

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**OPTIMIZACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS GENERADORES
DE VAPOR DE UNA CENTRAL TERMOELÉCTRICA OPERANDO CON
RESIDUAL N° 6**

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por los bachilleres

Briceño G. Jenny M.

Gómez P. José A.

Para Optar al Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2010

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**OPTIMIZACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS GENERADORES
DE VAPOR DE UNA CENTRAL TERMOÉLECTRICA OPERANDO CON
RESIDUAL N° 6**

Tutor Académico: **Prof. Fabián Flores**

Tutor Industrial: **Ing. Jorge Peñate**

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por los bachilleres

Briceño G. Jenny M.

Gómez P. José A.

Para Optar al Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2010



Facultad de Ingeniería
INGENIERIA MECÁNICA
Universidad Central de Venezuela
DEPARTAMENTO DE ENERGETICA



Caracas, 04 de noviembre de 2.010

ACTA

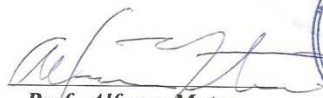
Los abajo firmantes, miembros del jurado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los bachilleres:

BRICEÑO JENNY y GOMEZ JOSE

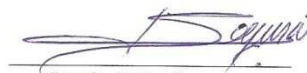
Titulado:

"OPTIMIZACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS GENERADORES DE VAPOR DE UNA CENTRAL TERMOELÉCTRICA OPERANDO CON RESIDUAL N° 6"

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudio conducente al Título de Ingeniero Mecánico.


Prof. Alfonso Mateo
Jurado




Prof. Julio Segura
Jurado


Prof. Fabian Flores
Tutor

"Núcleo de Ingeniería "Armando Mendoza" hacia el 30° Aniversario"

DEDICATORIA

A los mejores maestros de mi vida:

*Mi Dios y la Virgencita, quienes me han mostrado todo lo que se puede alcanzar
con fé, trabajo, constancia, amor y humildad.*

*Mi madre María Giménez, mujer luchadora, llena de fe, humildad, sabiduría y
de amor incondicional.*

*Mis hermanos Aimara, Yesireé y Anthony, trío de admirables personalidades
unidos por un valioso sentimiento de hermandad.*

Mi sobrino Joiner y mi sobrina Rosanny, por ser luz en nuestra familia.

Mi Abuela, mujer admirable con un maravilloso tesoro llamado sabiduría.

*Mis padrinos, mis segundos padres, digno ejemplo de fe y constancia para lograr
objetivos en la vida.*

Los Amo con todo mi Corazón

Jenny M. Briceño G.

DEDICATORIA

*A mi madre María Isabel Pérez, por estar de manera incondicional conmigo, por
brindarme la educación que tengo y por ser mi mejor amiga.*

*Me siento el hombre más afortunado del mundo por tenerte madre, gracias por
convertirme en lo que soy.*

Te Quiero Mucho

José Alejandro Gómez Pérez

AGRADECIMIENTOS

A Dios; por darme una maravillosa familia, por guiarme, acompañarme y darme las fortalezas para alcanzar todos mis logros.

A mi madre, por ser mujer incondicional que a través de su amor, correcciones y consejo me ha guiado, apoyado y me han llevado al logro de mis metas. Te Amo Mami.

A mis hermanos, por todos los momentos compartidos y por ser los mejores amigos de mi vida. Los quiero mucho.

A mi sobrino Joiner, por transmitirme tanto amor y alegría. Y no menos importante a una nueva lucecita que llegara a nuestro hogar llamada: Rossany, en este sentido gracias a mí cuñada Evelyn por darnos tan maravilloso regalo.

A mis tíos, tías, primos, primas por estar siempre allí apoyándome y ser un excelente ejemplo de lucha en todos los caminos de la vida.

A mi abuela, por su valioso ejemplo de lucha y de fé, además del inmenso amor que siempre está allí para acompañarme en todos los momentos de la vida.

A mis padrinos, mis segundos padres, por tanto amor, cuidado y por creer en mí en todo momento.

Al Programa Samuel Robinson y la Universidad Central de Venezuela, por sus enseñanzas y por mi excelente formación profesional.

A mis tutores el Ing. Fabian Flores y el Ing. Jorge Peñate por su valiosa colaboración y aporte en el logro de este trabajo.

A la Lic. María Antonieta Padrón, por compartir sus experiencias, conocimientos, consejos y un conocimiento profesional de alta calidad.

Al Ing. Eglis Hernandez, por su excelente profesionalismo y por su incondicional ayuda en la elaboración de este proyecto.

A todo el personal de la Planta Ampliación Tocoa, a los trabajadores del Taller de Instrumentación, Mecánico, Eléctrico, Soporte Técnico y Operaciones, en especial a Marcos Carapaica, Neil Carrero, Daniel Morales, Kenny Arcia, Alexis Alzaul, Domenico Magliano, Alvex de Sousa, Oswaldo Guedez, Carlos Díaz, José Arenas, Juan Carlos Ramos y Carlos Dama por su valiosa e incondicional forma de transmitir sus conocimientos.

A los pasantes Alainy Castillo, Mary Escobar y en especial a Jonathan Quiros, por los conocimientos y risas compartidas.

A mi compañero ale, por su amistad, paciencia, valiosos consejos y por todos los momentos compartidos durante este período. Sencillamente te deseo éxitos en todos los planos de tu vida y que Dios y la Virgen te bendigan siempre. Se te quiere mucho viejo.

A mis amigos de años: Jenarby, David, Ruben, Cristal, Ingrid y Erliz, por ser incondicionales y estar todo momento conmigo, soy muy afortunada de tenerlos como amigos.

A mis amigos y amigas: Veruska, Anyelo, Juan, Ariamne, Danni, Eliexer, Edhiño, Edinson, Greisa, Gina, Zaditza, Vanessa, Ildegar, Johann, Jorge, Karla, Rhaymari, Miguelito, Karlene, Rolnan y Peña, por formar parte de un valioso tesoro que me regalo esta época universitaria llamado: Amistad. A todos gracias por su apoyo, animo, confianza, momentos de estudio, viajes y por sobre todas las cosas cada risa compartida. Los quiero muchísimo y deseo que sean muchas las puertas que se abran para todos ustedes.

A todas las personas aquí mencionadas y aquellas que se me escapen, que mi Dios y la Virgen les llenen de Bendiciones. Mil Gracias.

Jenny M. Briceño G.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por brindarme salud y rodearme de experiencias constructivas.

A mi Padre Oscar Gómez por brindarme su cariño y apoyo incondicional durante toda mi vida.

A mi Hermano Melwin Gómez por quererme, apoyarme e inspirarme a lograr mis metas.

A mi abuela por hacerme reír y alegrarme los momentos de tristeza.

A mi Tía Vilma Pérez, por brindarme su incondicional apoyo cuando necesite de ella.

A mi Primo Luis Jiménez por ser mi otro hermano y apoyarme en todo.

A mis amigos Jonhas Escalona, Lismary Astudillo, Johan bolaños, Daviana Machado, Hector Garzón y Miguel Vélez por estar presente tanto en mis momentos buenos como malos para compartirlos conmigo.

A mi Suegra Martha Peña por ser tan especial conmigo y por prestarme todo su apoyo.

A mi Novia Martha Escobar por apoyarme en todos los momentos y por brindarme su amor.

A mis tutores por apoyarnos en el desarrollo de nuestra Tesis.

Al Ing. Eglis Hernandez por brindarnos su apoyo y conocimientos.

Al Señor Carlos Dama, Juan Carlos Ramos, Domenico y a Daniel Morales por brindarnos sus conocimientos.

A mis amigos de la universidad por motivarme en momentos de presión.

A mis profesores por transmitirme sus conocimientos y estimularme a ser cada día un mejor profesional.

A mi compañera de tesis, la Señora Jenny Birceño, por ser tan especial y por apoyarme en momentos difíciles, se te quiere Jennybiris.

José Alejandro Gómez Pérez

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

API	American Petroleum Institute.
ASTM	American Society for Testing Materials
BTU/lbm	British Thermal Unit sobre libra masa
BTU/pie ³	British Thermal Unit sobre pie cubico.
C.G.J.J.S.B	Complejo Generador Josefa Joaquina Sánchez Bastidas.
C.A	Compañía Anónima.
COVENIN	Comisión Venezolana de Normas Industriales.
cm ²	Centímetro cuadrado.
CIER	Comisión de Integración Energética Regional.
CORPOELEC	Corporación Electrica Nacional.
°C	Grados Centígrados.
cm ² /seg	Centímetro cuadrado sobre segundo.
COHB	Carboxihemoglobina.
EDC	Electricidad de Caracas
F.O.E	Fuel oil Eléctrico o Residual N° 6
°F	Temperatura en Grados Fahrenheit
G.V	Generador de Vapor
h.	Hora
kg/cm ²	Kilogramo sobre centímetro cuadrado
Kw	Kilovatio
KWh	Kilovatio hora
m ² /s	Metro cuadrado sobre segundo
m ³	Metro cúbico
MW	Megavatio
MPA	Material Particulado
N	Nitrógeno
ob. cit	Obra citada
O ₂	Oxígeno

PDVSA	Petróleos de Venezuela
P.C.I	Poder Calorífico Inferior.
S	Azufre
T	Toneladas
UPEL	Universidad Pedagógica Experimental Libertador
V	Voltio
%	Porcentaje

RESUMEN

Briceño G. Jenny M. y Gómez P. José A.

**“OPTIMIZACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS GENERADORES
DE VAPOR DE UNA CENTRAL TERMOÉLECTRICA OPERANDO CON
RESIDUAL N° 6”**

Tutor Académico: Prof. Flores, Fabián. Tutor Industrial: Ing. Peñate, Jorge.

Tesis. Caracas. U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Mecánica.

2010,168 páginas.

Palabras Claves: Generadores de Vapor, Residual N° 6, disponibilidad, confiabilidad, emisiones.

El trabajo se realizó con el objetivo de optimizar el funcionamiento de los Generadores de Vapor de la Planta Ampliación Tocoa al consumir exclusivamente Residual N° 6. Para ello se realizó un análisis en el comportamiento de la disponibilidad y confiabilidad con un consumo dual de combustible (Gas-Residual N° 6) durante un período de tres años (2007, 2008 y 2009), el cual permitió identificar los distintos efectos relacionados con el consumo de Residual N° 6 que afectan a estos parámetros; esto sirvió como base para desarrollar un modelo matemático donde se determinó el impacto generado en el funcionamiento al consumir únicamente Residual N° 6. En cuanto a las emisiones se realizó un análisis de datos comprendido entre los años 2007, 2008 y 2009; donde se evaluó el cumplimiento de la norma ambiental establecida en el decreto N°638; también se realizó una correlación estadística entre el consumo de Residual N° 6 y las distintas emisiones producidas por la combustión, donde se identificó cuál de ellas dependen directamente de este combustible y así realizar una proyección al consumir exclusivamente el mismo para verificar que cumpla con los parámetros exigidos. Para contrarrestar los efectos del Residual N°6 en la disponibilidad, confiabilidad y emisiones se evaluaron tecnologías factibles existentes en el mercado.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I.....	3
EL PROBLEMA	3
1.1 La Electricidad de Caracas.....	3
1.1.2 Misión	3
1.1.3 Visión	3
1.1.4 Valores	4
1.1.5 Reseña Histórica.....	4
1.2 Planteamiento del problema.....	7
1.3 Objetivos	9
1.3.1 Objetivo General	9
1.3.2 Objetivos Específicos.....	9
CAPÍTULO II	10
MARCO TEÓRICO.....	10
2.1 Descripción de una central Termoeléctrica a vapor.....	10
2.2 Clasificación de los Generadores de Vapor	14
2.3 Equipos principales de un generador de vapor	15
2.3.1 Sobrecalentador.....	15
2.3.2 Recalentador.....	15
2.3.3 Precalentador de Aire.....	15
2.3.4 Economizador	16
2.3.5 Caldera	16

2.4 Equipos auxiliares de un generador de vapor	17
2.4.1 Tambor Superior	17
2.4.2 Tambor Inferior	17
2.4.3 Hogar	17
2.4.4 Chimenea	18
2.4.5 Soplador de Hollín	18
2.5 Combustibles	18
2.5.1 Tipos de Combustibles	19
2.5.2 Características de los combustibles líquidos	19
2.6 Combustión	20
2.6.1 La combustión de los productos líquidos	21
2.6.2 Atomización y combustión de los combustibles líquidos	23
2.6.3 Requisitos básicos para la combustión industrial	24
2.7 Quemadores de aceites combustibles	25
2.7.1 Clasificación de los atomizadores industriales para aceites combustibles	26
2.8 Problemas relacionados con la presencia de compuestos sulfurados y de cenizas en los humos	27
2.8.1 Corrosión a alta temperatura	27
2.8.2 Influencia del exceso de aire en la formación de anhídrido sulfúrico ..	28
2.9 Prevención de la corrosión	29
2.9.1 Empleo de aditivos	30
2.10 Eficiencia de un Generador de Vapor	31
2.11 Emisiones Atmosféricas de una Central Termoeléctrica	33
2.12 Disponibilidad	38

2.12.1 Importancia de la Disponibilidad.....	38
2.13 Confiabilidad.....	39
2.13.1 Importancia de la confiabilidad.....	39
2.13.2 Índices cuantitativos de la confiabilidad	40
2.14 Estado de las Unidades.....	40
2.14.1 Activa	41
2.14.2 Inactiva.....	41
2.14.3 Limitación	42
2.14.3.1 Limitación Planificada	42
2.14.3.2 Limitación No-Planificada	42
CAPÍTULO III.....	43
MARCO METODOLÓGICO	43
3.1 Tipo de Investigación.....	43
3.2 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	44
3.3 Pasos de la Investigación de Campo	45
3.3.1 Levantamiento de Información	45
3.3.2 Diagnostico y Proyección del funcionamiento de los Generadores de Vapor.....	46
3.3.3 Resultados	46
CAPÍTULO IV.....	48
CONDICIÓN DE OPERACIÓN DE LOS GENERADORES DE VAPOR.....	48
4.1 Especificaciones del Generador de Vapor	48
4.1.1 Particularidades de Diseño del Generador de Vapor	49
4.1.2 Esquema del Generador de Vapor.....	51
4.2 Estudio de disponibilidad y confiabilidad de los Generadores de Vapor ...	52

4.2.1 Cálculo tipo	53
4.2.2 Resultados de disponibilidad para los generadores de vapor de las unidades 7, 8 y 9	55
4.2.3 Resultados de confiabilidad para los generadores de vapor de las unidades 7, 8 y 9.	59
4.3 Estudio de emisiones de los Generadores de Vapor	63
CAPÍTULO V	70
CAUSAS Y EFECTOS DEL RESIDUAL N° 6 EN EL FUNCIONAMIENTO DE LOS EQUIPOS Y EN LAS EMISIONES DE LOS GENERADORES DE VAPOR	70
5.1 Efectos del Residual N° 6 en el Sistema Aire-Combustible	73
5.1.1 Quemadores de Residual N° 6	73
5.2 Efectos del Residual N° 6 en el Sistema de Combustión.....	76
5.2.1 Horno de la Caldera	76
5.2.2 Sobrecalentadores y Recalentadores de vapor	82
5.3 Efectos del Residual N° 6 en el Sistema Aire-Gases	86
5.3.1 Precalentador de Aire	86
5.4 Efectos del Residual N° 6 en las emisiones	90
5.4.1 Residual N° 6 en las emisiones de NO _x	90
5.4.2 Efecto del Residual N° 6 en las emisiones de CO	90
CAPÍTULO VI.....	92
IMPACTO EN EL FUNCIONAMIENTO Y EN LAS EMISIONES DE LOS GENERADORES DE VAPOR AL CONSUMIR EXCLUSIVAMENTE RESIDUAL N° 6	92
6.1 Impacto en la disponibilidad y confiabilidad de los Generadores de Vapor al consumir exclusivamente Residual N° 6	92

6.1.1 Valores necesarios para el estudio	93
6.2 Proyección de Disponibilidad y Confiabilidad para un consumo exclusivo de Residual N° 6	104
6.2.1 Cálculo tipo de frecuencia de parada según el consumo.....	108
6.3 Cálculo de Disponibilidad.....	112
6.3.1 Cálculo Tipo de Disponibilidad	112
6.4 Cálculo de Confiabilidad.....	116
6.4.1 Cálculo tipo de Confiabilidad	117
6.5 Impacto en las emisiones al consumir exclusivamente Residual N° 6	121
6.6 Proyección de Emisiones dependientes del consumo de Residual N° 6...	124
CAPITULO VII	126
TECNOLOGÍAS PARA REDUCIR EL IMPACTO EN EL FUNCIONAMIENTO DE EQUIPOS Y EN LAS EMISIONES DE LOS G. V AL CONSUMIR EXCLUSIVAMENTE RESIDUAL N° 6.....	126
7.1 Tecnologías en el Sistema Aire- Combustible	126
7.2 Tecnologías en el Sistema de Gases de Combustión	128
7.3 Tecnologías en el Sistema Aire - Gases	131
7.4 Tecnología para el control de emisiones.....	135
CAPITULO VIII	137
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	137
8.1 Conclusiones	137
8.2 Recomendaciones.....	139
BIBLIOGRAFÍA	141
ANEXOS	144

LISTA DE TABLAS

Tabla 2. 1: Ventajas y Desventajas de Métodos para Cálculo de Eficiencia	32
Tabla 4. 1: Parámetros de Diseño del Generador de Vapor.....	50
Tabla 4. 2: Datos de la Unidad.....	53
Tabla 5. 1: Principales eventos que afectan el funcionamiento de los Equipos del Generador de Vapor	72
Tabla 5. 2: Características de los Quemadores de la Planta Ampliación Tocoa...	74
Tabla 5. 3 Pérdida de calor por espesor escoria adherida a la tubería	83
Tabla 5. 4: Residuos de Combustión en la superficie de tuberías.....	84
Tabla 5. 5: Efecto de taponamiento entre los haces de tubos por el alto nivel de escoria acumulado	85
Tabla 6. 1: Horas por fallas que no dependen del consumo de combustible en la unidad 7	100
Tabla 6. 2: Horas por fallas que no dependen del consumo de combustible en la unidad 8.....	100
Tabla 6. 3: Horas por fallas que no dependen del consumo de combustible en la unidad 9.....	101
Tabla 6. 4: Horas por fallas que externas al generador de vapor en la unidad 7.	102
Tabla 6. 5: Horas por fallas que externas al generador de vapor en la unidad 8.	102
Tabla 6. 6: Horas por fallas que externas al generador de vapor en la unidad 9.	102
Tabla 6. 7: Patrón de Consumo para que se presente problemas de acumulación de escoria en Precalentadores de aire.....	104
Tabla 6. 8: Patrón de Consumo para que se presente problemas de acumulación de escoria en Precalentadores de aire.....	104
Tabla 6. 9: N° de paradas por exceso de peso en el horno (N_1) y alta presión en el horno (N_2) en función del incremento del % de Residual N° 6 en la Unidad 7..	110
Tabla 6. 10: N° de paradas por exceso de peso en el horno (N_1) y alta presión en el horno (N_2) en función del incremento del % de Residual N° 6 en la Unidad 8..	111
Tabla 6. 11: N° de paradas por exceso de peso en el horno (N_1) y alta presión en el horno (N_2) en función del incremento del % de Residual N° 6 en la Unidad 9..	112

Tabla 6. 12: Disponibilidad en función del incremento del porcentaje de consumo de Residual N° 6 Unidad 7.....	113
Tabla 6. 13: Disponibilidad en función del incremento del porcentaje de consumo de Residual N° 6 Unidad 8.....	114
Tabla 6. 14: Disponibilidad en función del incremento del porcentaje de consumo de Residual N° 6 Unidad 9.....	115
Tabla 6. 15: Confiabilidad en función del incremento del porcentaje de consumo de Residual N° 6 Unidad 7.....	118
Tabla 6. 16: Confiabilidad en función del incremento del porcentaje de consumo de Residual N° 6 Unidad 8.....	119
Tabla 6. 17: Confiabilidad en función del incremento del porcentaje de consumo de Residual N° 6 Unidad 9.....	120
Tabla 7. 1: Comparación del sistema actual y el propuesto por Mitsubishi	128

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. 1: Planta Ampliación Tocoa.....	7
Fig. 2. 1: Ciclo de Agua y Vapor de la Planta Ampliación Tocoa.....	13
Fig. 2. 2: Clasificación de los Generadores de Vapor.....	14
Fig. 4. 1: Esquema del Generador de Vapor de Ampliación Tocoa.....	51
Fig. 4. 2: Disponibilidad y Consumo del período 2007 – 2009 de la Unidad 7....	56
Fig. 4. 3: Disponibilidad y Consumo del período 2007 – 2009 de la Unidad 8....	57
Fig. 4. 4: Disponibilidad y Consumo del período 2007 – 2009 de la Unidad 9....	58
Fig. 4. 5: Confiabilidad y Consumo del período 2007 – 2009 de la Unidad 7	60
Fig. 4. 6: Confiabilidad y Consumo del período 2007 – 2009 de la Unidad 8	61
Fig. 4. 7: Confiabilidad y Consumo del período 2007 – 2009 de la Unidad 9	62
Fig. 4. 8: NO _x vs Consumo del período 2007 – 2009 de la Unidad 7	63
Fig. 4. 9: NO _x vs Consumo del período 2007 – 2009 de la Unidad 8	64
Fig. 4. 10: NO _x vs Consumo del período 2007 – 2009 de la Unidad 9	64
Fig. 4. 11: CO vs Consumo del período 2007 – 2009 de la Unidad 7	65
Fig. 4. 12: CO vs Consumo del período 2007 – 2009 de la Unidad 8	66
Fig. 4. 13: CO vs Consumo del período 2007 – 2009 de la Unidad 9	66
Fig. 4. 14: SO ₂ vs Consumo del período 2007 – 2009 de la Unidad 7	67
Fig. 4. 15: SO ₂ vs Consumo del período 2007 – 2009 de la Unidad 8	68
Fig. 4. 16: SO ₂ vs Consumo del período 2007 – 2009 de la Unidad 9	68
Fig. 5. 1: Vista principal de la boquilla importada (izquierda) y nacional (derecha).....	75
Fig. 5. 2: Vista principal de la pastilla importada (izquierda) y nacional (derecha)	75
Fig. 5. 3: Vista posterior de la boquilla importada (izquierda) y nacional (derecha).....	76
Fig. 5. 4: Esquema del Horno de la Caldera	77
Fig. 5. 5: Características físicas de la acumulación de escoria en el horno	78
Fig. 5. 6: Sello Central del Horno de la Caldera	79
Fig. 5. 7: Distribución de carga en refractario del sello central del horno.....	80

Fig. 5. 8: Bloque refractario del sello central del horno.....	82
Fig. 5. 9: Corrosión en Tubería	83
Fig. 5. 10: Disminución del Espesor de la tubería en sobrecalentadores o recalentadores.....	86
Fig. 5. 11: Superficies de transferencia de calor del Precalentador de Aire afectados por el uso de Residual N° 6 en la combustión	88
Fig. 5. 12: Superficies de transferencia de calor del precalentador de aire luego de un lavado con soda cáustica	88
Fig. 6. 1: Histograma del Poder Calorífico Inferior del Residual N° 6.....	94
Fig. 6. 2: Poder Calorífico Inferior del Gas Natural	95
Fig. 6. 3: Histograma de frecuencias para Heat Rate en la unidad 7	97
Fig. 6. 4: Histograma del Heat Reat para la Unidad 8	98
Fig. 6. 5: Histograma del Heat Reat para la Unidad 9	99
Fig. 6. 6: Histograma del patrón de consumo para el Precalentador de Aire.....	103
Fig. 6. 7: Disponibilidad para un consumo exclusivo de Residual N° 6 en la Unidad 7.....	114
Fig. 6. 8: Disponibilidad para un consumo exclusivo de Residual N° 6 en la Unidad 8.....	115
Fig. 6. 9: Disponibilidad para un consumo exclusivo de Residual N° 6 en la Unidad 9.....	116
Fig. 6. 10: Confiabilidad para un consumo exclusivo de Residual N° 6 en la Unidad 7.....	118
Fig. 6. 11: Confiabilidad para un consumo exclusivo de Residual N° 6 en la Unidad 8.....	119
Fig. 6. 12: Confiabilidad para un consumo exclusivo de Residual N° 6 en la Unidad 9.....	120
Fig. 6. 13: Emisiones de NOx en función del incremento del flujo de Residual N° 6.....	122
Fig. 6. 14: Emisiones de SO ₂ en función del incremento del flujo de Residual N° 6	123

Fig. 6. 15: Emisiones de CO en función del incremento del flujo de Residual N° 6	123
Fig. 6. 16: Proyección de NOx para un máximo consumo de Residual N° 6.....	124
Fig. 6. 17: Proyección de SO ₂ para un máximo consumo de Residual N° 6	125
Fig. 7. 1 Quemador de Petróleo de Alstom Power.....	127
Fig. 7. 2: Limpiadores Acústicos Powerwave.....	131
Fig. 7. 3: Superficie de transferencia de calor esmaltada.....	132
Fig. 7. 4: Sello Duplex para precalentadores de Aire	134
Fig. 7. 5: Características del Soplador IK-525.....	135

LISTA DE ANEXOS

Anexo N° 1: Especificaciones del Residual N° 6. Electricidad de Caracas	144
Anexo N° 2: Decreto N° 638	145
Anexo N° 3: Norma CORPOELEC	146

INTRODUCCIÓN

La Planta Ampliación Tocoa, perteneciente al Complejo Generador Josefa Joaquina Sánchez Bastidas, cuyo principio de funcionamiento es el ciclo agua-vapor llamado Ciclo Rankine, está constituida por generadores de vapor que operan de manera dual, bien sea, utilizando como combustible gas natural o Residual N°6.

Con el fin de atender la situación de déficit de gas en el país, la Planta ha fijado el objetivo de operar únicamente con combustible líquido (Residual N° 6). En este sentido la central térmica está obligada a prepararse ante los impactos que genera el consumo exclusivo de este combustible, con el fin de mantener y/o mejorar su disponibilidad y confiabilidad, además de garantizar el cumplimiento de las normativas ambientales establecidas en el país que rigen a este tipo de termoeléctricas.

Por lo antes expuesto, el presente trabajo especial de grado tiene como objetivo predecir el impacto en los índices de disponibilidad, confiabilidad y emisiones de los Generadores de Vapor al consumir únicamente Residual N° 6 y proponer soluciones tecnológicas factibles que garanticen optimizar el funcionamiento de los mismos.

Este Trabajo Especial de Grado se fundamenta en los siguientes capítulos:

Capítulo I: contiene la reseña histórica de la Planta Ampliación Tocoa, el planteamiento del problema y los objetivos del proyecto.

Capítulo II: contempla los antecedentes de la investigación y las bases teóricas referente a los soportes conceptuales.

Capítulo III: comprende toda la metodología de la investigación y las técnicas de recolección de datos empleadas.

Capítulo IV: comprende las especificaciones de los Generadores de Vapor de la Planta y el estudio de los índices de disponibilidad, confiabilidad y emisiones de las unidades 7, 8 y 9 bajo un régimen de consumo dual de combustible (Gas Natural-Residual N° 6) en un período comprendido desde el año 2007 al 2009.

Capítulo V: Explica los efectos del consumo de Residual N° 6 en los Generadores de Vapor.

Capítulo VI: Se evalúa el impacto en los índices de disponibilidad, confiabilidad y emisiones al consumir exclusivamente Residual N° 6.

Capítulo VII: contempla el estudio de las tecnologías existentes en el mercado que permitan optimizar el funcionamiento de los generadores de vapor.

Capítulo VIII: se presentan las conclusiones y recomendaciones finales logradas en este trabajo de investigación.

Finalmente se presentan las Referencias Bibliográficas, que agrupan todas las fuentes de carácter bibliográfico consultadas, además de las citas textuales utilizadas para algunos aspectos teóricos desarrollados en este trabajo de investigación, seguidas de los anexos que se consideran importantes como apoyo a este trabajo.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1 La Electricidad de Caracas

La Electricidad de Caracas (EDC), empresa pionera del sector eléctrico venezolano, ha sido y seguirá siendo soporte del desarrollo social, económico y productivo del país.

Hoy más que nunca se reconoce el valor de la decisión tomada por el Gobierno Bolivariano de Venezuela, sobre la consolidación de la gestión que por más de un siglo ha realizado la empresa eléctrica. Ahora, La EDC es puntal para apalancar la misión de la Corporación Eléctrica Nacional (CORPOELEC), con el firme propósito de acompañar el crecimiento y desarrollo de la Región Capital aportando un indispensable y confiable fluido eléctrico.

1.1.2 Misión

La Electricidad de Caracas es una empresa del Estado venezolano dedicada a proveer el mejor servicio eléctrico y comprometida a responder las expectativas de sus clientes, trabajadores y accionistas, contribuyendo así a elevar la calidad de vida de la sociedad venezolana.

1.1.3 Visión

Ser una empresa reconocida nacional e internacionalmente como líder innovador, proveedora de un servicio eléctrico de alta calidad, con personal y tecnologías excelentes, financieramente sólida y factor fundamental del sector eléctrico venezolano.

1.1.4 Valores

Los trabajadores y trabajadoras de la EDC:

- **Ponen la seguridad primero.** La seguridad siempre está primero, para nuestra gente, los contratistas y las comunidades.
- **Actúan con integridad.** Somos honestos, dignos de confianza y responsables. La Integridad es la esencia en todo lo que hacemos, en la forma que conducimos y en la manera de relacionarnos los unos con los otros.
- **Honran sus compromisos.** Honramos los compromisos con nuestros clientes, compañeros, comunidades, accionistas, proveedores y socios. Queremos que nuestro negocio, en general, sea una contribución positiva a la sociedad.
- **Se esfuerzan por la excelencia.** Nos esforzamos para ser los mejores en todo lo que hacemos y para operar con niveles de clase mundial.
- **Disfrutan su trabajo.** El trabajo puede ser divertido, gratificante y emocionante. Disfrutamos de nuestro trabajo y apreciamos la satisfacción de ser parte de un equipo que está marcando una diferencia. Y cuando deje de ser de esa manera, cambiaremos lo que hacemos o cómo hacemos las cosas.

1.1.5 Reseña Histórica

A finales del siglo XIX nació la industria eléctrica venezolana producto del esfuerzo de inversionistas privados para atender las necesidades de los principales centros poblados. En el año 1895, el Ing. Ricardo Zuloaga junto a otras personalidades funda la C.A. La Electricidad de Caracas, y en 1897, se inicia el funcionamiento de dos (2) unidades generadoras de 420 kW, en la planta “El Encantado”, instalada en el curso del río Guaire. La energía era transportada a la ciudad capital a través de una línea de transmisión a una tensión de 5000 V.

Durante los primeros años del siglo XX, se formaron empresas aisladas de generación y transmisión de energía eléctrica en las ciudades más importantes del país. Muchas de ellas pertenecían a un individuo o grupo familiar, algunas fueron empresas municipales o estatales que posteriormente pasaron a formar parte del núcleo de empresas del gobierno.

La técnica para el suministro eléctrico de esos tiempos estaba principalmente basada en el aprovechamiento hidráulico utilizando ríos relativamente pequeños, donde se observaban diferencias de cota considerables.

El uso de la electricidad era casi exclusivamente para el alumbrado y por consiguiente las potencias instaladas eran pequeñas. Hasta el año 1950, la EDC contaba sólo con pequeñas unidades de generación hidroeléctrica y algunas plantas termoeléctricas (turbinas a vapor y motores diesel).

Entre 1950 y 1959 se disponen para la ampliación del servicio cinco (5) unidades termoeléctricas a vapor de la planta Arrecifes con una capacidad total de 170 MW, distribuidos de la siguiente manera, dos (2) unidades de 25MW, y tres unidades de 40MW, cada una.

Entre 1956 y 1966, se instalan las primeras seis (6) unidades de Tocoa con un total de 340 MW.

Y entre 1978 y 1981, se expande la capacidad de generación con las tres (3) unidades de 400 MW, que fueron repotenciadas a 460 MW, cada una entre 1992 y 1993.

A las plantas Arrecifes, Tocoa y Ampliación Tocoa se les denominaba Complejo Generador Ricardo Zuloaga (C.G.R.Z), las mismas operan con combustible Residual N° 6 o con Gas Natural, sin embargo, actualmente sólo Ampliación Tocoa funciona de manera dual, además de esto dispone de un almacenamiento, manejo y suministro de gas licuado de óleo para ser usado como combustible alternativo en el encendido de los pilotos de las calderas.

Actualmente, a las plantas Arrecifes, Tocoa y Ampliación Tocoa se les denomina Complejo Generador Josefa Joaquina Sánchez Bastidas (C.G.J.J.S.B).

Entre el 2006 y 2007 la EDC alcanza el primer lugar en los resultados obtenidos en la Encuesta de Satisfacción del Cliente Residencial Urbano, realizada por la Comisión de Integración Energética Regional (CIER) a cuarenta y siete (47) empresas eléctricas de Centro América y Sur América.

Desde el 14 de junio del 2007, la EDC pasa a ser una empresa del Estado venezolano, lo que representa un paso importante dentro del proceso de recuperación de la soberanía energética del país. En el mes de marzo del año 2007, PDVSA pasó a controlar el 93,62% del capital social de La Electricidad de Caracas y en el mes de junio del mismo año, se designó la nueva Junta Directiva de la empresa eléctrica. Así mismo, se le asignó estratégicamente la responsabilidad de incorporar a su área servida los estados: Aragua, Miranda y Nueva Esparta.

A mediados del año 2008 se reinician los trabajos en la Planta La Raisa, ubicada en los Valles del Tuy y comprende en su primera fase la instalación de las siguientes unidades de generación en ciclo abierto: 3 unidades de 60 MW, 2 Unidades de 85 MW y 2 unidades de 45 MW y en su segunda fase 21 unidades de 15 MW.

Simultáneamente se inician los trabajos en la Planta El Sitio, ubicada igualmente en los Valles del Tuy y comprende en su primera fase la instalación de 4 Unidades de 180 MW en ciclo abierto. En su segunda fase 2 unidades adicionales de 180 MW en ciclo combinado.

En el año 2010 con el fin de aumentar la generación de la EDC se inician actividades en el Sector Arrecifes del Estado Vargas, para la instalación de dos Gabarras de 175 MW c/u y de la Planta Termoeléctrica Picure de 144 MW, de esta última ya se encuentran 44 MW incorporados al Sistema Eléctrico Nacional.



Fig. 1. 1: Planta Ampliación Tacoa

Fuente: <http://www.correodelorinoco.gob.ve/tema-dia/planta-generacion-picure-beneficiara-a-200-000-familias/>

1.2 Planteamiento del problema

Actualmente, el Complejo Generador “Josefa Joaquina Sánchez Bastidas” antiguamente llamado Complejo Generador “Ricardo Zuloaga” consta de tres plantas termoeléctricas activas, que son: Ampliación Tacoa, Tacoa y Arrecifes.

La Planta Ampliación Tacoa consta de tres unidades turbogeneradores de 400MW fundamentadas en un ciclo termodinámico conocido como Rankine, en líneas generales, es considerada como una instalación industrial en donde la energía química del combustible se transforma en energía calorífica para producir vapor, éste se conduce a la turbina donde la energía del vapor sobrecalentado se convierte en energía mecánica, la cual se transmite al generador eléctrico, y así producir energía eléctrica.

Para que se cumpla este proceso es necesario el uso de un generador de vapor, el cual dará origen al vapor de agua con las propiedades termodinámicas exigidas para mover el rotor de las turbinas; para ello disponen de un hogar donde la energía calorífica liberada producto de la mezcla aire-combustible es aprovechada para tal fin. En el caso de la Planta Ampliación Tocoa, perteneciente al Complejo Generador Josefa Joaquina Sánchez Bastidas los generadores de vapor operan de manera dual, bien sea, utilizando como combustible Gas Natural o Residual N° 6.

La Electricidad de Caracas (EDC) tiene como objetivo que los generadores de vapor de la Planta Ampliación Tocoa operen exclusivamente con combustible Residual N° 6 para destinar el gas utilizado a las nuevas termoeléctricas contempladas dentro del fortalecimiento del parque termoeléctrico del país.

El Combustible Residual N° 6 es un producto derivado del petróleo que puede proceder de una sola etapa de destilación, o ser mezcla de productos procedentes de distintas etapas. En el hogar los productos de la combustión del Combustible Residual N° 6 adquieren una consistencia pegajosa y se adhieren a la superficie de los tubos que es la zona de transferencia de calor de la caldera (piso, paredes de agua, sobre-calentadores, etc.), actuando como aislante entre el agua-vapor y los gases de combustión, teniendo como consecuencia una disminución en el rendimiento energético. Dicha sustancia pegajosa también origina inconvenientes en la conservación del generador de vapor, debido a que se producen taponamiento en los haces de tubos de los sobrecalentadores, taponamiento en los elementos de los precalentadores de aire rotativos, ensuciamiento y sobrepeso en el horno.

Teniendo en cuenta los efectos antes expuestos la Planta Ampliación Tocoa requiere precisar el impacto en los índices de funcionamiento de los Generadores de Vapor al consumir únicamente Residual N° 6 y conocer las nuevas tecnologías, propuestas y mejoras existentes en el mercado que contribuyan con la optimización del funcionamiento de los mismos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Optimizar el funcionamiento de los generadores de vapor de una central termoeléctrica operando exclusivamente con Combustible Residual N° 6.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Determinar y evaluar el funcionamiento de los generadores de vapor de la Planta Ampliación Tocoa al operar con combustible dual (Gas Natural y Residual N° 6).
- Determinar las principales causas que afecten el funcionamiento de los Generadores de Vapor bajo un régimen de consumo dual de combustible (Gas Natural y Residual N° 6).
- Proyectar el funcionamiento de los generadores de vapor al operar exclusivamente Combustible Residual N° 6.
- Evaluar y proponer soluciones factibles que permitan reducir el impacto en la operación y emisiones de los generadores de vapor de la Planta Ampliación Tocoa al consumir exclusivamente Combustible Residual N° 6.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Descripción de una central Termoeléctrica a vapor

Se denominan centrales Termoeléctrica a vapor aquellas centrales que producen energía eléctrica a partir de una fuente de calor y su principio de funcionamiento se basa en un ciclo termodinámico de tipo Rankine cuyos elementos principales son: Generador de Vapor, Turbina, Condensador y Bombas de Alimentación.

Las centrales termoeléctricas de vapor clásicas o convencionales son aquellas donde la fuente de calor proviene de la combustión de carbón, Residual N° 6 o gas. El apelativo de "clásicas" o "convencionales" sirve para diferenciarlas de otros tipos de centrales donde la fuente de calor proviene de energías alternas como la fisión nuclear o radiación solar.

Una central clásica posee, dentro del propio recinto de la planta, sistemas de almacenamiento del combustible que utiliza (parque de carbón, depósitos de Residual N° 6) para asegurar que se dispone permanentemente de una adecuada cantidad de éste.

Cuando se trata del Residual N° 6, éste es precalentado para que fluidifique, siendo inyectado posteriormente en quemadores adecuados a este tipo de combustible. En el caso del Gas los quemadores están asimismo concebidos especialmente para quemar dicho combustible. Hay, por último, centrales cuyo diseño les permite quemar indistintamente combustibles fósiles diferentes, y reciben el nombre de centrales termoeléctricas mixtas.

Uno de los componentes con mayor importancia en una Central Termoeléctrica es el Generador de Vapor. Su estructura metálica varía de acuerdo a su uso y capacidad; además para desempeñar sus funciones eficientemente, está

dotada de equipo principal, equipo auxiliar e instrumentos como los siguientes: quemadores de combustible, ventiladores para tiro forzado, ventilador para tiro inducido, chimenea, equipo de bombeo, precalentador de aire regenerativo, sobrecalentadores, atemperadores, economizador, tambores de agua, tuberías, sopladores de hollín, manómetros, termómetros, indicadores, cabezales, tubos de generación y tubos elevadores. Este es un dispositivo que con ayuda de los quemadores provoca la combustión del carbón, Residual N° 6 o gas en el hogar de la caldera teniendo como consecuencia un desprendimiento de energía representada en forma de calor, el cual se transfiere al agua de alimentación a través de una extensa red de tubos hasta convertirlo en vapor sobrecalentado con las condiciones termodinámicas deseadas.

Este vapor entra a alta presión y alta temperatura en la turbina de la central, la cual consta generalmente de tres etapas cuando se trata de estructuras de gran capacidad: de alta, media y baja presión, unidos por un mismo eje. En el primer cuerpo (alta presión) hay varias ruedas o etapas con centenares de álabes o paletas. El cuerpo a media presión posee asimismo varias ruedas o etapas con centenares de álabes pero de mayor tamaño que los anteriores. El de baja presión, por último, tiene varias ruedas o etapas con álabes aún más grandes que los precedentes. El objetivo de esta triple disposición es aprovechar al máximo la fuerza del vapor, ya que este se va expandiendo progresivamente a medida que pierde presión. Es importante mencionar que el vapor antes de entrar en la turbina, debe ser cuidadosamente deshumidificado, en caso contrario, las pequeñísimas gotas de agua en suspensión que transportaría serían lanzadas a gran velocidad contra los álabes, actuando como si fueran proyectiles y erosionando las paletas hasta dejarlas inservibles.

La trayectoria del vapor sobre los álabes hace girar un eje, el cual se encuentra unido a las tres etapas de la turbina. Dicho eje se encuentra acoplado a un generador eléctrico, que a través de un proceso de excitación produce energía eléctrica, para luego ser vertida a la red de transporte a alta tensión mediante la acción de un transformador.

Posteriormente el vapor de agua a baja presión que sale de las turbinas es enviado a unos condensadores, donde se enfría y transforma en agua líquida, luego se eleva su presión mediante bombas centrífugas y es conducido nuevamente al Generador de Vapor, con lo cual el ciclo productivo puede volver a iniciarse.

En la siguiente página se muestra como es el diagrama de funcionamiento del Ciclo Rankine de la Planta Ampliación Tocoa.

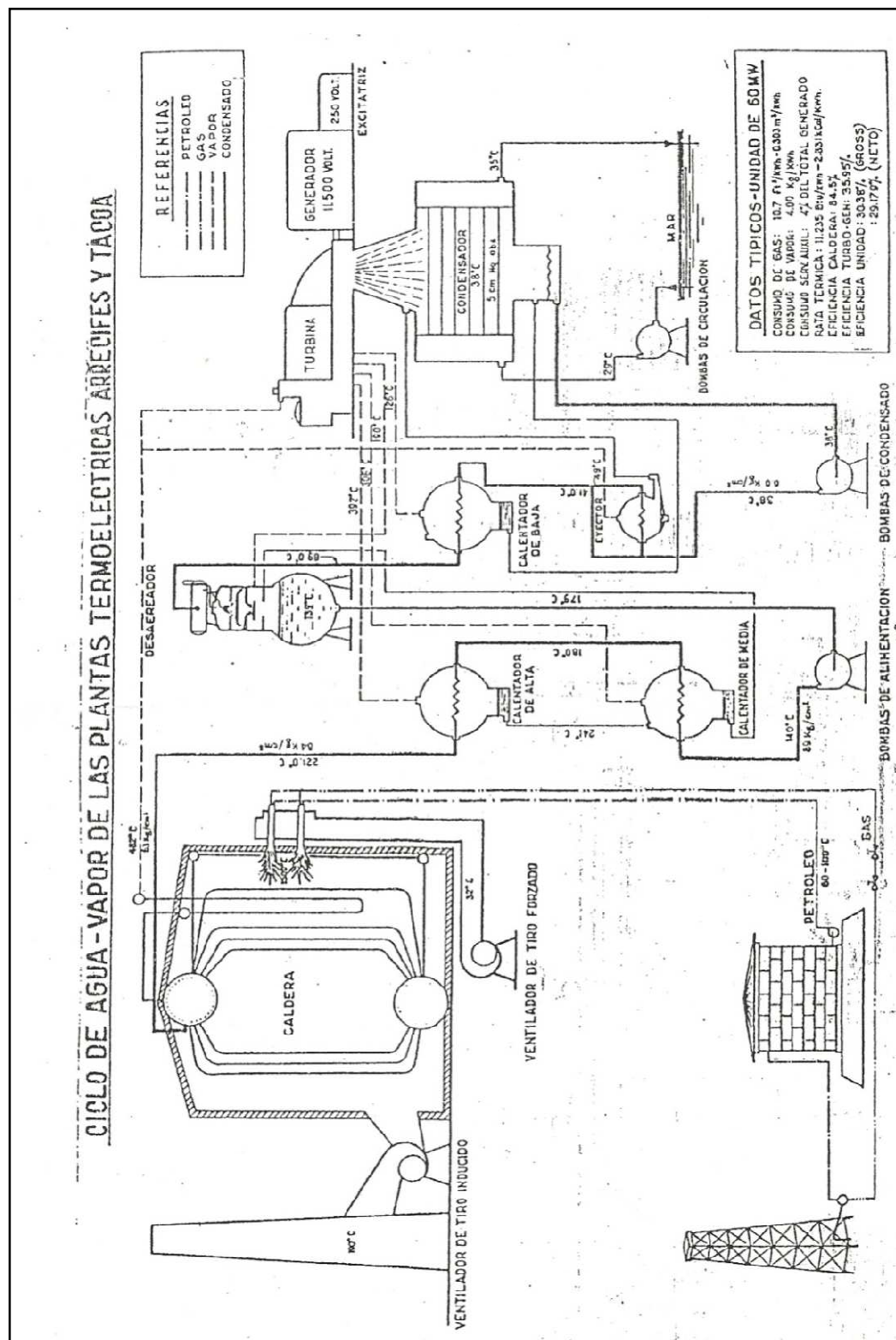


Fig. 2. 1: Ciclo de Agua y Vapor de la Planta Ampliación Tocoa
Fuente: Manual de Operación

2.2 Clasificación de los Generadores de Vapor

Los Generadores de Vapor se clasifican en dos grandes grupos:

- **Generadores de Vapor Pirotubulares o de tubos de humos:** son aquellos en los cuales los gases calientes de la combustión pasan por el interior de los tubos, los cuales se encuentran rodeados de agua.
- **Generadores de Vapor Acuotubulares:** son aquellos en los cuales por el interior de los tubos pasa agua o vapor y los gases calientes de la combustión se hallan en contacto con la superficie externa de los mismos.

Los Generadores de vapor también se pueden clasificar, basándose en algunas de las características siguientes:

Por la posición de los tubos	• Verticales • Horizontales • Inclínados
Por la forma de los Tubos	• Rectos • Curvos
Por el servicio que prestan	• Estacionarias • Móviles
Por la presión de Operación	• De baja presión • De alta presión
Por la circulación del agua de alimentación	• Circulación Natural • Circulación Forzado o Positiva
Por el tipo de horno	• A Presión • A vacío

Fig. 2. 2: Clasificación de los Generadores de Vapor

Fuente: Elaboración Propia

2.3 Equipos principales de un generador de vapor

2.3.1 Sobrecalentador

Está formado por un sistema de tubos que se interponen al paso de los gases para incrementar la temperatura al vapor saturado que se encuentra en el domo superior.

De acuerdo con Diez, P (s.f) “La ventaja del sobrecalentamiento se pone de manifiesto por la reducción del consumo de calor del ciclo, cuando la temperatura del vapor que entra en la turbina se eleva”. (p. XVIII.-544).

2.3.2 Recalentador

Es básicamente otro sobrecalentador usado en los G.V para incrementar el rendimiento de la planta. El recalentador obtiene vapor que sale de la turbina de alta presión. Este vapor a menor presión se calienta hasta la temperatura de sobrecalentamiento y después se introduce en la turbina de baja o media presión.

2.3.3 Precalentador de Aire

Se trata de un intercambiador de calor entre los gases calientes que salen del economizador y el aire procedente del ventilador de tiro forzado, donde se aumenta la temperatura del aire destinado para la combustión con el fin de reducir la cantidad de calor que debe liberar el combustible dentro del hogar.

Según la forma en que realizan la transferencia de calor, los precalentadores de aire pueden ser:

- Recuperativo: En el cual el flujo de gases se desliza sobre una superficie de una placa o tubo, mientras el aire se desliza por la cara opuesta. La transmisión de calor tiene lugar a través del espesor del metal que separa las dos caras. Estos son estáticos, tienen unas fugas teóricas bajas desde el lado de aire al lado de humos a través de juntas de expansión, puertas y carcasas.
- Regenerativos: en los cuales los humos circulan a través de una matriz cuya temperatura aumenta y posteriormente es atravesada por el aire, que se calienta y disminuye la temperatura de la matriz. Ya sea la matriz o los conductos de aire tienen que ser rotativos para hacer posible la forma de funcionamiento. En consecuencia aparecen problemas de sellado entre las partes móviles y fijas, debido a las presiones diferenciales entre el aire y los humos. La mayor parte de los precalentadores de aire son de este tipo y suelen funcionar en contracorriente, con el aire en sentido ascendente y los humos en sentido descendente.

2.3.4 Economizador

Se encarga de aumentar la temperatura del agua de alimentación en un valor cercano a la temperatura de saturación, utilizando el calor remanente de los gases de combustión.

Siguiendo a Díez, P (ob.cit.). “Los economizadores reducen la posibilidad de que se presenten choques térmicos y grandes fluctuaciones en la temperatura del agua de alimentación de la caldera, que llega a las paredes de tubos de agua que configuran el hogar”. (p. XIX-567).

2.3.5 Caldera

Es un recipiente a presión cerrado en el que se calienta el agua de alimentación hasta producir vapor saturado para uso externo del mismo por

aplicación directa del calor resultante de la combustión de un combustible (sólido, líquido o gaseoso) o por la utilización de la energía nuclear o eléctrica.

2.4 Equipos auxiliares de un generador de vapor

2.4.1 Tambor Superior

Provee el espacio físico para producir la separación de fase entre la mezcla agua y vapor. También suele utilizarse para el tratamiento químico del agua y para las purgas de la caldera con el fin de reducir los sólidos y las sales contenidas en el agua. Además, el domo debe ser de un volumen suficiente para absorber las oscilaciones del nivel de agua originadas por las variaciones de la carga, y evitar que se alcance un nivel peligrosamente bajo, o el paso de agua líquida al sobrecalentador.

2.4.2 Tambor Inferior

Es un recipiente cilíndrico horizontal que va en la parte inferior del hogar llamado también tambor de lodos en donde se lleva a cabo el asentamiento de los sólidos en suspensión, en donde a cada determinado tiempo se le efectúan purgas a la caldera de acuerdo al reporte de laboratorio, el domo inferior no está expuesto al calor.

2.4.3 Hogar

Es una cámara donde se efectúa la combustión. La cámara confina los productos de la combustión y puede resistir las altas temperaturas que se presentan y las presiones que se utilizan. Sus dimensiones y geometrías se adaptan a la liberación del calor, al tipo de combustible y al método de combustión, de tal manera que se haga lo posible por tener una combustión completa y se proporcione un medio apropiado para eliminar la ceniza.

2.4.4 Chimenea

Es una torre de forma cilíndrica y hueca, por la cual se desalojan los productos de la combustión, la altura de la misma debe ser suficiente para efectuar la descarga de los gases a la atmósfera.

2.4.5 Soplador de Hollín

Constan de lanzas que disparan chorros de vapor de agua a gran presión cuando se requiere para limpiar las superficies de absorción de calor. Estos sopladores pueden ser estáticos o retráctiles, usados estos últimos en las zonas donde la temperatura es tan elevada que si se dejaran colocados sin estar circulando vapor por su interior para refrigerarlos se quemarían. Siempre se ponen en funcionamiento desde el más alejado hasta el más cercano a la chimenea.

De acuerdo a Shield, C. (1965) “Los sopladores son aparatos dedicados más bien al control de la acumulación de escorias, que a su eliminación. Con su funcionamiento, contribuyen a mantener las temperaturas de los gases dentro de su valor de eficiencia y promueven condiciones de operación más satisfactorias en general. La localización de los sopladores es un asunto de mucha importancia en el diseño de una caldera nueva y su frecuencia de operación depende del combustible usado. Esta frecuencia de operación debe estar dentro de sus límites de control, debido a que hacerlo de menos tendrá tubos muy calientes y hacerlo de más tendrá alto consumos de combustible”. (p. 165)

2.5 Combustibles

Se denomina combustible a toda sustancia que por su composición haga posible la combustión de la misma, verificándose un desprendimiento de energía.

2.5.1 Tipos de Combustibles

Los combustibles pueden clasificarse, según el estado en que se presentan en:

- Combustibles Sólidos: leña, el carbón, y los residuos agrícolas de diverso origen.
- Combustibles Gaseosos: Se denominan combustibles gaseosos a los hidrocarburos naturales y a los fabricados exclusivamente para su empleo como combustibles, y a aquellos que se obtienen como subproducto en ciertos procesos industriales y que se pueden aprovechar como combustibles. La composición de éstos varía según la procedencia de los mismos.
- Combustibles Líquidos: desde el punto de vista industrial, son aquellos productos que provienen del petróleo bruto. Están formados básicamente por compuestos hidrocarbureados y pueden contener O₂, S, N, etc.

Algunos combustibles líquidos son: la gasolina, kerosén, gasóleos y fuel-oil. Este último designado como RESIDUAL N° 6 según la Norma Venezolana COVENIN: 787-90, para efectos de este Trabajo Especial de Grado esta designación es la utilizada para hacer referencia al combustible líquido también conocido como Fuel Oil N° 6.

2.5.2 Características de los combustibles líquidos

Según la norma ASTM (American Society for Testing Materials), las principales características que definen a los combustibles líquidos son las siguientes:

- Análisis elemental.
- La gravedad (ASTM D287).
- La viscosidad.

- Viscosidad Cinemática
- Punto de niebla, Punto de fluidez. (ASTM D97).
- Ceniza ASTM D482
- Punto de Inflamación (ASTM D93)

2.6 Combustión

La combustión es toda reacción química relativamente rápida, de carácter notablemente exotérmico, que se desarrolla en fase gaseosa o en fase heterogénea (gas-líquido, gas-sólido), con o sin manifestaciones del tipo de llamas o de radiaciones visibles. A su vez, las llamas pueden definirse como reacciones de combustión que se propagan a través de espacio, a velocidad inferior a la del sonido acompañadas normalmente de radiaciones visibles.

Para que se produzca una llama es necesaria tanto la presencia del combustible y del comburente como la de un iniciador; este puede ser una chispa o una fuente de calor, como un hilo incandescente o una llama piloto. El comburente universal es el oxígeno, por lo que en la práctica se utiliza el aire como comburente.

La reacción del combustible con el oxígeno origina sustancias gaseosas denominadas en forma genérica productos, humos o gases de combustión. Entre las sustancias más comunes que se pueden encontrar en los productos o humos de la reacción se encuentran:

- CO_2
- H_2O como vapor de agua
- N_2
- O_2
- CO
- H_2
- Carbono en forma de hollín

- SO_2

De acuerdo a como se produzcan las reacciones de combustión, estas pueden ser de distintos tipos:

- **Combustión completa:** Ocurre cuando las sustancias combustibles reaccionan hasta el máximo grado posible de oxidación. En este caso no habrá presencia de sustancias combustibles en los productos o humos de la reacción.
- **Combustión incompleta:** Se produce cuando no se alcanza el grado máximo de oxidación y hay presencia de sustancias combustibles en los gases o humos de la reacción.
- **Combustión estequiométrica o teórica:** Es la combustión que se lleva a cabo con la cantidad mínima de aire para que no existan sustancias combustibles en los gases de reacción. En este tipo de combustión no hay presencia de oxígeno en los humos, debido a que este se ha empleado íntegramente en la reacción.
- **Combustión con exceso de aire:** Es la reacción que se produce con una cantidad de aire superior al mínimo necesario. Cuando se utiliza un exceso de aire, la combustión tiende a no producir sustancias combustibles en los gases de reacción. En este tipo de combustión es típica la presencia de oxígeno en los gases de combustión.
- **Combustión con defecto de aire:** Es la reacción que se produce con una menor cantidad de aire que el mínimo necesario. En este tipo de reacción es característica la presencia de sustancias combustibles en los gases o humos de reacción.

2.6.1 La combustión de los productos líquidos

Los combustibles líquidos están constituidos esencialmente por hidrocarburos parafínicos, naftalenos y aromáticos de distintos grados de

ebullición con pequeñas cantidades de azufre, nitrógeno y a veces oxígeno en combinación química.

La composición química de los aceites combustibles es todavía más compleja; para su identificación se emplea generalmente la relación entre sus porcentajes de carbono e hidrógeno.

Los aceites combustibles, en condiciones de no excesiva turbulencia, se caracterizan por llamas muy luminosas y radiantes: la emisividad de la llama depende de la técnica de combustión y de la relación C/H, de esta relación dependen también el peso específico y la viscosidad del producto. Su aumento supone también el del peso específico y la viscosidad.

El contenido de azufre en los aceites combustibles puede variar en una proporción de cerca de 5% y 8% en peso o más. El azufre se presenta en forma de varios tipos de compuestos (sulfuros, mercaptanos, compuestos heterocíclicos, etc.) y es un componente perjudicial por las siguientes razones:

- Sus productos de combustión originan serios problemas de corrosión.
- Da origen a depósitos, formados preferentemente por sulfatos de los metales contenidos en el aceite.
- Algunos tipos de compuesto sulfurados, como los tiofenoles, pueden dar lugar a la formación de gomas y sedimentos en los aceites combustibles destilados y ocasionar problemas en el movimiento del líquido.

Los combustibles líquidos pesados presentan un contenido de sustancias minerales (cenizas) que raramente supera el 0.25% en peso. Los componentes, más comunes son el calcio, magnesio, hierro, níquel, sodio y vanadio, junto a otros elementos en pequeñas cantidades.

Las cenizas pueden dar lugar a reducciones de transmisión de calor, a causa de los depósitos que pueden formar los tubos y de otros inconvenientes, como por ejemplo:

- Deterioro rápido de los materiales refractarios de los hornos (debido especialmente a la presencia de sodio en el combustible).
- Reacciones químicas que pueden alterar los materiales en contacto con la llama.
- Corrosiones sensibles a causa de depósitos en estado fundido (muchos compuestos aparecidos en los depósitos tienen punto de fusión comprendido entre los 600° y los 900° C).

2.6.2 Atomización y combustión de los combustibles líquidos

Para lograr una buena combustión es necesario realizar una subdivisión forzada del líquido, con el objeto de producir pequeñísimas gotas infinitesimales, las cuales, dispersas en el comburente, vienen a formar una niebla extremadamente uniforme dentro de la cual puede propagarse la llama. La marcha de la combustión de estas nieblas depende de las dimensiones de las gotitas, de la naturaleza química y física de los reactivos y de la temperatura.

La atomización es la formación de un chorro de minúsculas gotas obtenida generalmente por medios mecánicos, por el efecto de la eyección a presión de una tobera o aprovechando la energía de un fluido atomizador secundario; el dispositivo utilizado para obtener los efectos se conoce como atomizador. En términos más específicos la atomización se obtiene mediante la formación a la salida del terminal atomizador, de una sutilísima película en forma de lámina o de cono, lleno o vacío (con el líquido en rapidísimo movimiento, que en un espacio de tiempo infinitesimal se fragmenta en pequeñísimas gotas de dimensiones y forma estrechamente dependientes de las condiciones operativas y de las características de viscosidad y tensión superficial del líquido.

De acuerdo con Salvi, Giuliano (1975):

Los aceites muy viscosos no se pueden atomizar a la temperatura ambiente, dada la dificultad del líquido de fluir en las canalizaciones; es preciso reducir su viscosidad calentándolos, para facilitar su paso a través del atomizador.

La tensión superficial representa un papel importante en la fase de rotura entre la película del líquido unida al atomizador y los largos ligamentos que de ésta se derivan y que dan origen a las gotitas. Las tensiones superficiales de gran valor tienden a dar lugar a gotas de grandes dimensiones. (p.275)

Para enjuiciar el comportamiento de un atomizador, se pueden tener en cuenta las siguientes normas:

- Dimensiones y condiciones operativas requeridas para lograr el caudal de líquido que se desee.
- Configuración espacial del chorro que resulta.
- Diámetro medio de las gotas conseguidas y características de la dispersión.

2.6.3 Requisitos básicos para la combustión industrial

- a. Campo de regulación: con este término se define la relación entre el caudal máximo y mínimo del combustible que gasta un quemador. En las calderas que contienen varios quemadores, en caso de necesidad es posible aumentar el campo de regulación apagando uno o más quemadores. Sin embargo, conviene evitar en lo posible esta práctica, puesto que lleva a una disminución del rendimiento por las infiltraciones de aire a través de los quemadores apagados.
- b. Estabilidad: se define como la capacidad de mantener la llama dentro de los límites de su campo de regulación, incluso en cámaras de combustión frías, o en condiciones de presión y depresión diferentes de

aquellas para las que ha sido proyectado el quemador. No puede considerarse estable un quemador que permanezca encendido sólo cuando se emplee continuamente un encendedor piloto. Entre las precauciones que se adoptan para estabilizar la llama, las más frecuentes son: aumento de la conducción gaseosa, utilizando turbulencia; precalentamiento del aire comburente; precalentamiento de la mezcla combustible por medio de la recirculación de gases parcialmente quemados.

- c. Forma y dimensiones de la llama: vienen determinadas por la potencia del quemador; pueden recibir influencias, dentro de algunos límites, por las condiciones del proyecto y de las variables de funcionamiento.
- d. Espacio necesario para la combustión: está estrechamente relacionado con la forma de la llama.
- e. Sistemas de protección y automatismos: tanto la estabilidad como el control de la capacidad de la forma de la llama se pueden regular manualmente o con mecanismos automáticos.

2.7 Quemadores de aceites combustibles

Por razones económicas se suelen utilizar en las instalaciones industriales los aceites Residuales, cuyo costo es menor por las impurezas que contienen. En las instalaciones con alto consumo de combustible está completamente justificado el mayor costo y la complicación de las instalaciones destinadas a pre-tratar los aceites pesados, por el ahorro que supone la utilización de estos productos.

Siguiendo a Salvi, G. (ob. cit.):

El problema de encontrar el quemador apropiado para los diferentes combustibles líquidos no es de fácil solución. Hay que recordar las exigencias fundamentales a las que tiene que responder una instalación de combustión de aceite:

- Lograr una intensidad elevada de combustión, es decir, quemar la mayor cantidad de aceite en un volumen determinado.
- Conseguir el máximo campo de regulación que sea compatible con el rendimiento de la combustión.
- Llegar a un rendimiento de combustión que sea superior al 99%.
- Evitar desperfectos en las paredes o en los tubos de la cámara de combustión debido a depósitos de carbón y hollín.
- Capacidad de modificar la forma de la llama dentro de algunos límites, para permitir la posibilidad de adaptación a las dimensiones de la cámara de combustión.
- Lograr la temperatura más alta de la llama, o dicho en otro modo, funcionar con el mínimo exceso de aire, sin producción de elementos sólidos o gaseosos no quemados en los gases de combustión.(p.420)

2.7.1 Clasificación de los atomizadores industriales para aceites combustibles

A) Atomizadores con pulverización mecánica:

- a. Con presión directa.
- b. Con retorno, de amplio campo de regulación.
- c. Con presión directa y acanaladuras regulares.
- d. Con presión directa, a pistón.
- e. Con presión directa, con doble circuito de presión.

B) Atomizadores que pulverizan con fluido auxiliar:

- a. De vapor
- b. De pulverización mecánica con ayuda de vapor.
- c. De aire, alta presión(3 -7 Ata)
- d. De aire, presión media(0,5-1,15 Ata)
- e. De aire, baja presión(600-700 mm H₂O)

C) Atomizadores (quemadores) de copa giratoria.

2.8 Problemas relacionados con la presencia de compuestos sulfurados y de cenizas en los humos

La presencia del azufre, casi generalizada en los combustibles líquidos y sólidos de uso doméstico e industrial, en cantidades que oscilan desde el 0,1% al 0,2% en el queroseno refinado, al 6-7% en algunos aceites y carbones, da lugar durante la combustión a la formación de anhídrido sulfuroso y en proporciones menores de anhídrido sulfúrico, que a su vez puede generar condensaciones de ácido sulfúrico en las zonas donde la temperatura de las superficies metálicas desciende por debajo del punto de rocío. Tales condensaciones, que contienen hasta el 80% de ácido, pueden dar lugar, a causa de reacciones que se desarrollan con mecanismos electroquímicos, a una rápida y fuerte corrosión de las superficies metálicas.

Las reacciones de oxidación heterogénea catalítica están vinculadas a la presencia en los combustibles, junto al azufre, de impurezas como el hierro, vanadio, calcio, níquel y silicio. Durante la combustión estos materiales inorgánicos se liberan como vapores o partículas fundidas o solidificadas (cenizas volantes), que se depositan sobre las paredes metálicas o refractarias de los hornos, calderas, etc., haciendo entonces de catalizadores para la reacción de oxidación heterogénea de SO_2 con el aire.

2.8.1 Corrosión a alta temperatura

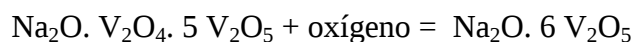
En las zonas de alta temperatura de los recalentadores, la corrosión de los tubos, por oxidación del metal, es atribuible a depósitos de productos sólidos de bajo punto de fusión.

Es notorio que el sodio y el vanadio son los principales responsables del depósito de estos compuestos y de la consiguiente dificultad de flujo para los humos; durante la combustión el vanadio se oxida a V_2O_5 (punto de fusión 675°C), mientras que el sodio reacciona con los óxidos de azufre para formar Na_2SO_4 (punto de fusión 880°C).

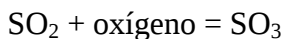
Si la temperatura de la superficie metálica es inferior a 450°C, los dos compuestos citados no reaccionan; a temperaturas más altas se forma SO₂ mas el compuesto Na₂O.V₂O₄.5V₂O₅ (punto de fusión 625°C) que constituye el principal producto de incrustaciones que se forman en los recalentadores de las calderas acuotubulares.

Los fenómenos de corrosión provocados por este compuesto se producen mediante dos distintos procesos:

- Con presencia de aire:



- presencia de aire y SO₂



Para reducir los fenómenos de corrosión a alta temperatura es preciso, tomando como base las reacciones anteriores, proceder a:

- a. Limitar el oxígeno libre en los gases de combustión.
- b. Elevar el punto de fusión de los depósitos, de forma que a la temperatura de servicio de las superficies aquéllos no lleguen a fundirse; como se sabe la reactividad aumenta en fase líquida, por lo que se producen mayores corrosiones.

2.8.2 Influencia del exceso de aire en la formación de anhídrido sulfúrico

Empleando excesos de aire muy bajos, con los quemadores normales, se provoca inevitablemente la presencia de partículas no quemadas en los humos; las

llamas, además, resultan más largas que las que se obtienen con excesos de aire normales.

En un estudio sobre los aceites combustibles y de los humos que se originan durante la combustión de estos productos, aportan las siguientes consideraciones:

- a. El contenido de SO_3 (el tipo de máxima corrosión) y el punto de rocío disminuyen con la reducción del contenido de oxígeno; en condiciones estequiométricas no se produce SO_3 ni se tienen puntos de rocío ácidos.
- b. La disminución del punto de rocío ácido es simultánea con la disminución del contenido del SO_3 en el gas.
- c. El contenido de SO_3 (el tipo de máxima corrosión) y el punto de rocío aumentan con la carga de la caldera, a igualdad contenido de oxígeno.
- d. Las calderas con quemadores colocados frontalmente dan, en igualdad de condiciones, valores más bajos de SO_3 y de puntos de rocío respecto a las calderas en forma distinta.
- e. El contenido de SO_3 , con exceso de aire constante, no es directamente proporcional al contenido de azufre en el combustible; con bajos excesos de aire las diferencias de contenido en azufre tienen efectos despreciables.
- f. La cantidad de sólidos presentes en los gases de combustión aumentan con la disminución del contenido de oxígeno; a niveles inferiores al 0,2% el crecimiento se produce muy rápidamente.
- g. Los aceites combustibles muy sulfurados se pueden quemar, con efectos de corrosión casi nulos, empleando quemadores de concepción moderna, aptos para quemar el aceite con limitadísimos excesos de aire.

2.9 Prevención de la corrosión

Los sistemas más eficientes para prevenir la corrosión en las instalaciones térmicas son, según la literatura técnica, los siguientes:

- a. Empleo de materiales resistentes a los agentes corrosivos.
- b. Tratamiento de las superficies interesadas a fin de hacerlas resistentes a los ataques químicos.
- c. Conducción de la combustión a condiciones estequiométricas.
- d. Utilización de ciertos aditivos antiácidos, o bien tratamientos especiales destinados a reducir el contenido de cenizas en el combustible.

2.9.1 Empleo de aditivos

Los aditivos se vienen utilizando actualmente con los combustibles líquidos y raramente con los carbones. Los fabricantes de estas sustancias afirman, que con su uso es posible obtener uno o más de los efectos que se indican a continuación:

- a. Disminución de los depósitos en los recipientes de almacenaje.
- b. Facilitar la atomización mediante la disminución de la viscosidad y/o mediante la disminución de la tensión superficial.
- c. Catalizar la combustión y por lo tanto disminuir las partes no quemadas (hollines).
- d. Actuar sobre los óxidos de azufre neutralizando el anhídrido sulfúrico; inhibir la oxidación de los anhídridos sulfurosos y sulfúricos; disminuir simultáneamente los contenidos de SO_2 y SO_3 .
- e. Desarrollar una acción antidepósito en la cámara de combustión o sobre las superficies de cambio, junto con una acción corrosiva más o menos relacionadas con el punto (d). El aditivo debe reaccionar con las cenizas del combustible, dando lugar a compuestos con elevada temperatura de fusión, que, permaneciendo en estado sólido, no deberían formar depósitos sobre las superficies metálicas, ni por consiguiente, corrosiones en las mismas.
- f. Evitar la aglomeración de las pequeñas partículas de hollín y por lo tanto, la formación de las pavesas con eventual emisión de hollines neutros.

- g. Aumentar el rendimiento térmico de la instalación, como consecuencia de la disminución de los restos no quemados y de la consiguiente limpieza de las superficies de transferencia de calor.

2.10 Eficiencia de un Generador de Vapor

La eficiencia de un generador de vapor se puede definir como un factor adimensional que nos indica la cantidad de energía aprovechada por el sistema respecto a una fuente calorífica que puede ser derivada de una combustión, fisión atómica u algún otro método de liberación de calor. Para calcular la cantidad de energía aprovechada por un generador de vapor existen dos métodos principalmente:

- El método de pérdidas de calor o sea la determinación de la eficiencia mediante la sustracción en porcentaje de la suma de las pérdidas medidas en la caldera.

$$\text{Eficiencia} = (1 - \text{Pérdidas}) * 100\%$$

- El método directo o energía que entrega la caldera en el vapor contra la energía entregada a la caldera (método de entrada- salida).

$$\text{Eficiencia} = \frac{Q_{\text{aprovechado}}}{Q_{\text{introducido}}} * 100\%$$

La elección de la técnica a utilizar, depende de las necesidades y de la utilidad que se le quiera dar al valor de eficiencia. En la siguiente tabla se muestran las ventajas y desventajas que presenta cada método según la norma ASME PTC 4 para así facilitar su selección:

Método	Ventajas	Desventajas
Método de Entrada-Salida.	-Los parámetros primarios para la definición de la eficiencia son de medición directa. -Requiere menos medidas. -No requiere la estimación de pérdidas.	-El flujo de combustible y el valor del poder calorífico, el flujo de vapor y sus propiedades deben ser medidos con mucha precisión para disminuir la incertidumbre. -No ayuda a identificar la localización de la ineficiencia del sistema. -Es necesario el cálculo por el método de balance de energía para poder relacionarlo con estándares o condiciones de garantía.
Método de Balance de energía.	-Las medidas primarias (análisis y temperaturas de los gases de combustión) se pueden hacer con gran precisión. -Permite relacionar o corregir los resultados con la norma o condiciones de garantía. -Presenta una menor incertidumbre.	-Requiere muchas mediciones. -No es automático el cálculo de eficiencia y de valores de salida. -Algunas pérdidas son imposibles de medir, y el valor debe ser estimado.

Tabla 2. 1: Ventajas y Desventajas de Métodos para Cálculo de Eficiencia

Fuente: ASME PTC 4 2008 (p. 20)

2.11 Emisiones Atmosféricas de una Central Termoeléctrica

El ambiente está formado por elementos naturales y artificiales que se interrelacionan entre sí y que son modificados por acciones humanas. El efecto que produce una determinada actividad humana sobre el ambiente se denomina impacto ambiental.

Las centrales termoeléctricas forman parte de los factores que inciden en el ambiente. Son consideradas fuentes importantes de emisiones atmosféricas y pueden afectar la calidad del aire en el área local o regional. La combustión que ocurre en las centrales termoeléctricas emite dióxido de sulfuro (SO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2) y partículas (que pueden contener metales menores). Las cantidades de cada uno dependerán del tipo y el tamaño de la instalación y del tipo y calidad del combustible, y la manera en que se queme.

A continuación se dará una descripción de cada una de las emisiones mencionadas anteriormente y su efecto sobre la salud y el ambiente:

a) Óxidos de Nitrógeno (NO_x)

La combustión de cualquier combustible fósil produce un determinado nivel de NO_x debido a las altas temperaturas y a la disponibilidad de oxígeno y nitrógeno, tanto en el aire comburente, como en el combustible. Las emisiones de NO_x generadas en los procesos de combustión están constituidas por un 90-95% de NO , y el resto por NO_2 ; cuando los humos abandonan la chimenea, una gran parte del NO se oxida en la atmósfera, pasando a NO_2 . El NO es un gas incoloro, mientras que el NO_2 es un gas de color pardo, que crea una pluma visible sobre la chimenea.

De acuerdo a Diez, P (ob. cit.) Cuando el NO_x sale a la atmósfera, comienza su participación en los fenómenos relativos a la formación de:

- **Ozono/huminiebla fotoquímica:** El ozono producido por la actividad del hombre, formado en las capas bajas de la atmósfera, se considera como un contaminante; este tipo de ozono, que se forma por la reacción de hidrocarburos y NO_x en presencia de luz solar, es el componente principal de la huminiebla urbana fotoquímica, junto con el NO₂ y gran variedad de otros compuestos. El NO contenido en los humos, una vez que se emite por la chimenea, se oxida para formar NO₂ que es un gas oxidante de color amarillo-marrón.
- **Lluvia ácida:** El NO_x y el SO₂ contribuyen a la formación de la lluvia ácida, que incluye una disolución diluida de los ácidos nítrico y sulfúrico, con pequeñas cantidades de ácido carbónico y otros ácidos orgánicos. El NO_x y el SO₂ reaccionan con el vapor de agua para formar compuestos ácidos, que son los causantes de más del 90% de la lluvia ácida; la mayor parte de los controles de lluvia ácida se concentra en las contribuciones del SO₂ imputando al NO_x menos de un tercio.
- **Partículas sólidas en suspensión:** El NO_x puede contribuir a la existencia de partículas sólidas suspendidas en el medio ambiente. En la atmósfera, el NO_x reacciona con otros productos químicos en suspensión, para producir nitratos. El NO_x promueve también la transformación del SO₂ en partículas de compuestos sulfatados.

b) Óxido de Azufre (SO_x)

El óxido de azufre (IV) también llamado dióxido de azufre, gas sulfuroso y anhídrido sulfuroso, cuya fórmula es SO₂, es un gas incoloro con un característico olor asfixiante. Se trata de una sustancia reductora que, con el tiempo y en contacto con el aire y la humedad, se convierte en óxido de azufre (VI).

Una gran parte del azufre emitido a la atmósfera se origina en forma de sulfuro de hidrógeno, procedente de la descomposición de la materia orgánica; estas emisiones se oxidan lentamente para formar SO_2 .

Las emisiones mundiales anuales de SO_2 se estiman en 200 millones de toneladas, casi la mitad procedente de fuentes industriales, como la combustión de combustibles fósiles y el refino metalúrgico de minerales.

El óxido de azufre (IV) es un gas irritante y tóxico. Afecta sobre todo las mucosidades y los pulmones provocando ataques de tos. Si bien éste es absorbido principalmente por el sistema nasal, la exposición de altas concentraciones por cortos períodos de tiempo puede irritar el tracto respiratorio, causar bronquitis y congestionar los conductos bronquiales de los asmáticos.

Por otro lado es el principal causante de la lluvia ácida ya que en la atmósfera es transformado en ácido sulfúrico.

c) Monóxido de Carbono (CO)

El monóxido de carbono es un gas inodoro, incoloro e insípido, ligeramente menos denso que el aire, constituido por un átomo de carbono y uno de oxígeno en su estructura molecular.

El monóxido de carbono es producto de la combustión incompleta de material que contiene carbono y de algunos procesos industriales y biológicos. Un proceso de combustión que produce CO en lugar de CO_2 resulta cuando la cantidad de oxígeno requerida es insuficiente, y depende de la temperatura de flama, tiempo de residencia en la cámara de combustión y turbulencia en la misma.

La concentración de monóxido de carbono en el aire, representa aproximadamente el 75% de los contaminantes emitidos a la atmósfera; sin embargo, es una molécula estable que no afecta directamente a la vegetación o los materiales. Su importancia radica en los daños que puede causar a la salud

humana al permanecer expuestos por períodos prolongados a concentraciones elevadas de éste contaminante.

El CO tiene la capacidad de unirse fuertemente a la hemoglobina, formando carboxihemoglobina (COHB), lo cual indica una reducción significativa en la oxigenación de nuestro organismo (hipoxia), debido a que el CO tiene una afinidad de combinación 200 veces mayor que el oxígeno.

La hipoxia causada por CO puede afectar el funcionamiento del corazón, del cerebro, de las plaquetas y del endotelio de los vasos sanguíneos. Se le ha asociado con la disminución de la percepción visual, capacidad de trabajo, destreza manual y habilidad de aprendizaje.

d) Dióxido de carbono (CO₂)

El dióxido de carbono es un gas incoloro, inodoro y con un sabor ácido. Su estructura molecular está compuesta de un átomo de carbono unido a dos átomos de oxígeno, es decir, según la nomenclatura química, CO₂.

Su densidad es, más o menos, 1,5 veces más densa que el aire y se disuelve en el agua en una proporción de un 0,9 de volumen del gas por volumen de agua, siempre a 20 grados centígrados.

La emisión del dióxido de carbono junto con los otros gases (vapor de agua, metano, óxidos de nitrógeno, ozono y clorofluorocarburos) ha aumentado de forma sustancial y ha provocado un cambio en el equilibrio natural. Este aumento ha producido, de forma directa, el incremento de la temperatura global y la radicalización de un efecto que se ha dado a llamar Efecto Invernadero.

El Efecto Invernadero es formado por la radiación solar de onda corta, atraviesa la atmósfera de cualquier planeta siendo absorbida, en parte, por el suelo. Otra parte de la radiación, queda en nuestra atmósfera gracias a la capa existente de gases como el CO₂. Por último, la cantidad restante y más grande, vuelve a salir al espacio convertida en una longitud de onda correspondiente a los

rayos infrarrojos. Debido al aumento de los gases en la atmósfera de la tierra, gran parte de estos rayos no pueden escapar al espacio en las cantidades de antaño permaneciendo en nuestra atmósfera y modificando su temperatura.

e) Partículas

El término partícula, aerosol o material particulado atmosférico (MPA) se refiere a cualquier sustancia, a excepción del agua pura, presente en la atmósfera en estado sólido o líquido por causas naturales o antropogénicas. Bajo esta denominación se incluyen humos, polvo, fibras, nieblas, brumas, calima, hollín, smog, etc.

Al contrario que otros contaminantes, el MPA es emitido por una gran variedad de fuentes, en función de las cuales varían sus propiedades físicas y su composición química. Tanto las partículas de origen natural como las antropogénicas pueden ser clasificadas, en función de su mecanismo de formación, en partículas primarias (son vertidas directamente a la atmósfera desde la fuente de emisión) y secundarias (se originan a partir de las emisiones de sus precursores gaseosos).

Dentro del ámbito industrial las fuentes de partículas primarias son múltiples, destacando las emisiones derivadas de la combustión de productos fósiles, la fundición de metales como cobre o cinc, y la producción de cemento, cerámica y ladrillos. A estas emisiones que salen por las chimeneas hay que sumar aquellas derivadas de la manipulación y transporte de materiales, denominadas emisiones fugitivas (P. ej. minería, construcción, producción de cemento y cerámica).

La exposición a material particulado en el aire ambiente supone unos de los principales riesgos para la salud humana en el ámbito de la contaminación atmosférica, debido a que provoca un aumento en la frecuencia de cáncer pulmonar, muertes prematuras, síntomas respiratorios severos, irritación de ojos y nariz, exacerbación del asma y agravamiento en caso de enfermedades

cardiovasculares. Así mismo, su acumulación en los pulmones puede originar enfermedades como la silicosis y la asbestosis. En materia ambiental las partículas son responsables de la degradación de los edificios y los monumentos históricos y de la alteración de los ecosistemas.

2.12 Disponibilidad

De acuerdo con Nava, J (1992) “La disponibilidad se define como la probabilidad de que un equipo esté operando o sea disponible para su uso, durante un período de tiempo determinado. Es decir, la disponibilidad es una función que permite estimar en forma global el porcentaje de tiempo total en que se puede esperar que un equipo esté disponible para cumplir la función para la cual fue destinado”. (p. 43)

La disponibilidad de un equipo aumenta si el tiempo fuera de servicio del mismo disminuye, lo cual se logra mejorando la operación, el entrenamiento de los operadores, los procedimientos de mantenimiento, calidad de repuestos utilizados, la dotación de herramientas y los sistemas administrativos.

2.12.1 Importancia de la Disponibilidad

En este sentido, Nava, J (ob.cit.) indica lo siguiente:

El concepto de la disponibilidad tiene mucha importancia en el cálculo de factores de efectividad, al evaluar la influencia de la disponibilidad de un equipo sobre la efectividad global del sistema.

A través del estudio de los factores que influyen sobre la disponibilidad, el tiempo probable entre fallas y el tiempo probable fuera de servicio, es posible evaluar distintas alternativas de acción para lograr los aumentos necesarios de disponibilidad a través de:

- Aumento de los tiempos entre fallas.

- Reducción de los tiempos fuera de servicio.
- Tácticas combinadas.

A la vez que se establecen las distintas alternativas de acción, en cuanto a los factores técnicos se refiere, también se establece la influencia de las alternativas sobre los costos. De esta manera es posible identificar la política óptima en función de maximización de la disponibilidad y la minimización de los costos.

2.13 Confiabilidad

Es la probabilidad de que un equipo preste su servicio en un tiempo determinado sin presentar falla alguna.

Nava (ob. cit.), en su libro “Teoría de Mantenimiento y Fiabilidad” define la confiabilidad como “la probabilidad de que un componente o equipo no fallará estando en servicio, durante un período determinado cuando es operado en condiciones razonablemente uniformes de presión, temperatura, velocidad, vibración, etc.” (p. 7).

2.13.1 Importancia de la confiabilidad

La confiabilidad de un equipo depende de la confiabilidad de sus componentes y de la forma en que están integrados entre sí. La confiabilidad es por lo tanto un parámetro que depende exclusivamente del diseño, y su modificación implica cambiar el diseño. Si sustituimos un componente de un equipo por otro de calidad inferior, la confiabilidad del equipo disminuirá, y viceversa, si aumentamos la calidad de un componente de un equipo puede aumentar la confiabilidad del equipo.

2.13.2 Índices cuantitativos de la confiabilidad

De acuerdo con Castellano, G (2000) “los parámetros fundamentales que caracterizan la confiabilidad de elementos y sistemas son: La probabilidad de trabajo sin fallas o probabilidad de supervivencia y la probabilidad de falla”. (p. 16).

- **Probabilidad de trabajo sin fallas o probabilidad de supervivencia:** es la probabilidad de que en un intervalo de tiempo prefijado (o en los límites de las horas de trabajo dadas) con regímenes y condiciones de trabajo establecidos, no se produzca ninguna falla, es decir, la probabilidad de que el dispositivo dado conserve sus parámetros en los límites prefijados durante un intervalo de tiempo determinado y para condiciones de explotación dadas.

La cuantificación de la confiabilidad como una probabilidad, está determinada por el carácter aleatorio del suceso al que está referida (aparición de la falla). Dicho suceso, aunque aleatorio, está condicionado por factores de diseño, calidad de la ejecución y explotación, etc., cuya influencia se refleja en su probabilidad de ocurrencia. Por tanto, la influencia de estos factores sobre la confiabilidad también es susceptible de cuantificar.

- **Probabilidad de falla:** es la probabilidad de que en un intervalo de tiempo prefijado se produzca al menos una primera falla.

2.14 Estado de las Unidades

Para evaluar la disponibilidad y confiabilidad de las unidades de generación de CORPOELEC es necesario identificar cual es su condición de operación, para ello se definen los siguientes estados de las unidades:

2.14.1 Activa

Se encuentra registrada en el parque de unidades que generan energía eléctrica para el sistema a partir de la fecha en la cual entró en operación comercial o desde su retorno del estado “Inactiva”. A su vez se clasifica en:

a) Disponible: la unidad es capaz de proveer el servicio independientemente si está en operación o no y del nivel de capacidad que pueda proveer. Dentro de esta categoría se tiene la siguiente clasificación:

- **En servicio:** la unidad se encuentra sincronizada al sistema.
- **Reserva:** la unidad se encuentra disponible pero no está en servicio.

b) Indisponible: la unidad no se encuentra capacitada para operar por fallas operativas o de equipos, restricciones externas, pruebas, trabajos que están ejecutándose o alguna condición adversa.

- **Salida Planificada:** la unidad se encuentra indisponible debido a la inspección, prueba o mantenimientos planificados. La salida planificada es debidamente programada y evaluado su avance.
- **Salida No-Planificada:** la unidad se encuentra indisponible por causas no previstas. La Salida No-Planificada comienza también cuando la Salida Planificada termina pero es extendida debido a trabajo No-Planificado.

2.14.2 Inactiva

La unidad se encuentra indisponible para el servicio durante un período extendido de tiempo, aún cuando técnicamente la unidad no presenta falla o malfuncionamiento derivado del proceso de generación de energía eléctrica que impida su operación.

2.14.3 Limitación

De acuerdo a la capacidad de la unidad se definen los siguientes estados:

2.14.3.1 Limitación Planificada

La porción de la limitación de la unidad la cual ha sido debidamente programada con anticipación.

2.14.3.2 Limitación No-Planificada

Es aquella porción de la limitación de la unidad el cual no es una limitación planificada.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

La metodología del proyecto incluye el tipo o tipos de investigación, las técnicas y los procedimientos que serán utilizados para llevar a cabo la indagación. Es el "cómo" se realizará el estudio para responder al problema planteado.

Según la Universidad Pedagógica Experimental Libertador (U.P.E.L) (2006) la investigación de campo comprende los siguientes aspectos: diseño de la investigación, instrumentos, procedimiento y análisis de datos.

3.1 Tipo de Investigación

Esta investigación está ubicada dentro del marco de proyecto factible y de investigación de campo, que según la Universidad Pedagógica Experimental Libertador (U.P.E.L) (2006) se definen como:

- Proyecto factible: consiste en la investigación, elaboración y desarrollo de una propuesta de un modelo operativo viable para solucionar problemas, requerimientos o necesidades de organizaciones o grupos sociales; puede referirse a la formulación de políticas, programas, tecnologías, métodos o proceso. (p.21)
- Investigación de Campo: consiste en el análisis sistemático de problemas en la realidad, con el propósito bien sea de describirlos, interpretarlos, entender su naturaleza y factores constituyentes, explicar sus causas y efectos, o predecir su ocurrencia, haciendo uso de métodos característicos de cualquiera de los paradigmas o enfoques de investigación conocidos o en desarrollo. Los datos de interés son recogidos de forma directa de la realidad; en este sentido se trata de investigaciones a partir de datos originales o primarios. Sin embargo, se aceptan también estudios sobre datos censales o muestrales no recogidos por el estudiante, siempre y

cuando se utilicen los registros originales con los datos no agregados; o cuando se trate de estudios que impliquen la construcción o uso de series históricas y, en general, la recolección y organización de datos publicados para su análisis mediante procedimientos estadísticos, modelos matemáticos o de otro tipo. (p-18)

3.2 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Con el fin de cumplir los objetivos establecidos en esta investigación, se emplearon las siguientes técnicas para la recolección de datos:

- Observación:

Según (Arias, 2004) “La observación es una técnica que consiste en visualizar o captar mediante la vista, en forma sistemática, cualquier hecho, fenómeno o situación que se produzca en la naturaleza o en la sociedad, en función de sus objetivos de investigación preestablecido” (p-67).

- Observación Participante:

Según Calello y Neuhaus (1993), la observación puede ser participante, cuando el observador tiene un lugar en el grupo en el que está observando y participa activamente en el fenómeno en estudio. (p.175).

- Observación No estructurada:

Según Calello y Neuhaus (1993), la observación no estructurada, cuando el observador se limita a registrar lo que sucede, dando lugar a interrogantes que pueden ser punto de partida de profundizaciones mayores. (p.175).

- Entrevista no estructurada:

Según Sabino, C (ob.cit.), La entrevista, desde el punto de vista del método, es una forma específica de interacción social que tiene por objeto recolectar datos para una investigación. El investigador formula preguntas a las personas capaces de aportarle datos de interés, estableciendo un diálogo peculiar, asimétrico, donde una de las partes busca recoger información y la otra es la fuente de esa información. (p. 106).

- Técnicas Estadísticas:

Siguiendo a Méndez, C. (2001) la técnica estadística:

Se refiere al tratamiento que se realiza a la información recolectada que debe ser tabulada y ordenada por técnicas de análisis matemático de carácter estadístico. Se debe definir, según sea el caso; el empleo de medidas de posición, (mediana, media), valores medios según frecuencia (moda), y parámetros de dispersión, como los intervalos de variación, desviación, media, desviación estándar, empleo de números índice, ión, etc. (p.158-159).

Esta técnica fue aplicada para procesar la data de los eventos que causan paradas y limitaciones en los generadores de vapor, en un periodo comprendido desde el año 2007 al 2009.

3.3 Pasos de la Investigación de Campo

3.3.1 Levantamiento de Información

Esta fase inicio en un recorrido por las instalaciones de la Planta Ampliación Tocoa perteneciente al CGJJSB, con el fin de obtener información de las áreas y equipos relacionados con el tema de estudio, siendo estos: quemadores,

hogar de la caldera, sobrecalentadores, recalentadores, sopladore de hollín, precalentadores de aire y las áreas circundantes a la chimenea(al circuito aire-combustibles), aplicándose como método de recolección de datos la observación participante.

Adicionalmente se utilizaron las entrevistas no estructuradas con el fin de obtener información más detallada de personas especialistas en las diferentes áreas de estudio.

3.3.2 Diagnostico y Proyección del funcionamiento de los Generadores de Vapor

Esta fase inicia con la aplicación estadística de la información recolectada para determinar las principales causas que afectan el funcionamiento de los generadores de vapor al utilizar Residual N° 6 como combustible y para determinar el cumplimiento de la normativa ambiental establecido en el decreto 638.

Luego se realizó un modelo matemático que permitió proyectar los parámetros de funcionamiento de los generadores de vapor. Paralelo a esto se realizo la proyección del impacto ambiental utilizando las herramientas graficas de Excel bajo con el fin de evaluar el cumplimiento de la normativa establecida en el país. Estas proyecciones se hicieron con las unidades generadoras utilizando Residual N° 6 como único combustible para la generación de energía.

Por último se hizo una búsqueda de las tecnologías existentes en el mercado, a fin de proponer aquellas que permitan optimizar el funcionamiento de los generadores de vapor al consumir exclusivamente combustible Residual N° 6.

3.3.3 Resultados

Considerada como la última etapa en el desarrollo de este trabajo de grado, se ordenó en esta fase toda la información y resultados obtenidos mediante las técnicas de investigación y recolección de datos, así como también los resultados

de las proyecciones con el fin de evaluar el funcionamiento de los generadores de vapor y del impacto ocasionado por los mismos, para generar conclusiones y recomendaciones de la factibilidad de nuevas tecnologías existentes en el mercado que optimicen el funcionamiento de los generadores de la Planta Ampliación Tocoa.

CAPÍTULO IV

CONDICIÓN DE OPERACIÓN DE LOS GENERADORES DE VAPOR

4.1 Especificaciones del Generador de Vapor

Según el Manual de Instrucciones MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES (1978):

“Los Generadores de Vapor” que funcionan en la planta Ampliación Tocoa son a la intemperie, de circulación controlada, acuotubular, emplean como combustible Gas y Residual N° 6, una altura de 43,5 metros medidos desde el piso de horno hasta el tambor superior, tienen una capacidad máxima de vapor 1.380 t/h, Temperatura vapor sobrecalentado 540 °C, Presión de vapor 174 Kg/cm², Capacidad de almacenamiento de agua 2.125 m³.

Estos constan de los siguientes equipos principales: ventiladores tiro forzado, ventiladores recirculadores de gases, diferentes distribuciones de tuberías que conforman las paredes de agua, sobre-calentadores, recalentadores y economizador, bombas de circulación forzada, sopladores de hollín, calentadores de aire, sistema de quemadores a gas y Residual N° 6, Válvulas de seguridad, Válvulas manuales y motorizadas, sistemas de combustible gas natural y Residual N° 6, una serie de ductos y compuertas, así como sistemas de control y monitoreo. Las calderas operan de la siguiente forma: Tienen una entrada de combustible que se combina con una entrada de aire y por medio de los quemadores se produce la combustión, en paralelo tiene una entrada de agua, que pasa por el economizador, luego con el calor se convierte en vapor y pasa por los sobre-calentadores y va hacia la turbina. Los gases producto de la combustión vienen del horno y pasan por los sobre-calentadores, recalentadores, economizador y finalmente por los calentadores de aire antes de salir hacia la chimenea.

4.1.1 Particularidades de Diseño del Generador de Vapor

Parámetros	Descripción	Valor
Designación de la caldera	Mitsubishi CE, del tipo intemperie, presurizada, de recalentamiento radiante y circulación controlada.	-
Presión del vapor.	Diseño	203 Kg/cm ² G
	Salida del supercalentador (en MCR)	174,4 Kg/cm ² G
	Tambor (en MCR)	185,9 Kg/cm ² G
	Diseño del recalentador(en MCR)	41,8 Kg/cm ² G
	Entrada del Recalentador.	35,3 Kg/cm ² G
	Salida del Recalentador	33,4 Kg/cm ² G
Temperatura del Vapor	Salida del supercalentador	540 °C
	Entrada del Recalentador (en MCR)	323,6°C
	Salida del Recalentador (en MCR)	540°C
	Escala del control de Temperatura del vapor del supercalentador.	1380-636 t/h
	Escala del control de Temperatura del vapor del recalentador.	1380-889,1 t/h
Temperatura del agua de alimentación	entrada del economizador en (MCR)	279,3 °C
Temperatura del aire	Aire ambiente	30 °C
	Entrada del precalentador de aire-ljungstrom	75°C

	(en MCR). Salida del precalentador de aire-ljungstrom (en MCR).	30°C
Flujo de Vapor	Salida del supercalentador	1380000 Kg/h
	Entrada del Recalentador	1133000 Kg/h
Sistema de encendido	Por petróleo o gas natural.	
Sistema de Tiro	Presurizado	

Tabla 4. 1: Parámetros de Diseño del Generador de Vapor.**Fuente:** Manual de Instrucciones MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES

4.1.2 Esquema del Generador de Vapor

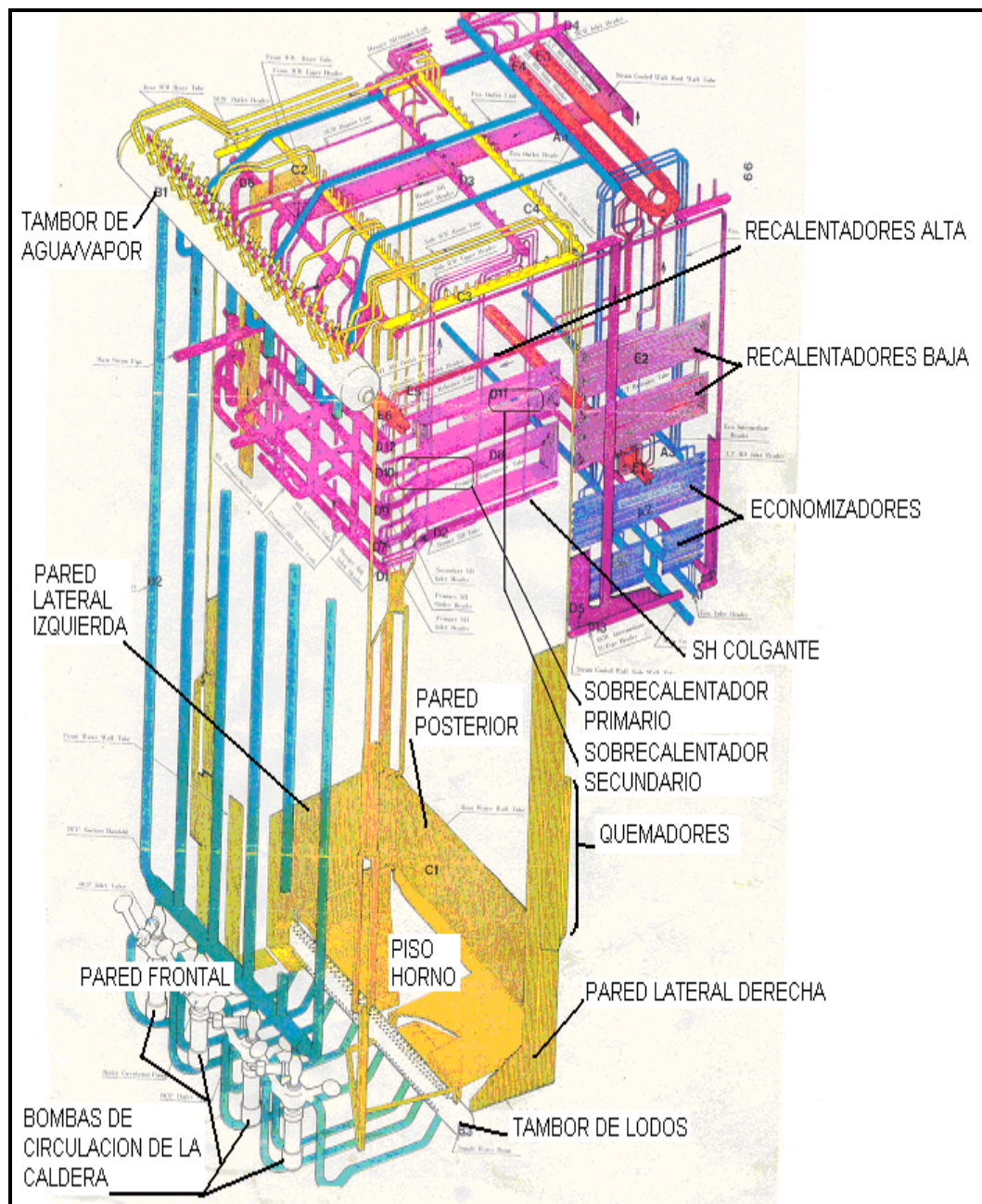


Fig. 4. 1: Esquema del Generador de Vapor de Ampliación Tanco

Fuente: Manual de Instrucciones MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES

4.2 Estudio de disponibilidad y confiabilidad de los Generadores de Vapor

El estudio fue realizado según las siguientes premisas:

- El cálculo se realizó tomando como referencia la normativa: “Definición para el uso en reporte de confiabilidad, disponibilidad y productividad de las unidades de generación eléctrica de CORPOELEC”
- La data que se utilizó comprende un período de tres años (2007, 2008 y 2009).
- Dichos parámetros fueron calculados de forma anual.
- Los resultados de disponibilidad y confiabilidad fueron comparados con el consumo de Residual N° 6 durante cada período.

Para el cálculo de disponibilidad y confiabilidad se realizó el siguiente procedimiento:

- a. Se solicitó la información correspondiente al reporte de eventos de las unidades (7, 8 y 9), las cuales contemplan los distintos estados que presentó la unidad durante el año, fecha de ocurrencia y duración del mismo, así como también la causa que lo originó.
- b. Se identificaron todos aquellos eventos referentes al generador de vapor de la información solicitada.
- c. Se realizó una base de datos para los eventos identificados en el paso anterior con los siguientes parámetros:
 - Período del mes.
 - Estado de la unidad.
 - Duración del evento.

- Capacidad de la unidad.
 - Limitación de carga de la unidad.
 - Factor de Carga.
 - Horas equivalentes.
 - Causa de evento.
- Se calculó el total de horas anuales por paradas forzadas, paradas programadas, reserva fría, limitación forzada y limitación planeada.
 - Se calculó las horas de servicio anuales del generador de vapor, considerando el total de horas de cada mes, las horas por paradas programadas e inmediatas.
 - Se procedió al cálculo de disponibilidad, índice de parada forzada (EFOR) y confiabilidad.

4.2.1 Cálculo tipo

Para dicho cálculo se tomaron como referencias los datos de la unidad 7 durante el período del año 2007, siguiendo el procedimiento antes descrito se obtuvieron los siguientes valores:

Año:2007	Horas Totales Anuales
Salida Forzada	727,55
Salida Planificada	199,42
Reserva Fría	0,00
Limitación Forzada	24,53
Limitación Planeada	0,00

Tabla 4. 2: Datos de la Unidad
Fuente: Elaborado por los autores

- Horas del periodo(HP):

$$HP = \text{días del año} * \frac{24\text{horas}}{1 \text{ día}} = \frac{365 * 24}{1} = 8760 \text{ h}$$

- Horas de Servicio (HS):

$$HS = HP - HSP - HSF = 8760 - 727,55 - 199,42 = 7833,03\text{h}$$

Donde:

HP: Horas del período.

HSP: Horas de Salida Planificada.

HPI: Horas de Salida Forzada.

- Disponibilidad (FDE):

$$FDE = \frac{HS + HRF - HLF - HLP}{HP} = \frac{(7833,03 + 0 - 24,53 - 0)\text{h}}{8760\text{h}} = 0,891$$

$$FDE(\%) = 0,8925 * 100 = 89,1\%$$

Donde:

HS: Horas de servicio.

HP: Horas del período.

HRF: Horas de reserva Fría.

HLF: Horas de limitación forzada.

HLP: Horas de limitación programada.

- Factor de Salida Forzada Equivalente (FSFE ó EFOR):

$$FSFE = \frac{HPF + HELF}{HS + HPF + HELFR} = \frac{(727,55 + 24,53)h}{(7833,03 + 727,55 + 0)h} = 0,0878$$

$$FSFE (\%) = 0,0878 * 100 = 8,78 \%$$

Donde:

HPF: horas de parada forzada

HELF: horas equivalentes de limitación forzada

HELFR: horas equivalentes de limitación forzada en reserva fría

HS: horas en servicio.

- Confiabilidad:

$$\text{Confiabilidad} = 1 - FSFE = 1 - 0,0878 = 0,9122$$

$$\text{Confiabilidad}(\%) = 0,9122 * 100 = 91\%$$

4.2.2 Resultados de disponibilidad para los generadores de vapor de las unidades 7, 8 y 9

Tomando como referencia el procedimiento del cálculo tipo, se procedió a calcular el factor de disponibilidad para las tres unidades y a realizar un análisis respecto al consumo de Residual N° 6 durante los años 2007, 2008 y 2009.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en las siguientes representaciones gráficas:

- **Unidad 7**

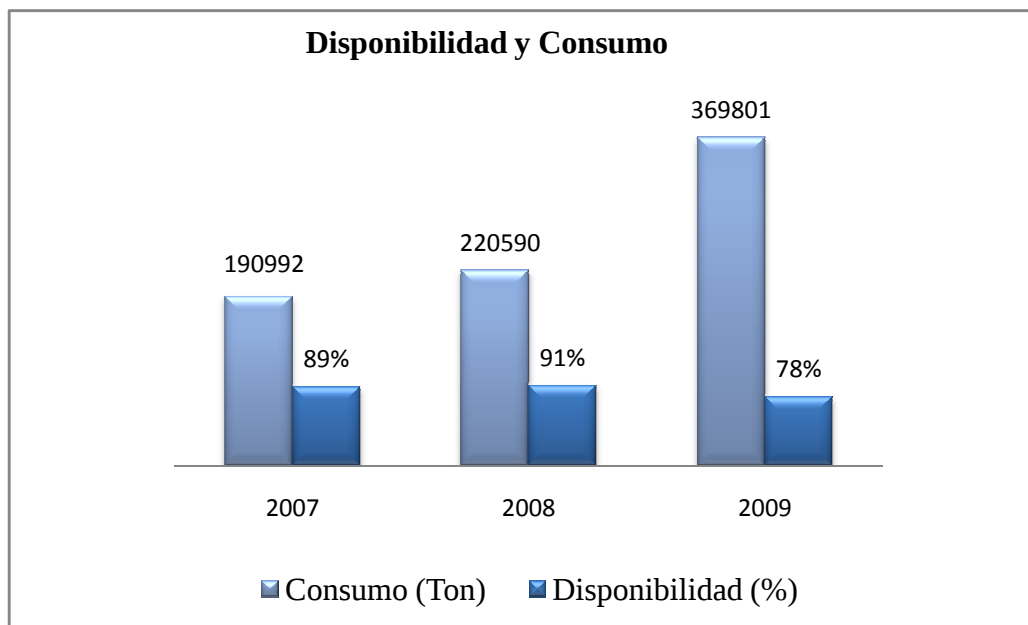


Fig. 4. 2: Disponibilidad y Consumo del período 2007 – 2009 de la Unidad 7

Fuente: Elaborado por los Autores

Observaciones:

- La disponibilidad para el año 2008 es mayor que la del 2007 a pesar de que hubo un incremento en el consumo de Residual N° 6, lo que marco este incremento fue la disminución de las fallas en el tambor inferior y los tubos rotos de la caldera para el año 2008. Esto nos indica que dichas fallas no dependen del consumo de Residual N° 6.
- Para el año 2007 y 2008 las paradas por lavado de precalentadores de aire y limpieza del horno afectaron de igual manera la disponibilidad.
- Para el 2008 aumentan las limitaciones de la unidad por problemas de alta presión en el horno.

- Gran disminución de la disponibilidad para el año 2009 fue consecuencia de un mantenimiento tipo B en la caldera que abarco tres meses del año.
- Para el año 2009 se observa un notable incremento en el consumo de Residual N° 6, adicionalmente aumentaron al triple las limitaciones por alta presión en el horno respecto al 2008.

- **Unidad 8**

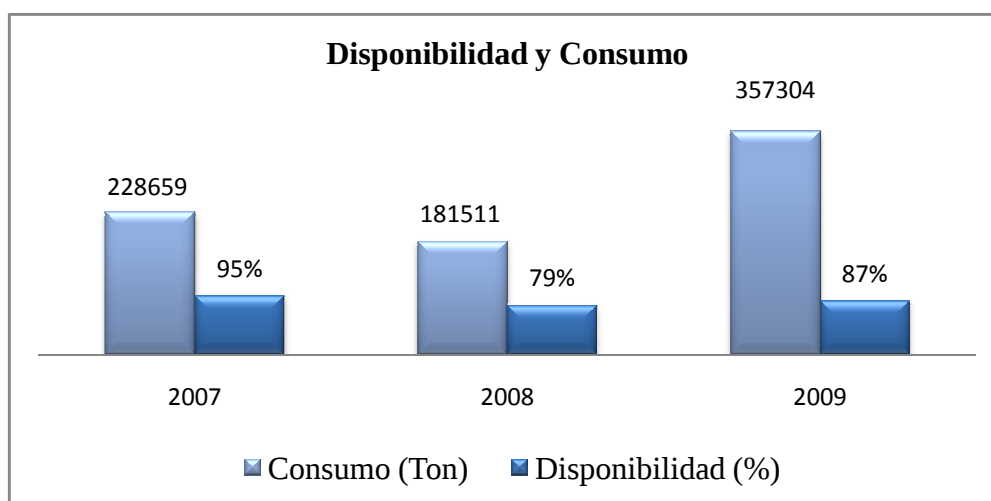


Fig. 4. 3: Disponibilidad y Consumo del período 2007 – 2009 de la Unidad 8

Fuente: Elaborado por los Autores

Observaciones:

- A pesar de que el consumo de Residual N° 6 del año 2008 disminuye respecto al 2007, se experimenta una disminución en la disponibilidad, esto sucede debido a que aumentan las paradas por tubos rotos y las horas de limitación por la presencia de puntos calientes en el horno de la caldera para el 2008.
- La disponibilidad en el año 2009 se incrementa respecto al 2008 a pesar de que el aumento del consumo de Residual N° 6 es muy

marcado, esto se debe a que a finales del año 2008 fue aplicado un lavado químico a las paredes de agua de la caldera teniendo como consecuencia una disminución en las paradas por tubos rotos en el 2009.

- El incremento de consumo de Residual N° 6 para el año 2009 concordó con el aumento de las limitaciones por alta presión en el horno.

- **Unidad 9**

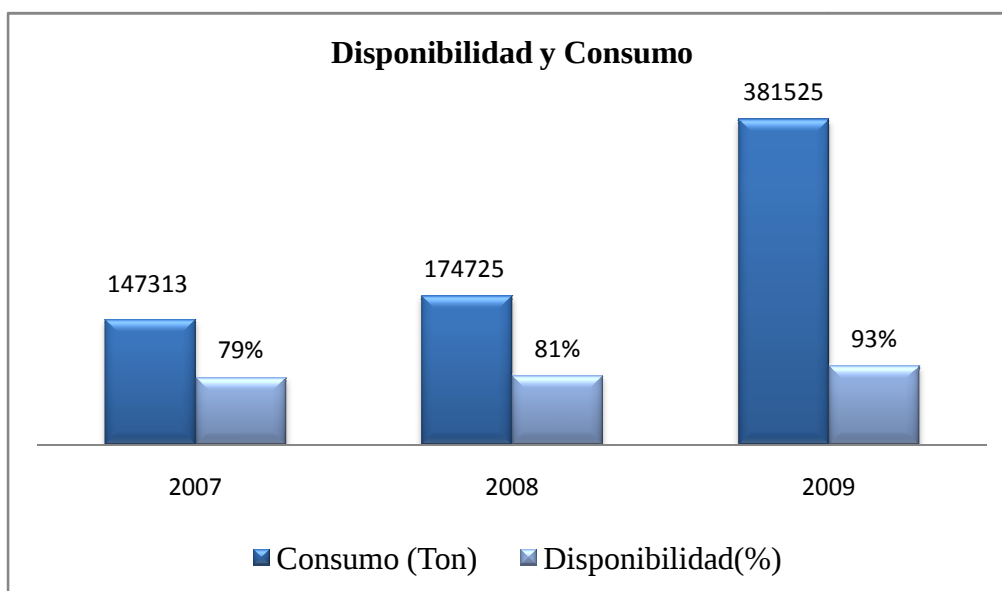


Fig. 4. 4: Disponibilidad y Consumo del período 2007 – 2009 de la Unidad 9

Fuente: Elaborado por los Autores

Observaciones:

- La disponibilidad para el año 2007 fue afectada en gran magnitud por un mantenimiento tipo B con una duración de tres meses, además de un gran número de paradas por tubos rotos.

- La Disponibilidad en el año 2008 se ve afectada por aumento de problemas en el tambor inferior de la caldera y por una parada para la adecuación del sello de la caldera el cual tuvo una duración de un mes.
- En marzo del 2008 se realizó un lavado químico en las paredes de agua de la caldera teniendo como consecuencia una disminución de paradas por tubos rotos en el resto del año y haciéndose extensivo este comportamiento hasta el 2009.
- Para el año 2009 el alto incremento del consumo de Residual N° 6 fue consecuente con el aumento de las limitaciones por alta presión en el horno.

4.2.3 Resultados de confiabilidad para los generadores de vapor de las unidades 7, 8 y 9.

Tomando como referencia el procedimiento del cálculo tipo, se procedió a calcular el factor de confiabilidad para las tres unidades y a realizar un análisis respecto al consumo de Residual N° 6 durante los años 2007, 2008 y 2009.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en las siguientes representaciones gráficas:

- **Unidad 7**

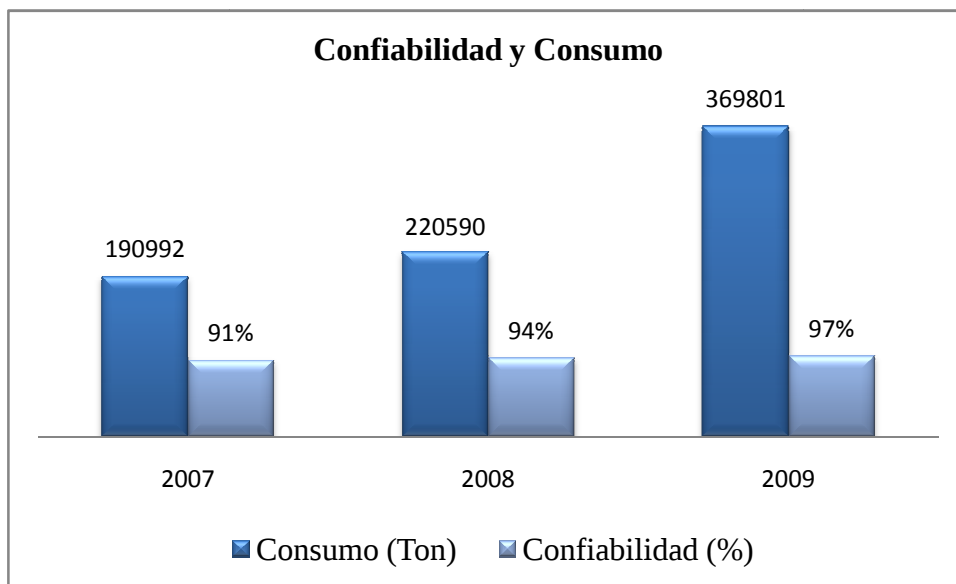


Fig. 4. 5: Confiabilidad y Consumo del período 2007 – 2009 de la Unidad 7

Fuente: Elaborado por los Autores

Observaciones:

- El consumo de Residual N° 6 fue aumentando progresivamente durante todo el periodo estudiado, siendo consecuente con el incremento de las limitaciones por alta presión en el horno.
- La confiabilidad para el año 2007 se vio impactada en gran escala por paradas inmediatas causadas por fallas en el tambor inferior de la caldera y por tubos rotos.
- La confiabilidad del año 2008 aumento respecto al 2007, esto se debe a que hubo una gran disminución de fallas en el tambor inferior de la caldera, sin embargo se siguieron presentando muchas paradas por tubos rotos.

- El aumento de la confiabilidad del año 2009 fue consecuencia de una disminución muy marcada de los problemas en el tambor inferior y tubos rotos de la caldera.

- **Unidad 8**

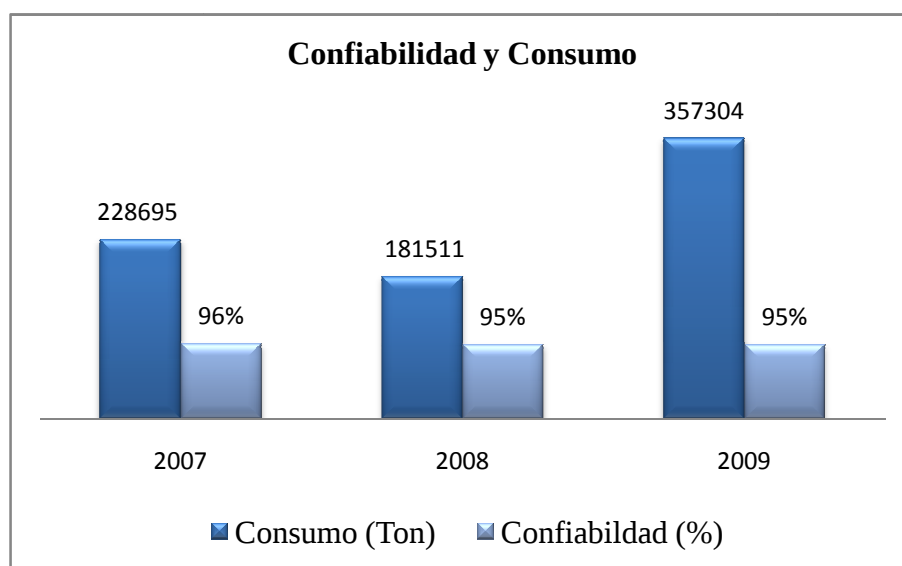


Fig. 4. 6: Confiabilidad y Consumo del período 2007 – 2009 de la Unidad 8

Fuente: Elaborado por los Autores

Observaciones:

- Para el año 2009 el aumento del consumo de Residual N° 6 es consecuente con el incremento de las limitaciones por alta presión en el horno.
- Las horas de paradas por tubos rotos para los años 2007 y 2008 fue muy similar, para el año 2009 hubo gran disminución de las mismas por efecto del lavado químico de las paredes de agua de la caldera.
- La pequeña disminución que existió en valor de la confiabilidad del año 2008 respecto al 2007 fue producto de un incremento en las limitaciones de la unidad por puntos calientes en la caldera.

- **Unidad 9**

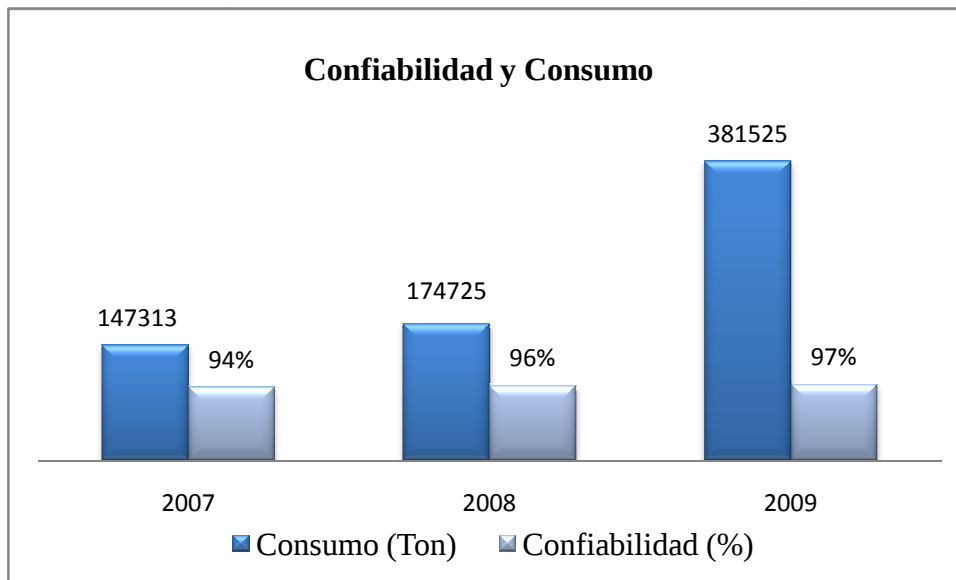


Fig. 4. 7: Confiabilidad y Consumo del período 2007 – 2009 de la Unidad 9

Fuente: Elaborado por los Autores

Observaciones:

- Se identifica un incremento progresivo en el consumo de Residual N° 6 durante el período estudiado.
- La confiabilidad para el año 2007 se vio impactada en gran escala por paradas inmediatas causadas por tubos rotos.
- La confiabilidad del año 2008 aumento respecto al 2007, esto se debe a que hubo una gran disminución de paradas por tubos rotos.
- La confiabilidad para el año 2008 fue impactada por presentarse puntos calientes en la compuerta de visita del horno.
- El aumento de la confiabilidad del año 2009 fue consecuencia de una disminución muy marcada de los problemas en el tambor y tubos rotos de la caldera.

- La confiabilidad del año 2009 solo se vio afectada por presentarse problemas de alta presión en el horno y ruptura en el sello del mismo.

4.3 Estudio de emisiones de los Generadores de Vapor

El estudio de emisiones se realizó según las siguientes premisas:

- La data que se utilizó comprende un período de tres años (2007, 2008 y 2009).
 - La data contempla mediciones puntual y aleatoria el cual se realizaron una vez por mes.
 - La data contiene parámetros de emisiones, carga de la unidad, flujo másico del Residual N° 6 y caudal del Gas.
 - Las emisiones fueron comparadas con el consumo de Residual N° 6 según cada medición puntual.
- **Óxidos Nitrosos (NOx)**

Unidad 7

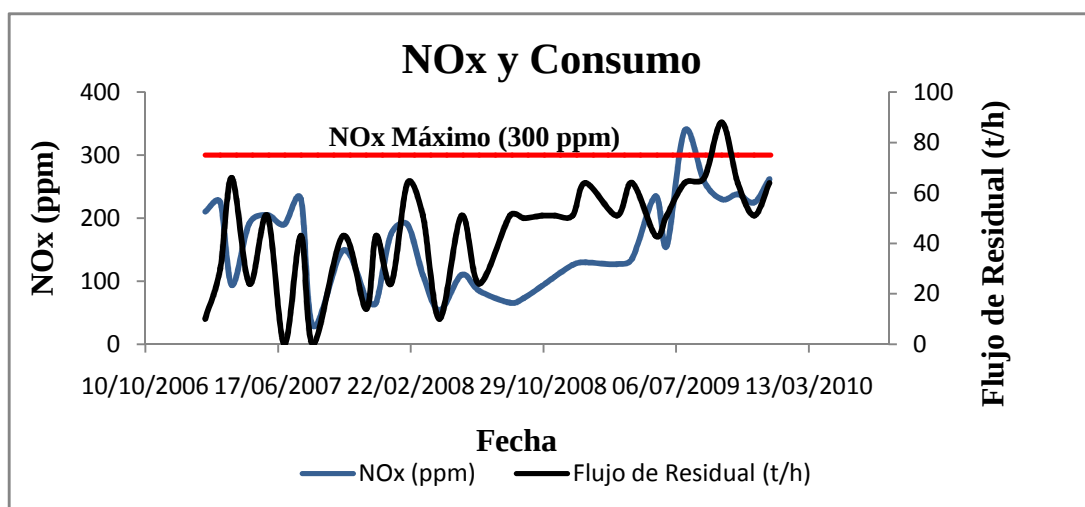


Fig. 4. 8: NOx vs Consumo del período 2007 – 2009 de la Unidad 7
Fuente: Elaborado por los Autores

Unidad 8

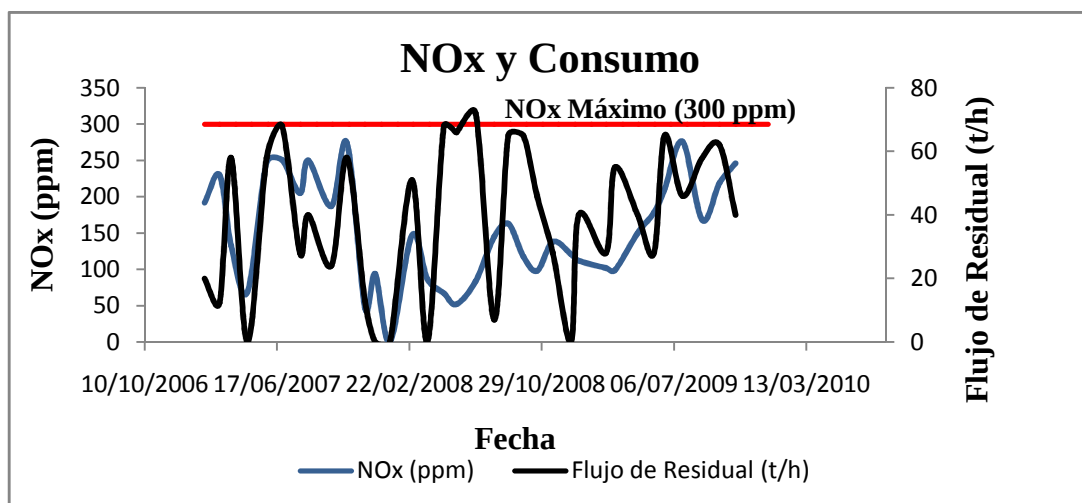


Fig. 4. 9: NOx vs Consumo del período 2007 – 2009 de la Unidad 8
Fuente: Elaborado por los Autores

Unidad 9

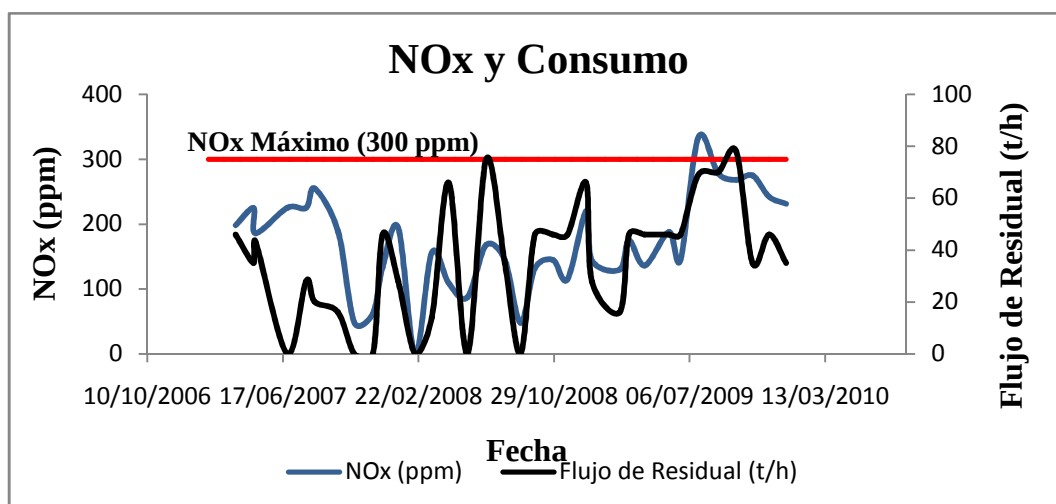


Fig. 4. 10: NOx vs Consumo del período 2007 – 2009 de la Unidad 9
Fuente: Elaborado por los Autores

Observaciones:

- Se puede observar que para las unidades 7 y 9 existen puntos en el cual las emisiones de NOx sobrepasan el límite establecido por el

decreto 638(Normas sobre calidad del aire y control de la contaminación atmosférica), esto pudo ser consecuencia de un elevado exceso de aire en la combustión.

- El combustible Residual N° 6 puede dar un pequeño aporte de NOx debido a que posee en su composición química 0,43% de N₂. Es importante resaltar que el hecho de que exista un alto consumo de Residual N° 6 no quiere decir que va a generar mayor formación de NOx, debido a que este depende del exceso de aire presente en la combustión.

- **Monóxido de Carbono(CO)**

Unidad 7

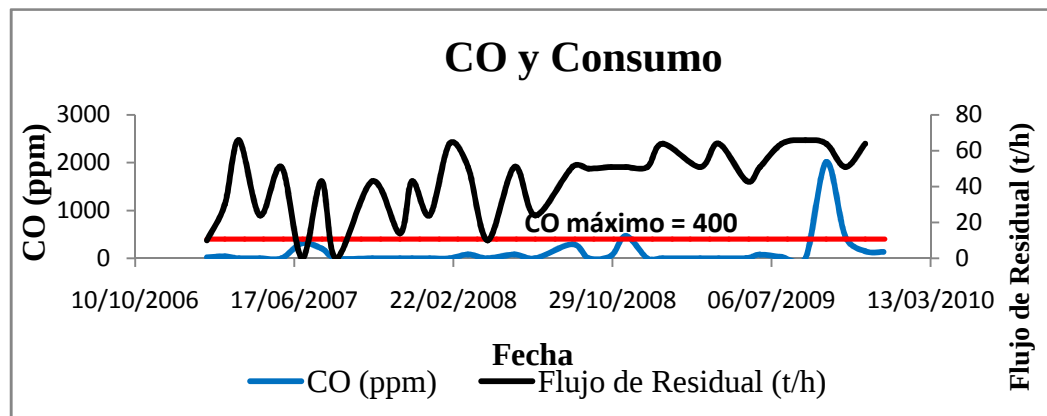


Fig. 4. 11: CO vs Consumo del período 2007 – 2009 de la Unidad 7

Fuente: Elaborado por los Autores

Unidad 8

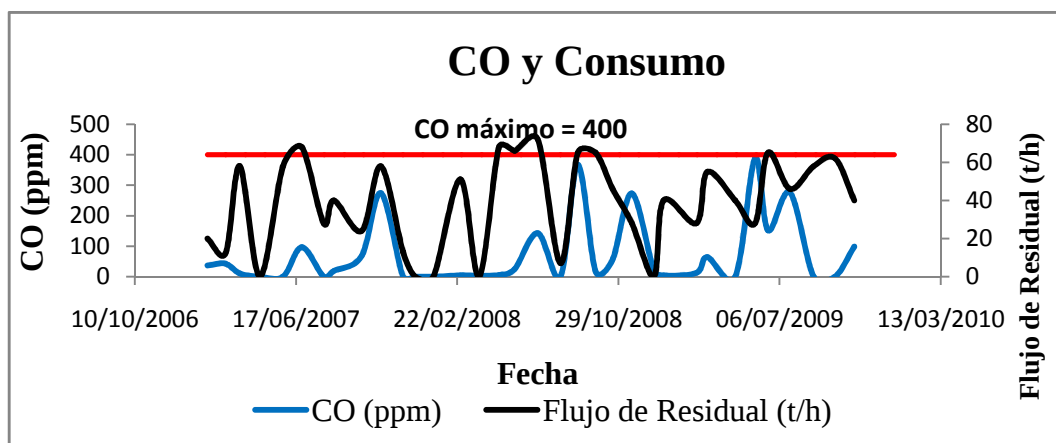


Fig. 4. 12: CO vs Consumo del período 2007 – 2009 de la Unidad 8

Fuente: Elaboración Propia

Unidad 9

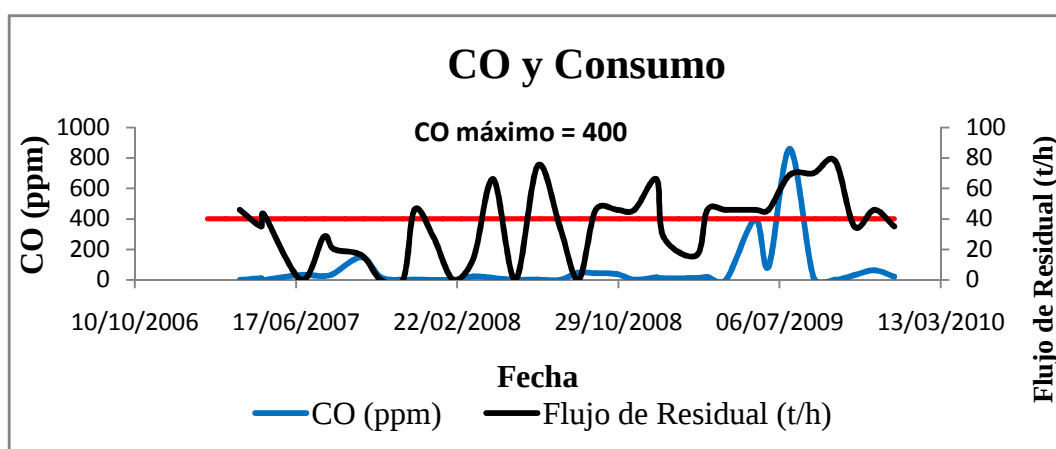


Fig. 4. 13: CO vs Consumo del período 2007 – 2009 de la Unidad 9

Fuente: Elaboración Propia

Observaciones:

- Para las unidades 7 y 9 se pudo observar que existen puntos donde las emisiones de CO sobrepasan el límite establecido por las norma 638.

- En los gráficos se puede observar que no existe una clara dependencia entre el consumo de Residual N° 6 y la formación de CO.
 - La presencia de CO es consecuencia de una combustión incompleta.
- **Anhídrido sulfuroso(SO₂):**

Unidad 7

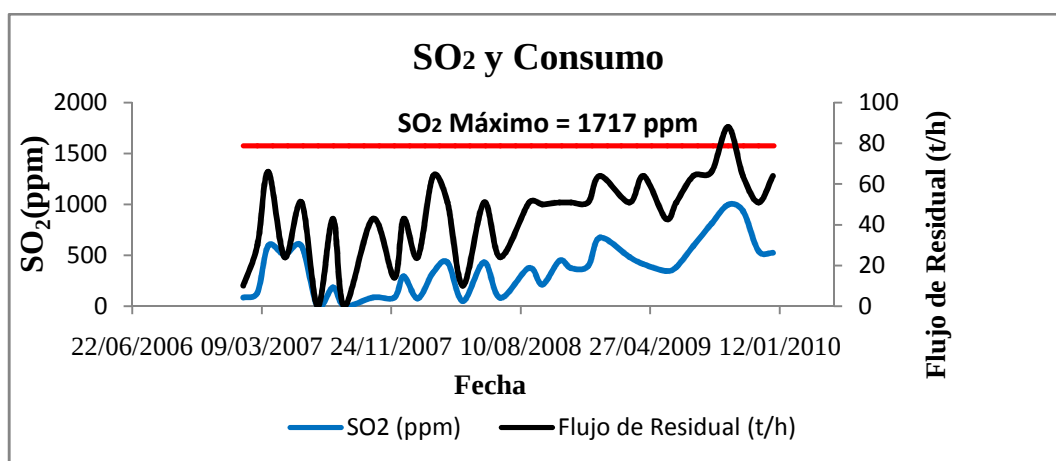


Fig. 4. 14: SO₂ vs Consumo del período 2007 – 2009 de la Unidad 7

Fuente: Elaborado por los Autores

Unidad 8

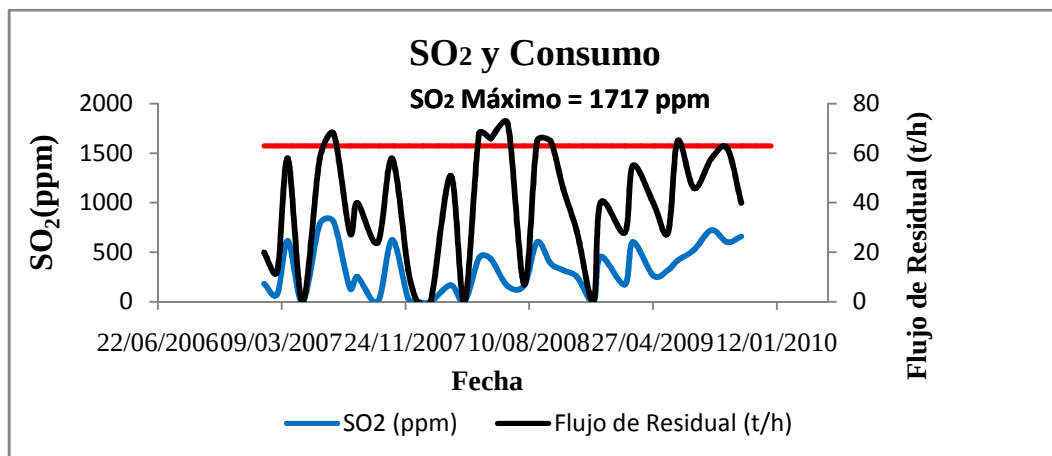


Fig. 4. 15: SO₂ vs Consumo del período 2007 – 2009 de la Unidad 8
Fuente: Elaborado por los Autores

Unidad 9

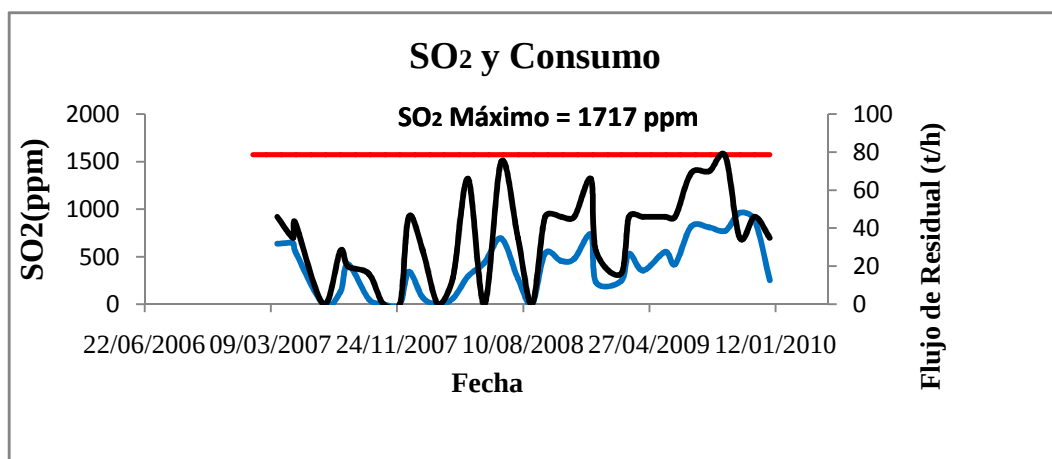


Fig. 4. 16: SO₂ vs Consumo del período 2007 – 2009 de la Unidad 9
Fuente: Elaborado por los Autores

Observaciones:

- Se puede verificar que las emisiones de SO₂ cumple en las tres unidades con el decreto 638.

- Se puede observar que existe cierta relación entre la formación de SO_2 y el consumo de Residual N° 6, esto se debe al alto contenido de azufre que tiene este combustible en su composición química.

CAPÍTULO V**CAUSAS Y EFECTOS DEL RESIDUAL N° 6 EN EL FUNCIONAMIENTO
DE LOS EQUIPOS Y EN LAS EMISIONES DE LOS GENERADORES DE
VAPOR**

Según rb bertomeu, S.L (1997):

La combustión del Residual N° 6 (o cualquier otro combustible) se define como la oxidación rápida de todos y cada uno de los elementos que lo constituyen originándose un desprendimiento de calor. Las reacciones principales que se producen en el quemado de un combustible son:

- $C + O_2 \longrightarrow CO_2 + \text{calor}$
- $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \longrightarrow H_2O + \text{calor}$
- $S + O_2 \longrightarrow SO_2 + \text{calor}$
- $MI + \frac{1}{2} O_2 \longrightarrow M_2O + \text{calor}$ (Ejemplo: Na)
- $MII + O_2 \longrightarrow 2MO + \text{calor}$ (Ejemplo: Ca)
- $MIII + O_2 \longrightarrow M_2O_3 + \text{calor}$ (Ejemplo: Fe, Al)
- $MIV + O_2 \longrightarrow M_2O_5 + \text{calor}$ (Ejemplo: V)

M significa metal de valencia I a V.

Paralelamente a estas reacciones, tienen lugar otras menores relacionadas siempre con las impurezas del Residual N° 6 (Azufre y metales), que en algunos casos están relacionadas con los procesos de corrosión que ocurren en el circuito de gases.

A continuación se citarán aquellas que están directamente ligadas con la aparición de corrosiones:

- $SO_2 + \frac{1}{2} O_2 \longrightarrow SO_3$

- $\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{H}_2\text{SO}_4$
- $\text{SO}_3 + \text{Na}_2\text{O} \longrightarrow \text{Na}_2\text{SO}_4$
- $3\text{V}_2\text{O}_5 + x/2 \text{Na}_2\text{O} \longrightarrow \text{Na}_x\text{V}_x\text{V}_{(6-x)}\text{O}_{15}$ (bannermite)
- $\text{V}_2\text{O}_5 + 2\text{Na}_2\text{O} \longrightarrow \text{Na}_4\text{V}_2\text{O}_7$
- $\text{V}_2\text{O}_5 + 3\text{Na}_2\text{O} \longrightarrow 2\text{Na}_3\text{VO}_4$

Los productos de estas reacciones están constituidos por desperdicios sólidos que se adhieren a las superficies de calefacción, se acumulan en áreas donde los gases pasan a poca velocidad y sobre el equipo que queda en el lado más frío de la caldera, donde la temperatura de los gases se acerca o está por debajo del punto de rocío.

Entre los desperdicios que se forman en la combustión del Residual N° 6 se tiene el hollín, partícula sólida de tamaño muy pequeño en su mayoría compuesta de carbono impuro, pulverizado, y generalmente de colores oscuros más bien negruzcos, formado por vapores de hidrocarburo que no han recibido oxígeno o les faltó la temperatura suficiente para su ignición. Las concentraciones de hollín son higroscópicas y el hollín del Residual N° 6 contiene huellas de SO_2 y SO_3 , sulfatos de sodio y de potasio. Con la humedad estos componentes reaccionan químicamente para formar ácidos sulfúricos y sulfurosos, diluidos pero altamente corrosivos, cuya acción se suma a la de la oxidación normal. La escoria producida por el Residual N° 6 puede contener Pentóxido de Vanadio, el cual atacará y corroerá el acero, inclusive el de alta aleación de Cr.

En el capítulo anterior se determinó a través del estudio de disponibilidad y confiabilidad de las unidades 7, 8 y 9 los principales eventos que afectan el funcionamiento de los equipos del Generador de vapor al aumentar el consumo de Residual N° 6 para la generación de energía eléctrica, dichos eventos y las causas probables que los originan se mencionan a continuación:

Eventos	Causas Probables
Alta presión en el horno	• Taponamiento del Precalentador de aire por acumulación de escoria. • Taponamiento en el sobrecalentador primario por acumulación de escoria.
Limpieza del Horno	• Acumulación de escoria en el horno de a caldera.
Deficiencia en quemadores	• Fallas en los componentes del quemador. • Quemador atascado. • Acumulación de escoria en alguna de las partes.
Lavado de calentadores de aire	• Acumulación de escoria en las superficies de calentamiento. • Alta presión en el horno. • Corrosión.
Puntos calientes en la caldera	• Acumulación de escoria en sobrecalentador, recalentador, paredes y compuerta del horno de la caldera.
Problemas de combustión	• Deficiencia de los quemadores. • Control de la Combustión. • Problemas con el ingreso de aire y combustible.
Falla en el sello central del horno	• Ataque químico por residuos de combustión en el refractario del sello del horno. • Exceso de carga en el sello central por acumulación de escoria.

Tabla 5. 1: Principales eventos que afectan el funcionamiento de los Equipos del Generador de Vapor

Fuente: Elaborado por los Autores

De acuerdo a las causas que originan los eventos mencionados en el cuadro, estas se pueden agrupar en los siguientes sistemas:

- **Sistema Aire-Combustible:** relacionado con todos los equipos y técnicas destinadas a lograr una combustión eficiente, en este caso se incluyen los eventos por deficiencia en quemadores y problemas de combustión.
- **Sistema de Gases de Combustión:** donde se incluyen todos los efectos ocasionados por los gases productos de la combustión durante su trayectoria antes de ingresar al precalentador de aire. En este se incluyen los siguientes eventos: taponamiento de sobrecalentadores, puntos calientes, falla en sello central del horno.
- **Sistema de Aire-Gases:** se refiere a los efectos causados en la zona de transferencia de calor entre los gases de combustión y el aire. En este caso se estudian los eventos ocasionados en los precalentadores de aire.

A continuación se explicaran los efectos del consumo de Residual N° 6 en cada uno de estos sistemas:

5.1 Efectos del Residual N° 6 en el Sistema Aire-Combustible

5.1.1 Quemadores de Residual N° 6

Actualmente en la planta Ampliación Tocoa existe para cada unidad un set de quemadores dispuestos en cuatro niveles diferentes, con un quemador en cada esquina para un total de dieciséis por unidad; poseen un sistema de encendido de ángulo tangencial y están formados por cuatro compartimientos de combustible y ocho compartimientos de aire.

El consumo de combustible de la Caldera es variable y es función directa de la presión de combustible (de 10 a 21 Kg/cm²) y del número de quemadores en servicio (de 1 a 16 quemadores). Para una carga de 100 % (400 MW) el consumo

de combustible alcanza un valor estimado de 102.000 Kg/h para un consumo específico de combustible de 0,26 Kg/kWh aproximadamente.

Los quemadores para Residual N° 6 utilizados son del tipo M-jet removibles de bajo consumo de vapor. Estos quemadores inyectan el combustible al horno de la caldera utilizando atomización con vapor, la cual se realiza por medio de una boquilla y pastillas rociadoras que poseen varios orificios de pequeño diámetro por los cuáles pasa petróleo, mezclándose con el vapor que pasa por otros orificios.

Características	Parámetros Operacionales	Condiciones
Tipo	Atomización con vapor	No Aplica
Presión de Residual N° 6	21 Kg/cm ²	En la entrada del quemador
Viscosidad del Residual N° 6	18 y 24 Centi- Stokes	En la entrada del quemador
Presión del vapor de atomización	10,5 Kg/cm ²	En la entrada del quemador
Proporción del vapor de atomización	2,50 %	
Presión mínima de operación	6 kg/cm ²	

Tabla 5. 2: Características de los Quemadores de la Planta Ampliación Tocoa

Fuente: Manual de Instrucciones. Vol 1. Mistsubishi Heavy Industries, LTD

Tanto las pastillas como boquillas de los quemadores son algunos de los componentes que sufren un deterioro constante y progresivo debido a la acumulación de Residual N° 6 en sus partes, lo cual implica cambios constantes de las mismas para garantizar el buen funcionamiento del quemador. Un parámetro que estimula el deterioro de estos elementos es que sus reemplazos son

fabricados en una empresa nacional sin seguir las condiciones de diseño, ya que se utiliza un material con una composición química diferente al original y una diferencia en la geometría de los ductos de salida del combustible-vapor generando problemas adicionales en la Atomización del Residual N° 6.

A continuación se presentan unas imágenes donde se puede apreciar las diferencias antes expuestas de las boquillas y pastillas:



Fig. 5. 1: Vista principal de la boquilla importada (izquierda) y nacional (derecha)

Fuente: Planta Ampliación Tocoa

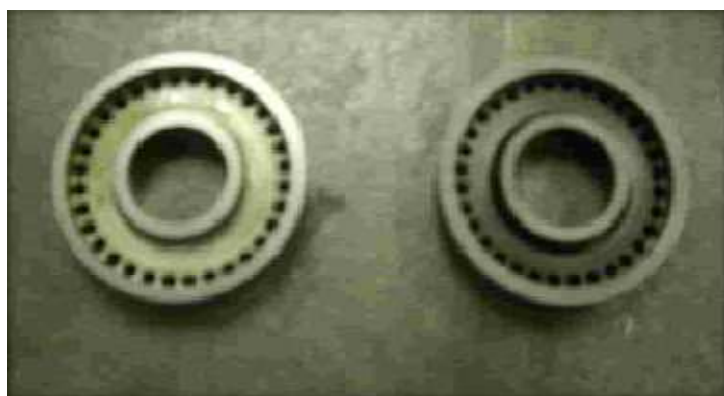


Fig. 5. 2: Vista principal de la pastilla importada (izquierda) y nacional (derecha)

Fuente: Planta Ampliación Tocoa

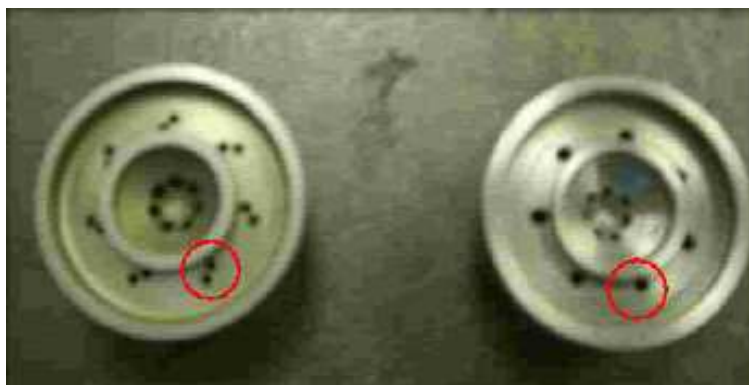


Fig. 5. 3: Vista posterior de la boquilla importada (izquierda) y nacional (derecha).
Fuente: Planta Ampliación Tocoa

5.2 Efectos del Residual N° 6 en el Sistema de Combustión

5.2.1 Horno de la Caldera

La formación de escoria a consecuencia de la combustión del Residual N° 6 tiende adherirse a las paredes de agua del horno formando una costra aislante en la misma y teniendo como efecto una disminución en la transferencia de calor, esto estimula a un mayor consumo de combustible para poder generar las condiciones termodinámicas necesarias del agua, sin embargo como el mayor porcentaje de transferencia de calor en esta zona se debe a la radiación de la combustión este efecto no es tan pronunciado.

Un efecto más preocupante en el horno de la Planta de Ampliación Tocoa es la acumulación de escoria que se presenta en el fondo del recinto a consecuencia de la precipitación de las mismas. En el gráfico a continuación se muestra un esquema de como se genera la acumulación de escoria en el recinto.

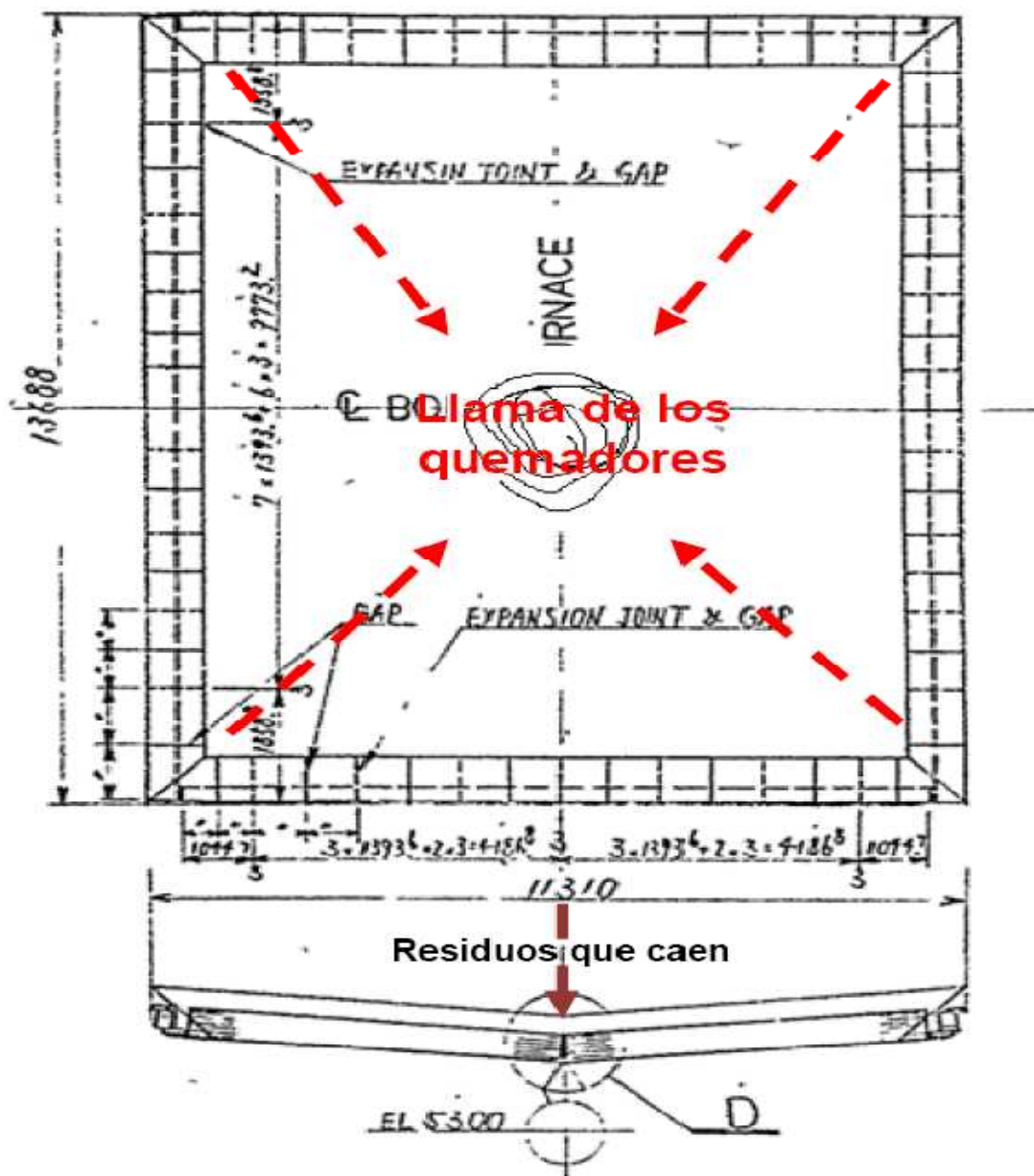


Fig. 5. 4: Esquema del Horno de la Caldera

Fuente: Manual de Mitsubishi

En la siguiente imagen se muestra como es la característica física de la escoria acumulada del horno:

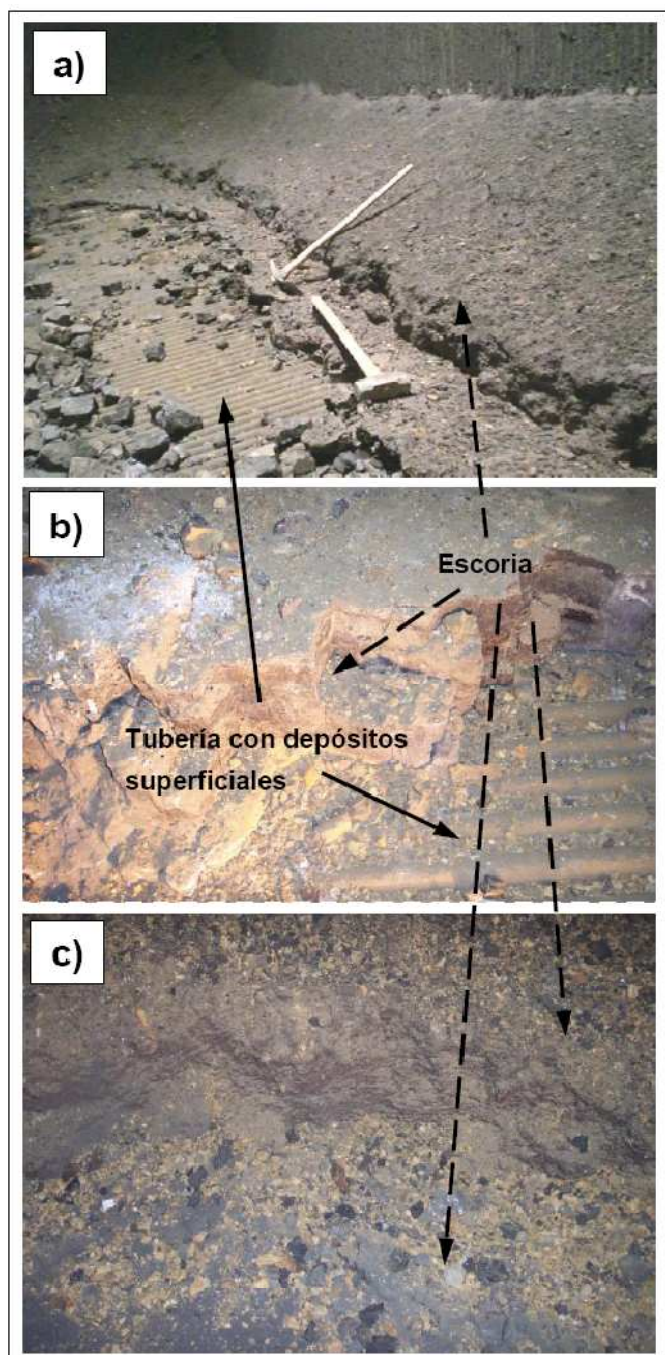


Fig. 5. 5: Características físicas de la acumulación de escoria en el horno
Fuente: Suministrado por la EDC

Esta acumulación de escoria tiende a afectar el sello del horno, el cual está ubicado en el centro del mismo y es fabricado por una mezcla moldeable cerámica

de “alta alúmina y alta pureza” y de bloques (ladrillos) refractarios de alta alúmina. En la siguiente imagen se muestra la apariencia del sello del horno:



Fig. 5. 6: Sello Central del Horno de la Caldera
Fuente: Suministrado por la EDC

Entre los efectos identificados que pueden ocasionar fallas en esta zona del horno se tienen:

a) Exceso de carga en el sello por escoria acumulada.

En el siguiente gráfico se muestra un esquema de la configuración del recinto cuando existe la presencia de escoria y una estimación de la distribución de carga sobre el mismo:

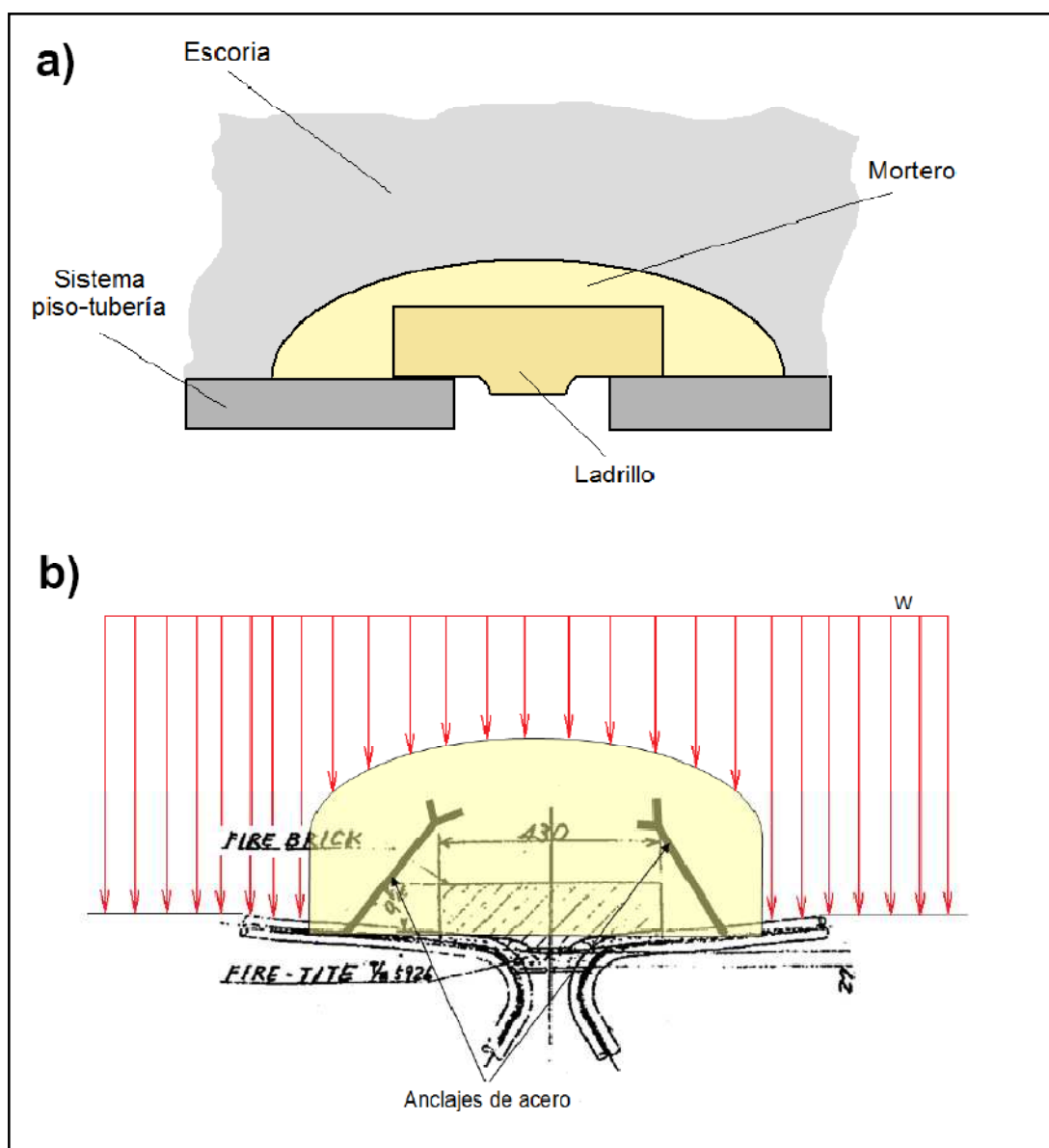


Fig. 5. 7: Distribución de carga en refractario del sello central del horno

Fuente: Suministrado por la EDC

Según los parámetros de diseño establecidos por MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES (1978) el horno puede soportar una carga máxima 120.000kgf, sin embargo por condiciones de desgaste del equipo los operadores de la planta tienen como límite actualmente 90.000kgf. Basándonos en estudios realizados por el personal de la EDC sobre la formación de escoria en el horno de la caldera, se estima que se forma aproximadamente 0,6 Kg. de escoria por cada tonelada de

Residual N° 6 consumido. Tomando como referencia los datos establecidos anteriormente se puede estimar que el consumo máximo del Residual N° 6 para proceder a realizar una parada por remoción de escoria sería:

$$C_m = 90.000 \text{ kg} * \frac{1 \text{ t}}{0,6 \text{ kg}} = 150.000 \text{ t}$$

Donde “Cm” indica el consumo máximo de combustible Residual N° 6 que puede consumir la unidad antes de presentar inconvenientes en el sello del horno. Este dato es de gran importancia debido a que puede ayudar a la planta a estimar un plan de mantenimiento preventivo en función del consumo y así evitar una falla inesperada el cual tiende a ocasionar mayores horas de indisponibilidad por falta de planificación.

b) Ataque químico de la escoria en el sello del horno

La escoria producida por el Residual N° 6 utilizado en la planta presenta en su composición química una notoria presencia de Vanadio (V) y mas en pequeñas proporciones Sodio (Na), el cual durante la combustión se oxidan para formar V_2O_5 (Punto de fusión 675°C) y $NaSO_4$ (Punto de fusión 880°C).

Estos dos compuestos según Giuliano Salvi (1975), representan una gran amenaza para el material refractario ya que reaccionan con la misma modificando sus propiedades. Según la siguiente imagen se puede mostrar el efecto sobre el sello del horno al ser atacado químicamente por estos compuestos:



Fig. 5. 8: Bloque refractario del sello central del horno

Fuente: Suministrado por la EDC

5.2.2 Sobrecalentadores y Recalentadores de vapor

La acumulación de escoria en sobrecalentadores y recalentadores tiene consecuencias negativas muy marcadas en estas zonas, ya que por realizarse la transferencia de calor por convección están en contacto permanente con estas partículas generando así los siguientes efectos:

a) Corrosión en tuberías

Estas zonas por ser de altas temperaturas, la corrosión de los tubos por oxidación de metal es atribuible a los depósitos de escoria de bajo punto de fusión. Es notorio que el Sodio y el Vanadio son los principales responsables de de estas formaciones, el cual a las temperaturas tan elevadas que se producen en la planta se forma SO_2 mas el compuesto $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{V}_2\text{O}_4 \cdot 5\text{V}_2\text{O}_5$ (punto de fusión 625°C) que constituye el principal producto de incrustaciones que se forman en los haces de tubos. En la siguiente imagen se muestra los efectos corrosivos del Residual N° 6 sobre los tubos:



Fig. 5. 9: Corrosión en Tubería
Fuente: Manual de NALCO

b) Disminución del rendimiento energético

Debido a las incrustaciones de escoria en las superficies de los haces de tubos se genera una disminución en el rendimiento de la caldera, puesto que dicha capa superficial disminuye la transferencia de calor entre los gases de combustión y el vapor de agua, teniendo como consecuencia un incremento en el consumo de combustible el cual estimula a la formación de puntos calientes en la caldera por sobrecalentamiento. Según el fabricante de aditivos “Rb Bertomeu, S.L” existen ciertos estudios en la cual se cuantifican dichas pérdidas en función de la costra formada, el cual se exponen en los siguientes datos:

Espesor de costra de Hollín en tubos	Pérdida de calos que se produce	Aumento del consumo de combustible equivalente
0,8mm	12%	2,5%
1,6mm	24%	4,5%
3,2mm	47%	8,5%

Tabla 5. 3 Pérdida de calor por espesor escoria adherida a la tubería
Fuente: Fabricante de aditivos “Rb Bertomeu, S.L”

En la siguiente imagen se muestra como es la formación de residuos de la combustión sobre la superficie de las tuberías:



Tabla 5. 4: Residuos de Combustión en la superficie de tuberías.

Fuente: Planta Ampliación Tocoa

c) Aumento de presión en el horno

Cuando se consume por un período prolongado Residual N° 6 se tiene como consecuencia un aumento de la presión en el horno debido a que existe una gran limitación en el flujo de los gases de combustión por efecto de taponamiento entre los haces de tubos por el alto nivel de escoria acumulado, en la siguiente imagen se muestra dicha formación:



**Tabla 5. 5: Efecto de taponamiento entre los haces de tubos por el alto nivel de escoria
acumulado**

Fuente: Planta Ampliación Tocoa

Para disminuir estos tres efectos causados por la escoria en los sobrecalentadores y recalentadores la planta posee un sistema de limpieza denominados Sopladores de Hollín (soplatiros) de tipo Retráctil, el cual inyectan vapor a una presión de 14 kgf/cm^2 . Sin embargo a medida que los generadores han incrementado el consumo de Residual N° 6 estos equipos han resultado insuficientes para reducir los efectos de dicho combustible, viéndose en la necesidad de realizar paradas de la unidad con el fin de remover la escoria acumulada en esta área.

Es importante resaltar que a pesar de que el Residual N° 6 afecta negativamente las zonas de recalentadores y sobrecalentadores, la mayor causa de fallas en las tuberías que se observan en la Planta Ampliación Tocoa se debe a que existe una gran disminución del espesor de las mismas a consecuencia de estar en la fase terminal de su vida útil, esto lo podemos apreciar en la siguiente imagen:



Fig. 5. 10: Disminución del Espesor de la tubería en sobrecalentadores o recalentadores
Fuente: Planta Ampliación Tocoa

5.3 Efectos del Residual N° 6 en el Sistema Aire-Gases

5.3.1 Precalentador de Aire

De acuerdo con los resultados del estudio de disponibilidad y confiabilidad se encontró que los precalentadores de aire son afectados con el aumento de consumo de Residual N° 6, provocando problemas taponamiento (obstrucción) y corrosión debido al contenido de azufre en el Residual N° 6.

a) Efecto de corrosión

Debido al contenido de azufre del Residual N° 6 los precalentadores de aire están sujetos a corrosión en el lado frío de los elementos de transferencia de calor. Parte del SO_2 producido se convierte en SO_3 y éste se combina con la humedad para formar vapor de H_2SO_4 ; este vapor condensa en las superficies que

tengan temperaturas inferiores a la del punto de rocío, por lo que existe riesgo de corrosión.

b) Taponamiento

El taponamiento incrementa la caída de presión en el Precalentador de Aire provocando problemas de alta presión en el horno y teniendo como consecuencia una limitación de la carga en la unidad generadora de vapor, debido a que se reduce el área de salida del flujo de los gases de combustión, haciéndola funcionar a una carga menor que la nominal cuando los ventiladores alcanzan su máxima capacidad.

Para controlar las situaciones expuestas anteriormente los precalentadores de aire cuentan con un sistema de limpieza denominado Soplador de Hollín de tipo giratorio cuyo movimiento es parecido al de un péndulo, y tiene una boquilla en su extremo por donde sale el vapor a una presión de 10 Kg/cm^2 y rocía toda la superficie de la colmena de la zona fría. Sin embargo por limitaciones del sistema no se logra evitar la acumulación de dicha escoria en el precalentador de aire ya que a partir del inicio de su formación se lleva a cabo durante un proceso irreversible, teniendo como consecuencia el retiro de la unidad del servicio para proceder a un lavado de agua con soda cáustica.



Fig. 5. 11: Superficies de transferencia de calor del Precalentador de Aire afectados por el uso de Residual N° 6 en la combustión
Fuente: Planta Ampliación Tocoa



Fig. 5. 12: Superficies de transferencia de calor del precalentador de aire luego de un lavado con soda cáustica
Fuente: Planta Ampliación Tocoa

En la Planta Ampliación Tocoa con el fin de reducir el impacto del Vanadio en las partes calientes y frías de la caldera al utilizar el Residual N° 6 como combustible se aplica la siguiente técnica:

- Inyección de Aditivo en el Residual N° 6

Esta técnica se utiliza para prevenir corrosión por alta/baja temperatura, la primera para elevar el punto de fusión de los Vanadatos presentes en los productos de la combustión y la segunda para sea mínima la cantidad de azufre sea transformado en anhídrido sulfúrico SO_3 . También se logra facilitar la extracción de las partículas de hollín que se acumulan en el sobrecalentador, recalentador y horno de la caldera. Adicionalmente se busca que facilite la atomización del Residual N° 6 mediante la disminución de la viscosidad y mediante la disminución de la tensión superficial.

El sistema de Aditivo instalado en la Planta Ampliación Tocoa corresponde a una empresa independiente llamada Química Pentol C.A. la cual denota al aditivo como “Pentomag 2000”. Este aditivo es un compuesto químico de óxido de magnesio, mezclado con gasoil.

La relación de inyección actual del aditivo es de 0,9 litros por cada tonelada de Residual N° 6, sin embargo esta relación varía en función del pH obtenido en el análisis de cenizas que desarrolla Química Pentol junto con la EDC. Actualmente se está implementando la dosificación automatizada, la cual consiste en la inyección directa del aditivo de acuerdo con el flujo de petróleo existente a través de un medidor de flujo que emite una señal a la bomba dosificadora para ajustar la inyección del mismo.

5.4 Efectos del Residual N° 6 en las emisiones

El aumento del consumo de Residual N° 6 no solo impacta en los sistemas mencionados anteriormente sino que también a las emisiones de las unidades generadores, con el fin de dar cumplimiento a las normativas establecidas en el decreto 638, se explica el efecto del Residual N° 6 en las siguientes emisiones:

5.4.1 Residual N° 6 en las emisiones de NO_x

La formación de este tipo de emisiones está relacionado principalmente a las altas temperaturas, contenido de nitrógeno en la llama, concentración de oxígeno y tiempo de residencia a altas temperaturas.

En los resultados obtenidos de emisiones para los años 2007, 2008 y 2009 de la planta se puede observar que existe relación con las formación de NO_x y el consumo de Residual N° 6, sin embargo la disposición de los quemadores en el horno es de tipo tangencial generando una reducción del tiempo de residencia del nitrógeno en la llama, teniendo como consecuencia una pequeña disminución en la formación de esta emisión.

5.4.2 Efecto del Residual N° 6 en las emisiones de CO

Según las gráficas obtenidas en el capítulo anterior, podemos estimar que la formación de las emisiones de CO no depende del consumo de Residual N° 6. Ésta es más atribuible a problemas en la eficiencia de la combustión, es decir, a una combustión incompleta ya sea por defecto de aire o por una mala atomización del Residual N° 6.

5.4.3 Efecto del Residual N° 6 en las emisiones de SO₂

En los resultados de emisiones obtenidas para la planta se pudo observar una clara dependencia de este elemento con el consumo de Residual N° 6.

Siguiendo a Salvi (ob. cit.): “En promedio el 95% del azufre contenido en el Residual N°6 se transforma en SO_2 , del 1-3% en SO_3 y el resto se transforma en sulfatos”.

CAPÍTULO VI

IMPACTO EN EL FUNCIONAMIENTO Y EN LAS EMISIONES DE LOS GENERADORES DE VAPOR AL CONSUMIR EXCLUSIVAMENTE RESIDUAL N° 6

6.1 Impacto en la disponibilidad y confiabilidad de los Generadores de Vapor al consumir exclusivamente Residual N° 6

Para evaluar como varía el funcionamiento de los generadores de vapor de la planta al aumentar su consumo de Residual N° 6 se reseña a continuación un modelo matemático, donde a través del análisis de la data de eventos que presentó la planta durante un período de tres años y de los datos de generación, consumo y propiedades del combustible en el mismo período, se identificaron distintos patrones y tendencias que nos permitió estimar el comportamiento del mismo.

Para dicho estudio se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

- En análisis fue diseñado para un período de 8760 h.
- La carga de operación de la unidad es de 400MW.
- Posee la capacidad de operar bajo un sistema Dual de combustible.
- Se tomaron horas de mantenimientos iguales para todos los casos con el fin de visualizar los efectos del aumento consumo de Residual N° 6.
- No se tomaron en cuentas horas de limitación de la unidad para maximizar su generación anual.
- El estudio clasifica las horas de fallas en aquellas que son dependientes o independientes del consumo de combustible.
- Los datos utilizados provienen de un análisis estadístico de un período de 3 años (2007, 2008 y 2009).
- Se consideró un flujo másico constante de los combustibles durante las horas de servicio de la unidad para cada escenario de consumo.

- Se evaluó el comportamiento de las unidades 7, 8 y 9 por separado.
- Se consideran como fallas que dependen del consumo la alta presión en el horno y el exceso de peso por escoria en el mismo.
- Para el estudio estadístico se utilizó Excel como herramienta, donde a través de una distribución de frecuencia se identificó como es la variación de un determinado valor.
- Para el estudio estadístico se utilizó una tolerancia de dos veces la desviación estándar ($\pm 2\sigma$).

6.1.1 Valores necesarios para el estudio

El estudio matemático tiene como propósito identificar la variación en el comportamiento de los generadores de vapor en función del régimen de consumo de Residual N° 6. Para ello es necesario analizar los valores que inciden en el proceso de generación de vapor y de operación:

- **Horas de período (Hp):** es el período del tiempo fijado para el análisis del funcionamiento del G.V, para el caso de modelo se tomó un período equivalente a un año.

$$H_p = 8760 \text{ h}$$

- **Horas de mantenimiento:** indica el tiempo que estuvo la unidad detenida a causa de paradas programada por mantenimiento del generador de vapor, dictaminado por la suma de las horas de mantenimiento mayor más las de mantenimiento menor. Para los efectos del cálculo estas horas serán constantes en todos los escenarios de consumo.

$$H_m = 20 \text{ días} = 480 \text{ h}$$

- **Carga de operación:** es la potencia en que está operando la unidad. Dicho valor contempla el valor de operación máxima que se tiene en la Planta.

P= 400 MW

- **Poder calorífico inferior del Residual N° 6:** este valor fue el resultado de un estudio estadístico de la data del análisis último del Residual N° 6 emitido por PDVSA durante los un período de tres años. Dando como resultado:

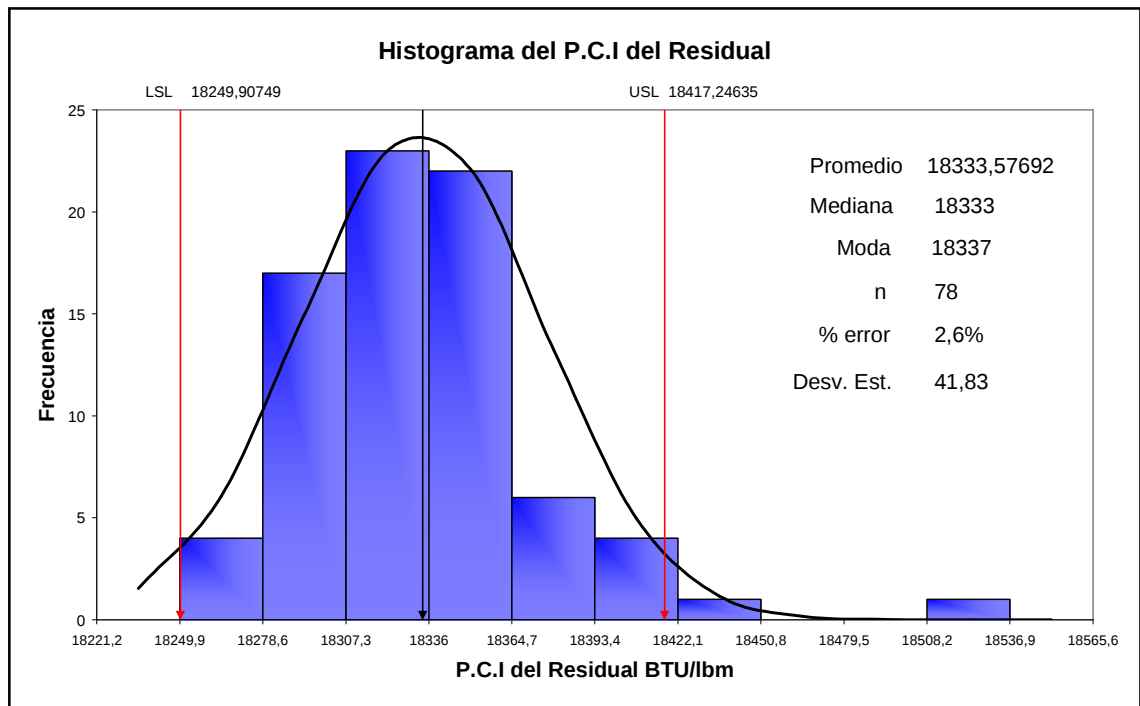


Fig. 6. 1: Histograma del Poder Calorífico Inferior del Residual N° 6
Fuente: Elaborado por los Autores

Se puede observar en el análisis de distribución normal de la data que el error es de 2,6 %, es decir que podríamos tomar como referencia su promedio.

$$\text{P.C.I}_{\text{Residual N° 6}} = 18333, 57 \text{ BTU/ lbm}$$

- **Poder calorífico inferior del Gas Natural:** este valor fue el resultado de un estudio estadístico de la data del análisis último del Gas emitido por PDVSA durante los un período de tres años. Dando como resultado:

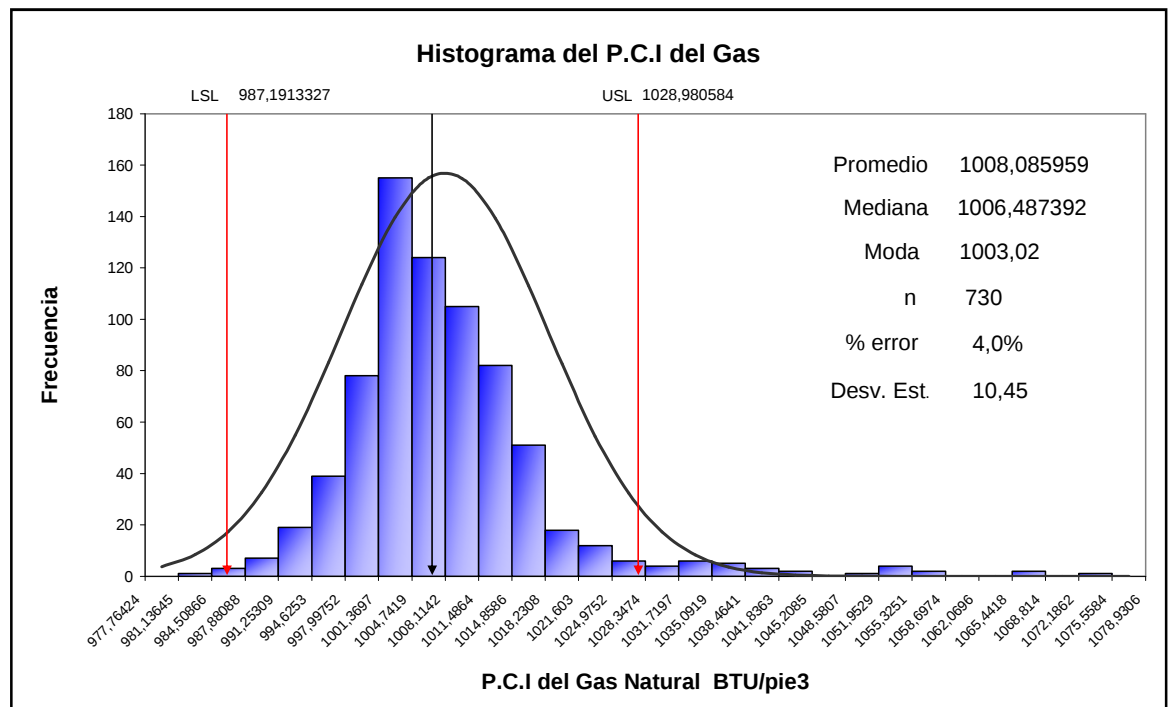


Fig. 6. 2: Poder Calorífico Inferior del Gas Natural
Fuente: Elaborado por los Autores

Se puede observar en el análisis de distribución normal de la data que el error es de 4 %, es decir que podríamos tomar como referencia su promedio.

$$\text{P.C.I}_{\text{Gas}} = 1008,09 \text{ BTU/ pie}^3$$

- **Heat Rate:** Nos indica la cantidad de calor consumido por la unidad por cada kWh generado. Este valor es calculado según la generación diaria de cada unidad durante un período de tres años.

$$\text{HR} = \frac{V_{\text{Gas}} \times \text{P.C.I}_{\text{Gas}} \times 35,314}{E} + \frac{m_{\text{Residual}} \times \text{P.C.I}_{\text{Residual}} \times 2,2046}{E}$$

Donde:

HR [BTU/kWh]

E [kWh]: es la energía bruta generada.

V_{gas} [m^3/h]: volumen de gas consumido.

$\text{P.C.I}_{\text{Gas}}$ [BTU/pie^3]: Poder Calorífico del Gas Natural.

$m_{\text{Residual N}^\circ 6}$ [Kg/h]: Masa de Residual N° 6 consumido.

$\text{P.C.I}_{\text{Residual N}^\circ 6}$ [BTU/lbm]: Poder Calorífico Inferior del Residual N° 6.

2,2046 es el factor de conversión de masa.

35,314 es un factor de conversión de volumen.

Realizando un cálculo tipo tenemos que para el día 02/01/2008 de la unidad “7” los siguientes datos:

$$E = 4.530.000 \text{ kWh}$$

$$V_{\text{gas}} = 1.404.862,03 \text{ pie}^3/\text{h}$$

$$\text{P.C.I}_{\text{Gas}} = 986,57 \text{ BTU}/\text{pie}^3$$

$$m_{\text{Residual N}^\circ 6} = 214.597,32 \text{ Kg}/\text{h}$$

$$\text{P.C.I}_{\text{Residual N}^\circ 6} = 18.329,00 \text{ BTU}/\text{lbm}$$

$$\text{HR} = \frac{(1.404.862,03) \times (986,57) \times 35,314}{4.530.000} + \frac{214.597,32 \times 18.329,00 \times 2,2046}{4.530.000}$$

$$\text{HR} = 10.418,86 \text{ BTU}/\text{kWh}$$

El cálculo del Heat Rate se repite para un período de tres años y tomando en cuenta cada unidad por separado. Con la data obtenida se procede a identificar su variabilidad a través de un histograma de frecuencias por cada unidad.

- Unidad 7

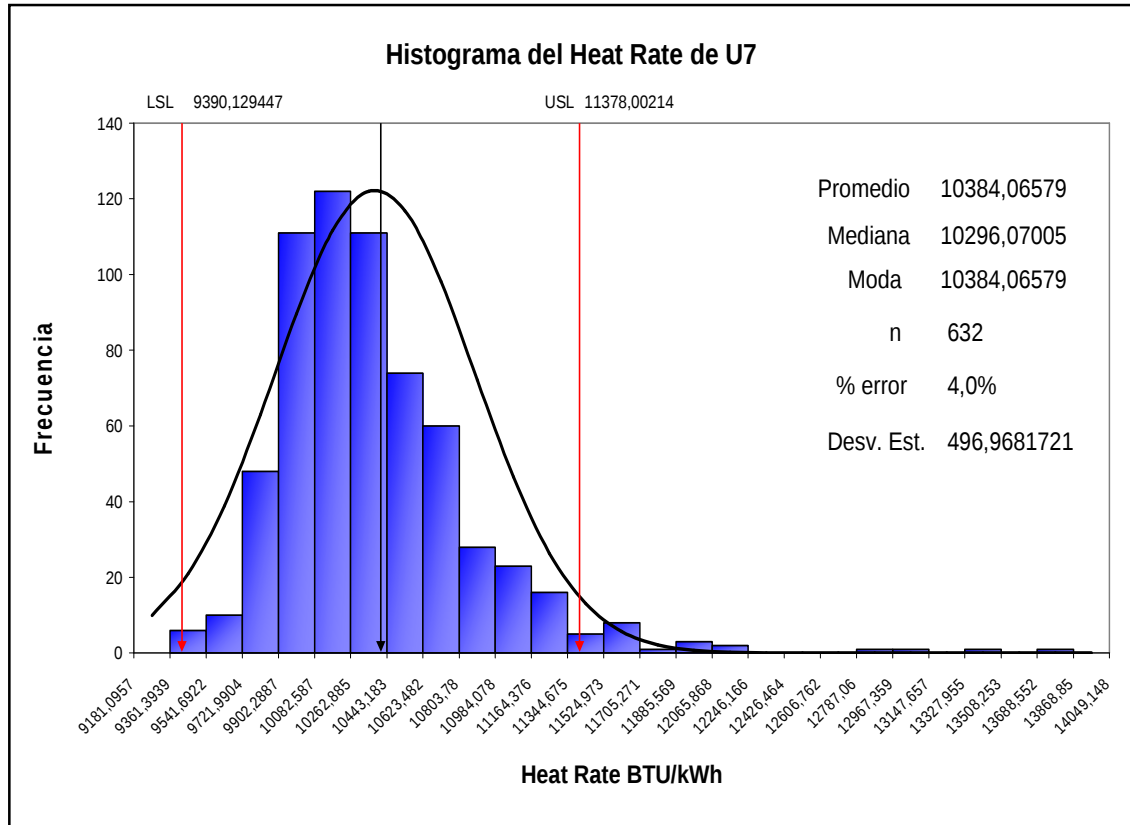


Fig. 6. 3: Histograma de frecuencias para Heat Rate en la unidad 7
Fuente: Elaborado por los Autores

El error es de 4%, lo que indica que el valor promedio es un valor aceptable siendo este $HR_7 = 10384,07 \text{ BTU/kWh}$.

- Unidad 8.

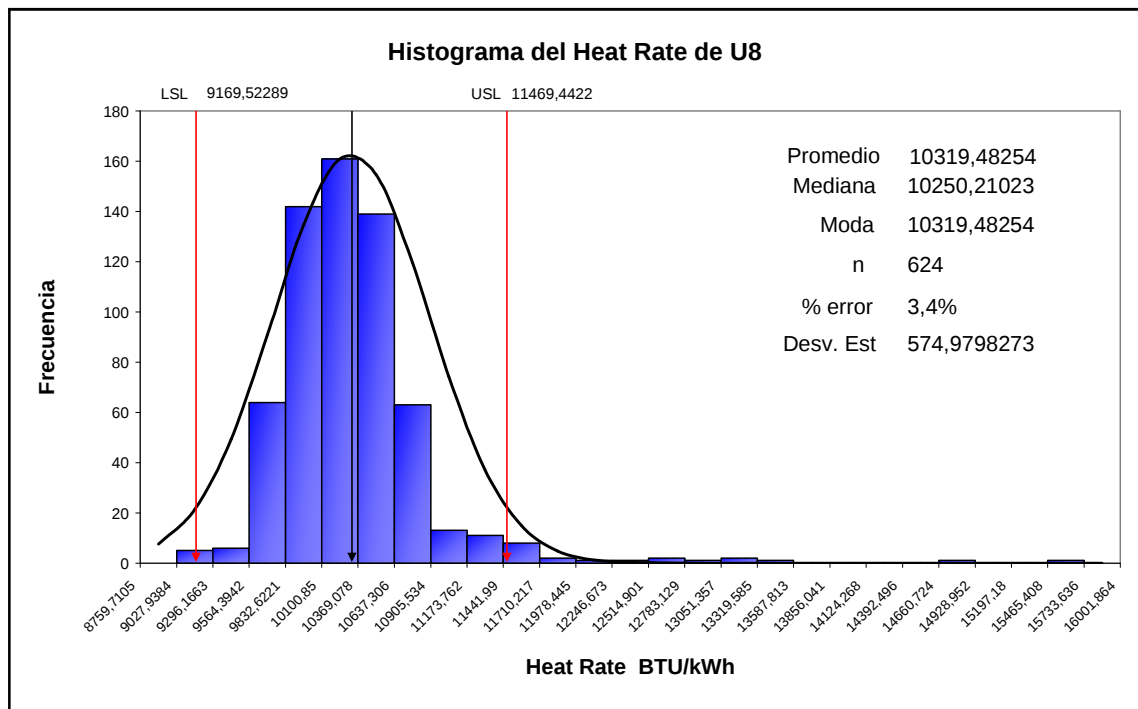


Fig. 6. 4: Histograma del Heat Reat para la Unidad 8
Fuente: Elaborado por los Autores

El error es de 3,4%, lo que indica que el valor promedio es aceptable e igual a $HR_8=10319,48$ BTU/kWh.

- Unidad 9

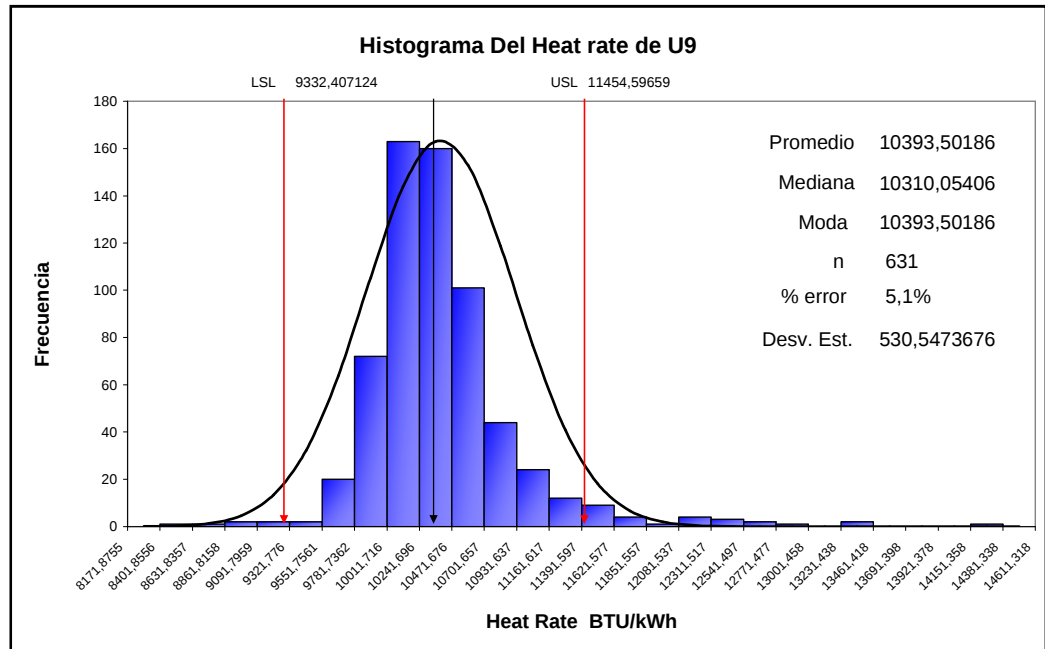


Fig. 6. 5: Histograma del Heat Reat para la Unidad 9
Fuente: Elaborado por los Autores

El error es de 5,1%, lo que indica que el valor promedio es aceptable e igual a $HR_9=10393,50$ BTU/kWh.

- Horas de Fallas en el generador de vapor que no dependen exclusivamente del consumo de Residual N° 6:** para estudiar esta variable solo se toman en cuenta todas aquellas fallas en el Generador de Vapor que no dependen del consumo exclusivo del Residual N°6. Las fallas que se contemplan en esta variable son:

- Bajo nivel de agua en el tambor de la Caldera.
- Controles de Aire de Combustión.
- Tubos rotos, ya que su ruptura se le atribuye a que están en los últimos ciclos de su vida útil.

- Juntas de expansión.
- Puntos calientes.
- Alta temperatura a la entrada del sobrecalentador primario.
- Problemas con válvulas de seguridad de la caldera.
- Fallas por en el Ventilador de tiro Forzado.
- Atemperador de vapor principal.

Para cuantificar ésta variable se suman todas las horas por parada forzada causadas por las fallas mencionadas anteriormente de forma anual 2007, 2008 y 2009. Para los efectos del modelo matemático se utilizó el valor obtenido del promedio de los tres años, dicho valor se tomo constante para cada escenario de consumo. A continuación se muestra por cada unidad las horas de fallas que no dependen del consumo de Residual N° 6:

UNIDAD 7	
Año	Horas por fallas que no dependen del consumo (h)
2007	769,81
2008	513,40
2009	128,08
PROMEDIO	470,43

Tabla 6. 1: Horas por fallas que no dependen del consumo de combustible en la unidad 7
Fuente: Elaborado por los Autores

UNIDAD 8	
Año	Horas por fallas que no dependen del consumo (h)
2007	256,59
2008	365,73
2009	433,62
PROMEDIO	351,98

Tabla 6. 2: Horas por fallas que no dependen del consumo de combustible en la unidad 8
Fuente: Elaborado por los Autores

UNIDAD 9	
Año	Horas por fallas que no dependen del consumo (h)
2007	336,92
2008	624,10
2009	50,62
PROMEDIO	337,21

Tabla 6. 3: Horas por fallas que no dependen del consumo de combustible en la unidad 9

Fuente: Elaborado por los Autores

- **Horas de fallas externas al generador de vapor:** por ser el generador un equipo que pertenece a un ciclo termodinámico, sus horas de operación dependen del buen funcionamiento de los otros elementos del ciclo, por lo tanto cuando los otros equipos fallan le restan horas de servicio al generador de vapor. En este sentido se tomaron las horas de aquellas fallas que son externas al generador de vapor de la lista de eventos de los años 2007, 2008 y 2009 y luego se realizó un promedio para cada unidad, los eventos que se identificaron fueron los siguientes:

- Fallas en la turbina.
- Fallas en las bombas de alimentación.
- Fallas en el sistema de combustible.
- Fallas en el sistema interconectado.
- Fallas en el condensador.
- Tratamientos de agua.

Para el efecto del modelo matemático se utilizó el valor promedio de cada año del período estudiado y se consideró constante para cada escenario de consumo. A continuación se muestran estos resultados por cada unidad:

UNIDAD 7	
Año	Horas por fallas externas al Generador de Vapor (h)
2007	80,11
2008	120,86
2009	121,58
PROMEDIO	107,52

Tabla 6. 4: Horas por fallas que externas al generador de vapor en la unidad 7
Fuente: Elaborado por los Autores

UNIDAD 8	
Año	Horas por fallas externas al Generador de Vapor (h)
2007	91,53
2008	178,08
2009	104,79
PROMEDIO	124,80

Tabla 6. 5: Horas por fallas que externas al generador de vapor en la unidad 8
Fuente: Elaborado por los Autores

UNIDAD 9	
Año	Horas por fallas externas al Generador de Vapor (h)
2007	92,13
2008	111,39
2009	131,81
PROMEDIO	111,78

Tabla 6. 6: Horas por fallas que externas al generador de vapor en la unidad 9
Fuente: Elaborado por los Autores

- **Patrón de fallas que dependen exclusivamente del consumo de Residual N° 6:** en dicho estudio se busca estimar un patrón de fallas en función del consumo, el cual fue hallado mediante el análisis de la lista de eventos. Otro dato importante es su tiempo de reparación, el cual fue obtenido mediante la información proporcionada por el equipo de

mantenimiento de los generadores de vapor de la planta. Las fallas que se le atribuyeron al consumo Residual N° 6 según el estudio de los parámetros de funcionamiento en los tres años fueron las siguientes:

- **Alta presión en el horno:** Para el análisis de este patrón se tomó el consumo entre las fechas del lavado de precalentador de Aire y las limitaciones por alta presión en el horno. Dicho análisis solo se le aplicó a una de las unidades y se generalizó para las tres debido a que todos tienen las mismas características de diseño.

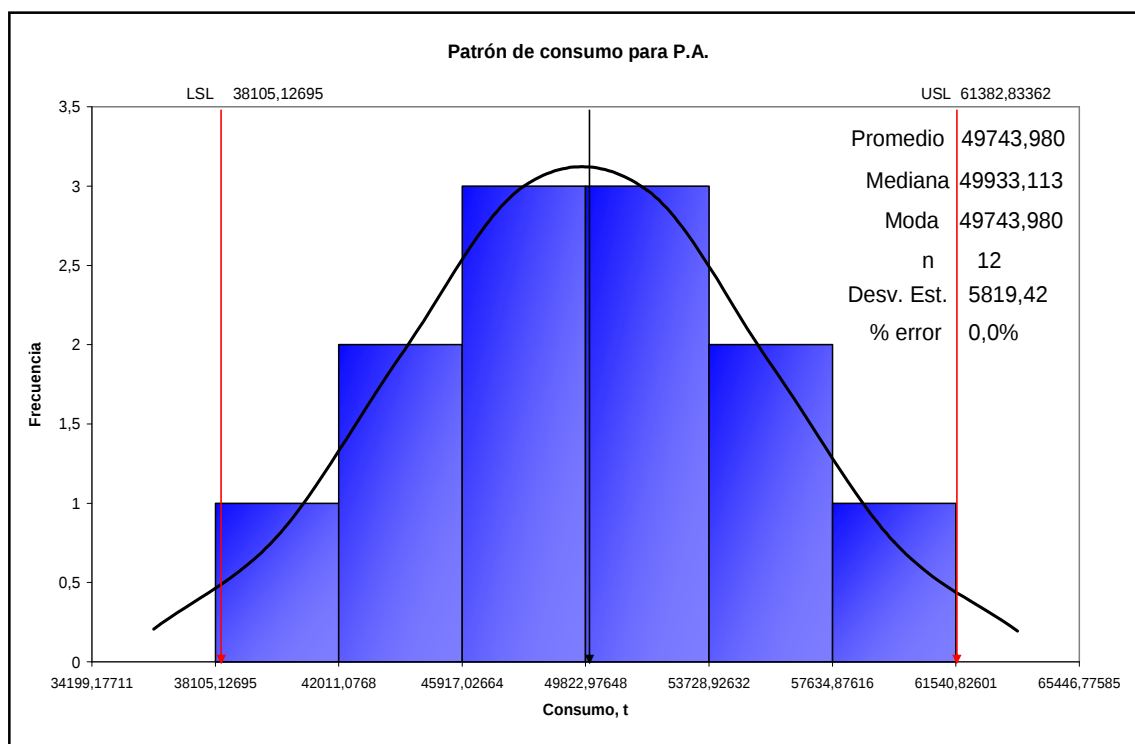


Fig. 6. 6: Histograma del patrón de consumo para el Precalentador de Aire
Fuente: Elaborado por los Autores

Observando que no se presenta error en el histograma para una tolerancia de dos veces la desviación estándar podemos afirmar que es un valor aceptable y que puede ser usado para estimar tiempos de paradas de la unidad dependiendo del consumo de Residual N° 6. El patrón queda estipulado como:

Consumo de Residual N° 6	Horas de reparación de Falla
49.993 t	24 h

Tabla 6. 7: Patrón de Consumo para que se presente problemas de acumulación de escoria en Precalentadores de aire

Fuente: Elaborado por los Autores

- **Exceso de peso en el horno:** en el capítulo anterior se identificó el máximo consumo de Residual N° 6 que debe existir para que se presenten problemas por efectos del peso en el sello del horno.

Consumo de Residual N° 6	Horas de reparación de Falla
150.000 t	288h

Tabla 6. 8: Patrón de Consumo para que se presente problemas de acumulación de escoria en Precalentadores de aire

Fuente: Elaborado por los Autores

6.2 Proyección de Disponibilidad y Confiabilidad para un consumo exclusivo de Residual N° 6

Ya teniendo todos los valores necesarios para el modelo matemático se procede a explicar el procedimiento llevado a cabo para evaluar el funcionamiento.

- **Paso 1:** Hallar ecuación de las horas de operación del generador de vapor.

Esta expresión indicará cuantas horas de consumo de Residual N° 6 sostuvo el generador de vapor durante un año. Para hallar las horas de operación se resta al período establecido de un año todas aquellas horas que interfieren en la operación del generador de vapor, involucrando todas las variables se tiene que:

$$H_{oper} = H_p - H_m - H_{pf}(\dot{m}) - H_{p,e} - H_{pf} \quad (1)$$

Donde:

Hoper: Horas de operación.

Hp: Horas del período.

Hm: horas de mantenimiento.

Hpf: horas de parada forzada del generador de vapor por causas que no dependen del consumo.

Hpf (m): horas de parada forzada del generador de vapor por causas que dependen del consumo de Residual N° 6.

Hpf,e: Horas de parada forzada por causas externas al generador de vapor.

Como Hp, Hm, Hpf, Hf,e se consideran constante para cada unidad las podemos simplificar en la siguiente expresión:

$$k = Hp - Hm - Hpf - Hf,e \quad (2)$$

Sustituyendo (1) en dos se tiene que las horas de operación quedan resumidas en la siguiente expresión:

$$Hoper = k - Hpf(m) \quad (3)$$

- **Paso 2:** Cálculo del flujo másico de Residual N° 6 según el porcentaje de generación.

El valor de flujo másico es de gran importancia ya que este va a definir la frecuencia de aquellas fallas que dependen del consumo de Residual N° 6, es importante recordar que según las premisas establecidas para el estudio matemático, dicho valor se considerará constante durante el período de un año.

$$\dot{m} = \frac{C*HR}{P.C.Iresidual*2,2046} * X\% \quad (4)$$

Donde:

m [t/h]: Flujo másico de Residual N° 6.

C [MW]: Carga de la unidad.

HR [BTU/kWh]: Heat Rate de la unidad.

P.C.I_{Residual N° 6} [BTU/lbm]: poder calorífico del Residual N° 6.

2,2046 es un factor de conversión de lbm a Kg.

X%: es el porcentaje de consumo de Residual N° 6 y va de 0 a 100%.

- **Paso 3:** Se expresa ecuación que represente la frecuencia de fallas que dependan del consumo

Este valor tiene la intención de identificar cuantas paradas en función del consumo de Residual N° 6 se presentan el período. Para ello se calcula en primera instancia cuantas horas de servicio presenta la unidad antes de que se presente cada evento, dichas horas se calculan en las siguientes ecuaciones:

$$Hf_1 = \frac{C_1}{\dot{m}} \quad (5)$$

$$Hf_2 = \frac{C_2}{\dot{m}} \quad (6)$$

Donde:

Hf[h]: Representa las horas de servicio del Generador de Vapor para que se presente la falla.

C[t]: Consumo de cada patrón de falla.

$\dot{m}$ [t/h]: Flujo másico de Residual N° 6.

El subíndice “1” Se refiere al patrón de falla por exceso de peso en el Horno.

El subíndice “2” Se refiere al patrón de falla por Alta presión en el Horno.

Luego se calcula el número de paradas que presenta la unidad respecto cada evento. Es importante resaltar que para efectos de este cálculo se tomo como consideración, que en cada limpieza del horno se presentó simultáneamente una limpieza en el precalentador de aire.

$$N_1 = \frac{H_{oper}}{Hf_1} \quad (7)$$

$$N_2 = \frac{H_{oper}}{Hf_2} - \frac{H_{oper}}{Hf_1} \quad (8)$$

Donde:

N: Representa al número de paradas.

Hoper: Número de horas de operación del generador de vapor.

Hf[h]: Representa las horas de servicio del Generador de Vapor para que se presente la falla.

El subíndice “1” Se refiere al patrón de falla por exceso de peso en el Horno.

El subíndice “2” Se refiere al patrón de falla por Alta presión en el Horno.

- **Paso 4:** Representar las horas de parada forzada por efectos del consumo según la frecuencia de fallas.

Para saber cuántas horas de parada forzada acumula el generador de vapor durante el período, se multiplica la frecuencia de cada falla por las horas de reparación y luego se suman, al realizar el procedimiento tenemos:

$$H_{pf}(m) = N_1 * H_1 + N_2 * H_2 \quad (9)$$

Donde:

N: Número de paradas de la falla.

H (h): Horas de reparación de la falla.

- **Paso 5:** Despeje de las horas de operación según datos conocidos.

Al sustituir Ec. (9) en Ec. (3), no queda:

$$H_{oper} = k - (N_1 \times H_1 + N_2 \times H_2) \quad (10)$$

Luego se procede a sustituir Ec. 7 y 8 en 10:

$$H_{oper} = k - \left[\left(\frac{H_{oper}}{Hf_1} \right) \times H_1 + \left(\frac{H_{oper}}{Hf_2} - \frac{H_{oper}}{Hf_1} \right) \times H_2 \right] \quad (11)$$

Al despejar las horas de operación nos queda:

$$H_{oper} = \frac{k}{1 + \left(\frac{H_1}{Hf_1} + \frac{H_2}{Hf_2} - \frac{H_2}{Hf_1} \right)} \quad (12)$$

- **Paso 6:** Cálculo de la frecuencia de paradas considerándola como número enteros.

Obteniendo las horas de operación a través de la Ec. 12, se cálculo otra vez el número de paradas por cada falla que tendrá la unidad durante el período de 1 año tomando en cuenta de que deben ser número enteros.

$$N_1 = \text{ENTERO} \left(\frac{H_{oper}}{Hf_1} \right) \quad (13)$$

$$N_2 = \text{ENTERO} \left(\frac{H_{oper}}{Hf_2} \right) - N_1 \quad (14)$$

6.2.1 Cálculo tipo de frecuencia de parada según el consumo

Tomando como referencia la unidad 7 tenemos los siguientes datos:

$H_p = 8760 \text{ h.}$

$H_m = 480 \text{ h.}$

$H_{pf} = 470, 43 \text{ h.}$

$H_{pf,e} = 107,52 \text{ h.}$

$C = 400 \text{ MW}$

$HR_7 = 10384,07 \text{ BTU/kWh}$

$P.C.I_{Residual \text{ N}^\circ 6} = 18333, 57 \text{ BTU/ lbm}$

$$X\% = 60\%$$

$$C_1 = 150.000 \text{ t.}$$

$$C_2 = 49.993 \text{ t}$$

$$H_1 = 288 \text{ h}$$

$$H_2 = 24 \text{ h}$$

- **Paso 1:**

$$k = 8760 - 480 - 470,43 - 107,52 = 7702,06 \text{ h} \quad (2)$$

$$H_{\text{oper}} = 7702,06 - H_{\text{PF}} (\text{m}) \quad (3)$$

- **Paso 2:**

$$\dot{m} = \frac{400 * 10384,1}{18333,57 * 2,2046} * 60\%$$

$$\dot{m} = 61,66 \text{ t/h} \quad (4)$$

- **Paso 3:**

$$H_{f_1} = \frac{150000}{61,66} = 24331 \text{ h} \quad (5)$$

$$H_{f_2} = \frac{49993}{61,66} = 810,8 \text{ h} \quad (6)$$

$$N_1 = \frac{H_{\text{oper}}}{24331} \quad (7)$$

$$N_2 = \frac{H_{\text{oper}}}{8108} - \frac{H_{\text{oper}}}{24331}$$

(8)

- **Paso 4, 5 y 6**

Al sustituir los valores de H_1 y H_2 nos queda:

$$H_{oper} = \frac{7702,0557}{1 + \left(\frac{288}{2433,1} + \frac{24}{810,8} - \frac{24}{2433,1} \right)} = 6767,44h \quad (12)$$

$$N_1 = \text{ENTERO} \left(\frac{6767,4448}{2433,1} \right) = \text{ENTERO}(2,78) = 2 \text{paradas} \quad (13)$$

$$N_2 = \text{ENTERO} \left(\frac{6767,4448}{810,8} \right) - 2 = \text{ENTERO}(8,35) - 2 = 8 - 2 = 6 \text{paradas} \quad (14)$$

Al extender el cálculo para las unidades 7, 8 y 9 para todos los escenarios de consumo nos queda:

- Unidad 7:

% Residual N° 6	N_1	N_2
0	-	-
10	-	1,00
20	1,00	2,00
30	1,00	3,00
40	1,00	4,00
50	2,00	5,00
60	2,00	6,00
70	3,00	6,00
80	3,00	7,00
90	3,00	8,00
100	4,00	8,00

Tabla 6. 9: N° de paradas por exceso de peso en el horno (N_1) y alta presión en el horno (N_2) en función del incremento del % de Residual N° 6 en la Unidad 7

Fuente: Elaborado por los Autores

- Unidad 8

% Residual N° 6	N ₁	N ₂
0	-	-
10	-	1,00
20	1,00	2,00
30	1,00	3,00
40	1,00	4,00
50	2,00	5,00
60	2,00	6,00
70	3,00	6,00
80	3,00	7,00
90	3,00	8,00
100	4,00	8,00

Tabla 6. 10: N° de paradas por exceso de peso en el horno (N₁) y alta presión en el horno (N₂) en función del incremento del % de Residual N° 6 en la Unidad 8

- Unidad 9:

% Residual N° 6	N ₁	N ₂
0	-	-
10	-	1,00
20	1,00	2,00
30	1,00	3,00
40	1,00	4,00
50	2,00	5,0
60	2,00	6,00
70	3,00	6,00
80	3,00	7,00
90	3,00	8,00

100	4,00	9,00
-----	------	------

Tabla 6. 11: N° de paradas por exceso de peso en el horno (N₁) y alta presión en el horno (N₂) en función del incremento del % de Residual N° 6 en la Unidad 9

Fuente: Elaborado por los Autores

6.3 Cálculo de Disponibilidad

Para dicho cálculo seguimos el siguiente procedimiento:

- **Paso 1:** Cálculo de las horas de parada forzada por causas del consumo de Residual N° 6.

Para calcular dichas horas se toma sustituyen valores en la Ec. 9:

$$H_{pf} (\dot{m}) = N_1 \times H_1 + N_2 \times H_2 \quad (9)$$

- **Paso 2:** Cálculo de horas de servicio del Generador de Vapor.

$$H_{serv} = H_p - H_m - H_{pf} - H_{pf} (\dot{m}) \quad (15)$$

- **Paso 3:** Cálculo de Disponibilidad (D)

$$D(\%) = \frac{H_{serv}}{H_p} * 100 \quad (16)$$

6.3.1 Cálculo Tipo de Disponibilidad

A continuación se muestra un ejemplo cálculo tipo de disponibilidad tomando como referencia los datos utilizados para el cálculo de frecuencia de paradas, de donde se obtiene que para un régimen de consumo de un 60% en la unidad 7 la disponibilidad sería:

- **Paso 1:**

$$H_{pf} (\dot{m}) = 2 \times 288 + 6 \times 24 = 720 \text{ h} \quad (9)$$

- **Paso 2:**

$$H_{serv} = 8760 - 480 - 470,4285 - 720 = 7089,57h \quad (15)$$

- **Paso 3**

$$D = \frac{7089,5715}{8760} * 100 \% = 80,93 \% \quad (16)$$

- **Unidad 7**

%Residual N° 6	$\dot{m}$ [t/h]	$H_{pf} (\dot{m})$ [h]	Hserv.[h]	Disponibilidad[%]
0	-	7809,57	89,15	89,15
10	10,20	7785,57	88,88	88,87
20	20,40	7473,57	85,31	85,31
30	30,60	7449,57	85,04	85,04
40	40,80	7425,57	84,76	84,77
50	51,00	7113,57	81,21	81,21
60	61,20	7089,57	80,93	80,93
70	71,40	6801,57	77,64	77,64
80	81,60	6777,57	77,37	77,37
90	91,80	6753,57	77,09	77,09
100	102,00	6465,57	73,81	73,81

Tabla 6. 12: Disponibilidad en función del incremento del porcentaje de consumo de Residual N° 6 Unidad 7

Fuente: Elaborado por los Autores

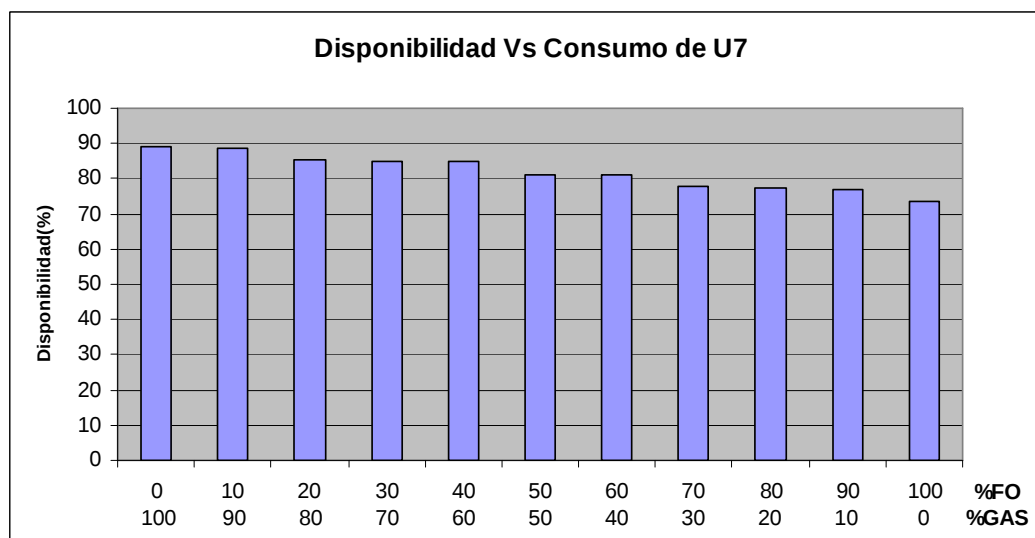


Fig. 6. 7: Disponibilidad para un consumo exclusivo de Residual N° 6 en la Unidad 7

Fuente: Elaborado por los Autores

- Unidad 8**

%Residual N° 6	$\dot{m}$ [t/h]	$H_{pf} (\dot{m})$ [h]	Hserv.[h]	Disponibilidad[%]
0	-	0	7928,02	90,50
10	10,20	24	7904,02	90,23
20	20,40	336	7592,02	86,67
30	30,60	360	7568,02	86,40
40	40,80	384	7544,02	86,12
50	51,00	696	7232,02	82,56
60	61,20	720	7208,02	82,28
70	71,40	1008	6920,02	79,00
80	81,60	1032	6896,02	78,72
90	91,80	1056	6872,02	78,45
100	102,00	1344	6584,02	75,16

Tabla 6. 13: Disponibilidad en función del incremento del porcentaje de consumo de Residual N° 6 Unidad 8

Fuente: Elaborado por los Autores

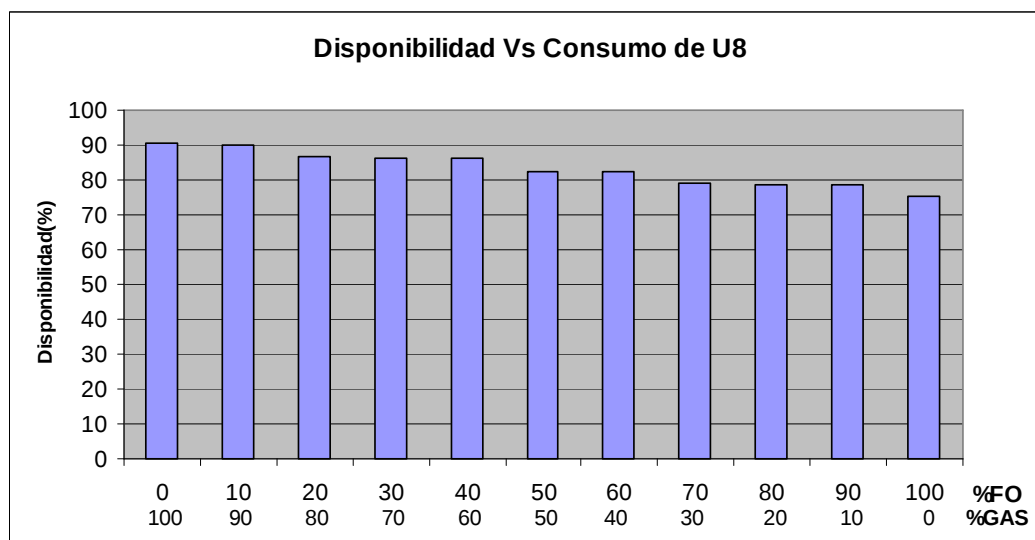


Fig. 6. 8: Disponibilidad para un consumo exclusivo de Residual N° 6 en la Unidad 8

Fuente: Elaborado por los Autores

- Unidad 9**

%Residual N° 6	$\dot{m}$ [t/h]	$H_{pf} (\dot{m})$ [h]	Hserv.[h]	Disponibilidad[%]
0	-	0	7942,79	90,67
10	10,20	24	7918,79	90,39
20	20,40	336	7606,79	86,84
30	30,60	360	7582,79	86,56
40	40,80	384	7558,79	86,29
50	51,00	696	7246,79	82,73
60	61,20	720	7222,79	82,45
70	71,40	1008	6934,7893	79,16
80	81,60	1032	6910,7893	78,89
90	91,80	1056	6886,7893	78,62
100	102,00	1368	6574,7893	75,05

Tabla 6. 14: Disponibilidad en función del incremento del porcentaje de consumo de Residual N° 6 Unidad 9

Fuente: Elaborado por los Autores

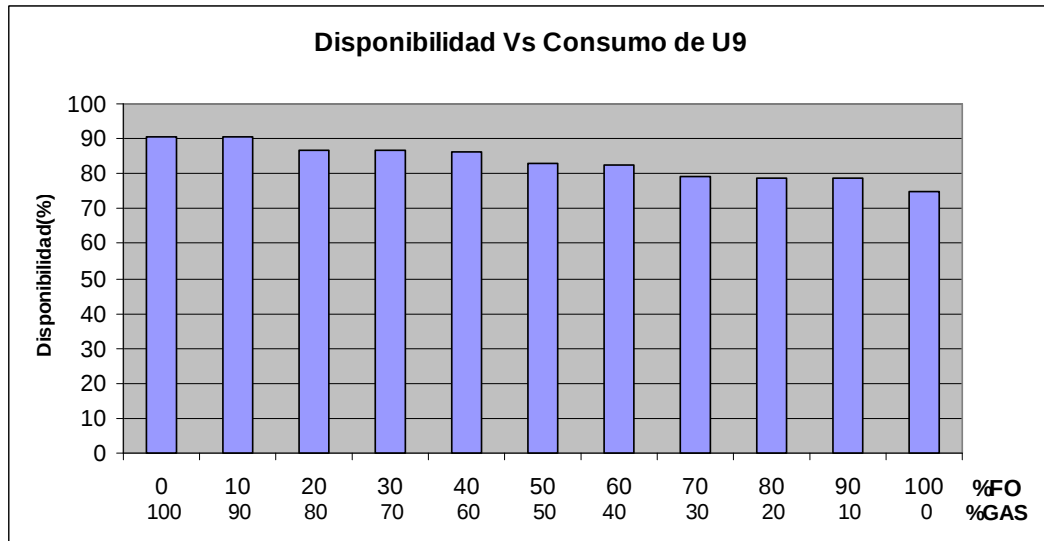


Fig. 6. 9: Disponibilidad para un consumo exclusivo de Residual N° 6 en la Unidad 9
Fuente: Elaborado por los Autores

6.4 Cálculo de Confiabilidad

Para calcular la confiabilidad es necesario seguir a continuación los siguientes pasos:

- **Paso 1:** Cálculo de las horas de parada forzada por causas del consumo.

Para calcular dichas horas se toma sustituyen valores en la Ec. 9:

$$H_{pf}(\dot{m}) = N_1 \times H_1 + N_2 \times H_2 \quad (9)$$

- **Paso 2:** Cálculo de horas de servicio del Generador de Vapor.

$$H_{serv} = H_p - H_m - H_{pf} - H_{pf}(\dot{m}) \quad (15)$$

- **Paso 3:** Cálculo del índice de parada forzada EFOR

$$EFOR = \frac{H_{pf} + H_{pf}(\dot{m})}{H_{serv} + (H_{pf} + H_{pf}(\dot{m}))} \quad (17)$$

- **Paso 4:** Cálculo de la confiabilidad

$$C = (1 - EFOR) * 100 \% \quad (18)$$

6.4.1 Cálculo tipo de Confiabilidad

A continuación se presenta un cálculo tipo de Confiabilidad donde se tomo como referencia los datos utilizados para el cálculo de frecuencia de paradas, y para un régimen de consumo de un 60% en la unidad 7 la confiabilidad será:

- **Paso 1:**

$$H_{pf} (\dot{m}) = 2 \times 288 + 6 \times 24 = 720 \text{ h} \quad (9)$$

- **Paso 2:**

$$H_{serv} = 8760 - 480 - 470,4285 - 720 = 7089,57 \text{ h} \quad (15)$$

- **Paso 3:**

$$EFOR = \frac{470,43 + 720}{7089 + (470,4285 + 720)} = 0,14 \quad (17)$$

- **Paso 4:** Cálculo de la confiabilidad

$$C = (1 - 0,1438) * 100 \% = 85,62 \quad (18)$$

Este cálculo se hizo extensivo en las tres unidades cuyos resultados numéricos y gráficos se muestran a continuación:

• Unidad 7

%Residual N° 6	$\dot{m}$ [t/h]	$H_{pf}(\dot{m})$ [h]	Hserv.[h]	Disponibilidad[%]
0	-	0	7809,57	94,32
10	10,20	24	7785,57	94,03
20	20,40	336	7473,57	90,26
30	30,60	360	7449,57	89,97
40	40,80	384	7425,57	89,68
50	51,00	696	7113,57	85,91
60	61,20	720	7089,57	85,62
70	71,40	1008	6801,57	82,15
80	81,60	1032	6777,57	81,85
90	91,80	1056	6753,57	81,57
100	102,00	1344	6465,57	78,09

Tabla 6. 15: Confiabilidad en función del incremento del porcentaje de consumo de Residual N° 6 Unidad 7

Fuente: Elaborado por los Autores

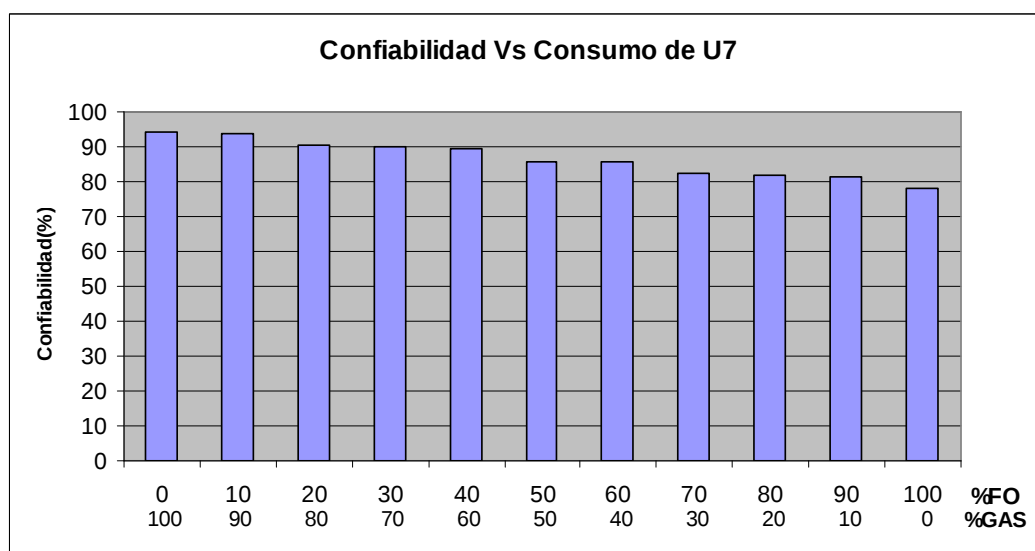


Fig. 6. 10: Confiabilidad para un consumo exclusivo de Residual N° 6 en la Unidad 7

Fuente: Elaborado por los Autores

• **Unidad 8**

%Residual N° 6	$\dot{m}$ [t/h]	$H_{pf} (\dot{m})$ [h]	Hserv.[h]	Disponibilidad[%]
0	-	0	7928,02	95,75
10	10,20	24	7904,02	95,46
20	20,40	336	7592,02	91,69
30	30,60	360	7568,02	91,40
40	40,80	384	7544,02	91,11
50	51,00	696	7232,02	87,34
60	61,20	720	7208,02	87,05
70	71,40	1008	6920,02	83,58
80	81,60	1032	6896,02	83,29
90	91,80	1056	6872,02	82,99
100	102,00	1344	6584,02	79,51

Tabla 6. 16: Confiabilidad en función del incremento del porcentaje de consumo de Residual
N° 6 Unidad 8

Fuente: Elaborado por los Autores

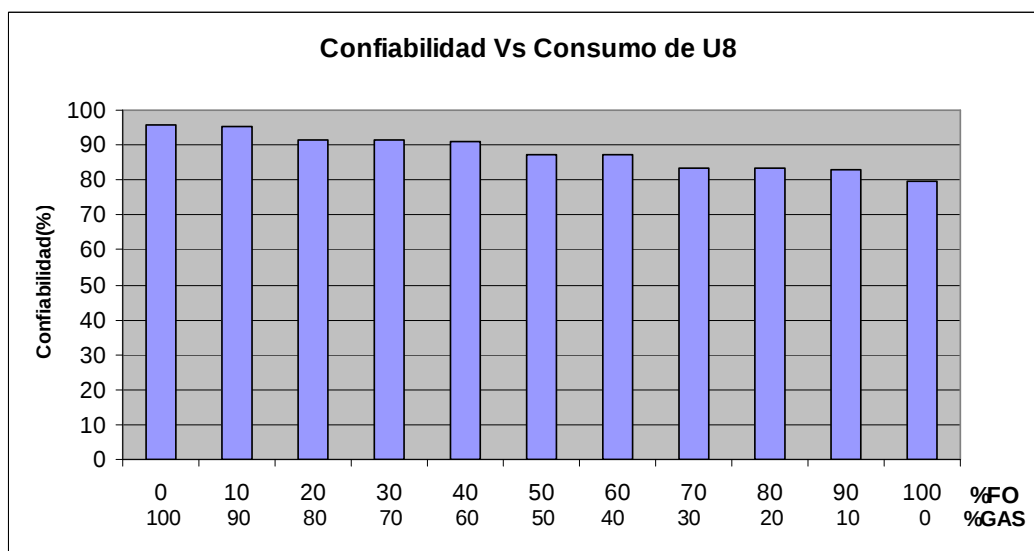


Fig. 6. 11: Confiabilidad para un consumo exclusivo de Residual N° 6 en la Unidad 8

Fuente: Elaborado por los Autores

• Unidad 9

%Residual N° 6	$\dot{m}$ [t/h]	$H_{pf} (\dot{m})$ [h]	Hserv.[h]	Disponibilidad[%]
0	-	0	7942,79	95,93
10	10,20	24	7918,79	95,64
20	20,40	336	7606,79	91,87
30	30,60	360	7582,79	91,58
40	40,80	384	7558,79	91,29
50	51,00	696	7246,79	87,52
60	61,20	720	7222,79	87,23
70	71,40	1008	6934,79	83,75
80	81,60	1032	6910,79	83,46
90	91,80	1056	6886,79	83,17
100	102,00	1368	6574,79	79,41

Tabla 6. 17: Confiabilidad en función del incremento del porcentaje de consumo de Residual N° 6 Unidad 9

Fuente: Elaborado por los Autores

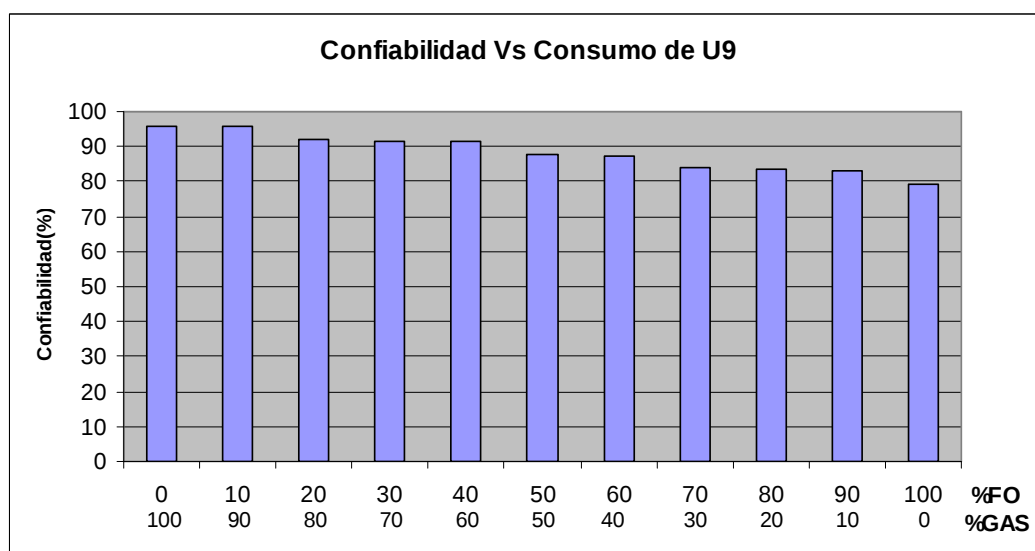


Fig. 6. 12: Confiabilidad para un consumo exclusivo de Residual N° 6 en la Unidad 9

Fuente: Elaborado por los Autores

6.5 Impacto en las emisiones al consumir exclusivamente Residual N° 6

Para evaluar como varía las emisiones de los G.V de la planta al aumentar su consumo de Residual N° 6, se realizó un análisis estadístico donde evaluó la correlación que tienen las emisiones respecto al consumo de dicho combustible para luego ser proyectada al 100% de consumo de Residual N° 6.

Para dicho estudio se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

- La carga de operación de la unidad es de 400MW.
- La Data contempla un consumo Dual de combustible.
- Los datos utilizados provienen de un análisis estadístico de un período de 3 años (2007, 2008 y 2009).
- El comportamiento del valor de emisiones en las tres unidades es muy similar, por ello se hizo el estudio para una sola unidad.
- Para el estudio estadístico se utilizó Excel como herramienta, donde a través de la herramienta gráfica nos calculó la correlación existente entre las emisiones y el consumo de Residual N° 6.
- Para las proyecciones se consideró el máximo flujo de Residual N° 6 que puede haber en los G.V (102 t/h) y los límites de emisión establecidos en la normativa ambiental venezolana específicamente en el decreto 638.

A continuación se muestran los resultados gráficos de los valores de emisiones de NO_x, SO₂ y CO respecto al incremento del flujo de Residual N° 6:

• Emisiones de NOx

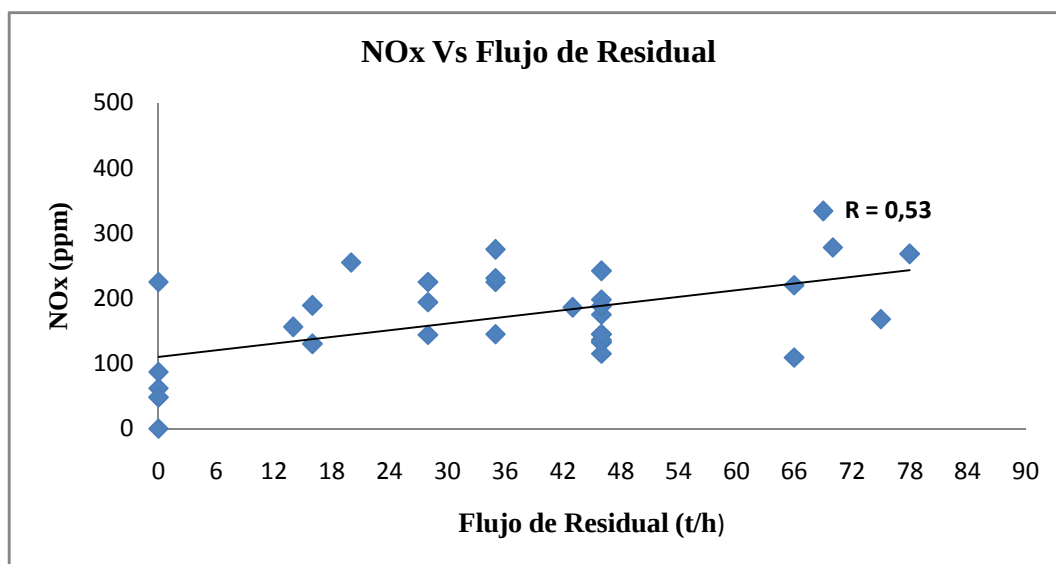


Fig. 6. 13: Emisiones de NOx en función del incremento del flujo de Residual N° 6
Fuente: Elaborado por los Autores

En el gráfico anterior se muestra que el factor de correlación es de 0,53, el cual es aceptable para una data real y se puede considerar que los valores de NOx crecen con el incremento de consumo del Residual N° 6, sin embargo es importante mencionar que debido a que la formación de NOx depende de otros factores como: exceso de aire, altas temperaturas y tiempo de permanencia del nitrógeno en las zonas de alta temperatura.

- **Emisiones de SO₂**

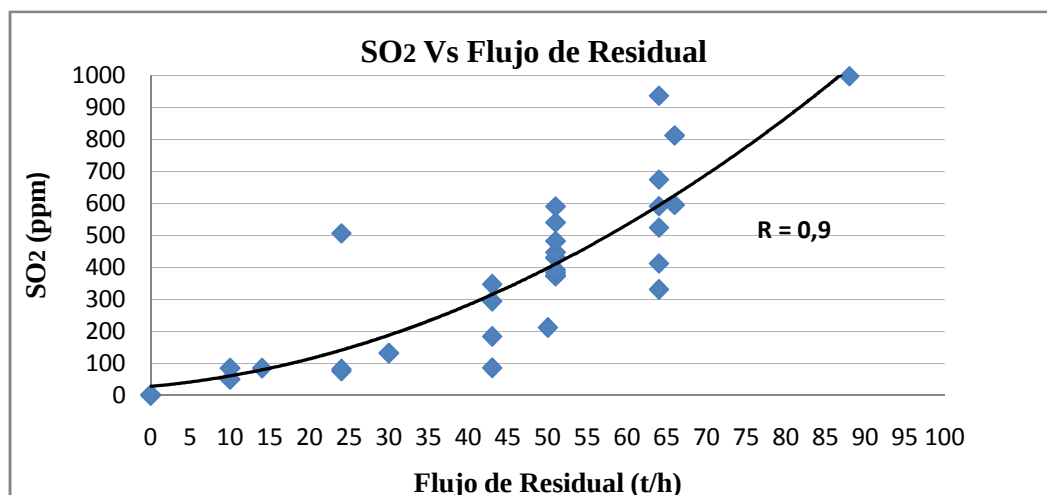


Fig. 6. 14: Emisiones de SO₂ en función del incremento del flujo de Residual N° 6
Fuente: Elaborado por los Autores

En este gráfico la tendencia de la curva y el factor de correlación expresan la dependencia del incremento de las emisiones de SO₂ al aumentar el consumo de Residual N° 6 debido al contenido de azufre que este posee.

- **Emisiones de CO**

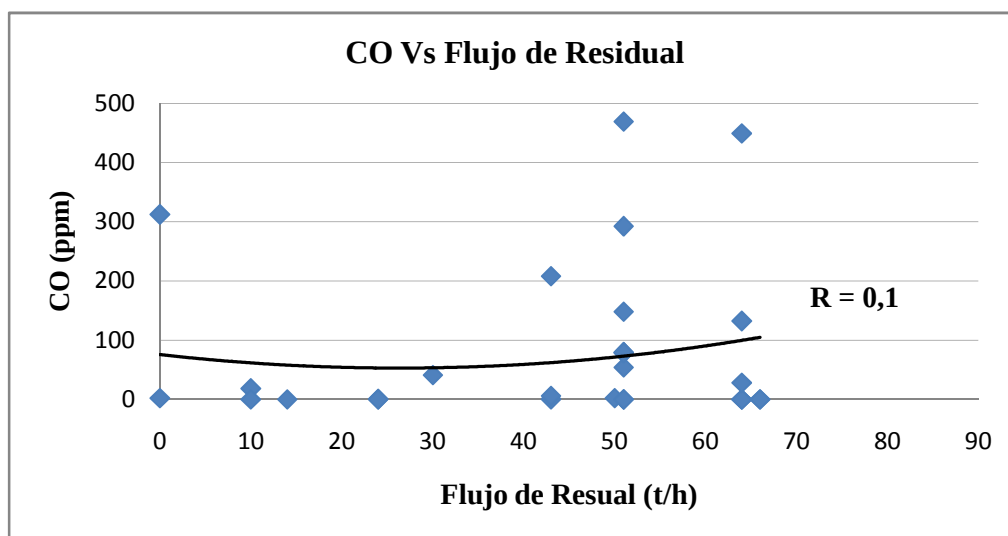


Fig. 6. 15: Emisiones de CO en función del incremento del flujo de Residual N° 6
Fuente: Elaborado por los Autores

El valor del factor de correlación de este gráfico indica que la variación de las emisiones de CO no depende del aumento en el consumo de Residual N° 6.

6.6 Proyección de Emisiones dependientes del consumo de Residual N° 6

A continuación se presentaran las proyecciones de las emisiones que mostraron dependencia con el incremento del consumo de Residual N° 6:

- **Emisiones de NOx**

La ecuación que arrojo el gráfico de NOx versus el flujo de Residual N° 6 es:

$$y = 1,7076x + 109,79$$

Ahora evaluando dicha ecuación para el máximo flujo de Residual N° 6 en los generadores de vapor que es 102 t/h, se tiene:

$$y = 1,7076(102) + 109,79 = 284 \text{ ppm}$$

Comparando con lo establecido en el decreto 638 se tienen los siguientes resultados:

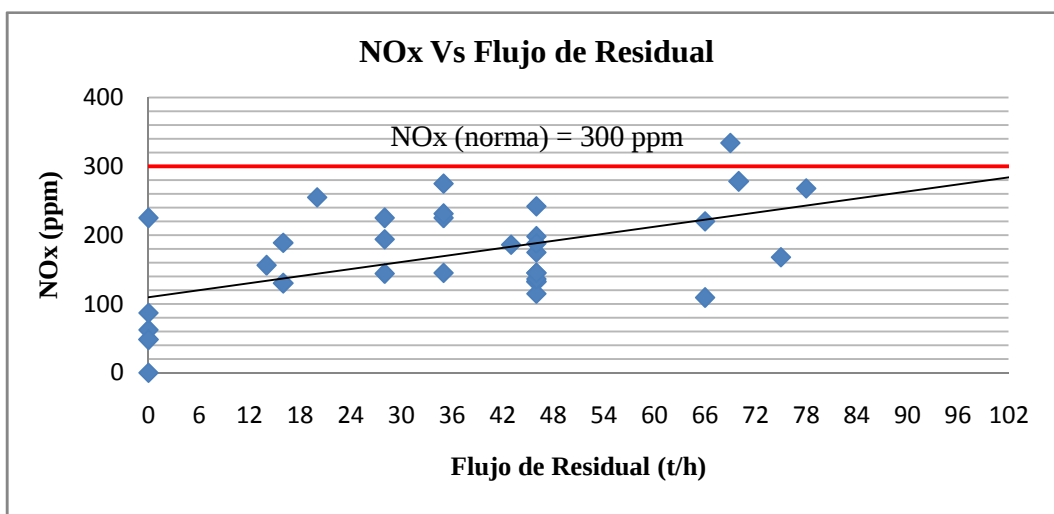


Fig. 6. 16: Proyección de NOx para un máximo consumo de Residual N° 6

Fuente: Elaborado por los Autores

Para un máximo consumo las emisiones de NOx serán de aproximadamente 284 ppm, cumpliendo con el límite establecido en la normativa ambiental.

- **Emisiones de SO₂**

La ecuación que arrojo el gráfico de SO₂ versus el flujo de Residual N° 6 es:

$$y = 0,1031x^2 + 2,241x + 28,321$$

Ahora evaluando dicha ecuación para el máximo flujo de Residual N° 6 en los generadores de vapor que es 102 t/h, se tiene:

$$y = 0,1031(102)^2 + 2,241(102) + 28,321 = 1717 \text{ ppm}$$

Comparando con lo establecido en el decreto 638 se tienen los siguientes resultados:

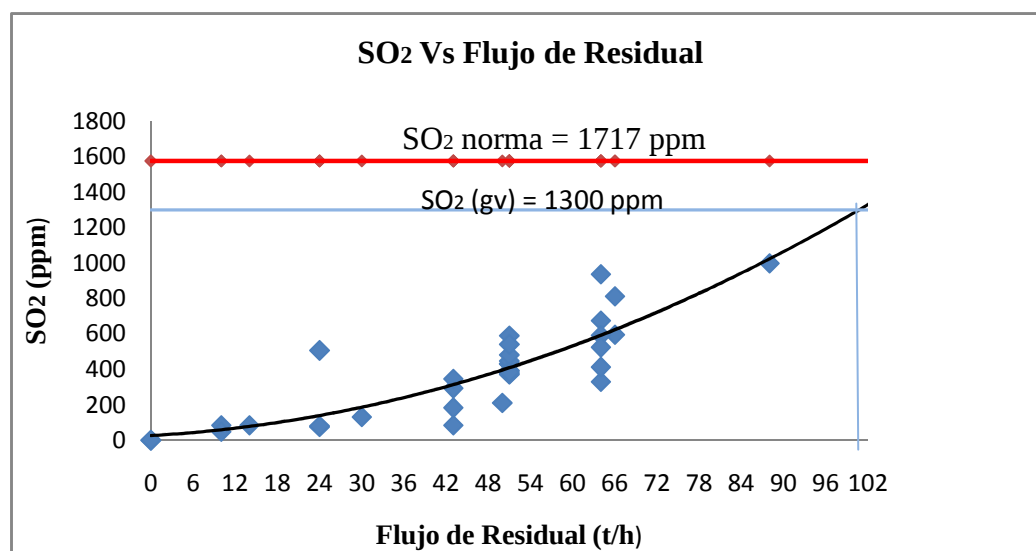


Fig. 6. 17: Proyección de SO₂ para un máximo consumo de Residual N° 6
Fuente: Elaborado por los Autores

Para un máximo consumo de Residual N° 6, las emisiones de SO₂ no pasaran el límite establecido en la Normativa Ambiental Venezolana.

CAPÍTULO VII

TECNOLOGÍAS PARA REDUCIR EL IMPACTO EN EL FUNCIONAMIENTO DE EQUIPOS Y EN LAS EMISIONES DE LOS G. V AL CONSUMIR EXCLUSIVAMENTE RESIDUAL N° 6

En las proyecciones realizadas en el capítulo anterior se puede observar el impacto negativo en los parámetros de funcionamiento y de emisiones de los G.V al aumentar el consumo de Residual N°6, ya que la disponibilidad marca una disminución de un 15,6%, la confiabilidad de un 16,5% y las emisiones de NO_x se proyectan hasta 284 ppm, el cual es un valor muy cercano al límite establecido en el decreto 638.

Tomando en cuenta el impacto negativo que genera el consumo exclusivo de Residual N°6, es necesario tomar medidas tecnológicas y operacionales para minimizar dichas consecuencias.

A continuación se muestran las diversas tecnologías factibles que se pueden instalar en las áreas críticas asociadas al sistema aire-combustible, sistema de gases de combustión, sistema de aire-gases y emisiones atmosféricas.

7.1 Tecnologías en el Sistema Aire- Combustible

a) Quemadores de bajo NO_x

En los quemadores de bajos NO_x se modifica la entrada de combustible y aire para retrasar la mezcla, se reduce la cantidad de oxígeno disponible en las zonas más críticas para la formación de NO_x y se reduce la temperatura pico de la llama. Los quemadores de bajo NO_x reducen, por tanto, la formación de NO_x por efectos del combustible y NO_x térmico manteniendo una elevada eficiencia de combustión. Proporcionan una llama estable que tiene varias zonas diferentes. Por ejemplo, la primera zona puede ser combustión primaria. La segunda zona puede

ser Re-quemado de Combustible (RC) con combustible añadido para reducir los NOx químicamente. Los quemadores de bajo NOx han producido hasta el 80% de reducción de emisiones.

En cuanto al diseño del propio quemador, este se basa en los diferentes principios de reducción de NOx. Los quemadores de bajo NOx han sido desarrollados con criterios de inyección de aire escalonada, recirculación de gases de combustión y combustión escalonada. Entre los fabricantes que se dedican al diseño de este tipo de quemadores se encuentran:

- Alstom Power: El primero garantiza excelente atomización por el nuevo diseño que presenta el atomizador de sus quemadores y porque el material de sus pastillas y boquillas tiene una mayor homogeneidad y estructura de grano más fino que los aceros de herramientas convencionales.

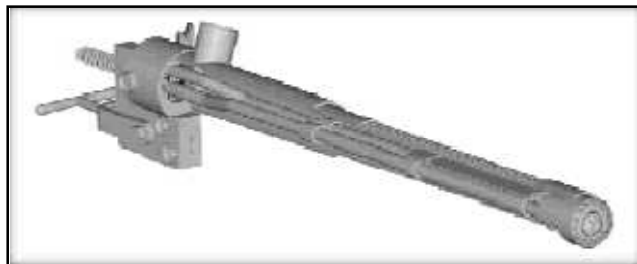


Fig. 7. 1 Quemador de Petróleo de Alstom Power

- Mitsubishi: ofrecen un diseño nuevo en las pastillas y boquillas de los quemadores, a fin de reducir el particulado en las emisiones de los gases producto de combustión. Dicha propuesta fue aprobada recientemente por la EDC y contempla las siguientes mejoras respecto al sistema actual:

Características	Sistema Actual	Sistema Propuesto por MHI
Cantidad de quemadores	16 piezas	16 piezas
Capacidad	7900 lts/h	7900 lts/h
Presión de Residual N° 6	21 kg/cm ²	9 kg/cm ²
Presión del vapor de atomización	10,5 Kg/cm ²	10,5 Kg/cm ²
Proporción del vapor de atomización	2,5 %	12,50 %

Tabla 7. 1: Comparación del sistema actual y el propuesto por Mitsubishi
Fuente: Planta Ampliación Tocoa

Actualmente la EDC ya firmo un acuerdo con MHI para la utilización de un nuevo diseño de los quemadores con el fin de mejorar el proceso de combustión y una reducción de las emisiones de particulado.

7.2 Tecnologías en el Sistema de Gases de Combustión

a) Limpiadores acústicos

Son dispositivos que funcionan con aire y emiten ondas acústicas de baja frecuencia y de alta energía. Las ondas sonoras son producidas por el aire comprimido al entrar en el generador acústico, dando lugar a la flexión del diafragma. Esta flexión genera ondas sonoras que son amplificadas por la campana del limpiador acústico. Las ondas entran en resonancia con los depósitos de polvo y cenizas desprendiéndolos de las superficies. Una vez que se han desprendido los depósitos, se alejan de la zona por gravedad y/o por flujo de gas.

Los limpiadores acústicos se ajustan a las aberturas existentes, como las puertas de acceso, los puertos de inspección o los agujeros. Estos limpiadores no requieren aire de calidad instrumental, pueden funcionar con el aire estándar de la planta. Los limpiadores acústicos no requieren mantenimiento regular. Una vez instalada, la unidad funciona sin necesidad de asistencia, sólo una parte tiene

movimiento (diafragma), y tiene una vida útil de 2 a 5 años, en función de los requisitos de sonorización del limpiador acústico en la mayoría de las aplicaciones, el diafragma se puede sustituir incluso con el equipo en marcha.

El principio de funcionamiento de todos los limpiadores acústicos es el mismo, ellos difieren en cuanto a tamaño, material de construcción y frecuencia fundamental. Uno de los fabricantes de estas bocinas acústicas es GE Energy, quien denomina su sistema de limpieza acústico como Powerwave y garantiza los siguientes beneficios y ventajas de sus productos:

Beneficios Económicos.

- ✓ Baja inversión inicial. Su valor representa una fracción del costo de los sistemas convencionales, como los sopladores de hollín. Utilizados en las calderas.
- ✓ Bajo costo de instalación. Pueden instalarse a través de orificios existentes, tales como puertas de acceso, mirillas, puertas de los sopladores de vapor o a través de orificios nuevos de 405mm o menos de diámetro. El mayor costo de instalación corresponde al trazado de tuberías neumáticas y las conexiones eléctricas, a las válvulas solenoides que se utilizan para controlar la operación de los limpiadores.
- ✓ Bajo costo operativo. Operan con aire comprimido de planta. Los requisitos de aire son de 5.5 a 6.5 bar. Con un consumo de aire inferior a 40 l/s al producir el sonido. El tiempo necesario para limpiar las superficies de transferencia de calor de la caldera es de en torno a 10 segundos cada 10 minutos, lo que equivale a un consumo medio de aire de 2.4m³/hora por cada limpiador acústico.
- ✓ Bajo costo de mantenimiento. Estos limpiadores tienen una sola parte móvil, el diafragma, que va alojado en el generador de sonido. La esperanza de vida media de un diafragma es superior a tres años. Cuando

sea necesario el diafragma puede sustituirse quitando la tapa del generador de sonido, lo que puede hacerse mientras la caldera está en funcionamiento.

Ventajas operativas en la caldera:

- ✓ Mayor rendimiento en la transferencia térmica. La frecuencia de activación del limpiador acústico evita que los depósitos se acumulen en las superficies de transferencia térmica, manteniendo en todo momento un rendimiento estable de la transferencia térmica. Puesto que los sopladores operan con mucha menor frecuencia, debido a su acción de limpieza erosiva y al alto coste de su operación y mantenimiento, el rendimiento de la transferencia térmica puede resultar comprometida.
- ✓ Mejora en las emisiones de la caldera. Los limpiadores acústicos arrastran una gran cantidad de depósitos puramente nominal cada vez que se produce el sonido, lo que permite que los equipos de control de polución recojan los depósitos de manera más efectiva. Esta ventaja es aún mayor en calderas que no están dotadas de equipo de control de polución.
- ✓ Mayor duración de las superficies de transferencia térmica. Las ondas sonoras de baja frecuencia y alta energía que emiten los sopladores acústicos no dañan las partes internas de la caldera. Toda la familia de estos limpiadores genera energía a una frecuencia de 75 Hz o más, que está muy por encima de la frecuencia de resonancia de la estructura y de las superficies de transferencia térmica.



Fig. 7. 2: Limpiadores Acústicos Powerwave
Fuente: GE Energy

b) Sopladores de Hollín

Los fabricantes originales de los Generadores de Vapor recomiendan la instalación de dos set de Sopladores de Hollín tipo retráctil a nivel de los sobrecalentadores primarios, uno en el lado este y uno en el lado oeste de la caldera. El rango de soplado de estos sopladores será de 10 Kg/cm^2 a 15 Kg/cm^2 .

c) Haces de tubos de los Sobrecalentadores Primarios

Es importante mencionar que otra mejora en este sistema y ya aprobada es la instalación nuevas tuberías de acero inoxidable en los sobrecalentadores a fin de disminuir los problemas por tuberías rotas

7.3 Tecnologías en el Sistema Aire - Gases

En esta sección las tecnologías existentes en el mercado están orientas en modificaciones de los precalentadores de aire Ljungstrom como se muestra a continuación:

a) Esmaltado de las Superficies de Transferencia de Calor

En este sentido la propuesta consiste en esmaltar las cestas ubicadas en el extremo frío con la mejor configuración del elemento correcto, en cuanto al material, espesor y calidad con el fin de alargar su vida útil y mejorar la resistencia ante las duras condiciones presentes en los calentadores, como componentes agresivos (agua, vapor, condensación de ácido sulfúrico y partículas erosivas), cambios de temperatura (obstrucciones, chorro de aire, etc.) y vibraciones (limpieza con corrientes de agua, chorros de vapor, etc.). Para ello buscan la mejor configuración del elemento correcto, en cuanto al material, espesor y calidad para garantizar el rendimiento térmico y la caída de presión de la unidad.

Algunos de los fabricantes encargados de hacer esta mejora en las superficies de transferencia de calor de los Precalentadores de Aire tipo Ljungstrom son:

- Howden: trabaja con elementos esmaltados fabricados con materias primas inorgánicas y naturales, que luego son sometidos a un proceso de cocción que consta de las siguientes fases: la interfase (donde se produce la adherencia mediante la reacción química del acero con los óxidos de cobalto y níquel presentes en el esmalte) y la fase vítrea (compuesta principalmente por componentes inertes como el óxido de silicio, titanio y boro).



Fig. 7. 3: Superficie de transferencia de calor esmaltada

Fuente: Howden

- Alstom Power: basa el diseño de sus superficies de transferencia de calor de acuerdo al tipo de combustible que utilice la Central Termoeléctrica para la generación de energía. Por otro lado aconsejan un revestimiento de porcelana en los elementos de calefacción del extremo frío para reducir al mínimo la adherencia de los depósitos de bisulfato de amonio e inhibir la corrosión que puede ser resultado de estos depósitos.

b) Sello del Precalentador

Los fabricantes de Alstom Power ofrecen nuevos Precalentadores de aire con un sellado doble, aplicado normalmente a las juntas radiales y axiales, o a cada una por separado. Esto implica una doble restricción al flujo de cruzar de un lado a otro y garantiza una reducción del diferencial de presión por un factor de aproximadamente dos con una reducción de pérdida de un 30%. Este sistema puede ser adaptado a precalentadores existentes, implicando modificaciones del rotor. Este sellado es denominado por el fabricante como sello DuplexTM y se muestra a continuación:

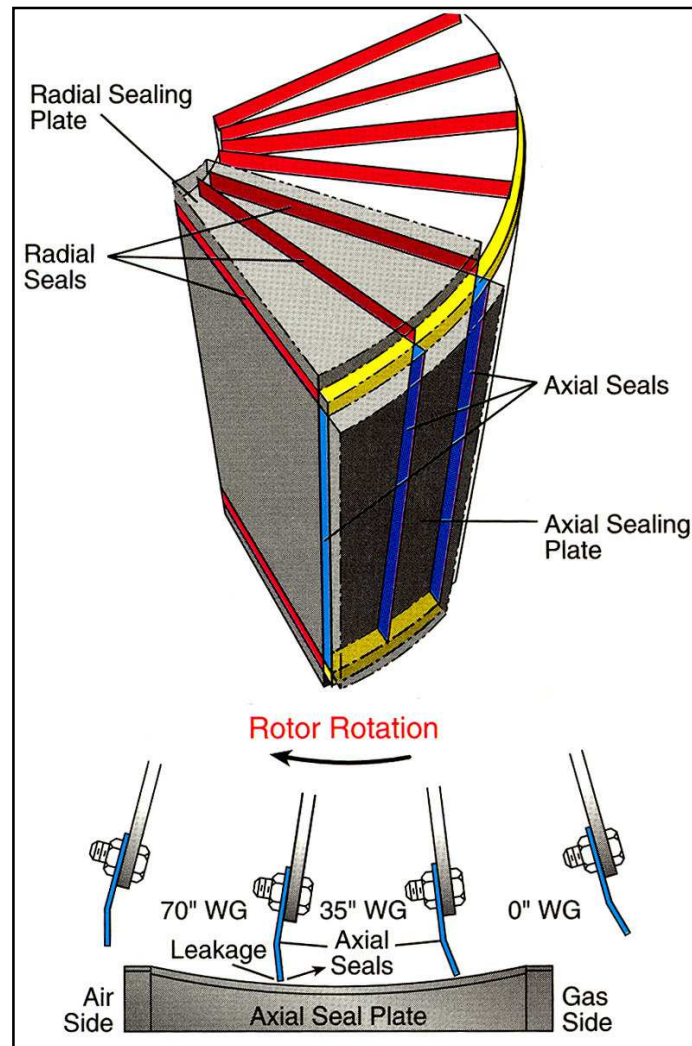


Fig. 7. 4: Sello Duplex para precalentadores de Aire
Fuente: Alstom Power

c) Cambio de tres a dos zonas

En este sentido tanto MSH como Alstom power proponen eliminar de la zona intermedia de los precalentadores de Aire, esto porque según sus estudios es allí donde se produce la mayor acumulación de depósitos corrosivos. Ambos fabricantes aseguran que esta modificación dará como resultado frecuencias de lavados razonables.

d) Sistema de Limpieza

En este sentido los fabricantes de Termo Power cuentan con unos sopladores de hollín de tipo retráctil designados con el nombre de IK-525, el cual cuenta con un diseño especial en su boquilla que le permite tres modos de funcionamiento: vapor y /o aire para el día a día, agua a baja presión y agua a alta presión para aplicaciones de limpiezas. Se puede pasar de un modo a otro tan solo pulsar un botón. Es de fácil mantenimiento debido a su retracción, sobre todo en la boquilla del mismo sin necesidad de sacar la lanza.

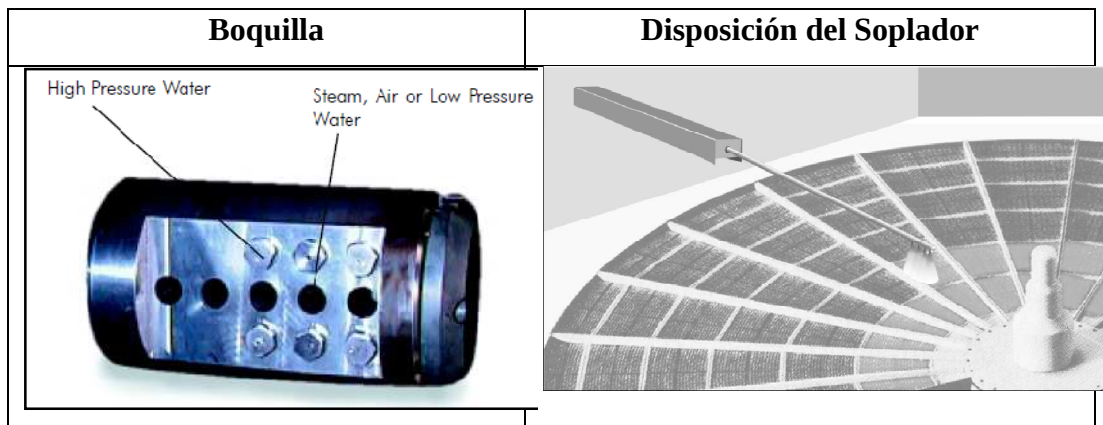


Fig. 7. 5: Características del Soplador IK-525

Fuente: Termo Power

7.4 Tecnología para el control de emisiones

Con respecto a las opciones que ofrece el mercado para el control de las emisiones atmosférica se encuentra lo quemadores de bajo NO_x, que tal como su nombre lo indica y como fue explicado a principios de este capítulo se encargan de aminorar los valores de NO_x. Sin embargo, es importante recordar que el cambio de los quemadores puede ser una medida que no reduzca el valor de emisiones de acuerdo a lo establecido en la norma, es por ello que otra tecnología que puede complementar esta situación es un Sistema de Reducción Catalítica (SRC) la cual es una técnica de reducción química de la molécula de NO_x a nitrógeno (N) y vapor de agua. Tiene una eficiencia de remoción de hasta 100%, y emplea un catalizador para acelerar la velocidad de la reacción.

Es importante saber que también existe el Sistema de Reducción Catalítica No Selectiva (SNCR), sin embargo no hace referencia al mismo porque los porcentajes de reducción de NOx con respecto al SRC son menores. Esta toma en cuenta esta consideración debido a los valores de emisiones de NOx que resultaron para un máximo y exclusivo consumo de Residual N° 6. Uno de los fabricantes que cuentan con este tipo de tecnologías es Alstom Power, quien también cuenta con un sistema de monitorización continua de emisiones que en el caso de los NOx permitirá controlar el flujo de amoníaco con el fin de alcanzar los niveles de emisiones de NOx deseados.

Para el control de emisiones del SO₂ el mercado propone la aplicación de un sistema de desulfurización de gases de combustión por vía húmeda puestos que alcanzan una eficiencia de eliminación elevada y porque no requieren la instalación de precipitadores electrostáticos como es el caso de la desulfurización por vía seca. Esta última observación es importante considerarla puesto que en la Planta Ampliación Tocoa a través de un estudio se determinó que no es posible la instalación de Precipitadores Electrostáticos.

CAPITULO VIII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 Conclusiones

- Los principales eventos que afectan la disponibilidad y confiabilidad de los Generadores de Vapor bajo un régimen de consumo dual son: acumulación de escoria en los serpentines de los recalentadores y sobrecalentadores, paradas por lavado de precalentadores y limpieza del horno, fallas en el tambor inferior de la caldera, tubos rotos y problemas por alta presión en el horno.
- Los eventos que son consecuencia directa del consumo de Residual N° 6 son: la acumulación de escoria en los serpentines de los sobrecalentadores y recalentadore, frecuencia de lavado de los precalentadores de aire, problemas de alta presión en el horno y frecuencia de limpieza de los mismos.
- La causa de tubos rotos en los sobrecalentadores es debido a la terminación de la vida útil de los mismos.
- Las limitaciones de las unidades por alta presión en el horno debida a la acumulación de escoria en los precalentadores de aire, se presentaran cada vez que se han consumido 50.000 t de Residual N° 6 aproximadamente.
- Las fallas por exceso de peso en el hogar de la caldera debida a la acumulación de escoria en la misma se presentará cada vez que se han consumido 150.000 t de Residual N° 6 aproximadamente.
- Cuando los Generadores de Vapor estén operando con un consumo exclusivo de Residual N° 6 la disponibilidad disminuirá en un 15,6 %, la

confiabilidad en un 16,5 % aproximadamente si no se toman las medidas preventivas necesarias, indicadas en las recomendaciones.

- La formación de las emisiones de NOx y SOx están relacionadas con el consumo de Residual N° 6, sin embargo no superan los límites establecidos en el decreto n° 638 para un máximo consumo dicho combustible.

8.2 Recomendaciones

- Tomar como referencia los patrones de fallas por exceso de peso en el horno y taponamiento en los precalentadores de aire respecto al consumo de Residual N°6, para la planificación de mantenimientos preventivos como lavados de precalentadores de aire y limpieza del horno, con el propósito de minimizar las limitaciones en las unidades y paradas forzadas.
- Diseñar un banco de pruebas para quemadores que permita chequear las características básicas del mismo con el fin de garantizar un desempeño eficiente de los mismos.
- Realizar un estudio técnico- económico con el fabricante de las calderas con el fin de automatizar el control de la combustión tomando como referencias una medición continua de las emisiones para poder garantizar una combustión completa.
- Evaluar la tecnología de limpiadores acústicos propuesta por los fabricantes para reducir el ensuciamiento en el área de los sobrecalentadores y recalentadores.
- Intensificar los trabajos de instalación de tuberías de acero inoxidable en los sobrecalentadores primarios, para lograr disminuir los eventos por tubos rotos.
- Evaluar propuestas de los fabricantes para el esmaltado de las superficies de transferencia de calor de los precalentadores de aire con el fin de minimizar los efectos de corrosión y erosión en los mismos.
- Evaluar propuesta de los fabricantes sobre sus tecnologías en los sellos axiales y radiales de los precalentadores de aire con el fin de disminuir pérdidas por fugas.
- Considerar la propuesta de los fabricantes originales de los generadores de vapor respecto a la reducción de tres zonas de transferencia de calor a solo

dos en los precalentadores de aire, para disminuir la acumulación de depósitos corrosivos.

- Evaluar tecnologías de los sopladores de hollín de tipo retráctil en el área de precalentadores de aire con el fin de prevenir el taponamiento de los mismos.
- Acelerar la implementación de los quemadores de bajo NO_x para poder garantizar el cumplimiento del decreto 638 al operar exclusivamente Residual N°6.
- Considerar la aplicación de un sistema de desulfurización de gases de combustión por vía húmeda para el control de emisiones de SO_2

BIBLIOGRAFÍA

- Arias, Fidias G. (2004). *El Proyecto de Investigación. Introducción a la Metodología Científica*. 4ta. Ed. Editorial Episteme.
- Avallone, E. y Baumeister III, T. (1995) *Manual del Ingeniero. Mecánico-tomo II*, 3era ed. México: Mc Graw-Hill. 778 p.
- Casanova, Mauricio., 1972, *Combustión aplicado a la Generación de Potencia*, caracas.
- Decreto N° 638 (Normas Sobre la Calidad de Aire y Control de la Contaminación Atmosférica). Gaceta Oficial de la República de Venezuela, N° 5.021 (Extraordinario, Diciembre 18, 1995).
- Edwards, John B, 1974, *Combustion formation and emission of Trace Species*, An Arbor Science Publishers , Michigan.
- Kohan, Anthony L., 2000, *Manual de Caldera, Principios Operativos de Mantenimiento, Construcción, Reparación, Seguridad, Requerimientos y Normativas*, Mc Graw Hill, Madrid.
- Mesny, Marcelo., 1977, *Calderas de Vapor: Descripción, Teoría, Manejo y mantenimiento*, Ediciones Marymar, Buenos Aires.
- Mitsubishi Heavy Industries, 1978, *Manual de Operaciones de las unidades 7, 8, 9 de Ampliación Tocoa*.
- Planta Ampliación Tocoa. Reporte de eventos de las unidades 7, 8 y 9. Período: 2007, 2008 y 2009.

- Planta Ampliación Tocoa. Reporte de emisiones atmosféricas de las unidades 7, 8, y 9. Período: 2007, 2008 y 2009.
- Planta Ampliación Tocoa. Reporte de fechas de lavado de Precalentadores de Aire en las unidades 7, 8 y 9. Período: 2007, 2008 y 2009.
- Planta Ampliación Tocoa. Reporte de fechas de limpieza del horno en las unidades 7, 8 y 9. Período: 2009.
- Sabino, Carlos. (1978). El proceso de la Investigación Científica. Buenos Aires: El Cid Editor. Universidad Pedagógica Experimental Libertador, Vicerrectorado de Investigación y Postgrado. Manual de trabajos de grado de especialización y maestría y tesis doctorales. Caracas, 2002.
- Salvi, Giuliano (1975), La combustión, teoría y aplicaciones, Editorial Dossat, S.A.
- Shield, Carl D. (1965) *Calderas. Tipos, Características y sus funciones*. Editorial Continental, México.
- Norma Venezolana COVENIN 787-92. Productos Derivados del Petróleo. Combustibles Residuales. Venezuela FONDONORMA
- Universidad Pedagógica Experimental Libertador (2006). Manual de Trabajos de Grado Especialización y Maestría y Tesis Doctorales. (4^{ta} Ed.). Caracas: Fondo Editorial de la Universidad Pedagógica Experimental Libertador (FEDUPEL).
- Acoustic Cleaning Systems [Página Web en línea]. Disponible en: <http://acousticcleaning.com/service.html>. [Consulta: 2010, Agosto 23].

- Power- eng [Página Web en línea]. Disponible en: [http:// www.power-eng.com](http://www.power-eng.com). [Consulta: 2009, Agosto 23].
- Gepower. [Página Web en línea]. Disponible en: http://www.gepower.com/prod_serv/serv/env_serv/en/index.htm. [Consulta: 2009, Agosto 25]
- Clydebergemann. [Página Web en línea]. Disponible en: <http://www.clydebergemannpowergroup.com>. [Consulta: 2009, Agosto 30].
- Diamond power. [Página Web en línea]. Disponible en: <http://www.diamondpower.com>. [Consulta: 2010, Septiembre 2].
- La Electricidad de Caracas [Página Web en línea]. Disponible en: <http://www.laedc.com.ve>. [Consulta: 2010, Abril 25].
- Wikipedia [Página Web en línea]. Disponible en: <http://es.wikipedia.org/wiki/Consultada>: 2010, Mayo 8].

ANEXOS**Anexo N° 1:** Especificaciones del Residual N° 6. Electricidad de Caracas

Especificaciones del Residual N° 6		
Propiedades	Valor	Unidades
Gravedad A.P.I	10 - 14	° API
Viscosidad Cinematica 122 °F	< 650 (350-650)	cTs
Punto de Inflamación	> 150	°F
Agua por Destilación	< 1	% V/V
Agua y Sedimentos (BSW)	< 1	% V/V
Cenizas	< 0.1	% Peso
Carbón Conradson	< 15	%Peso
Poder Calorífico	>18000	Btu/lb
Azufre	< 2.5	% Peso
Asfáltenos	< 15	% Peso
Vanadio	< 450	P.P.M
Sodio	< 60	P.P.M

Anexo N° 2: Decreto N° 638

NORMAS SOBRE CALIDAD DEL AIRE Y CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Gaceta Oficial N° 4.899 Extraordinario del 19 de mayo de 1995

Decreto N° 638

26 de abril de 1995

RAFAEL CALDERA
Presidente de la República

El Presidente de la República en ejercicio de la atribución que le confiere el ordinal 10 del artículo 190 de la Constitución y de conformidad con lo establecido en los artículos 4, 19, 20 y 21 de la Ley Orgánica del Ambiente, en Consejo de Ministros.

Decreta

Las siguientes:

NORMAS SOBRE CALIDAD DEL AIRE Y CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA.

CAPÍTULO DISPOSICIONES GENERALES

I.

Artículo 1. Este decreto tiene por objeto establecer las normas para el mejoramiento de la calidad del aire y la prevención y control de la contaminación atmosférica producida por fuentes fijas y móviles capaces de generar emisiones gaseosas y partículas.

Artículo 2. A los fines de este decreto se entiende por:

“Actividad existente o en funcionamiento”: fuente fija de contaminación atmosférica que a la fecha de publicación de este decreto se encuentre instalada, en operación o en la etapa de proyecto para su instalación o ampliación.

“Actividad nueva”: fuente fija de contaminación atmosférica que a la fecha de publicación de este decreto no se encuentre instalada ni en operación, o que se encuentre en la etapa de prefactibilidad, factibilidad o anteproyecto, para su instalación o ampliación.

“Aire ambiental”: aquella porción de la atmósfera, externa a edificaciones y de libre acceso al público.

Anexo N° 3: Norma CORPOELEC



**Definiciones para el uso en reportes de
Confiabilidad, Disponibilidad y Productividad de
las unidades de generación eléctrica de
CORPOELEC.**

Sede Principal: Calle 77 entre Avdas. 10 y 11, Edif. EISA. Telfs.: (0261) 7903406 - 7903408. Fax: (0261) 7903838.
Apartado Postal: 146-164, Código Postal: 4001-A, Edo. Zulia - Venezuela.