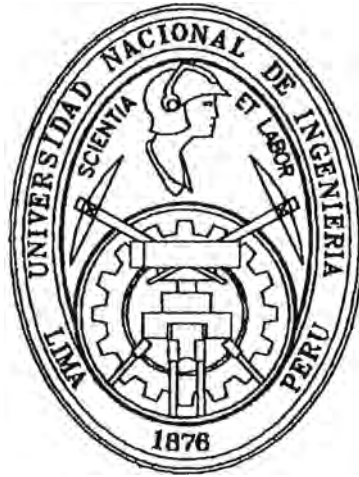


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA QUÍMICA Y MANUFACTURERA



**“ESTUDIO TÉCNICO PRELIMINAR PARA LA
OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE LA PLANTA PELETS
DE MINERALES DE HIERRO”**

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO QUÍMICO

**POR LA MODALIDAD DE ACTUALIZACIÓN DE
CONOCIMIENTOS**

PRESENTADO POR:

RAÚL ESTEBAN INFANTE BARRERA

**LIMA – PERÚ
2003**

A mis padres:

OSCAR Y ALEJANDRINA

Por ser ejemplos de superación, esfuerzo, valor y dedicación, los cuales me han guiado en el transcurso de mi vida para seguir adelante.

A mis amigos:

JORGE DÍAZ
JUAN VALDIVIA

Por su ayuda incondicional, apoyo y
consejos a lo largo de mi formación
universitaria.

JUAN C. SANCHEZ
ARMANDO VERA
VICTOR QUINCHO
ELIANA GUTIERREZ
ELIZABETH BLAS
ROXANA ALVAREZ

Por su apoyo moral en la realización
de este trabajo.

A mis hermanos:

OSCAR, PATRICIA y VERÓNICA

Por el apoyo y cariño que me brindan a
cada momento.

INDICE

RESUMEN.....	1
INTRODUCCIÓN.....	2

CAPITULO I: DESCRIPCIÓN DEL PROCESO PRODUCTIVO

1.1. Área Mina.....	4
1.1.1. Etapa de perforación.....	5
1.1.2. Etapa de disparo.....	5
1.1.3. Etapa de carguío.....	5
1.1.4. Etapa de acarreo.....	6
1.1.5. Planta de chancado (chancado primario).....	6
1.2. Área de beneficio San Nicolás.....	6
1.2.1. Stock de Crudos.....	7
1.2.2. Planta de Chancado.....	7
1.2.3. Planta Magnética.....	7
1.2.4. Planta Filtros.....	8
1.2.5. Planta Pelets.....	9

CAPÍTULO II: CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA, INSUMOS, COMBUSTIBLE, PRODUCTO INTERMEDIO Y PRODUCTO FINAL

2.1. Materia Prima: Mineral concentrado.....	12
2.2. Insumo: Bentonita (Aditivo).....	13
2.3. Combustible: Petróleo Residual R – 500.....	14
2.4. Producto Intermedio: Pelets Verdes: (alimentación al horno).....	14
2.5. Producto Final – Pelets Quemados.....	15

CAPITULO III: EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO TERMICO ACTUAL

3.1	Metodología	17
3.2	Mediciones realizadas en el horno	17
3.3	Metodología para efectuar el análisis térmico del horno	23
3.3.1.	Etapas del proceso	23
3.3.2.	Balance de materia.....	23
3.3.2.1.	Consideraciones.....	23
3.3.2.2.	Bases teóricas.....	24
1.	Cálculo del flujo másico de los gases en los ductos	24
2.	Cálculo del agua evaporada en las zonas de Secado y Pre-quemado ...	26
3.	Cálculo del flujo másico en la alimentación al horno (Pelets Verdes) .	26
4.	Cálculo del flujo másico de los Pelets quemados usado como protección de parrilla y cantonera.....	27
5.	Cálculo del flujo másico de los barrotes y Pelets	28
6.	Aire de filtración.....	28
3.3.3.	Balance de energía.....	29
3.3.3.1.	Consideraciones.....	29
3.3.3.2.	Bases teóricas.....	30
1.	Cálculo de las capacidades caloríficas medias	30
2.	Cálculo de entalpía	31
3.	Calor de reacción	32
4.	Calor entregado por el combustible.....	33
5.	Calor absorbido por los linteles	35
3.3.4.	Balance de materia.....	36
3.3.4.1.	Balance global	38

3.3.4.2.	Zona de secado ascendente (WB 1 – 6).....	39
3.3.4.3.	Zona secado descendente (WB 6 – 9).....	40
3.3.4.4.	Zona pre – quemado / quemado (WB 10 – 21)	42
3.3.4.5.	Zona quemado / post -quemado (WB 22 – 28).....	43
3.3.4.6.	Zona 1° enfriamiento (WB 29 – 41).....	44
3.3.4.7.	Zona 2° enfriamiento (WB 42 – 44).....	46
3.3.4.8	Porcentaje en peso de los gases de salida en los ventiladores	48
3.3.5.	Balance de energía	49
3.3.5.1.	Balance global	49
3.3.5.2.	Zona de secado ascendente (WB 1 – 6).....	50
3.3.5.3.	Zona de secado descendente (WB 6 – 9).....	52
3.3.5.4.	Zona de pre – quemado / quemado (WB 10 – 21).....	53
3.3.5.5.	Zona de quemado / post – quemado (WB 22 – 28)	54
3.3.5.6.	Zona 1° enfriamiento (WB 29 – 41).....	55
3.3.5.7.	Zona 2° enfriamiento (WB 42 – 44).....	57
3.3.5.8.	Ducto del ventilador 059 – 691	58
3.3.5.9.	Ducto de los ventiladores 059 – 692/693	58
3.3.5.10.	Ducto del ventilador 059 – 695	59
3.3.5.11.	Ducto de recuperación directa	59

CAPITULO IV: PROPUESTAS TÉCNICAS PARA LA MEJORA DEL RENDIMIENTO TÉRMICO DEL HORNO

4.1.	Alternativa 1: Aumento del rendimiento de la combustión	61
4.2.	Alternativa 2: Recuperación de gases de escape	64
4.2.1.	Recuperación de calor en los gases de escape en el ventilador 059 – 691	65
4.2.2.	Recuperación de calor en el gas de escape del POS 5	66

4.3.	Otras Propuestas	68
4.3.1	Sistema de precalentado del combustible.....	68
4.3.2	Mejora del aislamiento térmico (refractario).....	69

CAPITULO V: EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LAS PROPUESTAS TÉCNICAS SOBRE EL AHORRO ENERGÉTICO

5.1	Evaluación de la situación actual.....	72
5.2	Alternativa 1: Aumento del rendimiento de la combustión (Cambio de quemadores) 73	
5.3	Alternativa 2: Aprovechamiento de gases de escape (Compuerta POS 5).....	74
5.4	Otras Propuestas	77
5.4.1	Precalentamiento del combustible	77
5.4.2	Mejora del aislamiento térmico (refractario).....	77
CONCLUSIONES		79
RECOMENDACIONES.....		81
BIBLIOGRAFIA		82
ANEXOS		84
ANEXO 1: CARACTERÍSTICAS DEL MINERAL DE LA MINA		85
ANEXO 2: DIAGRAMAS DEL PROCESO PRODUCTIVO: MINA-SAN NICOLAS..		87
ANEXO 3: DESCRIPCIÓN DE INSTRUMENTOS UTILIZADOS EN LAS MEDICIONES A NIVEL DE PLANTA.....		94
ANEXO 4: PRUEBAS REALIZADAS A NIVEL DE PLANTA		99
ANEXO 5: DATOS EXPERIMENTALES.....		102
ANEXO 6: DETERMINACION DE LAS ESPECIES MINERALOGICAS EN LOS PELETS (PELETS VERDES, TRANSICIONAL Y QUEMADO).....		106

ANEXO 7: CARTA PSICOMETRICA DEL AIRE	111
ANEXO 8: DETERMINACION DE CAPACIDADES CALORIFICAS MEDIA	114
ANEXO 9: ENTALPIAS DE REACCION	120
ANEXO 10: CORROSION ACIDA.....	121
ANEXO 11: QUEMADORES	127
ANEXO 12: FACTORES QUE AFECTAN LA CALIDAD DE LA COMBUSTION...	138
ANEXO 13: COTIZACIONES DE CAMBIO DE QUEMADORES	140
ANEXO 14: EVALUACION ECONOMICA (VPN)	146
ANEXO 15: SISTEMA DE CONTROL EN LA PLANTA PELETS	150
ANEXO 16: GLOSARIO DE SIMBOLOS.....	163
ANEXO 17: GLOSARIO DE TERMINOS.....	164

RESUMEN

El trabajo realizado enfoca el análisis energético de la Planta Pelets, con el objetivo de optimizar el consumo del combustible (Petróleo R – 500).

Para obtener un conocimiento del entorno en el que se desarrolla este trabajo, se realiza una breve descripción de las operaciones en minería, las que abarcan desde la extracción del mineral (área mina), hasta la obtención del Pelets (área San Nicolás – Planta Pelets) (Capítulo 1). Dentro de este capítulo se detalla el principio del funcionamiento del Horno.

Para una mejor comprensión del tema se realiza la caracterización de la materias prima, insumos, productos intermedio y producto final. (Capítulo 2).

Para la determinación de las pérdidas de energía por etapas de proceso, se realizó un análisis termodinámico (balances de materia y energía) en la Planta Pelets, para ello se realizaron diferentes pruebas a nivel de planta, recogiendo datos experimentales, los cuales son el punto de soporte de este trabajo. Se presenta la metodología empleada para la realización de las pruebas realizadas a nivel de Planta, y las bases de cálculo para la realización del Balance de Materia y Energía por proceso (Capítulo 3)

El enfoque de las propuestas técnicas para la mejora del rendimiento térmico del horno, así como su análisis respectivo se detalla en el Capítulo 4. Las alternativas propuestas son:

1. Aumento del rendimiento de la Combustión.
2. Recuperación de gases de escape en el proceso.
3. Otros: Precalentamiento del combustible y Aislamiento térmico.

La evaluación económica de las propuestas técnicas sobre el ahorro energético se detalla en el Capítulo 5.

INTRODUCCIÓN

En el proceso de peletización, la etapa de mayor significación desde el punto de vista técnico – económico, es el proceso de transformación de los Pelets que se produce dentro del horno. Los pelets sufren una serie de reacciones en las cuales el mineral concentrado magnetítico es transformado a Pelets Hematíticos.

El objetivo del presente trabajo, consiste en analizar la viabilidad de reducción del consumo del combustible, con tal fin se ha efectuado el balance y la evaluación energética del horno, en base a las condiciones de operación existentes en la planta.

El empleo del combustible, se realiza en el calentamiento de los gases de recirculación para lograr la remoción del contenido de humedad en los pelets y las reacciones de transformación de los Pelets Verdes a Pelets Quemados.

Para efecto de cálculo se realizaron mediciones de presión, temperatura, composición y flujos volumétricos del aire de proceso, en las diferentes etapas que conforma el secado y endurecimiento de los Pelets.

El balance de materia y energía, a su vez determina y cuantifica las pérdidas de energía del sistema, posibilitando de esta forma la realización de los ajustes operativos necesarios, así como el planteamiento de mejoras en el horno, que permitan minimizar las pérdidas con el consiguiente ahorro de energía.

Las propuestas técnicas expuestas en este trabajo son las siguientes:

- Incremento de la eficiencia de combustión: Disminuir la formación de CO, en la combustión del petróleo residual R – 500, con el consiguiente aumento de energía.

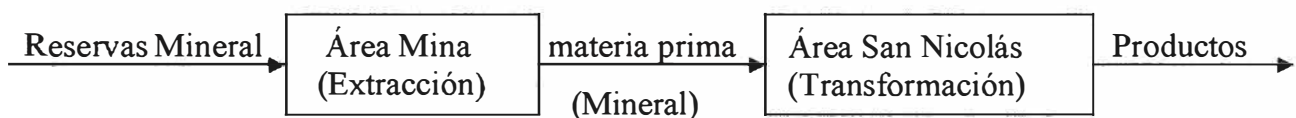
- Recuperación de Gases de Escape: Empleo del aire caliente de la salida de la compuerta (POS 5), en la cámara de secado ascendente y descendente, con la consiguiente remoción del contenido de humedad.
- Precalentamiento del Combustible: Mejorar el rendimiento de la combustión mediante el ajuste de la temperatura de entrada del petróleo residual R – 500
- Mejora del aislamiento térmico: En la etapa de gases de ingreso al secado ascendente, zona del horno desde el WB 21 al 28, y especialmente en la zona de Recuperación Directa, para minimizar las pérdidas de energía por radiación.

Con la puesta en marcha de las alternativas propuestas, se estima la disminución de pérdidas de calor, con la consiguiente disminución del consumo del combustible, asimismo la recuperación de calor en otros sistemas permiten disminuir los costos de producción de generación de vapor, lo que se refleja en una reducción global de los costos de producción en la Planta Pelets.

CAPITULO I : DESCRIPCIÓN DEL PROCESO PRODUCTIVO

La Planta Pelets dentro del proceso productivo viene a ser una de las etapas finales del Complejo Metalúrgico San Nicolás. Para estar ubicados dentro de este sector que es la minería, se indicara a continuación una breve descripción de las áreas, que empieza desde la obtención del mineral (Mina) hasta su proceso de transformación de concentrado fino, el cual es utilizado como materia prima en el proceso de Peletización. (Complejo Metalúrgico San Nicolás)

Se tiene el siguiente cuadro:



Para mayores detalles del proceso, en le anexo 2 se muestra esquemas y/o planos de las operaciones realizadas en el área mina y el área de San Nicolás.

1.1 Área Mina

Las etapas de las operaciones de minado comprenden:

- Perforación.
- Disparo.
- Carguío.
- Acarreo.
- Planta de chancado (chancado primario)



1.1.1. Etapa de perforación.

La perforación, es el proceso de penetrar la roca creando aberturas cilíndricas o taladros.

La perforación es una operación minera que tiene como objetivo hacer taladros cilíndricos, para cargar con mezclas explosivas, luego hacerla detonar y conseguir la fragmentación de la roca. De acuerdo a la naturaleza de la roca, se calcula la cantidad de explosivos por emplear.

1.1.2. Etapa de disparo

La operación de disparo o voladura tiene una influencia predominante en el ciclo de minado, porque de sus resultados dependerán las siguientes operaciones: Carguío, Acarreo y Trituración o Chancado. Por lo que el proceso de fragmentar o fracturar las rocas, se realiza mediante el uso de explosivos.

El explosivo químico es usado con mayor frecuencia en las actividades de minería superficial, donde la liberación de energía va acompañada de una reacción química. Los explosivos pueden reaccionar lentamente, deflagrar o detonar.

1.1.3. Etapa de carguío

El carguío de materiales, ya sea desmonte o mineral disparado en los frentes de los bancos de la Mina se realizan con palas eléctricas, palas neumáticas; retroexcavadoras y/o unidades, equipo auxiliar y cargadores frontales.

1.1.4. Etapa de acarreo

La operación de acarreo se realiza de acuerdo al tipo de material, desde las zonas de extracción hasta las canchas de estériles, canchas intermedias de mineral y en el caso del mineral beneficiable, a las Plantas de Chancado, mediante camiones pesados especiales para este propósito, provistos de tolva; con volteos cuyas capacidades están entre 120 y en algunos casos de 200 toneladas métricas.

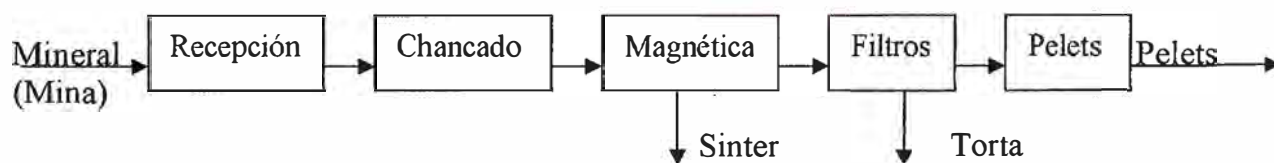
1.1.5. Planta de chancado (chancado primario)

El mineral fracturado proveniente de los frentes de trabajo de los tajos, son depositados por los camiones de acarreo, en las plantas de chancado, donde es reducido el material a un determinado tamaño, de acuerdo a la necesidad del proceso, para luego ser almacenados en canchas o pilas, clasificándose de acuerdo al tipo de material, su ley o calidad.

1.2. Área de beneficio San Nicolás

Las etapas de las operaciones en el complejo metalúrgico San Nicolás comprenden:

- Recepción de crudos.(proveniente de la mina)
- Planta Chancadora (chancado secundario).
- Planta Magnética.
- Planta Filtros.
- Planta Pelets.



1.2.1. Stock de Crudos

Se recepciona el mineral que viene de la mina para su reducción de tamaño. El mineral transferido de la mina a San Nicolás tiene una dimensión de 2" en un 75 %. La capacidad de almacenamiento de esta área es de aproximadamente unas 400000 Toneladas métricas de minerales debidamente clasificados en sus diferentes tipos, posteriormente a cada tipo de mineral se le aplica un plan de mezcla para su utilización en la planta concentradora (Planta Magnética).

1.2.2. Planta de Chancado (chancado secundario)

Las Plantas de Chancado tienen como objetivo reducir el tamaño del mineral, para pasar luego a la fase de molienda y de concentración.

Las Plantas de Chancado están constituidas por la Planta N^o 1, que contiene dos chancadoras que trituran el mineral primario (P.O.) en circuito cerrado. Esta planta tiene una capacidad de molienda de 500 TLH y la Planta N^o 2, que opera con mineral primario (PO), y mineral transicional (TO, OX). Esta constituido por zarandas vibratorias y dos chancadoras que trabajan en circuito abierto. La capacidad de chancado es de 1600 TLH, reduciendo el mineral a $- 3/4$ " (80%).

Para ver características del mineral, ver anexo 1.

1.2.3. Planta Magnética

Comprende las siguientes etapas: Reducción del tamaño de partícula, separación magnética, clasificación de partículas y celdas de flotación; los cuales están integrados mediante circuitos.

La planta cuenta con circuitos de molienda gruesa y molienda fina según el tipo de producto especificado.

En el circuito de molienda gruesa, se utiliza mineral primario (CG), en el cual se obtienen concentrados de alta ley para sinterización (Sinter Calibrado y Especial).

En el circuito de molienda fina se utilizan mezclas de mineral primario (CG, FG, R), asimismo eventualmente se usa mineral Transicional (TO).

Los productos obtenidos se dividen en dos tipos: concentrado para ser usado en la Planta Pelets y concentrado para Exportación.

La capacidad nominal de la alimentación a los molinos de barras es de 160 TLH, obteniéndose porcentajes de recuperación en peso del producto de 63 – 66 % para circuitos de molienda gruesa y , 66 – 68 % para circuitos de molienda fina.

1.2.4. Planta Filtros

La Planta Filtros consiste en el espesamiento de la pulpa proveniente de Planta Magnética, para luego pasar al proceso de filtrado propiamente dicho, obteniéndose concentrados de mineral con un porcentaje de humedad de 8.5 – 9.5 %.

El proceso de filtrado del concentrado se realiza por medio de filtros de discos, con agitación mecánica y nivel de tanques controlado por rebose.

Se tiene tres líneas de producción en filtros

- Línea 1 procesa concentrado para Pelets y/o concentrado para Exportación según requerimiento.

- Línea 2 procesa concentrados para Pelets.
- Línea 3 procesa concentrados para exportación.

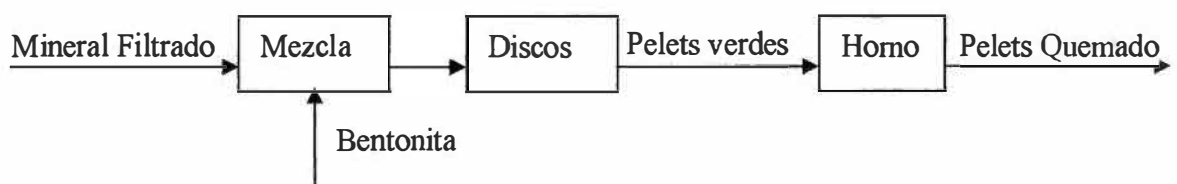
La capacidad de producción de concentrado filtrado en Línea 1 y 2 es de 270 – 320 TLH cada uno , con un contenido de humedad de 8.5 a 9.0 %. Para la Línea 3 se tiene una producción de concentrado de 220 – 250 TLH, con un contenido de humedad de 9.0 – 9.5 %.

1.2.5. Planta Pelets

La planta pelets consiste básicamente en 3 etapas:

- Mezcla de bentonita con el mineral filtrado proveniente de planta filtros.
- Formación de los pelets que se realiza en los discos peletizadores.
- Transformación de los pelets formados de composición magnetítica (pelets verdes) a pelets de composición hematítica (pelets quemado). Esta transformación se realiza en el horno.

Se tiene el siguiente diagrama: de la Planta Pelets:



El proceso de Peletización empieza con la mezcla de concentrado filtrado y la bentonita, realizado sobre la faja transportadora, con ayuda de un sistema de mezclado, luego se alimenta a los Discos Peletizadores en donde el mineral es aglomerado formando los pelets verdes, estos pelets pasan al interior del horno horizontal mediante carros transportadores con parrillas los cuales son sometidos a

unas condiciones determinadas de temperatura para su proceso de transformación a pelets quemados.

El Horno horizontal comprende tres zonas básicas: Secado, Quemado y Enfriamiento. La temperatura de quemado es gradual y va desde los 800 a 1300 C°.

Los Pelets quemados luego pasan por un proceso de clasificación por tamaño. Las torres de zarandas sirven para separar la fracción $- \frac{5}{8}'' + \frac{1}{2}''$, que son utilizados como protección de parrilla dentro del horno.

Los Pelets luego son almacenados en el stock de planta, listos para la transferencia y embarque.

La planta de Peletización cuenta con 2 líneas de producción (independientes) con una capacidad de alimentación nominal a los hornos de: Línea 1 con 130 TLH y Línea 2 con 300 TLH. (Ver Anexo 2 – diagrama de proceso).

El horno de Línea 2, presenta las siguientes zonas:

- Zona de secado ascendente.
- Zona de secado descendente.
- Zona de pre – quemado.
- Zona de quemado.
- Zona de post – quemado.
- Zona 1° enfriamiento.
- Zona 2° enfriamiento

Las zonas descritas se encuentran dentro del horno, el cual tiene una separación interna mediante paredes con refractario.

Zona de secado ascendente: Se inyecta aire caliente a 320 – 340 °C, de abajo hacia arriba con la finalidad de ir secando la humedad de los pelets verdes.

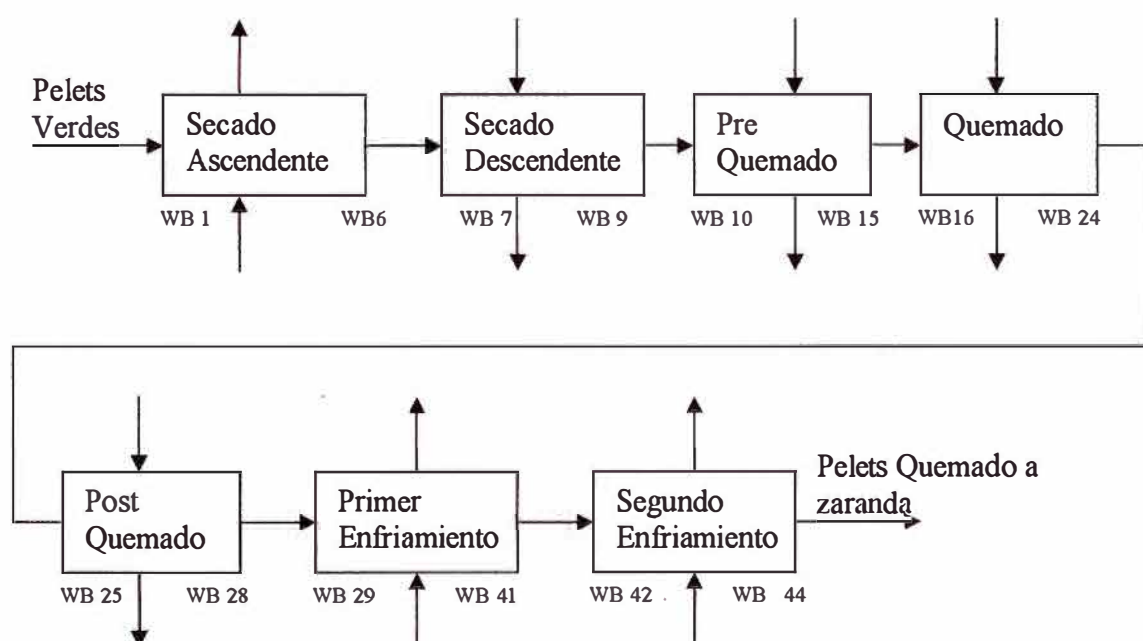
Zona de secado descendente: El aire caliente de 320 a 360 °C se inyecta de arriba hacia abajo con la finalidad de continuar el secado de los pelets verdes, se realiza un secado uniforme en la cama de los pelets verdes.

Zona de pre – quemado: En esta zona los pelets terminan su secado e inician el quemado a una temperatura de 600 a 1000 °C. El flujo de aire es hacia abajo.

Zona de quemado: En esta zona los pelets van recibiendo gradualmente una temperatura de 1000 a 1300 °C. continuando con el proceso de oxidación. El flujo de aire es hacia abajo.

Zona de post – quemado: En esta zona se culmina la oxidación del pelets en toda la cama (no hay quemadores). El flujo de aire es hacia abajo.

Zona 1° y 2° enfriamiento: En esta zona se inyecta aire del ambiente de abajo hacia arriba con la finalidad de enfriar los pelets que salen de la zona de post – quemado. El aire que atraviesa los pelets calientes se recupera y es enviado a los ductos de las troneras para facilitar la combustión del petróleo en los quemadores.



CAPITULO II : CARACTERIZACION DE LA MATERIA PRIMA, INSUMOS, COMBUSTIBLE, PRODUCTO INTERMEDIO Y PRODUCTO FINAL

2.1. Materia Prima: Mineral concentrado:

Para efectos de estudio del trabajo, el mineral proveniente de la Mina es Mineral Primario CG / FG (ver anexo 1), el cual sufre una serie de transformaciones hasta la obtención del mineral concentrado para la peletización.

Las características del mineral concentrado se subdividen en: Propiedades Físicas - Metalúrgicas y Propiedades Químicas.

Propiedades Físico – Metalúrgicas

Concentrado

Granulometría (% -325 Mesh) Rango = 66 - 70

Área Específica (BSA cm²/gr.) Rango = 1500 - 1700

Humedad (% H₂O) Rango = 8.4 – 8.8

Propiedades Químicas

Esta basado en resultados a nivel de laboratorio, tomando como base el promedio característico del mes.

Análisis Químico (Peso %)

Fe : 67.7, S : 0.155, Cu : 0.008, FeO : 28.6, SiO₂ : 3.80, CaCO₃ : 0.78
MgO : 0.91, Na₂O : 0.176, K₂O : 0.065, Al₂O₃ : 0.44, Mn : 0.03, P : 0.009.

Según las especies mineralógicas encontradas en el mineral Primario, se tiene el siguiente porcentaje en peso, en función de las especies mineralógicas presentes en el mineral. (Ver Anexo 6)

Composición mineralógica: (Peso %)

Fe₂O₃ : 1.247 , Fe₃O₄ : 92.217, FeS₂ : 0.275, CuFeS₂ : 0.023, SiO₂ : 3.80 ,
 MnO₂ : 0.047, P₄O₁₀ : 0.021, Na₂O : 0.176, K₂O : 0.065, Al₂O₃ : 0.44 ,
 MgO : 0.91 , CaCO₃ : 0.78.

2.2 Insumo: Bentonita (Aditivo)

La bentonita es un aditivo utilizado como aglomerante en el mineral concentrado, para la formación de los Pelets Verdes en los discos peletizadores, asimismo interviene en las reacciones secundarias que se producen dentro del horno.

La dosificación utilizada a nivel de Planta se encuentra en el intervalo de 10 – 18 lb./TL. Para efectos de cálculo se toma una dosificación de 15 lb./TL.

Propiedades Físicas

Granulometría (% -200 Mesh.)	Rango = 66 - 70
Área Especifica (BSA cm ² /gr.)	Rango = 1700 - 1800
Humedad (% H ₂ O)	Rango = 7.2 – 7.6

Propiedades Químicas

La composición de la Bentonita es tomada en base a los análisis químicos promedios del mes :

Análisis Químico (Peso %)

Fe : 4.8 , S : 1.780 , SiO₂ : 56.22 , CaCO₃ : 13.599 , MgO : 5.06 , Na₂O : 3.940 , K₂O : 1.286 , Al₂O₃ : 11.92 , P : 0.144.

Como el yacimiento donde se extrae la Bentonita es zona sulfurada (Geología Mina), el contenido S presente está en la forma de FeS₂, y el Fe presente se encuentra como Fe₃O₄ y FeS₂. (Ver Anexo 6). Se tiene la siguiente composición mineralógica:
 Fe₃O₄: 4.50, FeS₂ : 3.330 .

2.3. Combustible: Petróleo residual R – 500

El principal proveedor es la Refinería de Conchan. Las características del Petróleo residual son:

Gravedad API	: 13.9
Gravedad Específica a 60 °F	0.9732
Densidad a 60 °C (Kg / lt)	0.9569
Viscosidad Cinemática a 50 °C (cst)	993
Punto de Inflamación (°C)	: 67

Combustión

Poder Calorífico Bruto (BTU / lb.) 18514

Composición Química (Peso %)

C : 91.4 , H : 5.6 , S : 1.6 , O 0.5 , H₂O 0.8 , N 0.1

2.4. Producto intermedio: Pelets verdes : (alimentación al horno)

Los pelets verdes son obtenidos al pasar el mineral de hierro (mezclado con bentonita), a través de los discos peletizadores, el cual mediante el giro del disco da formación a gránulos pequeños del mineral, los gránulos siguen una trayectoria circular en el disco dando formación a los pelets hasta que mediante rebose de los pelets en el disco es enviado por fajas transportadoras como materia prima al horno, para su transformación de pelets magnetíticos a hematíticos.

La característica del pelets verdes va ha depender de las revoluciones del disco peletizador, contenido de humedad

Las propiedades físicas y químicas de los pellets se detallan a continuación:

Propiedades Físicas

Rango de tamaño de los pelets verdes (diámetro del pelets)

Tabla 1

Diámetro pelet (pulgadas)		Rango Peso
Limite Superior	Limite Inferior	(%)
mayor a 3/4	3/4	0.0
3/4	5/8	2.0
5/8	1/2	35.0 - 40.0
1/2	3/8	50.0 - 55.0
3/8	1/4	3.0
1/4	menor a 1/4	0.5

Propiedades Químicas:

Composición mineralógica: (Peso %)

Fe₂O₃ : 1.238, Fe₃O₄ : 91.621 , FeS₂ : 0.296 , CuFeS₂ : 0.023, SiO₂ : 4.156 ,
MnO₂ : 0.047, P₄O₁₀ : 0.021, Na₂O : 0.202 , K₂O : 0.073, Al₂O₃ : 0.52 ,
MgO : 0.90 , MgCO₃ : 0.034, CaCO₃ : 0.867.

2.5. Producto final – Pelets Quemados

El producto obtenido es Pelets de Hierro (Hematita) , el cual es usado como materia prima en la industria siderúrgica (alimentación a los altos hornos).

Los Pelets presentan las siguientes propiedades :

Propiedades Físico – Metalúrgicas

Hinchamiento (%)	13 - 16
Porosidad (%)	10
Desprendimiento de Azufre (%)	0.05
Compresión -1/2”+7/16” (Kg. – F)	250
(% -150 Kg- F)	12
Tumbler Index (%)	95.0

Tabla 2

Diámetro pelet (pulgadas)		Rango Peso (%)
Limite Superior	Limite Inferior	
mayor a 3/4	3/4	0.0
3/4	5/8	2.0
5/8	1/2	45.0 - 50.0
1/2	3/8	50.0 - 55.0
3/8	1/4	3.0
1/4	menor a 1/4	0.5

Propiedades Químicas

Esta basado en resultados a nivel Laboratorio.

Análisis Químico (Peso %)

Fe : 65.5, S : 0.162, Cu : 0.008, FeO : 0.6 , SiO₂ : 4.05 , CaO : 0.47

MgO : 0.90, Na₂O : 0.196, K₂O : 0.071, Al₂O₃ : 0.50, Mn : 0.029, P : 0.009.

Las especies mineralógicas mostradas corresponden a las reacciones de transformación que se producen dentro del horno, en base a la composición de la materia prima de entrada, asimismo a la composición química de los Pelets quemados a partir de sus elementos (grado de reacción)

Composición mineralógica: (Peso %)

Fe₂O₃ : 91.681 , Fe₃O₄ : 2.023, FeS₂ : 0.015 , Cu₂O : 0.008, CaSiO₃ : 0.98,

MgSiO₃ : 2.232 , Na₂SiO₃ : 0.387, MnO₂ : 0.046, P₄O₁₀ : 0.065, K₂O : 0.071

Al₂O₃ : 0.505 ,SiO₂ : 2.032

CAPITULO III: EVALUACION DEL RENDIMIENTO TERMICO ACTUAL

3.1. Metodología

Para el análisis energético del Horno de Línea 2 en la Planta Pelets. Se realizaron diversas mediciones físicas en el horno, a condiciones estables de operación. Estas mediciones corresponden a: Temperatura, Presión, Flujo y Composición.

La toma de datos correspondientes a las mediciones se efectuaron en lo posible de manera simultánea, asimismo se recogió información correspondiente a los parámetros de operación en el cuarto de control del horno.

Luego se desarrollo una metodología para efectuar el análisis térmico del horno, tanto en lo que respecta al balance de masas como de energía.

3.2. Mediciones realizadas en el horno

Se tomaron datos de balanzas y contómetros en:

- Flujo másico de alimentación de los Pelets Verdes al Horno.
- Flujo masico de mineral, luego de ser clasificados en los rodillos (retorno finos).
- Flujo volumétrico de la alimentación del Combustible.

Se realizaron mediciones para determinar:

- Flujo volumétrico del aire en diferentes puntos del proceso.
- Altura de la cama del pelets usados para protección de Parrilla.
- Ancho de la carga del Pelets empleados a los costados (Protección de Cantoneras).
- Peso promedio de Palets.
- Peso promedio de los barrotes dentro del Palets.
- Densidad aparente de los Pelets Verdes.

- Densidad aparente de los Pelets Quemados usados como protección de parrillas y protección de cantoneras.
- Contenido de Humedad de los Pelets Verdes.
- Temperatura de entrada de los Pelets Verdes
- Temperatura de salida de los Pelets Quemados
- Temperatura de entrada y salida al horno de los carros.
- Temperatura del combustible al ingreso del horno
- Temperaturas de los Pelets en las diferentes zonas del Horno (Prueba de Termocupla).
- Velocidad de los carros en el horno.
- Temperatura del bulbo seco y humedad relativa del aire ambiental.
- Análisis de SO₂ en los gases de salida en los WB 13, 14, 15.

Asimismo se obtuvo información del cuarto de control del horno en Línea 2:

- Temperatura del aire de salida en los Wind Box.
- Presiones de salida en los Wind Box.
- Temperatura del aire que ingresa por las troneras (termocuplas instaladas al costado de la tronera).
- Temperatura de los principales ductos del Horno. (ventiladores, zonas del horno).
- Presiones de las principales ductos del Horno.
- Posicionamiento de compuertas que regulan el paso del flujo de aire.
- Posición de la abertura del servomotor que regula el paso del flujo de petróleo por zonas del Horno. (Ver Anexo 12)

También se cuenta con la información correspondiente a dimensiones del Horno, dimensiones de los ductos donde se transportan los gases, mediciones de los palets.

La relación de instrumentos empleados para efectuar las mediciones mencionadas, así

como sus características y rango de aplicación se incluye en el Anexo 3.

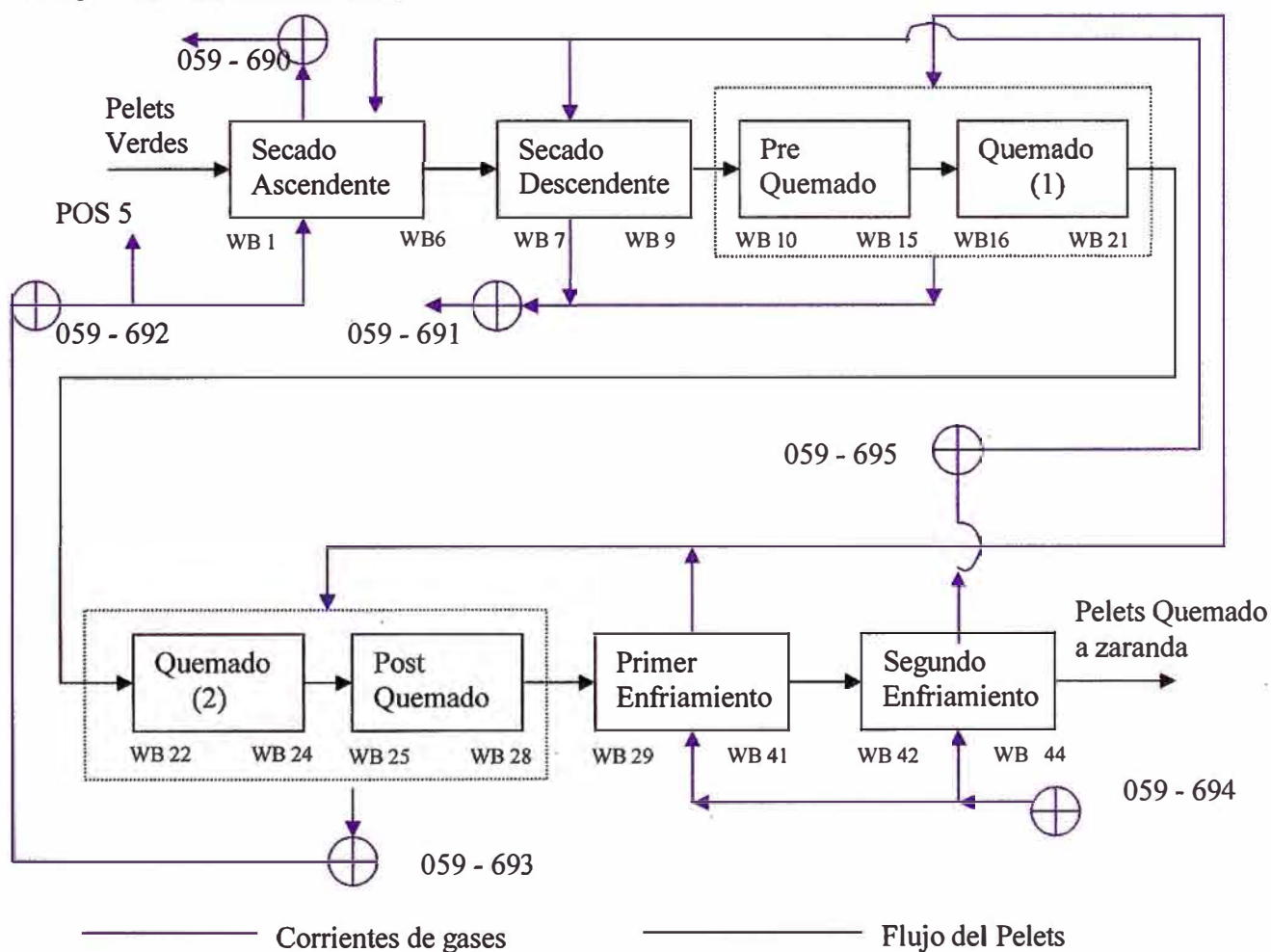
El procedimiento de las principales pruebas realizadas se detalla en el Anexo 4.

Los datos obtenidos de las mediciones efectuadas asimismo los datos recogidos del cuarto de control y los datos técnicos de operación se muestran en el Anexo 5.

Para el análisis del sistema, el horno se divide en las siguientes zonas:

- Zona de Secado Ascendente. (WB 1 al 6).
- Zona de Secado Descendente (WB 7 al 9).
- Zona de Pre-Quemado y Quemado (WB 10 al 21).
- Zona de Quemado y después de Quemado (WB 22 al 28).
- Zona primera de enfriamiento (WB 29 al 41).
- Zona segunda de enfriamiento (WB 42 al 44).

Esquema del Horno Linea 2



Los puntos de medición más importantes son:

Zona de Secado Ascendente

Mediciones Directas:

Entrada :	Ducto del aire caliente HIC 20 (50%)	(1)
	Ducto del aire caliente HIC 23 (50%)	(2)
Salida	Ducto de los gases de salida 059 – 690	(3)

Mediciones Indirectas

(Determinación del aire caliente de ingreso a la zona de secado ascendente)

- Ducto del aire de escape POS 5 (45%) (4)
- Ducto Bylan (5)
- Ducto del aire de salida del 059 – 692. (6)

Zona de Secado Descendente:

Mediciones Directas:

Salida :	Ducto de los gases de salida HIC 25 (40 %)	(7)
	Ducto de los gases de salida HIC 26 (50 %)	(8)
	Ducto de los gases de salida HIC 27 (60 %)	(9)

Mediciones Indirectas

(Determinación del aire caliente de ingreso POS 12 (100%))

- Ducto del aire del ventilador 059 – 695 (10)
- Puntos (1) y (2).

Zona de Pre – Quemado y Quemado

Mediciones Directas

Entrada :	Ducto de aire de atomización a los quemadores	(11)
-----------	---	------

Salida : Ducto de los gases de salida del 059 – 691 (12)

Mediciones Indirectas

(Determinar el aire de Recuperación Directa que ingresa desde la tronera 10 al 21)

- Ducto del aire de enfriamiento 059 – 694 (13)
- Ducto del aire de recuperación 059 – 693 (14)
- Punto 10 y 11.

Zona de Quemado y Post - Quemado

Mediciones Directas

Entrada : Punto 11.

Salida Punto 14.

Ducto de los gases de salida WB 28 (15)

Mediciones Indirectas

(Determinar el aire de Recuperación Directa que ingresa desde la tronera 22 al 28)

- Puntos 10, 11, 12, 13 y 14.

Zona Primera y Segunda de Enfriamiento

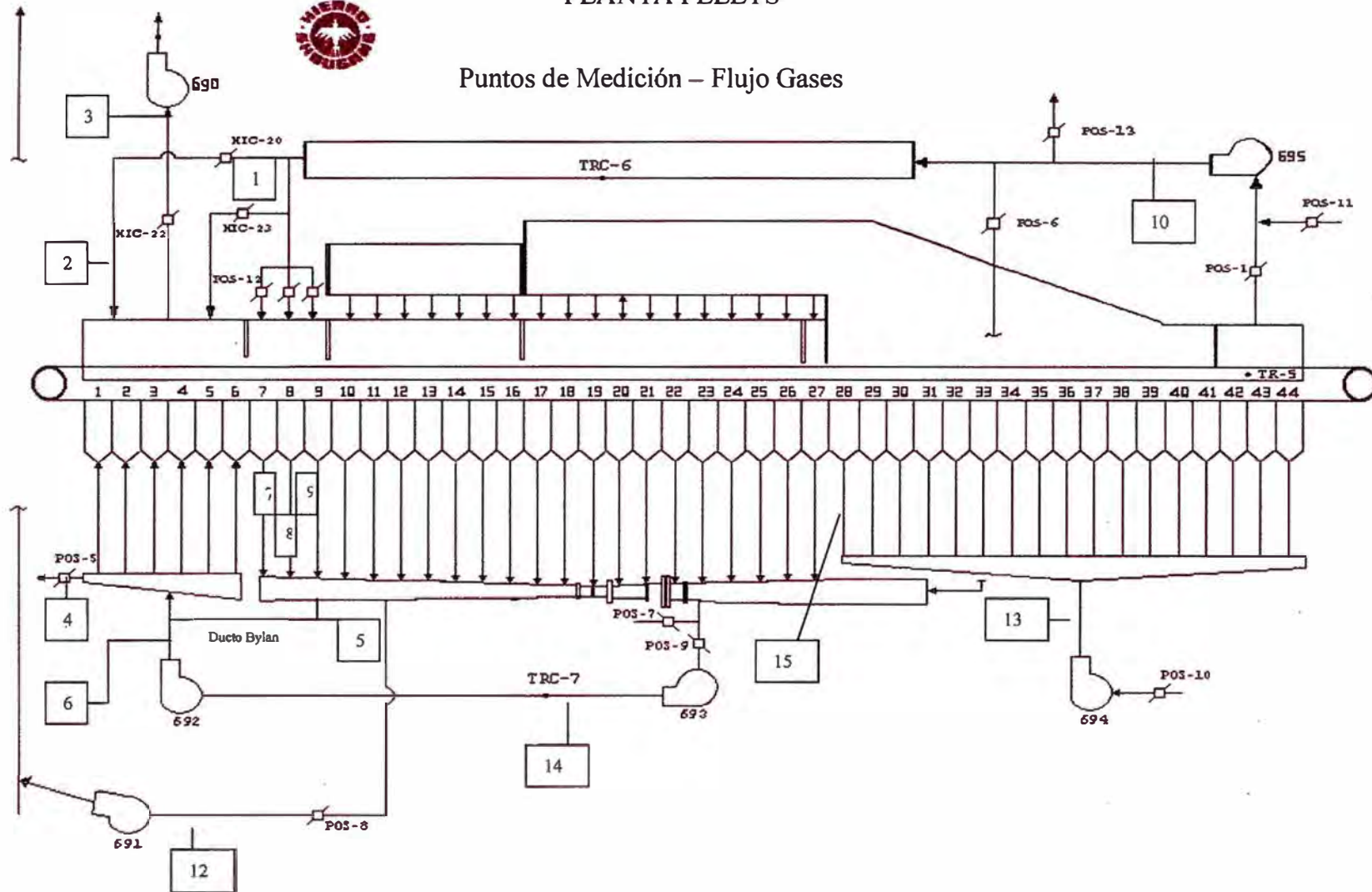
Mediciones Indirectas

- Puntos 10 y 13.
- Ducto del aire de sello (16)

PLANTA PELETS



Puntos de Medición – Flujo Gases



3.3 METODOLOGÍA PARA EFECTUAR EL ANÁLISIS TÉRMICO DEL HORNO

3.3.1 Etapas del Proceso

Secado (Ascendente, Descendente)	Remoción del contenido de Humedad
Pre - Quemado	Reacción de los compuestos sulfurosos, remoción del total de humedad. Reacciones de los componentes ácidos y básicos de los Pelets. Reacción de la magnetita.
Quemado	Estabilidad estructural del Pelets, continúan las reacciones hasta su término - magnetita y otros constituyentes.
Post - Quemado	Dar uniformidad a la reacción de los constituyentes en la cama de los Pelets.
Enfriamiento (1° y 2° zona)	Recuperación del calor por enfriamiento de los Pelets.

3.3.2 Balance De Materia

3.3.2.1. Consideraciones

La composición química descrita en el Capítulo 2, referente a los Pelets verdes y el petróleo R-500, son tomadas de la composición promedio del mes.

El flujo másico de la alimentación de los Pelets verdes y el consumo de promedio, son calculados en base al promedio de los datos obtenidos cada vez que se realizaron mediciones de flujo de gases.

Las mediciones efectuadas de flujo volumétrico (expresado en SCFM), son tomadas como promedio de las presiones diferenciales en los ductos tomados a 20 cm. de

distancia desde la base a la zona central. Estas mediciones se realizaron en condiciones similares de operación en el horno, con un seguimiento de 2 semanas, y los datos empleados son el resultado promedio.

El flujo másico mostrado de la protección de parrilla y cantoneras, es calculado mediante la distribución geométrica de la carga de los pelets quemados dentro del palets, asimismo para la conversión de flujo volumétrico a flujo másico se tomo la densidad aparente de los pelets quemados a una granulometría promedio. (3 veces)

El flujo másico de los palets esta basado en el peso promedio de 3 palets (de los 139 palets instalados en el horno), del mismo modo el peso de los barrotes es calculado en base al peso promedio de barrotes nuevos (200 barrotes), multiplicado por el numero de filas y columnas conformadas dentro de los palets.

El factor empleado para reciclo es obtenido del cociente de la diferencia de la alimentación de los Pelets verdes y los Pelets de retorno (undersize) que pasan por rodillos de clasificación.

3.3.2.2 Bases Teóricas

1. Cálculo del flujo másico de los gases en los ductos

Se utiliza el principio de Bernoulli (balance de energía para fluidos incompresibles), el cual se adapta al sistema bajo estudio por presentar presiones diferenciales de los ventiladores en el orden de 50 - 600 mm H₂O.

El instrumento utilizado para la medición es el Tubo Pitot (1.5m) el cual mide la diferencia entre la presión dinámica y estática en un fluido. Esto se representa mediante la siguiente ecuación:

$$V = (2 * (d_1 * g * h) / d_2)^{0.5}$$

Donde:

V : Velocidad del gas (m/min).

d_1 : Densidad del fluido del medidor de presión (Kg/m^3)

d_2 : Densidad del gas (Kg/m^3)

h : Diferencia de alturas en el manómetro (m.)

g : Gravedad (9.81 m/s^2)

El fluido utilizado en el manómetro es el agua. ($d_1 = 1000 \text{ Kg/m}^3$)

Para el cálculo de la densidad del gas se calcula mediante la correlación de gases ideales donde:

$$d_2 = P \cdot M / (R \cdot T)$$

P : Presión del gas (atm.)

M : Peso molecular del gas , $M = \sum M_i \cdot x_i \dots$ (i : componente puro del gas)

R : Constante $0.082 \text{ l-atm / (K-mol)}$

T : Temperatura del gas (K)

El cálculo del flujo volumétrico expresado en pie cúbico por minuto (ACFM) esta dado por :

$$Q (\text{ACFM}) = 35.314 \cdot A \cdot V$$

A : Área interna del ducto (m^2)

V : Velocidad del gas (m/min)

Para expresar el flujo volumétrico se usara el termino SCFM (pie cúbico por minuto a condiciones standard $P = 1 \text{ atm}$, $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$)

$$Q (\text{SCFM}) = Q (\text{ASFM}) \cdot (d_{\text{gas}}/d_{\text{std}})$$

Para el aire : $d_{\text{std}} = 1.186 \text{ Kg/m}^3$

El flujo másico estará expresado por :

$$M_{\text{gas}} = d_{\text{std}} \cdot \text{SCFM}$$

2. Cálculo del agua evaporada en las zonas de secado y pre – quemado.

Para el Secado Ascendente: Se realizaron mediciones de Temperaturas de Bulbo Húmedo y Seco de los gases de salida del ventilador 059 – 690, y mediante el empleo de cartas psicométricas se determinó el contenido de humedad (Y)

$$Y = M_{\text{agua}} / M_{\text{aire seco}} \quad Y : \text{lb. agua / lb. aire seco}$$

$$M_{SA} = 0.0624 * Y * d_{std} * \text{SCFM}$$

M_{SA} : Flujo másico en la zona de secado ascendente (lb./min.)

Para el Secado Descendente: Se realizaron mediciones de Temperatura de Bulbo Húmedo y Seco en la salida de los ductos que corresponden a: Wind box 7, 8 y 9 y el contenido de humedad corresponde a las aportaciones de humedad de los 3 ductos.

$$Y_i = M_{i \text{ agua}} / M_{i \text{ aire seco}}$$

$$M_{SD} = 0.0624 * \sum Y_i * d_{i \text{ std}} * \text{SCFM}_i \quad (i = 1 \dots 3)$$

M_{SD} : Flujo másico en la zona de secado descendente (lb./min.)

La relación de tablas psicometricas utilizadas se muestran en el anexo 7.

El agua evaporada en la zona de pre – quemado se calcula mediante la diferencia del contenido total de humedad y el agua evaporada en las zonas de secado ascendente y descendente.

$$M_{PQ} = M_{\text{agua}} - (M_{SA} + M_{SD})$$

M_{PQ} : Flujo másico de agua evaporada en la zona de pre – quemado. (lb./min.)

3. Cálculo del flujo másico en la alimentación al horno (pelets verdes)

El flujo de Pelets verdes se obtuvo de la diferencia de lecturas de la balanza de suministro y la balanza de retorno.

El flujo de Pelets verdes se expresa en base seca: $M_{pvs} = M_{pv} (1 - (X/100))$

M_{pvs} : Flujo másico seco del Pelets verdes (TLH).

M_{pv} : Flujo másico del Pelets verdes (TLH).

X : Humedad en los Pelets verdes (%).

Para el cálculo de las especies mineralógicas en los Pelets verdes, se obtuvo en base a las composiciones químicas por los elementos de los Pelets Verdes y Quemados (anexo 6)

La composición mineralógica del mineral transicional (WB 21) se calculó en base a la extensión de reacción de los componentes según su temperatura.

4. Cálculo del flujo másico de los pelets quemados usado como protección de parrilla y cantonera.

El flujo másico de los Pelets protección de parrilla y cantoneras viene dado por:

$$M_{pp} = (D_{ap1}/D_{ap2}) * (h_1/h_2) * M_{pv}$$

$$M_{pc} = 2 * (D_{ap1}/D_{ap2}) * (h_3/h_2) * (e_3/l_{pa}) * M_{pv}$$

Donde:

M_{pp} : Flujo másico de los Pelets utilizados como protección de parrilla.

M_{pv} : Flujo másico de Pelets Verdes (Alimentación al horno).

M_{pc} : Flujo másico de los Pelets utilizados como protección de cantoneras.

D_{ap1} : Densidad aparente de los Pelets de protección de parrilla.

D_{ap2} : Densidad aparente de los Pelets verdes.

h_1 : Altura de los Pelets de protección de parrilla dentro del palets.

h_2 : Altura de los Pelets verdes dentro del palets.

h_3 : Altura de los Pelets de protección a cantoneras dentro del palets.

e_3 : Espesor de los Pelets en las cantoneras.

l_{pa} Largo del palets.

5. Cálculo del flujo másico de los barrotes y palets.

El palets es la estructura principal dentro del carro donde se colocan los barrotes formando una parrilla (abertura de 3/8" entre 2 barrotes juntos), donde se va a colocar la carga que ingresa al horno (Pelets de protección parrilla, cantoneras y la carga de Pelets verdes). Para la determinación del flujo másico se tiene:

$$M_{ba} = (N^{\circ}_{fila} * N^{\circ}_{col}) * m_{ba} * M_{pv} / (D_{ap2} * l_{pa} * a_{pa} * h_2)$$

$$M_{pa} = m_{pa} * M_{pv} / (D_{ap2} * l_{pa} * a_{pa} * h_2)$$

Donde:

M_{ba} : Flujo másico de los Barrotes.

M_{pa} : Flujo másico del Palets.

m_{ba} : Peso unitario de un Barrote.

m_{pa} : Peso unitario del Palets.

l_{pa} : Largo del Palets.

a_{pa} : Ancho del Palets.

N°_{fi} : Numero de divisiones del Palets.

N°_{col} : Numero de barrotes colocados por columna.

6. Aire de Filtración

El horno de peletización en estudio se instaló en el año 1968. Se observa que el mismo deterioro del equipo hace posible la pérdida de gases al ambiente (por los sellos laterales), asimismo la infiltración de aire del ambiente al sistema. Los datos

mostrados de aire de filtración se calculan por diferencia de otros puntos de medición para cerrar el balance de masas.

3.3.3. Balance de energía

3.3.3.1. Consideraciones

Para el establecimiento del balance de energía, todas las fuentes de energía térmica son consideradas como términos de entrada del balance, además todas las de utilización y disipación de calor, como términos de salida.

Para efectuar los balances de energía se ha considerado como base en todas las magnitudes térmicas una temperatura de referencia de 25 °C que permita el empleo directo de datos termodinámicos normales.

Para el cálculo de Entalpías de los pelets (verdes, transicional y quemados), material de transporte (palets y barrotes) así como de los gases de proceso se empleó capacidades caloríficas medias, tomando como referencia la temperatura de 25 °C.

El cálculo de las capacidades caloríficas medias se realizó en base a las aportaciones individuales de cada uno de los constituyentes que conforman el material en estudio (pelets, gases y otros), conociendo las capacidades caloríficas individuales de cada constituyente (función de la temperatura) y composición en peso o molar del material en estudio.

Los calores de reacción, serán computados en base a los calores estándares de formación disponibles a 25 °C

La energía entregada por el combustible, se calculara de acuerdo con las especificaciones técnicas del combustible empleado y tomando en consideración el promedio del consumo real de planta del mes.

Para la determinación de la combustión del petróleo como CO y CO₂ se tomo como referencia mediciones anteriores de CO (ppm.) en los ductos de los Wind Box 15, 16 y 17.

El consumo de petróleo desde la tronera 12 al 21, se calcula en base a la abertura de válvula del sistema de control de los quemadores que controla cada una de las zonas del proceso.

El calor absorbido por los linteles se calcula por la cantidad de calor que absorbe el agua que circula por los linteles (linteles superior, inferior y transversal).

Las pérdidas de energía serán calculadas, como la diferencia entre la energía total que ingresa al sistema (sumatoria de todos los términos de entrada) y la energía que sale del mismo (sumatoria de los términos de salida).

3.3.3.2. Bases Teóricas

1. Cálculo de la capacidades caloríficas medias

Los datos de capacidades caloríficas molares en función de la temperatura fueron tomados de Kelley (1960) para las especies mineralógicas de los pelets (pelets verdes, transicional y quemado), Perry (1993) para los compuestos gaseosos, productos de combustión e Incropera (1999) para las aleaciones de acero de los palets y barrotes (anexo 8).

Para una mezcla de compuestos, la capacidad calorífica global estará dada:

$$C_p(T) = \sum_i X_i * C_{p_i}(T) \quad (i : 1 \rightarrow N)$$

Donde:

$C_p(T)$: Capacidad calorífica de la mezcla.

$C_{p_i}(T)$: Capacidad calorífica del elemento o compuesto i.

X_i : Fracción molar del elemento o compuesto i.

N : Numero de elementos o compuestos que conforma la mezcla.

La capacidad calorífica media se define:

$$C_{p_m} = \left(\int_{T_1}^{T_2} C_p(T) dT \right) / (T_2 - T_1)$$

$$C_p(T) = A + B * T + C * T^2 + D/T$$

Donde:

$C_p(T)$: Capacidad calorífica molar en función de la temperatura.

T_2 : Temperatura del sistema en estudio.

T_1 : Temperatura de referencia (25 °C).

A,B,C,D : Constantes.

Se realizó el cálculo de la capacidad calorífica media a intervalos de 10 °C. (Integración numérica), con los datos obtenidos se procedió a realizar un ajuste de curva cúbica con un coeficiente de regresión R^2 del orden de 0.999.

En el anexo 8 se muestran los resultados obtenidos para:

Pelets: Verdes, Transicional y Quemados.

Gases de Proceso: gases de salida del ventilador 059 – 690/691/692/694, Wind Box 7 – 9, vapor de agua.

Material de Transporte: Barrotes, palets.

2. Cálculo de Entalpía

La entalpía de los pelets, gases de proceso y material de transporte se determina de la siguiente manera:

$$H = M * C_{p_m} * (T - 77)$$

Donde:

H Entalpía (BTU/min)

M Flujo másico (Lb/min)

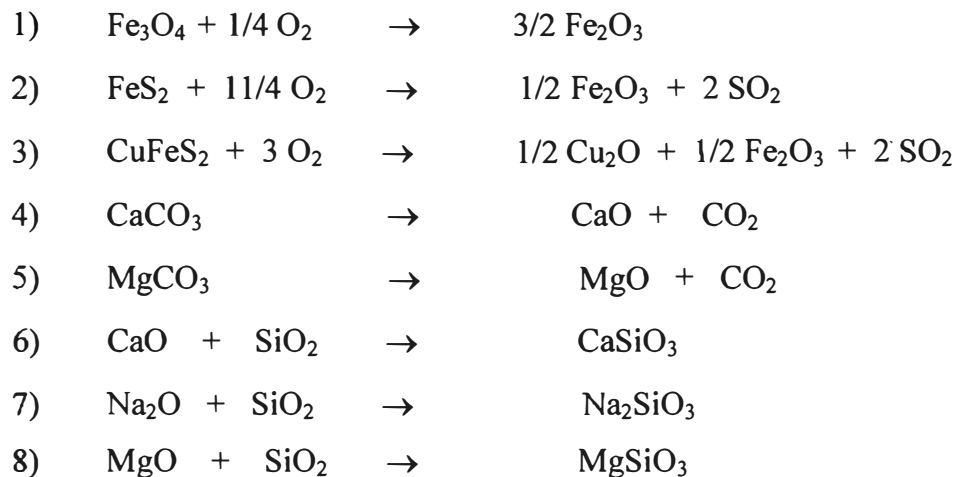
C_{p_m} : Capacidad calorífica (BTU/ Lb. - °F)
 T : Temperatura (°F)

Cuando se realiza cambio de fase se adiciona el término adicional de Calor Latente de Vaporización (λ), y para el cálculo de la entalpía se adicionara el término:

$$H = M \cdot \lambda.$$

3. Calor de Reacción

El pelets en su proceso de transformación cuenta con las siguientes reacciones:



La reacción 1 corresponde a la transformación de la magnetita (Fe_3O_4) a Hematita (Fe_2O_3), siendo la reacción más importante dentro del proceso.

Las reacciones 2 y 3 corresponden a las reacciones de compuestos sulfurados, con la eliminación de S en forma de SO_2 .

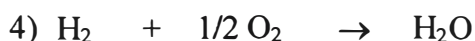
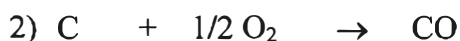
Las reacciones 4 y 5 corresponden a la descomposición de los carbonatos a óxidos (CaO, MgO).

Las reacciones 6 al 8 corresponden a las reacciones de adición producidas a temperaturas altas (mayor a 800 °C) dentro del horno (junto con las reacciones de cristalización de la hematita dan estabilidad a la estructura de los pellets).

Los valores de calor de reacción, fueron tomados de Perry (6^{ta} ed. 1980) a una temperatura de referencia de 25 °C. Estos datos son mostrados en el anexo 9

4 Calor entregado por el Combustible

Las reacciones de los constituyentes del combustible (Petróleo Residual R-500) son:



La composición del combustible se detalla en el capítulo 2

Para el cálculo de la extensión de reacción en las reacciones del Carbono con el Oxígeno se tomo mediciones de CO en los gases de salida WB 15, 16 Y 17, y mediante un cálculo iterativo se determina la extensión de reacción expresado el porcentaje en peso: 78.8 % para el CO₂ y 21.2 % para el CO.

Para el cálculo de consumo de petróleo en los quemadores 12 al 21 se llegó a realizar por disposición de quemadores:

Sistema Control (TRC)	Perfiles T. (°C)	Quemadores Cantidad (N°)	Abertura válvula Unitaria (%)	Abertura Total (%)	(%)
002	800	2	40.6	81.2	8.0
003	950	4	30.3	121.2	12.0
004	1250	6	64.3	385.8	38.1
005	1300	8	53.0	424.0	41.9

Asimismo la disposición de los quemadores dentro del sistema de control es:

Sistema Control (TRC)	Quemadores Troneras
002	12 - 14
003	15 - 17
004	18 - 20
005	21 - 24

En el TRC 005 que dispone de 8 quemadores (2 quemadores por lado del horno) consume el 41.9 % del petróleo total, entonces para 2 quemadores de esta zona (Tronera 21) será de 10.5 %.

La Cantidad de petróleo usado en la tronera 12 al 21 estará dado:

$$(Mpe)_{12-21} = Mpe * (y_{12-14} + y_{15-17} + y_{18-20} + (y_{21-24})/4)$$

$$(Mpe)_{22-24} = Mpc - (Mpe)_{12-21}$$

Donde:

Mpe : Flujo másico de petróleo total (R – 500).

$(Mpe)_{12-21}$: Flujo másico del petróleo en las troneras 12 al 21.

$(Mpe)_{22-24}$: Flujo másico del petróleo en las troneras 22 al 24.

y_{i-j} : Porcentaje en peso del petróleo usado desde el quemador i al j.

(i – j: 12 – 14, 15 – 17, 18 – 20, 21 – 24)

5. Calor absorbido por los Linteles

Para el cálculo de calor absorbido por los Linteles se dispone información de la diferencia de temperaturas de entrada y salida de los linteles, también se realizaron mediciones para la determinación del flujo de agua total que ingresa a los linteles (1250 gpm)

Se considera que el flujo total de agua se distribuye uniformemente en los 81 Linteles (superior, inferior y transversal), se tiene:

$$Q_{\text{lintel}} = M_{\text{agua}} * C_p * \Delta T$$

M_{agua} : Flujo másico del agua (128.77 Lb./min)

C_p : Capacidad calorífica del agua (1.0 BTU/Lb. - °F)

ΔT : Diferencia de temperatura (°F).

Se tiene la siguiente tabla:

Zonas	N° Linteles	ΔT (°F)	BTU/min
Sec. Descendente	8	7.2	4747
Pre - quemado	15	10.8	13351
Quemado	16	10.8	14241
Post- Quemado	10	10.8	8901
1° Enfriamiento	26	27	57854
2° Enfriamiento	6	27	13351

3.3.4. Balance de materia

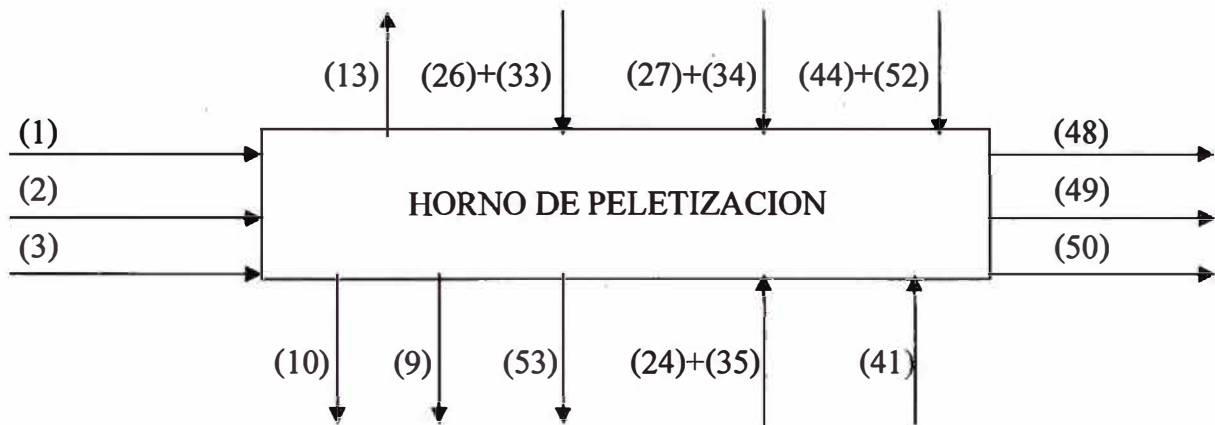
Para un mejor entendimiento de las corrientes de flujo de materiales de entrada y salida del sistema se presentan diagramas de proceso con su nomenclatura respectiva:

Nomenclatura

- 1 Pelets verdes húmedo (WB 1 - Alimentación).
- 2 Pelets de protección (WB 1 - Alimentación).
- 3 Barrotes y cantoneras (WB 1 - Alimentación).
- 4 Pelets verdes (WB 6).
- 5 Pelets de protección (WB 6).
- 6 Barrotes y cantoneras (WB 6).
- 7 Gas de salida (059- 692).
- 8 Gas de salida (Ducto Bylan – WB 8-15).
- 9 Gas salida (POS 5).
- 10 Gas salida (Filtración gas).
- 11 Gas entrada a la zona de secado ascendente.
- 12 Gas entrada (HIC 20, HIC 23).
- 13 Gas de salida (059-690).
- 14 Pelets verdes (WB 9).
- 15 Pelets protección (WB 9).
- 16 Barrotes y cantoneras (WB 9).
- 17 Gas de entrada (Ducto Bylan - WB 8 - 9).
- 18 Gas de entrada (POS 12).
- 19 Gas de salida (WB 7 – 9).
- 20 Pelets transicional (WB 21).
- 21 Pelets protección (WB 21).
- 22 Barrotes y cantoneras (WB 21).
- 23 Gas de entrada (Ducto Bylan - WB 10 – 15).
- 24 Filtración de aire del ambiente.

- 25 Recuperación directa (Tronera 10 – 21).
- 26 Aire atomización (Tronera 10 – 21).
- 27 Petróleo (Quemadores 12 - 21).
- 28 Gas de salida (WB 10-21).
- 29 Pelets quemado (WB 28).
- 30 Pelets protección (WB 28).
- 31 Barrotes y cantoneras (WB 28).
- 32 Recuperación directa (Tronera 22 – 28).
- 33 Aire atomización.(Tronera 22 – 28).
- 34 Petróleo (Quemadores 22 - 24).
- 35 Filtración de aire del ambiente.
- 36 Filtración aire (059-694).
- 37 Gas de salida (059-693).
- 38 Pelets quemado (WB 41).
- 39 Pelets protección (WB 41).
- 40 Barrotes y cantoneras (WB 41).
- 41 Aire de entrada (059-694).
- 42 Aire de entrada (WB 42-44).
- 43 Aire de entrada (WB 29-41).
- 44 Aire de entrada (sello WB 29 – 41).
- 45 Aire caliente recuperado.
- 46 Aire caliente filtración (hacia 059 – 695).
- 47 Recuperación Directa.
- 48 Pelets Quemados (WB 44 –Descarga).
- 49 Pelets Protección (WB 44 – Descarga).
- 50 Barrotes y cantoneras (WB 44 – Descarga).
- 51 Aire de salida (059 – 695).
- 52 Aire de entrada (sello WB 42 – 44).
- 53 Gas de salida (059 – 691).

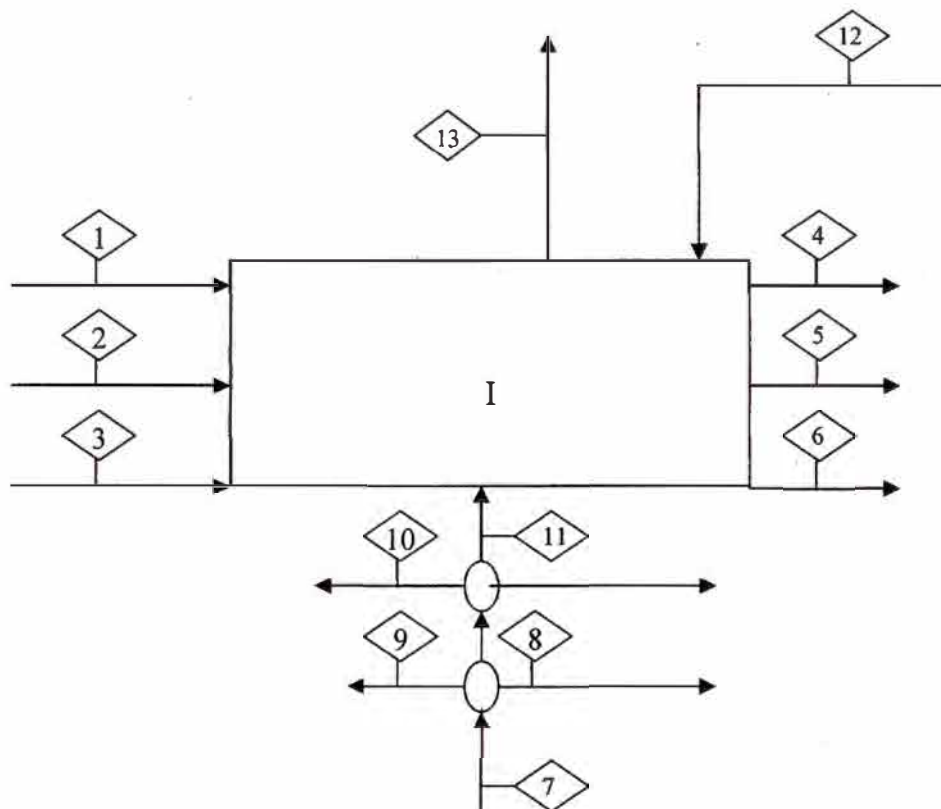
3.3.4.1 Balance global



Entrada	Flujo másico (lb./h)
Combustible (27) + (34)	8775
Aire Atomización (26) + (33)	41485
Aire Sello (44) + (52)	39302
Aire Filtración (24) + (35)	82530
Aire 059 – 694 (41)	1790422
Pelets Verdes secos (1 – a)	573977
Agua (Humedad) (1 – b)	56767
Protección Parrilla (2)	223848
Palets (3 – a)	1301006
Barrotes (3 – b)	346185
Total	4464298

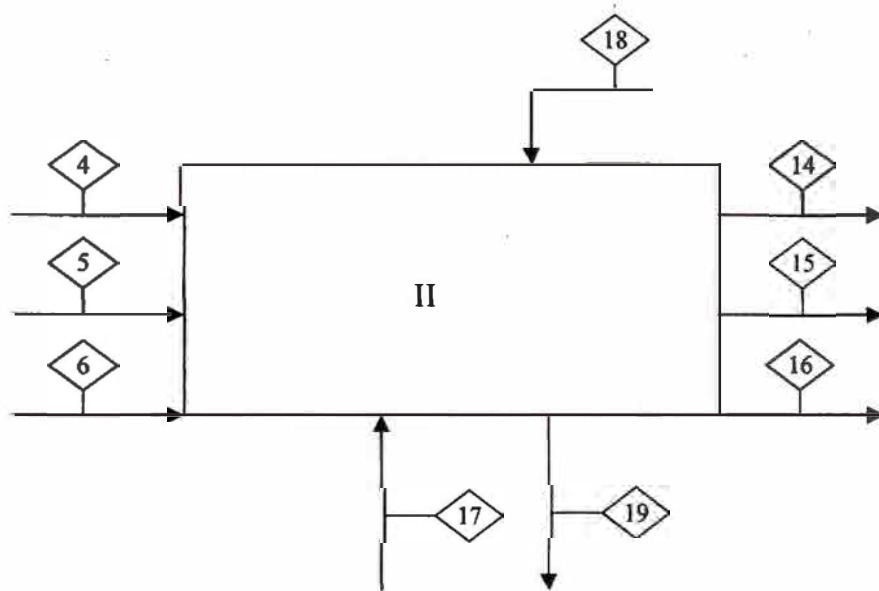
Salida	Flujo másico (lb./h)
Gases 059 – 690 (13)	777041
Gases 059 – 691 (53)	1009045
POS 5 (9)	192104
Aire Filtración (10)	15698
Pelets Quemados (48)	588873
Protección Parrilla (49)	223848
Palets (50 – a)	1301006
Barrotes (50 – b)	346185
Total	4464298

3.3.4.2 Zona de secado ascendente (WB 1 – 6)



Descripción	SCFM	Flujo (lb./h)
Entrada		
Gas de entrada (11)	147000	641802
Gas de entrada (12)	23000	100438
Pelets Verdes (1)		630744
Pelets Protección (2)		223848
Barros y palets (3)		1647192
Total	170000	3244025
Salida		
Gas de salida (059 - 690) (13)	182648	777041
Pelets Verdes (4)		595944
Pelets Protección (5)		223848
Barros y palets (6)		1647192
Total	182648	3244025

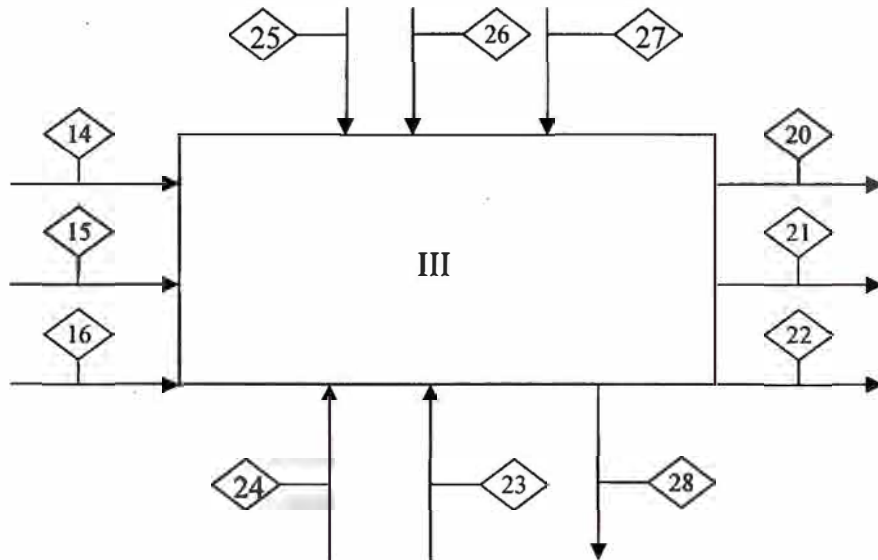
3.3.4.3. Zona secado descendente (WB 6 – 9)



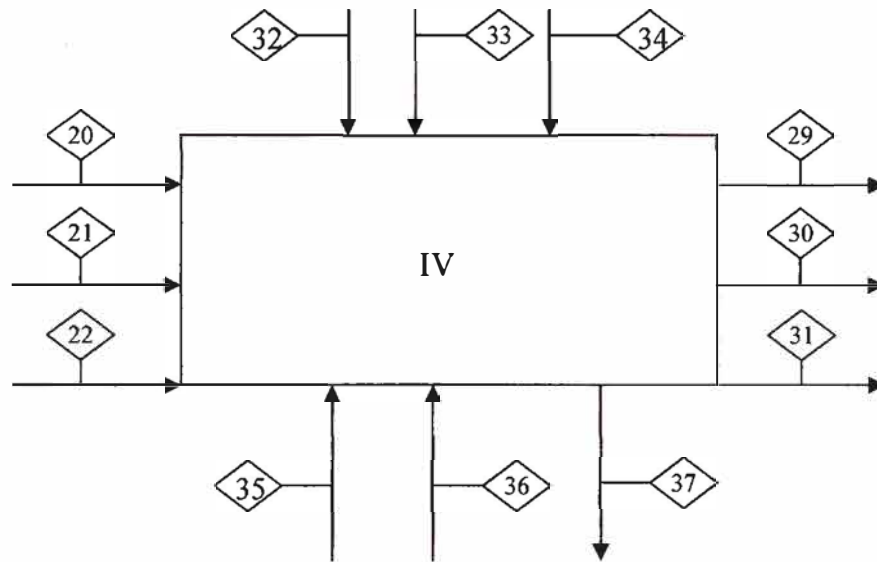
Descripción	SCFM	Flujo (lb./h)
Entrada		
Ducto Bylan (17)	3000	13098
Aire entrada - POS12 (18)	54000	235812
Pelets Verdes (4)		595944
Pelets Protección (5)		223848
Barrotes y palets (6)		1647192
Total	57000	2715894
Salida		
Gas de salida (WB 7 - 9) (19)	58822	256110
Pelets Verdes (14)		588744
Pelets Protección (15)		223848
Barrotes y palets (16)		1647192
Total	58822	2715894

Descripción	SCFM	Flujo (lb./h)
Entrada		
Gas de salida (059 - 692) (7)		
Total	215000	938690
Salida		
Ducto Bylan (8)	18000	78588
POS 5 (9)	44000	192104
Gas Filtración (10)	6000	26196
Gas de entrada (11)	147000	641802
Total	215000	938690

3.3.4.4 Zona pre – quemado / quemado (WB 10 – 21)

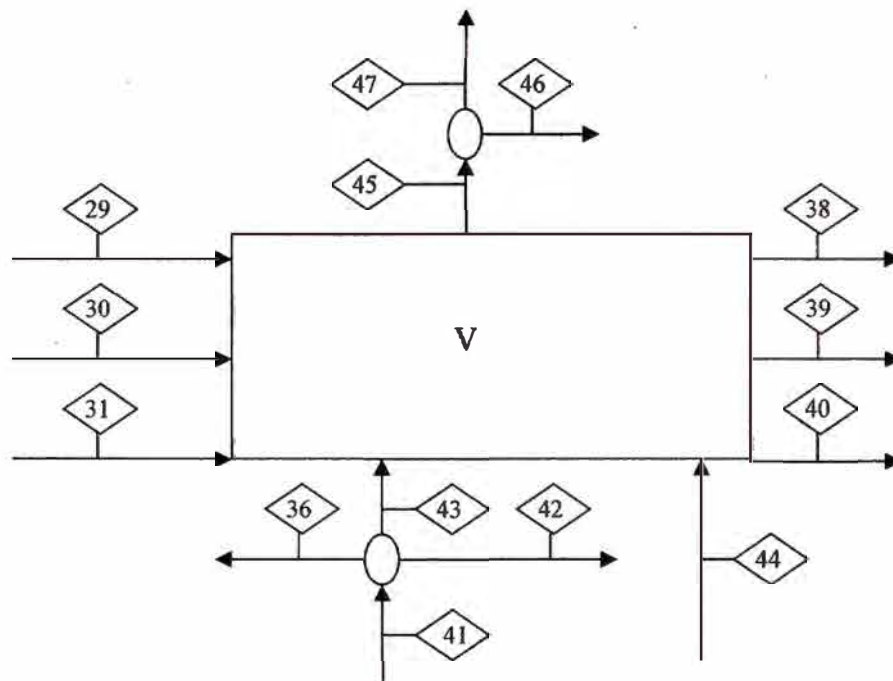


Descripción	SCFM	Flujo (lb./h)
Entrada		
Ducto Bylan (23)	15000	65490
Filtración de aire (24)	5231	22842
Aire atomización (26)	6000	26201
Recuperación Directa (25)	143556	626892
Petróleo (27)		6018
Pelets Verdes (14)		588744
Pelets Protección (15)		223848
Barros y palets (16)		1647192
Total	169787	3208867
Salida		
Gas de salida (WB 10 - 21) (28)		752935
Pelets Transicional (20)		584892
Pelets Protección (21)		223848
Barros y palets (22)		1647192
Total		3208867

3.3.4.5. Zona quemado / post -quemado (WB 22 – 28)

Descripción		SCFM	Flujo (lb./h)
Entrada			
Filtración de aire	(35)	13303	58048
Filtración de aire (059 - 694)	(36)	13444	58709
Aire atomización	(33)	3500	15284
Recuperación Directa	(32)	185000	807873
Petróleo	(34)		2757
Pelets Transicional	(20)		584892
Pelets Protección	(21)		223848
Barrotes y palets	(22)		1647192
Total		215247	3398603
Salida			
Gas de salida (059 - 693)	(37)	215010	938690
Pelets Quemados	(29)		588873
Pelets protección	(30)		223848
Barrotes y palets	(31)		1647192
Total			3398603

3.3.5.5 Zona 1° enfriamiento (WB 29 – 41)

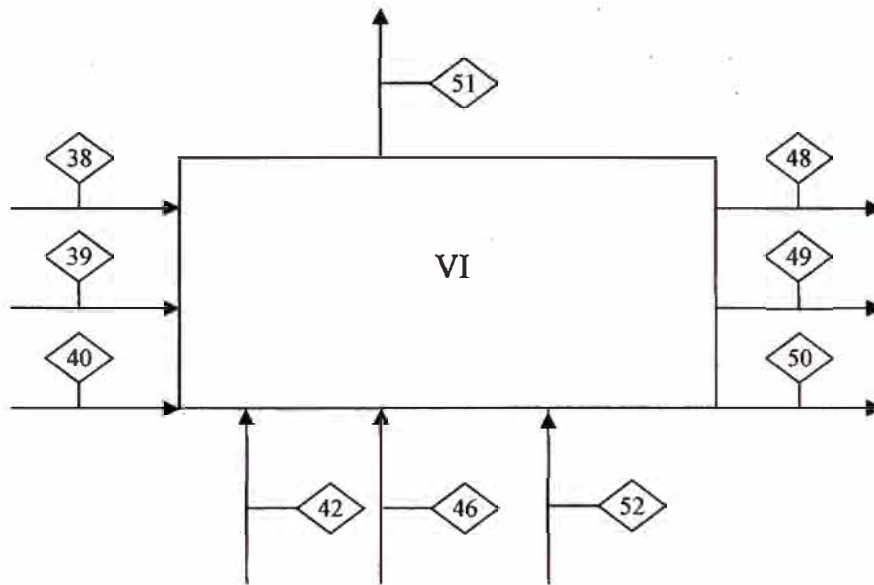


Descripción		SCFM	Flujo (lb./h)
Entrada			
Aire frío de entrada	(43)	330556	1443499
Aire de sello	(44)	8000	34935
Pelets Quemados	(29)		588873
Pelets protección	(30)		223848
Barrotes y palets	(31)		1647192
Total		338556	3938347
Salida			
Aire caliente Recuperado	(45)	338556	1478434
Pelets Quemados	(38)		588873
Pelets protección	(39)		223848
Barrotes y palets	(40)		1647192
Total			3938347

Descripción	SCFM	Flujo (lb./h)
Entrada		
Aire frío (059 - 694) (41)		
Total	410000	1790422
Salida		
Aire frío de entrada (42)	66000	288214
Aire frío de entrada (43)	330556	1443499
Filtración de Aire (36)	13444	58709
Total	410000	1790422

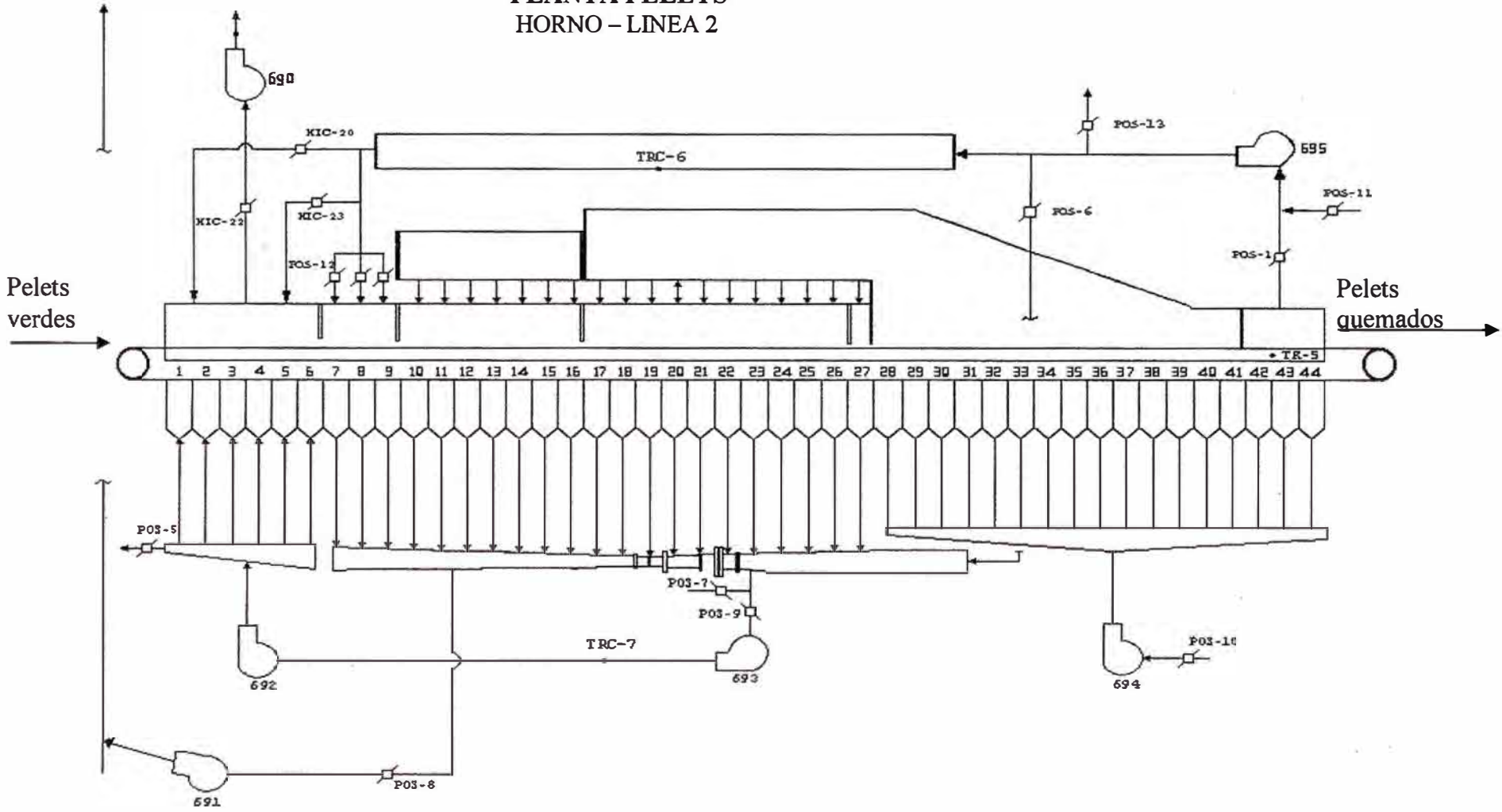
Descripción	SCFM	Flujo (lb./h)
Entrada		
Aire caliente Recuperado (45)		
Total	338556	1478434
Salida		
Aire de filtración (46)	10000	43669
Recuperación Directa (47)	328556	1434765
Total	338556	1478434

3.3.4.7 Zona 2° enfriamiento (WB 42 – 44)



Descripción		SCFM	Flujo (lb./h)
Entrada			
Aire frío de entrada	(42)	66000	288214
Aire de filtración	(46)	10000	43669
Aire Sello	(52)	1000	4367
Pelets Quemados	(38)		588873
Pelets protección (39)			223848
Barrotes y palets	(40)		1647192
Total		77000	2796163
Salida			
Aire de salida (059 - 695)	(51)	77000	336250
Pelets Quemados	(48)		588873
Pelets protección (49)			223848
Barrotes y palets	(50)		1647192
Total			2796163

PLANTA PELETS
HORNO - LINEA 2

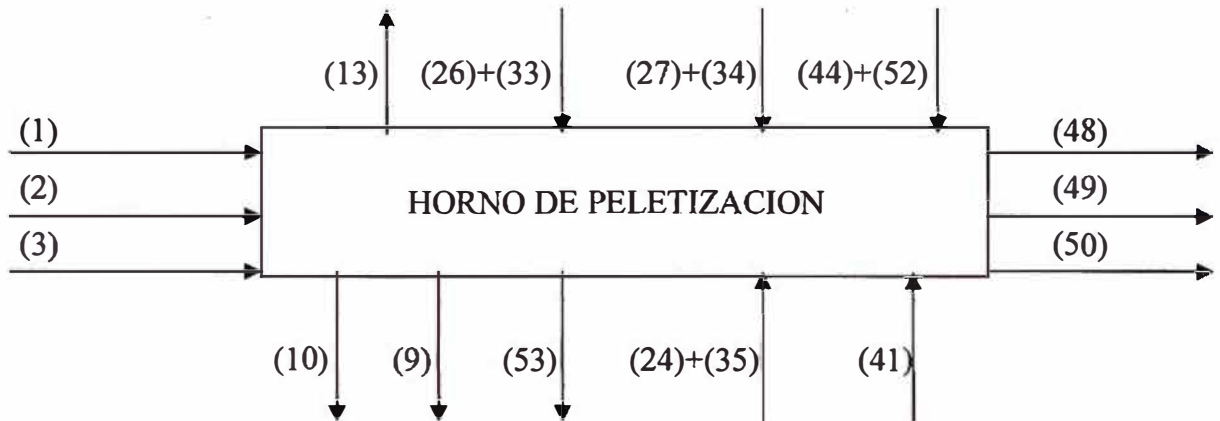


3.3.4.8 PORCENTAJE EN PESO DE LOS GASES DE SALIDA EN LOS VENTILADORES

Compuesto	059 - 690 (13)	059 - 691 (53)	059 - 692/693 (37)	059 - 694 (41)	059 - 695 (51)
N ₂	71.88	73.95	75.29	75.20	75.20
O ₂	20.74	19.19	21.55	22.84	22.84
CO	0.10	0.26	0.12		
CO ₂	0.60	1.77	0.73		
SO ₂	0.09	0.13	0.06		
H ₂ O	6.58	4.70	2.24	1.96	1.96
Total	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

3.3.5 Balance de energía

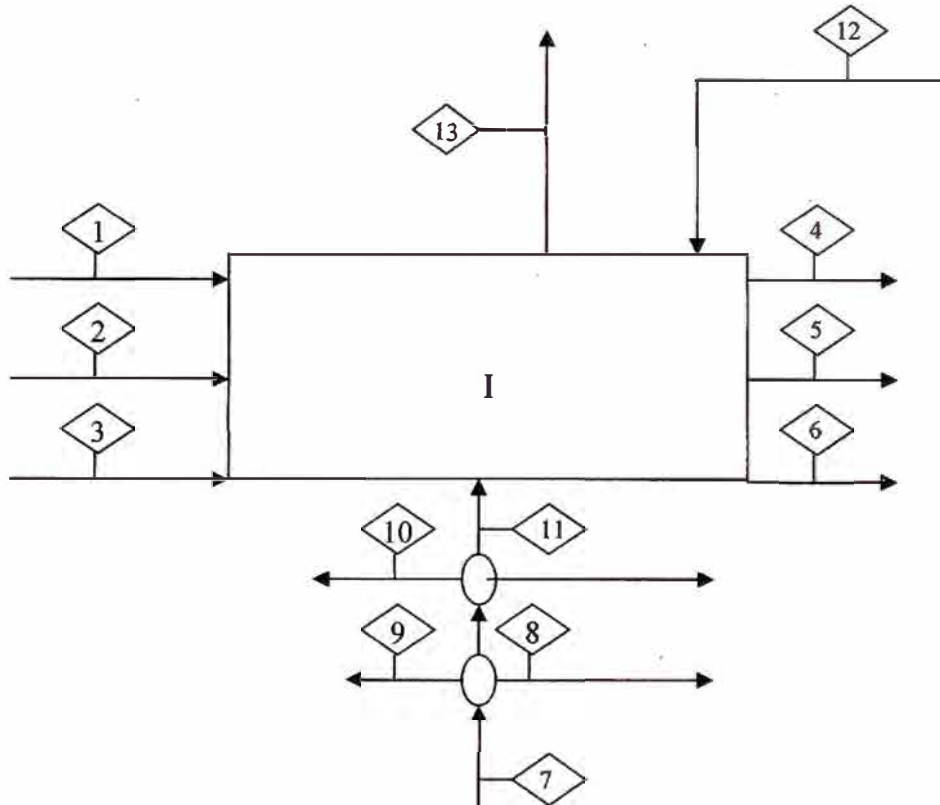
3.3.5.1 Balance Global



Entrada	BTU/min.	(%)
Petróleo R - 500 (27)+(34)	9951	0.22
Aire Atomización (26)+(33)	6406	0.14
Aire Sello (44)+(52)	578	0.01
Aire Filtración (24)+(35)	1213	0.03
Aire 059 - 694 (41)	26310	0.58
Pelets Verdes secos (1 - a)	-13737	-0.30
Agua (Humedad) (1 - b)	-5109	-0.11
Pelets Protección (2)	67540	1.50
Palets (3 - a)	147786	3.28
Barrotes (4 - a)	32723	0.73
Rxn. Petróleo R - 500	2446678	54.23
Rxn. Pelets	1791136	39.70
Total	4511474	100.00

Salida	BTU/min.	(%)
Gases 059 - 690 (13)	981975	21.77
Gases 059 - 691 (53)	1231828	27.30
POS 5 (9)	451786	10.01
Gas Filtración (10)	60615	1.34
Pelets Quemados (48)	228327	5.06
Pelets protección (49)	109083	2.42
Barrotes y palets (50)	438272	9.71
Linteles	112445	2.49
Total	3614330	80.11
Pérdida por Radiación	897144	19.89

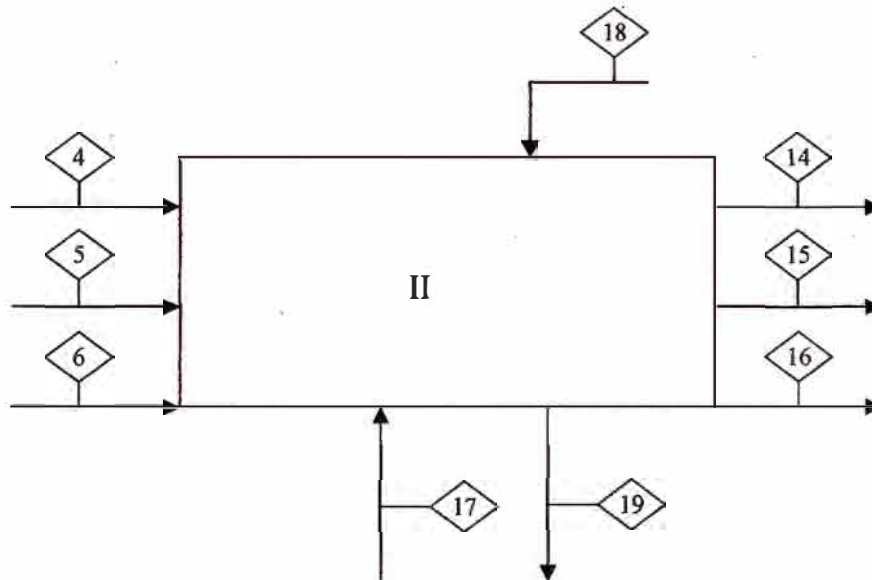
3.3.5.2 Zona secado ascendente (WB 1-6)



Descripción		Q (BTU/min.)	(%)
Entrada			
Gas de entrada	(11)	1485065	77.36
Gas de entrada	(12)	205332	10.70
Pelets Verdes	(1)	-18846	-0.98
Pelets Protección	(2)	67540	3.52
Barrotes y palets	(3)	180508	9.40
Total		1919599	100.00
Salida			
Gas de salida (059 - 690)	(13)	981975	51.16
Pelets Verdes	(4)	206008	10.73
Pelets Protección	(5)	85664	4.46
Barrotes y palets	(6)	602460	31.38
Total		1876107	97.73
Pérdida por Radiación		43493	2.27

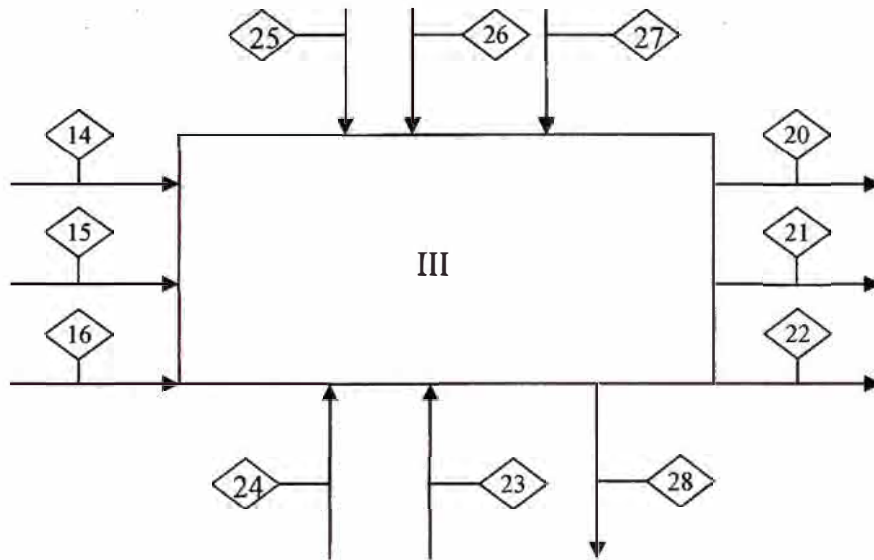
Descripción	Q (BTU/min.)	(%)
Entrada		
Gas de salida (059 - 692) (7)		100.00
Total	2207592	100.00
Salida		
Ducto Bylan (8)	184822	8.37
POS 5 (9)	451786	20.47
Gas Filtración (10)	60615	2.75
Gas de entrada (11)	1485065	67.27
Total	2182288	98.85
Pérdida por Radiación	25304	1.15

3.3.5.3. Zona secado descendente (WB 6 – 9)



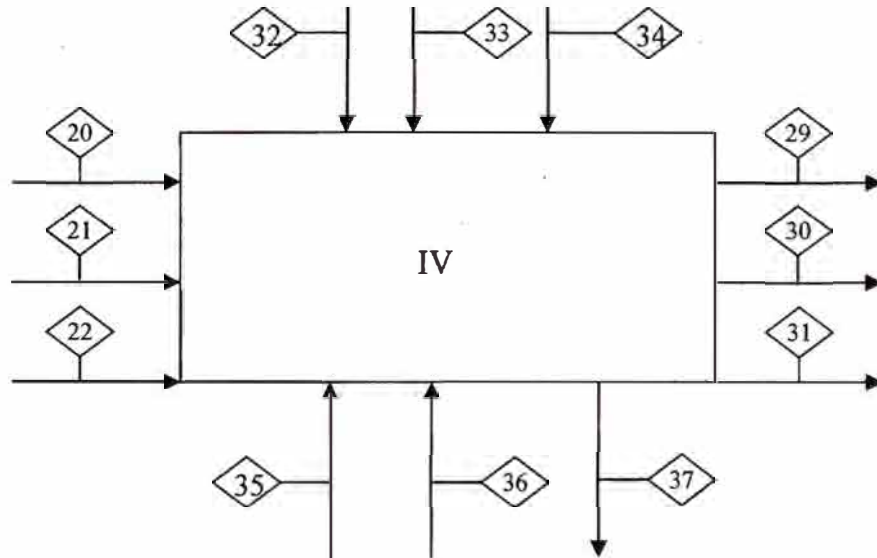
Descripción	Q (BTU/min.)	(%)
Entrada		
Ducto Bylan (17)	30804	2.19
Aire entrada - POS12 (18)	482083	34.26
Pelets Verdes (4)	206008	14.64
Pelets Protección (5)	85664	6.09
Barrotes y palets (6)	602460	42.82
Total	1407019	100.00
Salida		
Gas de salida (WB 7 - 9) (19)	439120	31.21
Pelets Verdes (14)	217074	15.43
Pelets Protección (15)	79525	5.65
Barrotes y palets (16)	640864	45.55
Lintel	4747	0.34
Total	1381330	98.17
Pérdida por Radiación	25688	1.83

3.3.5.4 Zona Pre-quemado/Quemado (WB 10-21)



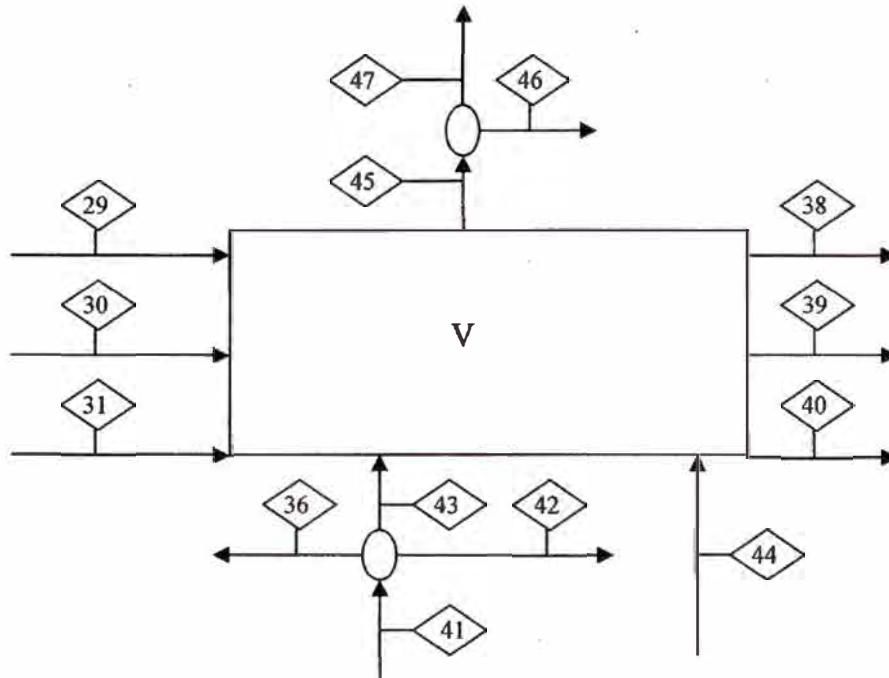
Descripción	Q (BTU / min.)	(%)
Entrada		
Ducto Bylan (23)	154018	1.95
Filtración de aire (24)	360	0.00
Aire atomización (26)	4046	0.05
Recuperación Directa (25)	3752558	47.46
Petróleo (27)	6825	0.09
Pelets Verdes (14)	217074	2.75
Pelets Protección (15)	79525	1.01
Barrotes y palets (16)	640864	8.10
Calor de reacción del Petróleo	1678012	21.22
Calor de reacción del Pelets	1374217	17.38
Total	7907500	100.00
Salida		
Gas de salida (WB 10 - 21) (28)	885386	11.20
Pelets Transicional (20)	3558258	45.00
Pelets Protección (21)	1150833	14.55
Barrotes y palets (22)	2205256	27.89
Lintel	20471	0.26
Total	7820204	98.90
Pérdida por Radiación	87296	1.10

3.3.5.5. Zona quemado / post -quemado (WB 22 – 28)



Descripción	Q (BTU/min.)	(%)
Entrada		
Filtración de aire (35)	853	0.01
Filtración de aire (059 - 694) (36)	863	0.01
Aire atomización (33)	2360	0.02
Recuperación Directa (32)	4835908	37.36
Petróleo (34)	3126	0.02
Pelets Transicional (20)	3558258	27.49
Pelets Protección (21)	1150833	8.89
Barrotes y palets (22)	2205256	17.04
Calor de reacción del Petróleo	768666	5.94
Calor de reacción del Pelets	416919	3.22
Total	12943042	100.00
Salida		
Gas de salida (059 - 693) (37)	2350003	18.16
Pelets Quemados (29)	4995608	38.60
Pelets Protección (30)	1883676	14.55
Barrotes y palets (31)	3617330	27.95
Lintel	16021	0.12
Total	12862638	99.38
Pérdida por Radiación	80404	0.62

3.3.5.6 Zona 1° enfriamiento (WB 29-41)

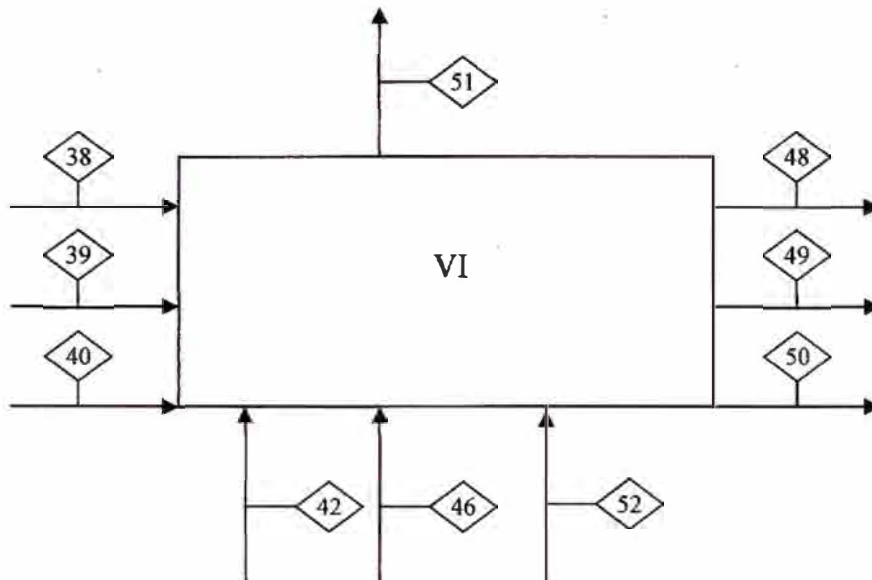


Descripción		Q (BTU/min.)	(%)
Entrada			
Aire frío de entrada	(43)	21212	0.20
Aire de sello	(44)	513	0.005
Pelets Quemados	(29)	4995608	47.49
Pelets Protección	(30)	1883676	17.91
Barrotes y palets	(31)	3617330	34.39
Total		10518339	100.00
Salida			
Aire caliente Recuperado	(45)	9108409	86.60
Pelets Quemados	(38)	477943	4.54
Pelets Protección	(39)	179974	1.71
Barrotes y palets	(40)	633762	6.03
Lintel		57854	0.55
Total		10457943	99.43
Pérdida por Radiación		60396	0.57

Descripción	Q (BTU/min.)	(%)
Entrada		
Aire frío (059 - 694) (41)		
Total	26310	100.00
Salida		
Aire frío de entrada (42)	4235	16.10
Aire frío de entrada (43)	21212	80.62
Filtración de Aire (36)	863	3.28
Total	26310	100.00

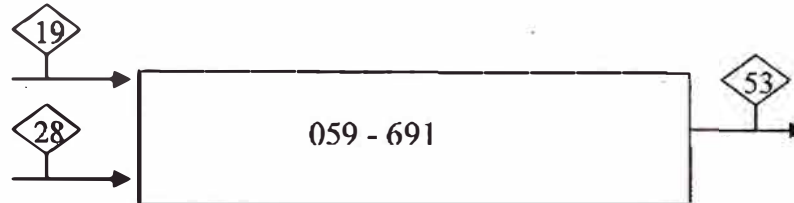
Descripción	Q (BTU/min.)	(%)
Entrada		
Aire caliente Recuperado (45)		
Total	9108409	100.00
Salida		
Aire de filtración (46)	269037	2.95
Recuperación Directa (47)	8839372	97.05
Total	9108409	100.00

3.3.5.7 Zona 2° enfriamiento (WB 42-44)



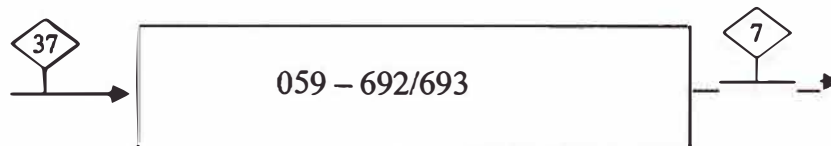
Descripción	Q (BTU/min.)	(%)
Entrada		
Aire frío de entrada (42)	4235	0.27
Aire de filtración (46)	269037	17.19
Aire Sello (52)	64	0.004
Pelets Quemados (38)	477943	30.54
Pelets Protección (39)	179974	11.50
Barrotes y palets (40)	633762	40.50
Total	1565016	100.00
Salida		
Aire de salida (059 - 695) (51)	755983	48.31
Pelets Quemados (48)	228327	14.59
Pelets Protección (49)	109083	6.97
Barrotes y palets (50)	438272	28.00
Lintel	13351	0.85
Total	1545016	98.72
Pérdida por radiación	20000	1.28

3.3.5.8 Ducto del Ventilador 059 – 691



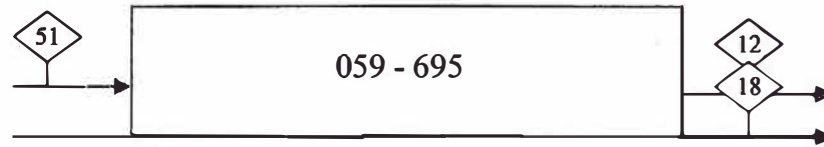
Descripción	Q (BTU/min.)	(%)
Entrada		
Gas de salida (WB 7 - 9) (19)	439120	33.15
Gas de salida (WB 10 - 21) (28)	885386	66.85
Total	1324506	100.00
Salida		
Gas de salida (059 - 691)		
Total	1231828	93.00
Pérdida por Radiación	92678	7.00

3.3.5.9 Ducto del Ventilador 059 – 692/ 693



Descripción	Q (BTU/min.)	(%)
Entrada		
Gas de salida (059 - 693) (37)		
Total	2350003	100.00
Salida		
Gas de salida (059 - 692) (7)		
Total	2207592	93.94
Pérdida por Radiación	142411	6.06

3.3.5.10 Ducto del ventilador 059- 695



Descripción	Q (BTU/min.)	(%)
Entrada		
Aire de salida (059 - 695) (51)		
Total	755983	100.00
Salida		
Gas de entrada (12)	205332	27.16
Aire entrada - POS12 (18)	482083	63.77
Total	687415	90.93
Pérdida por Radiación	68568	9.07

3.3.5.11 Ducto de Recuperación Directa



Descripción	Q (BTU/min.)	(%)
Entrada		
Recuperación Directa (47)		
Total	8839372	100.00
Salida		
Recup. Directa WB 10-21 (25)	3752558	42.45
Recup. Directa WB 22-28 (32)	4835908	54.71
Total	8588466	97.16
Pérdida por Radiación	250906	2.84

CAPITULO IV: PROPUESTAS TECNICAS PARA LA MEJORA DEL RENDIMIENTO TERMICO DEL HORNO

El petróleo residual (R – 500) da un aporte calorífico del 54.23 % de la energía total suministrada, tomando como base un ritmo de producción nominal de 320 TLH de pelets verdes (antes de clasificación). Esta cantidad calorífica depende de la combustión del petróleo R – 500 en los quemadores, según resultados de análisis de gases (sección 3.3.4.8) se ha encontrado que los quemadores están operando con una pérdida de energía considerable (porcentajes de CO superiores a 2000 ppm en los ductos de salida del horno) produciendo una combustión incompleta que se encuentra en el orden: 78.8 % del C que reacciona a CO₂ y 21.2 % del C que reacciona a CO (% peso).

Asimismo de la sección 3.3.4.8, se observa que el contenido de O₂, en los gases de combustión es del orden del 19.19 – 21.55 % en comparación al CO₂ formado 0.6 – 1.77 %, esto indica que el O₂ presente en el sistema se encuentra en exceso.

Entonces es necesario incrementar la eficiencia de combustión en el Horno, para lo cual una de las alternativas propuestas consiste en mejorar el sistema de quemado, mediante la implementación de nuevos quemadores. (Alternativa 1).

Al analizar las energías de salida del horno en los gases de chimenea: Puntos 9, 13 y 53, se tiene que las energías en los punto 13 y 53 son básicamente energía latente de vapor de agua, dejando un porcentaje pequeño de energía sensible que podría ser recuperada. Asimismo se requiere de un tratamiento previo de los gases para eliminar el SO₂, CO y partículas generadas en el proceso por ser agentes corrosivos a una temperatura menor de 145 °C, por la formación de ácido sulfúrico diluido (ver anexo 10), lo que resulta no factible. Por lo tanto, podemos concluir que la energía correspondiente al punto 9 (Temperatura de salida de 330 °C) es factible de poderse utilizar técnicamente como aire de

proceso que regresa a la cámara de secado ascendente y/o descendente, produciendo una mayor remoción del contenido de humedad con un menor consumo de combustible.

El calor requerido solo para vaporizar el agua que ingresa al horno (humedad del pelets verdes) es de 920477 BTU/min. a un contenido de humedad del 9.0 %; esto representa el 20.4 % de energía requerida por el sistema. Una implementación en la mejora de filtrado con un contenido de humedad del 8.5 % como promedio, reduce el contenido de energía a 869339 BTU/min.(19.2 %). Un contenido menor de humedad produce una menor compactación en la Formación del Pelets ocasionando una menor resistencia mecánica a las caídas (produce agrietamientos en los pelets).

De los resultados del balance de energía se obtiene que las pérdidas por radiación son del orden del 19.89 % de la energía total entregada, el cual corresponde el 7.04 % a pérdidas producidas en las zonas del horno y el 12.85 % a pérdidas producidas por el transporte de los gases de proceso en los ductos. Los ductos del proceso están revestidos de refractario, los cuales presentan espesores de 4 a 6 pulg. Una implementación en el aumento del espesor del refractario con una menor conductividad térmica y emisividad (bajo contenido de aluminio en su composición), ocasiona menores pérdidas de calor por radiación

4.1 Alternativa 1: Aumento del rendimiento de la combustión

En base a los análisis de gases (ver sección 3.3.4.8) se determinó que la actual presencia de CO en los gases de los wind boxes en los ductos de salida del horno del orden de 2500 partes por millón (salida del ventilador 059 – 691).

La presencia de CO en una instalación con quemadores en buen estado y con buena eficiencia de combustión es del orden de 300 - 500 partes por millón (Dato proporcionado en la hoja técnica de cotización), lo cual revela que los quemadores del horno, están quemando el combustible de una manera ineficiente,

desaprovechándose una parte del calor que puede liberar el proceso de combustión y por lo tanto, consumiéndose mas combustible del que se requiera para el proceso en si.

Por lo tanto, se plantea mejorar el proceso de combustión del horno mediante un cambio en todos los quemadores de petróleo, aumentando el rendimiento de la combustión de tal manera que el porcentaje de CO sea menor a 500 partes por millón y reducir la presencia de carbono en los gases de salida (cualitativo).

Para evaluar la rentabilidad del cambio de quemadores se ha determinado el ahorro anual en consumo de combustible que resulta de la implementación de dicho cambio, y se ha comparado con el costo de inversión que representa el mismo, así como el tiempo en que se pagaría la inversión.

El cálculo del calor perdido por la combustión incompleta del CO se ha determinado de la siguiente manera:

El calor perdido debido a la combustión incompleta es:

$$\Delta H = H_{CO_2} - H_{CO}$$

En donde:

H_{CO_2} : entalpía de reacción del CO_2 (-14086.8 BTU/lb. de C.)

H_{CO} : entalpía de reacción del CO (-3962.4 BTU/lb. de C.)

Del consumo de petróleo y resultados de análisis químico del petróleo residual R – 500, se obtiene la cantidad de C que interviene en la combustión.

La cantidad de C empleado para la formación de CO, multiplicado por la diferencia de entalpía, viene ha ser la energía calorífica perdida por la combustión del CO.

En los siguientes gráficos se presente el efecto del grado de conversión del CO₂ y la cantidad de calor perdido por formación de CO en función de las ppm de CO que se genera en la salida del ducto del ventilador 059 – 691 (gas de escape).

GRAFICO 4 - 1

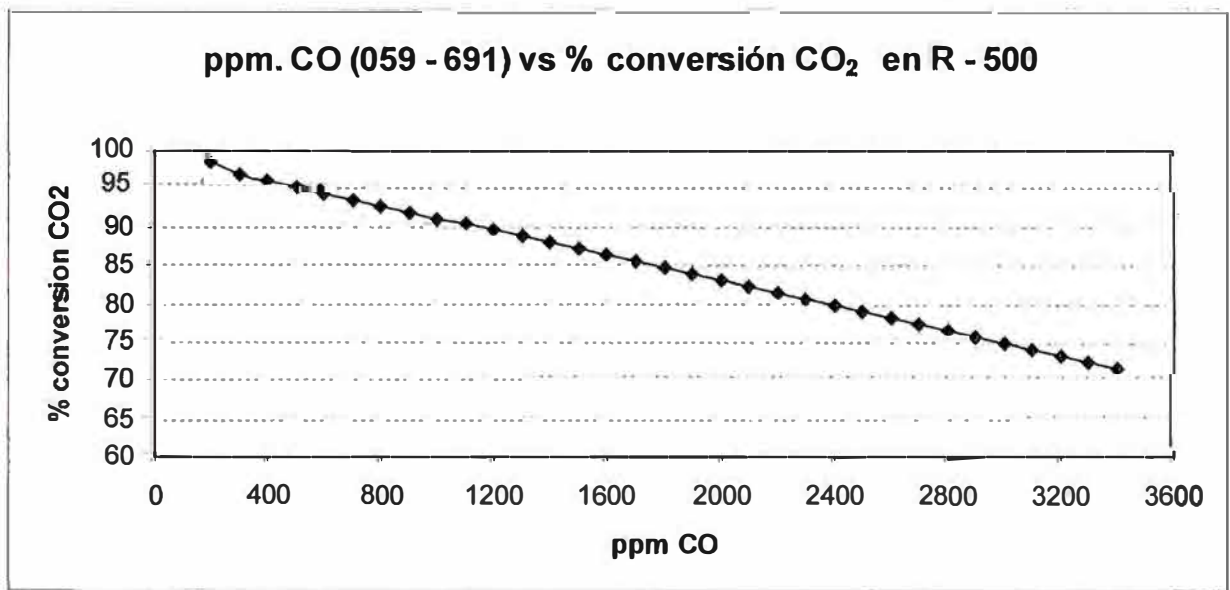
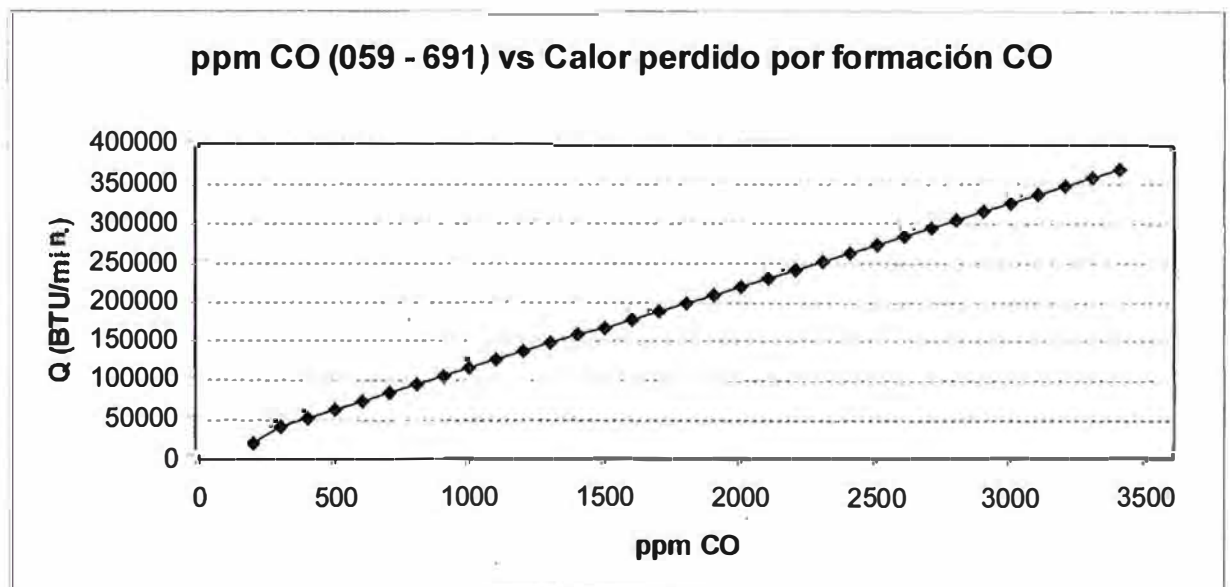


GRAFICO 4 - 2



En el gráfico 4 – 1 se calculó la composición del CO en el ducto del ventilador 059 – 691 a diferente grado de reacción del C a CO₂ en el petróleo residual R – 500.

En el gráfico 4 – 2 se muestra el calor perdido por la combustión incompleta del C al pasar a CO, para el flujo de gas proveniente del ventilador 059 – 691.

Se tiene:

$$\Delta H_1 = (0.788 * 14086.8 - 0.212 * 3962.4) = 10260.37 \text{ BTU/lb. de C}$$

Para una concentración de 500 ppm. en el ducto 059 – 691 (96% C reacciona como CO₂ y 4% C que reacciona como CO)

$$\Delta H_2 = (0.96 * 14086.8 - 0.04 * 3962.4) = 13364.83 \text{ BTU/lb. de C}$$

$$\text{Ganancia de calor: } 13364.83 - (10260.37) = 3104.46 \text{ BTU/lb. de C.}$$

Para un consumo de petróleo de 3.8 gal./TL se tiene:

$$\Delta H = 220000 \text{ BTU/min.}$$

Este ahorro de energía se expresa en una disminución del consumo de petróleo ha 3.48 gal./TL.

4.2 Alternativa 2 : Recuperación de gases de escape

Esta alternativa busca mejorar las condiciones de temperatura y humedad de ingreso de los pelets al horno empleando aire caliente proveniente de la recuperación de calor adicional en el horno.

Para recaudar a los pelets verdes se han estudiado dos probables fuentes de recuperación de calor:

- La recuperación del calor que actualmente se pierden con los gases que salen del horno por el ventilador 059-691.
- La recuperación del calor al utilizar el aire expulsado por el POS 5.

En lo que viene a continuación se presenta el desarrollo de las alternativas mencionadas.

4.2.1 Recuperación de calor en los gases de escape en el ventilador 059 – 691.

El gas de salida del ventilador 059 – 691 tiene las siguientes características:

Flujo másico (lb./h) : 1009045

Temperatura (°C) : 150

Presión (mm H₂O) : 550

Composición Química: (ver sección 3.3.4.8)

Calor de vaporización de agua (BTU/min.) : 356195

Calor sensible (BTU/min.) : 875633

De acuerdo a las características del gas, su aprovechamiento de calor implica disminuir la temperatura del gas que sale del horno por este ventilador. Sin embargo, técnicamente existe un límite de temperatura llamado el punto ácido de rocío, en el que el ácido sulfúrico formado en los gases de salida por la presencia de azufre y agua en el combustible, se condensa, causando una severa corrosión sobre cualquier superficie metálica con la que este en contacto.

Dicho punto ácido de rocío depende de la cantidad de azufre y agua presentes en el gas (aportación de azufre del mineral y combustible) y del agua formada durante la combustión.

En el anexo 10 se presenta la gráfica que permite determinar el punto ácido de rocío en función del porcentaje de azufre en el combustible.

De dicha curva se obtiene, para el tipo combustible empleado en el horno, que la temperatura de rocío del ácido sulfúrico es del orden de 140 °C

Por lo tanto, siendo la temperatura del gas unos 150°C a la salida del ventilador 059-691. Técnicamente resulta inconveniente el empleo del calor que se pierde en estos gases, debido a la imposibilidad de disminuir su temperatura sin que se condense el ácido sulfúrico presente en los gases.

En el caso que el gas de salida del ventilador 059 – 691 realice un tratamiento para la remoción de SO₂, CO y partículas finas (técnicas de absorción o catálisis), implica una serie de costos (insumos, operativos, mantenimiento) e instalación de la técnica de tratamiento, a la vez que el poder calorífico recuperado (usado en sistema de precalentamiento) no es tan significativo, por lo cual no es viable.

4.2.2 Recuperación de calor en los gases de escape del POS 5.

El gas de salida de la compuerta (POS 5) tiene las siguientes características:

Flujo másico (lb./h) : 192104

Temperatura (°C) : 340

Presión (mm H₂O) : 450

Composición Química : (similar al 059 – 692, ver sección 3.3.4.8)

Calor sensible (BTU/min.) : 451786

El aire caliente es usado nuevamente en las zonas de secado ascendente y descendente, acondicionándose entradas (ductos con refractario) al costado de los ductos del HIC 20, HIC 23 Y POS 12.

Para el diseño de la tubería es necesario calcular el diámetro de la tubería para una caída de presión que va de 450 mm H₂O a 150 mm H₂O (presión de los gases en el HIC 20, HIC 23, POS 12). A mayor presión en la descarga se ocasiona un deterioro del estado físico de los pelets (rajadura).

Para la utilización del gas proveniente del POS 5, se requiere la instalación de un ducto con un diámetro 1.2 m, de una longitud de 12m (aproximadamente), con la incorporación de una compuerta regulable (zona de secado ascendente), asimismo una tubería auxiliar de 1m diámetro por 4m de longitud (zona de secado descendente). Ver diagrama 4 – 2.

La caída de temperatura del gas por el traslado a la zona de secado se asume de 15 °C, lo cual significa que el aire ingresa a una temperatura de 325 °C. El gradiente de temperatura utilizado para la evaporación del contenido de humedad es de: $\Delta T = (325 - 150) \text{ °C} = 175 \text{ °C}$, expresado en términos de energía sera:

(ΔH) : Flujo másico (lb. /min.)*capacidad calorífica (BTU/LB.-°F)* Δ Temperatura (°F)

$$(\Delta H) = (192104/60)*(0.25)*(175*1.8) = 252236 \text{ BTU/min.}$$

La utilización real del gas del POS 5 resulta ser del 55.8 % de la energía inicial entregada al proceso de secado.

4.3 Otras Propuestas

Estas propuestas son: Sistema de Precalentamiento del Combustible y mejora del aislamiento térmico (refractarios).

Se hace referencia que las propuestas mencionadas es de carácter cualitativo debido a que no fue posible cuantificar el ahorro del combustible expresado en gal./TL., lo cual tiene su repercusión en el análisis económico (capítulo 5).

El sustento de ambas propuestas tienen base teórica en información Técnica (ver Anexo 11) sobre el uso adecuado del petróleo antes de ser atomizado (a mayor temperatura de entrada, menor tensión superficial y mayor área de contacto entre el aire – combustible), asimismo concerniente a los refractarios se conoce que ha menor emisividad , menores será la perdida por radiación.

4.3.1 Sistema de precalentado de combustible

Actualmente se precalienta el combustible a la salida del tanque diario hasta la temperatura de 110 - 120 °C y luego se bombea a la zona de los quemadores, en donde es inyectado directamente al horno.

La instalación existente presenta las siguientes deficiencias:

Instalación de la bomba de atomización del petróleo ubicada después del calentador correspondiente.

Calentador del petróleo para la atomización demasiado alejado de la zona de quemadores.

Aislamiento de tuberías en mal estado

Temperatura de atomización por debajo del valor recomendado para el petróleo de alta viscosidad.

A fin de dar solución a este problema se plantea el empleo de resistencias eléctricas que estarían instaladas en las tuberías de ingreso a los quemadores y cada una controlada por un termostato regulado a la temperatura de atomización del combustible.

También se recomienda estudiar la posibilidad de reubicar la bomba de combustible antes del calentador de petróleo para la atomización del combustible.

Así también es conveniente revisar las válvulas y sensores del sistema de control del calentador de petróleo.

Similaramente es necesario efectuar un trabajo de verificación de la operatividad de la trampa de vapor del calentador de petróleo.

Se recomienda actuar sobre las válvulas de control de presión de vapor a fin de determinar su correcto funcionamiento.

Considerando que el recalentamiento del combustible con las resistencias eléctricas sean de 20°C para un flujo de combustible de 999 gal/h se tiene que la capacidad total de resistencias eléctricas es de 76 Kw.

De esta manera, se garantiza una buena atomización del combustible en los quemadores y por lo tanto, se optimizan las condiciones para conseguir el aumento del rendimiento de la combustión.

4.3.2 Mejora del aislamiento térmico (refractarios)

Del balance de energía se han obtenido pérdidas de energía por radiación en las diferentes zonas del proceso:

Zonas del Horno	Q (BTU/min.)
Secado Ascendente	43493
Secado Descendente	25688
Pre - Quemado / Quemado	87296
Quemado / Pos Quemado	80404
Primer Enfriamiento	60396
Segundo Enfriamiento	20000
Total	317277

Ductos de transporte gases	Q (BTU/min.)
secado ascendente	25304
ventilador 059 - 691	92678
ventiladores 059 - 692/693	142411
ventilador 059 - 695	68568
Recuperación Directa	250906
Total	579867

Las pérdidas de calor que se producen en una pared de aislamiento esta dada por la siguiente expresión:

$$Q = \frac{T_s - T_{oo}}{1} \cdot \frac{1}{(hr + he) \cdot A}$$

$$he : 0.19 \cdot (T_s - T_{oo})^{(1/3)}$$

$$hr : \frac{\sigma \cdot E \cdot (T_s^4 - T_{oo}^4)}{(T_s - T_{oo})}$$

donde :

Ts : Temperatura de superficie (C)

E : Emisividad de la pared del horno o ducto

T_{oo} : Temperatura del medio ambiente (C)

he : Coeficiente convectivo de transferencia de calor (Kcal/h m² C)

- hr : Coeficiente equivalente de radiación (Kcal/h m² C)
 sigma : Coeficiente de radiación (4.8 * 10⁻⁸ Kcal/hm² K⁴)

En el caso que se considere aislamiento de espesor “e” con una conductividad térmica K, el calor perdido esta dado por:

$$Q = \frac{T_s - T_{oo}}{\frac{1}{(hr_1 + he_1).A} + \frac{e}{K.A}}$$

$$he_1 : 0.19 \cdot (T_{s1} - T_{oo})^{(1/3)}$$

$$hr_1 : \frac{\sigma \cdot E \cdot (T_{s1}^4 - T_{oo}^4)}{(T_{s1} - T_{oo})}$$

En estas ecuaciones T_{s1} representa la temperatura en la superficie de aislamiento.

El calor perdido disminuye conforme se incrementa el espesor del aislamiento. Si se analiza el efecto de variación en el espesor se tiene:

$$(Q/Q_1) = (K + e_1 \cdot (hr_1 + he_1)) / (K + e \cdot (hr_1 + he_1))$$

Para temperaturas superiores a los 800 °C , K/e << hr₁+he₁ y se considera despreciable, entonces:

$$(Q/Q_1) = e_1/e \quad (\text{aproximadamente})$$

Para una reducción del 10 % en pérdidas de energía por radiación y con un espesor actual de 4 pulg. , se tiene un espesor de: (1/(1-0.1))*4 = 4.44 ≈ 4.5 pulg.

CAPITULO V EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LAS PROPUESTAS TÉCNICAS SOBRE AHORRO ENERGÉTICO

5.1 Evaluación de la situación actual

Los datos mostrados corresponden a los costos producidos en el año 2002. En Planta Pelets Línea 2.

Así se tiene lo siguiente:

El costo de energía eléctrica y petróleo residual R – 500, representa el 97 % de los costos totales de operación :

Costo Operación

Residual R - 500	US\$/gal.	gal./Tls	Tls/año	US\$/año
	0.58833	3.8	2086110	4663820

Energia Electrica	US\$/Kwh	Kwh/Tls	Tls/año	US\$/año
	0.04643	35.17	2086110	3406499

Rubro	MUS\$/año	(%)
Residual R - 500	4663.8	56.06
Energía Eléctrica	3406.5	40.94
Otros	249.6	3.00
Total	8319.9	100.00

Costo de Mantenimiento (MUS\$/año): 62.0

Costo Total = Costo Operación + Costo Mantenimiento = 8379.9 MUS\$/año

Para una proyección en 10 años, asumiendo que los costos totales se mantienen constantes y a una tasa de descuento del 12 %, el valor presente neto (VPN) es de (47350.60) MUS\$/año.

En el Anexo 14 (cuadro N° 1) se muestra el flujo neto de fondos de la situación actual.

5.2 Alternativa 1: Aumento del rendimiento de la combustión (Cambio de quemadores)

Para evaluar el costo de cambio de quemadores se ha solicitado presupuestos de proveedores de acuerdo al tipo de combustible, atomización y capacidad, los cuales se incluyen en el Anexo 13

Costo en la adquisición de los quemadores y accesorios:

Quemadores y accesorios	Cantidad (unid)	US\$/unid.	MUS\$
	26	22500	585.0

Costo de Instalación y puesta en Marcha (10 % Inversión Total): 65.0 MUS\$

Inversión Total: 650.0 MUS\$

La reducción del consumo del combustible al implementarse el cambio de quemadores es de 3.48 gal. /TL, obteniéndose los siguientes costos:

Rubro	MUS\$/año	(%)
Residual R - 500	4271.1	53.9
Energía Eléctrica	3406.5	43.0
Otros	249.6	3.1
Total	7927.2	100.0

El costo por mantenimiento se mantiene constante (62.0 MUS\$).

El costo total será de : 7989.2 MUS\$.

Para una proyección de 10 años (TD = 12 %), se tiene:

Valor Presente Neto (VPN_1) = (45790.76) MUS\$

Como $VPN_1 < VPN \rightarrow$ Proyecto es rentable.

Asimismo presenta un TIR = 59.9 %, tasa hasta el cual el proyecto se mantiene rentable.

El tiempo de Recuperación de la Inversión será : 2 años.

En el anexo 14 (cuadro N° 2) se observa el Flujo Neto de fondos de la alternativa 1.

5.3 Alternativa 2 : Aprovechamiento de gases de escape (Compuerta POS 5)

Los costos de Tuberías, compuerta corresponden a datos obtenidos en Cotizaciones según se muestra en la siguiente tabla:

Características			Costo		
Caso	Diámetro (m)	Espesor (plg)	Ducto (US\$)	Acces. (US\$)	Total (MUS\$)
	1	0.25	180915	18091.5	199.01
2	1.4	0.25	206760	20676	227.44
3	1.6	0.25	232605	23260.5	255.87
4	1.8	0.25	258450	25845	284.30

El caso en estudio corresponde a la alternativa 1 (1m diámetro): 199.01 MUS\$

El costo de la compuerta y sistema de control (8 % de la Inversión Total): 18.30 MUS\$

El costo de Instalación e Ingeniería (5 % de la Inversión Total): 11.43 MUS\$

Inversión Total: 228.7 MUS\$.

En la sección 4.2.2 se tiene que la utilización del gas proveniente del POS 5, se obtiene un consumo de petróleo R - 500 de 3.41 gal./TL

Se tiene los siguientes costos:

Rubro	MUS\$/año	(%)
Residual R - 500	4185.2	53.4
Energía Eléctrica	3406.5	43.4
Otros	249.6	3.2
Total	7841.3	100

Para un costo de mantenimiento constante (62.0 MUS\$) se tiene un costo total de: 7903.3 MUS\$.

Para una proyección de 10 años (TD = 12 %), se tiene:

Valor Presente Neto (VPN_2) = (45234.42) MUS\$.

Como $VPN_2 < VPN \rightarrow$ Proyecto es rentable.

Asimismo presenta un TIR = 182.0 %, esto indica que el proyecto es ventajoso.

El tiempo de Recuperación de la Inversión será: 8 meses.

En el Anexo 14 (cuadro N° 3) se muestra el flujo neto de fondos de la Alternativa 2.

Asimismo se muestra en el cuadro N° 4 el flujo neto de fondos de la implementación de las 2 alternativas a la vez (alternativa 1 + alternativa 2).

El ahorro de combustible para este caso es:

Ahorro: $(\text{Energía aprovechable})/(\text{Energía suministrada por el petróleo}) * \text{Consumo Petróleo}$

Ahorro: $(252236/2446678) * 3.8 = 0.391 \text{ gal./TL}$

El consumo de petróleo se reduce de 3.80 a 3.41 gal / TL.

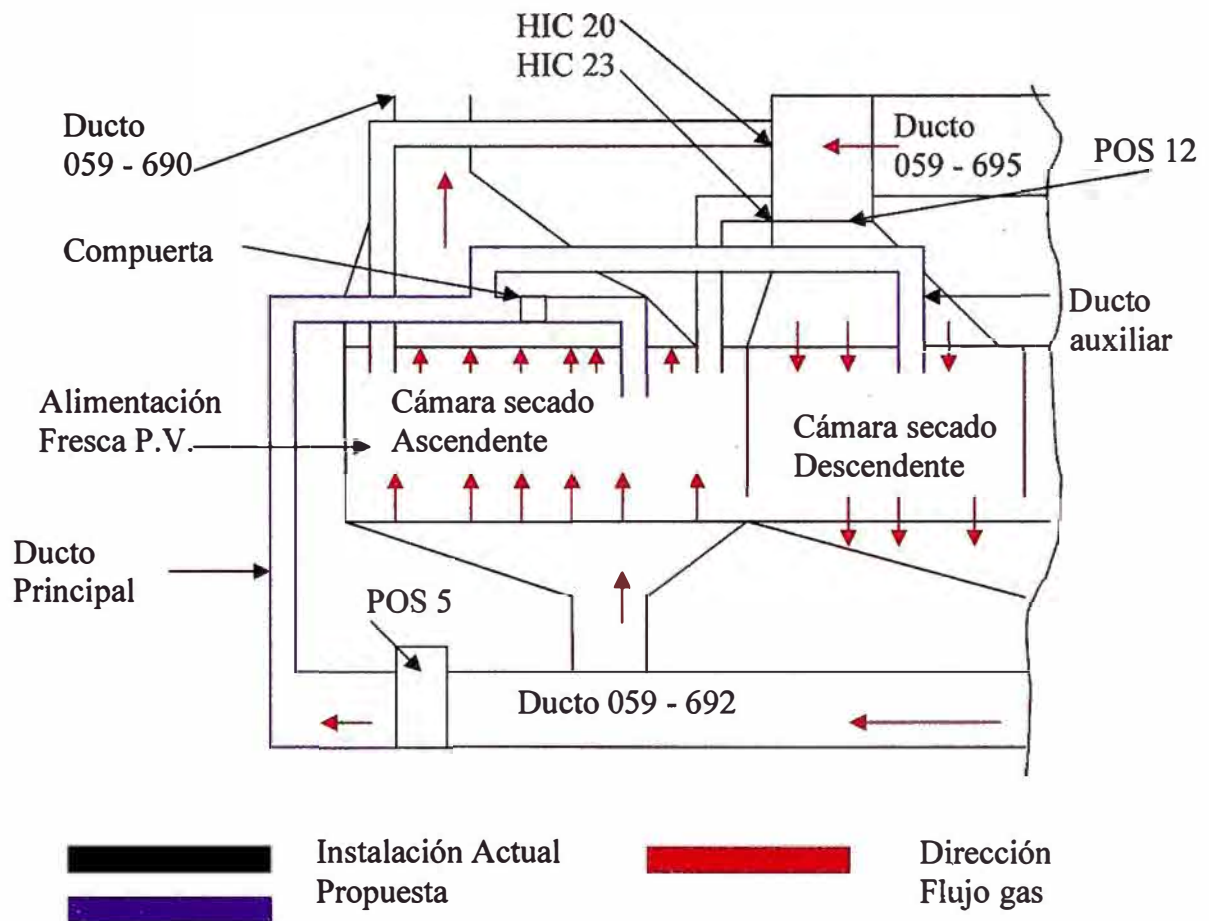


Diagrama 4 - 2 Propuesta 2 – Recuperación de gases de escape POS 5

5.4 OTRAS PROPUESTAS

5.4.1 Pre calentamiento del combustible

Considerando que el recalentamiento de combustible con las resistencias eléctricas sean de 20° C, para un flujo de combustible de 3.380 Kg./h, se tiene que la capacidad total de las resistencias eléctricas es de 76 KW.

El costo total de la implementación de este sistema de calendario asciende aproximadamente a MUS\$ 5.0

Esta inversión se justifica en la medida que asegura una buena atomización de los combustibles en los quemadores.

5.4.2 Mejora del Aislamiento Térmico (Refractarios)

El horno Línea 2 comprende una serie de calidades de material refractario, según se indica en la tabla:

Zona del Horno	Ubicación	Material
Secado (Asc. y Desc.)	Techo Paredes	Coralite Varnon
Pre - Quemado/Quemado y Post. Quemado	Techo Paredes	Coralite Plastico Castable Super
Enfriamiento (1° y 2°)	Techo Paredes	Kaolite 2300 - LI Castable Super

Ductos de Transporte de gases: Coralite Plástico.

De acuerdo a la sección 4.3.2 se tiene que las mayores perdidas de calor corresponden a los ductos de transporte de gases, que viene ha ser el 64.6 % de las perdidas de radiación total.

Si se cambiara la calidad del ladrillo refractario a Castable Super (refractario de mejor calidad), lograria reducir las perdidas de energia.

Precio del Coralite Plastico : 49.2 US\$/Caja

Precio del Castable Súper : 73.5 US\$/Caja

Cemento para Refractario : 35.0 US\$/Caja

Para 2000 cajas ($c/Caja = 1 m^2$), se tiene:

Costo Refractario : $2000*(73.5) = 147.0$ MUS\$

Para 50 cajas de cemento : $50*35 = 1.75$ MUS\$

Costo de Mano de Obra (3 % de la inversión Total) : 4.55 MUS\$

Inversión Total : 153.3 MUS\$

CONCLUSIONES

1. Mediante el empleo de balances energéticos por etapas de proceso, permiten cuantificar las entradas y salidas de energía, que en sí cumple un doble papel:
 - Diagnóstico de pérdidas de energía para la implementación de mejoras.
 - Sirve como base para la evaluación de la performance del proceso productivo en cuanto a la calidad del producto.

2. Se ha evaluado la implementación de las mejoras analizadas en el presente estudio, presentándose a continuación el cuadro resumen:

Propuestas de mejora	Consumo Petróleo	Inversión (MUS\$)	VPN _{12%} (MUS\$)	Tiempo Recuperación
Situación actual	3.80	0	47359.6	----
Cambio de quemadores	3.48	650.0	45790.3	2 años
Aprovechamiento de gases de escape (Pos 5)	3.41	228.7	45234.4	8 meses
Total (Alternativa 1 y 2)	3.09	878.7	43314.7	1 año 2 meses

- Del cuadro se observa que la propuesta de aprovechamiento de gases de escape proveniente de la compuerta (POS 5), es la alternativa mas rentable, con una reducción hasta de 3.41 gal/TL.

- La implementación de ambas propuestas implica una reducción del consumo de petróleo R – 500 de 3.09 gal /TL con un ahorro de $(47359.6-43314.7) = 4044.9$ MUS\$/ en un tiempo de evaluación de 10 años.

3. El análisis energético de la alternativa 1, se basa en la reducción de la formación de CO, de 2500 ppm a 500 ppm en los gases de escape según requisición de proveedores.
4. El análisis energético de la alternativa 2, se basa en la recuperación de gases de escape del POS 5 con un flujo de 44000 SCFM (192104 lb./h) medición promedio, el flujo del gas de escape oscila de 40000 SCFM hasta 48000 SCFM (Sistema de regulación de presión). Esto implica una oscilación de recuperación de calor que es del orden de 9.1 % lo que significa un consumo de petróleo del 3.44 gal. /TL como margen inferior.
5. De las propuestas de carácter cualitativo se tiene:
 - La implementación del cambio de refractarios de mejor calidad implica una inversión de 153 MUS\$. Sería conveniente realizar pruebas a nivel de laboratorio para determinar la reducción de calor que se lograría al introducir este cambio y realizar la evaluación económica.
 - La implementación de un calentador eléctrico de combustible en la zona de ingreso a los quemadores garantizara una correcta temperatura de atomización, evitándose pérdidas por mala combustión. El costo de instalación de esta mejora asciende a MUS\$ 5.0
6. El orden de jerarquía para la implementación de las mejoras propuestas en el presente estudio es el siguiente:
 - Reutilización de gases de escape en el POS 5. Mediante la instalación de tuberías, compuerta regulable y sistema de control.
 - El cambio de todos los quemadores del horno con su sistema de control.
 - Implementación de un aislamiento en las paredes y ductos del horno.

RECOMENDACIONES

1. Realizar un mantenimiento general en el Horno, con la finalidad de minimizar:
 - Filtración de aire frío de entrada (afecta a la estabilidad térmica del proceso).
 - Pérdida de energía por filtración de gases caliente (En la sección 3.3.5 se muestra una pérdida en el orden 60615 BTU/min., a una temperatura de 325 °C).
2. Los pelets quemados y pelets de protección salen a una temperatura 93 y 117 °C (ver Anexo 5), se puede realizar un estudio para la recuperación de calor, mandando parte de la carga de la salida del horno de manera directa a la tolva de protección de parrilla de tal manera de incrementar la temperatura de entrada de los pelets de protección de parrilla a una temperatura mayor a 86 °C. (Actualmente los pelets son enfriados mediante rociamiento con agua, luego son zarandeados para eliminar los pelets que tienen un diámetro menor a 1/4" y luego retornan parte de la carga para pelets de protección de parrilla).
3. Mantener el contenido de humedad del mineral concentrado antes de la peletización en un rango de 8.3 a 8.6 %, para reducir el requerimiento energético por efecto de la vaporización del contenido de humedad dentro del horno.
4. Es conveniente la implementación de un nuevo lazo de control de temperaturas del tipo digital, en reemplazo al actual que es del tipo analógico. De esta manera se contribuye a mejorar el rendimiento térmico del horno.

BIBLIOGRAFÍA

- BONED, J. y otros. 1989 “Iniciación al estudio de un modelo matemático previo para un sistema integrado de control de una planta piloto de peletización de lecho fijo”. En: Nueva Bibliografía sobre modelos matemáticos en la peletización industrial. Madrid: Publicaciones CENIM.
- CASTILLO, Percy. 1990 Combustión de petroleos residuales. Lima: Combustión Industrial. S.A.
- CENTRO DE DESARROLLO INDUSTRIAL (Ed). Manual de eficiencia energética de calderas industriales
- INCROPERA, Frank. DEWITT, David. 1999 Fundamentos de transferencia de calor. México: Prentice Hall Hispanoamericana. S.A.
- INSTITUTO LATINOAMERICANO DEL HIERRO Y EL ACERO. 1974 Aglomeración de minerales de hierro. Santiago de Chile: Publicaciones ILAFA.
- KELLEY, Kenneth. 1960 Contributions to the data on theoretical metallurgy. Washington: U.S Department of the Interior.
- LEVENSPIEL, Octavio. 1996 Flujo de fluidos e intercambio de calor. Barcelona: Editorial Reverte.
- MELI, José. 1979 “Balance de energía calórica en planta de pelets de Huasco”. Santiago de Chile: Publicaciones ILAFA.
- MEYER, Kart. 1980 Pelletizing of iron ores. Düsseldorf: Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, and Verlag Stahleisen m.b.H.
- PERRY, Robert. 1993 Perry manual del ingeniero químico. Tomo I, II, III, VI México: Mc. Graw- Hill Interamericana.
- SMITH, J. VAN NESS, H. ABBOTT, M. 1997 Introducción a la termodinámica en ingeniería química. México: Mc. Graw- Hill Interamericana

ULRICH, Gael.
1986

Diseño y economía de los procesos de ingeniería química.
México: Mc. Graw- Hill Interamericana.

ANEXOS

ANEXO 1 CARACTERISTICAS DEL MINERAL DE LA MINA

El mineral esta compuesto por magnetita con diseminaciones de sulfuros que fueron oxidados y lixiviados por acción de la intemperie y aguas subterráneas, originando así los cuerpos mineralizados. En vista frontal, la mineralización tiene tres zonas verticales:

1. Zona Oxidada (OX): Comprende la zona superior y esta formada por hematita y también contiene limonita y cantidades variables de martita, oxido de cobre y yeso, halita y vetas de actinolita. Esta zona es de 30 m. de profundidad. La ley promedio de fierro es de 58 % y el azufre esta en niveles menores a 1.0 %. (Predominantemente como sulfatos).
2. Zona de Transición (TO): Esta zona esta formada por la lixiviación de los elementos de la zona superior y materiales primarios parcialmente lixiviados. La ley promedio del hierro es de 54 % y el nivel de azufre es cerca de 2.0 %. Esta zona tiene 35 m. de profundidad y contiene principalmente hematita, martita de grano fino con jarosita, botriogeno, algo de magnetita y algunas impurezas como piritita, halita, yeso, crisocola y dolomita.
3. Zona Primaria (PO): Esta zona es la más profunda y extensa, en donde se encuentran cristales de magnetita en forma masiva y densa; asimismo se encuentra abundante piritita diseminada y algo de calcopiritita y pirrotita. La ganga esta compuesta por actinolita, calcita, clorita, cuarzo y yeso. La ley promedio es de 57 % de fierro, 3 % de azufre y 0.1 % de cobre. Conforme va creciendo la profundidad del yacimiento su contenido de azufre se incrementa.

La zona primaria provee de 3 tipos de minerales magnéticos principalmente, que se clasifican de acuerdo a su comportamiento metalúrgico para obtener los productos requeridos

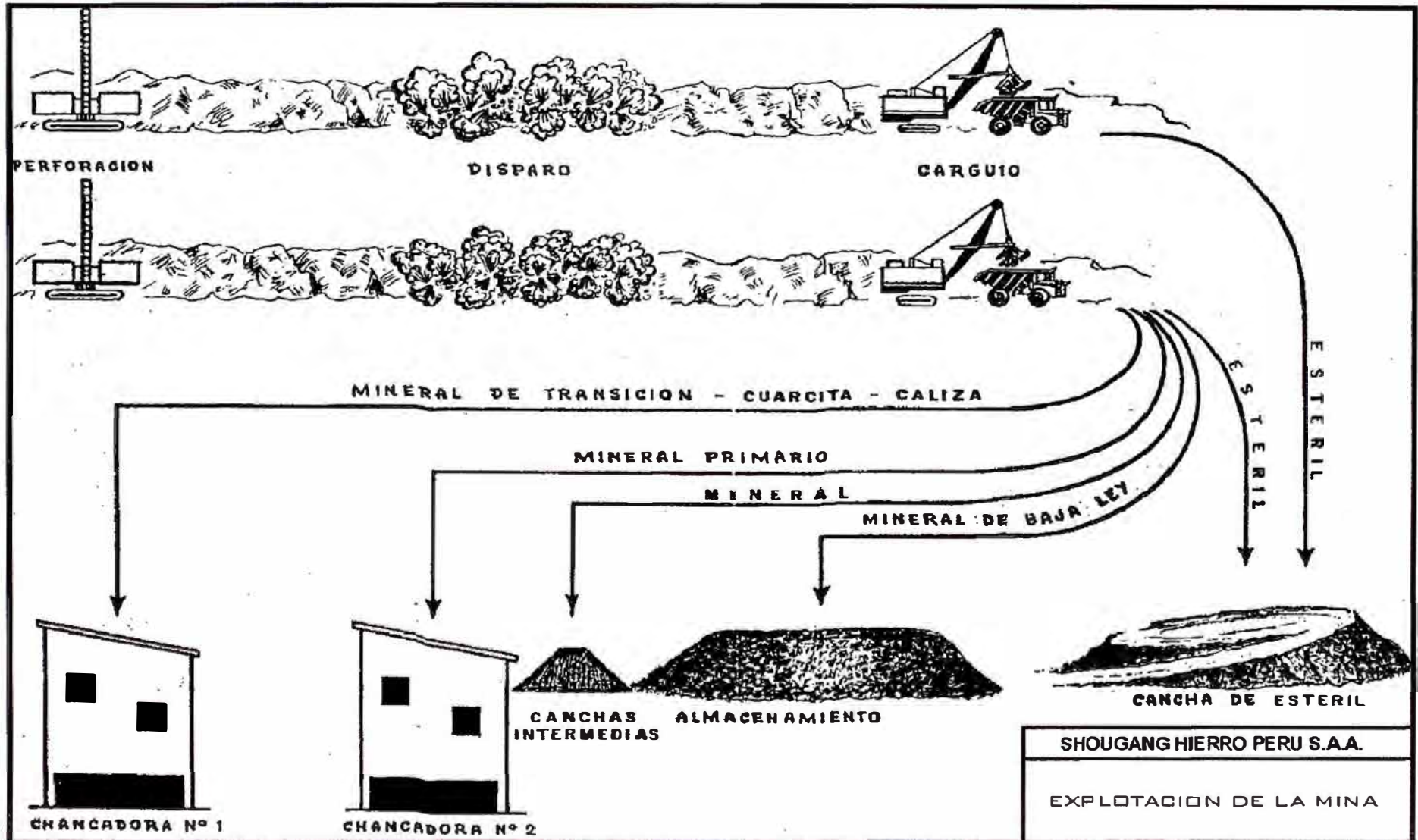
- a) Mineral Grueso (CG): Representa el 57 % de las reservas de mineral primario obtenido de la formación Marcona. El sulfuro es eliminado mediante la molienda a – 10 Mesh y es usado en la producción del Sinter Calibrado o Especial.

- b) Mineral Fino (FG): Representa el 25 % de las reservas de mineral primario, para eliminar el sulfuro se requiere de molienda fina – 100 Mesh.

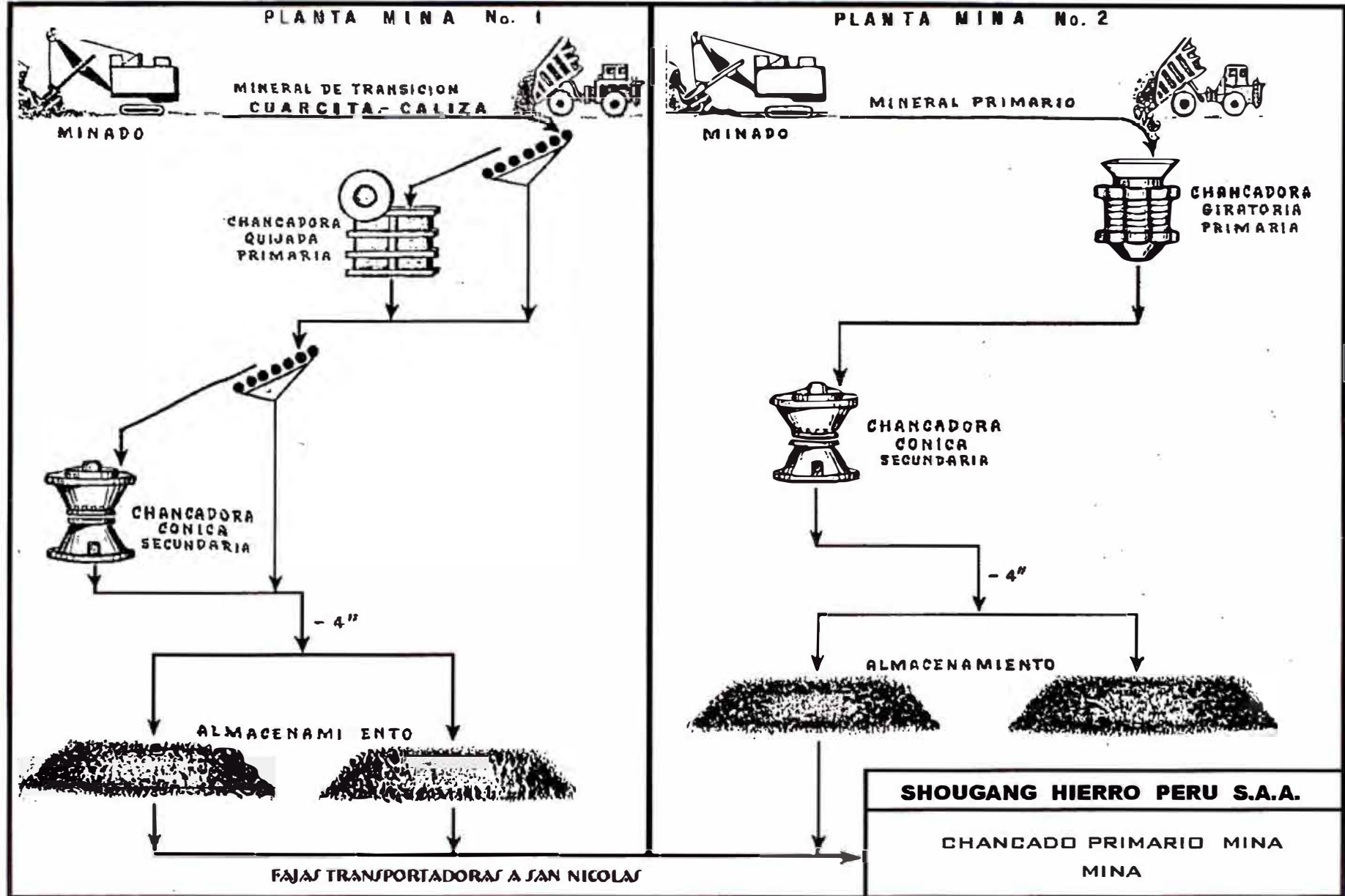
- c) Mineral Refractario (R): Representa el 18 % de las reservas del mineral primario .Este mineral con contenido de pirita contiene pirrotita, este último no puede ser eliminado por procedimientos normales de concentración ya que la pirrotita es magnética y difícil de flotar.

ANEXO 2 DIAGRAMAS DEL PROCESO PRODUCTIVO: MINA - SAN NICOLAS

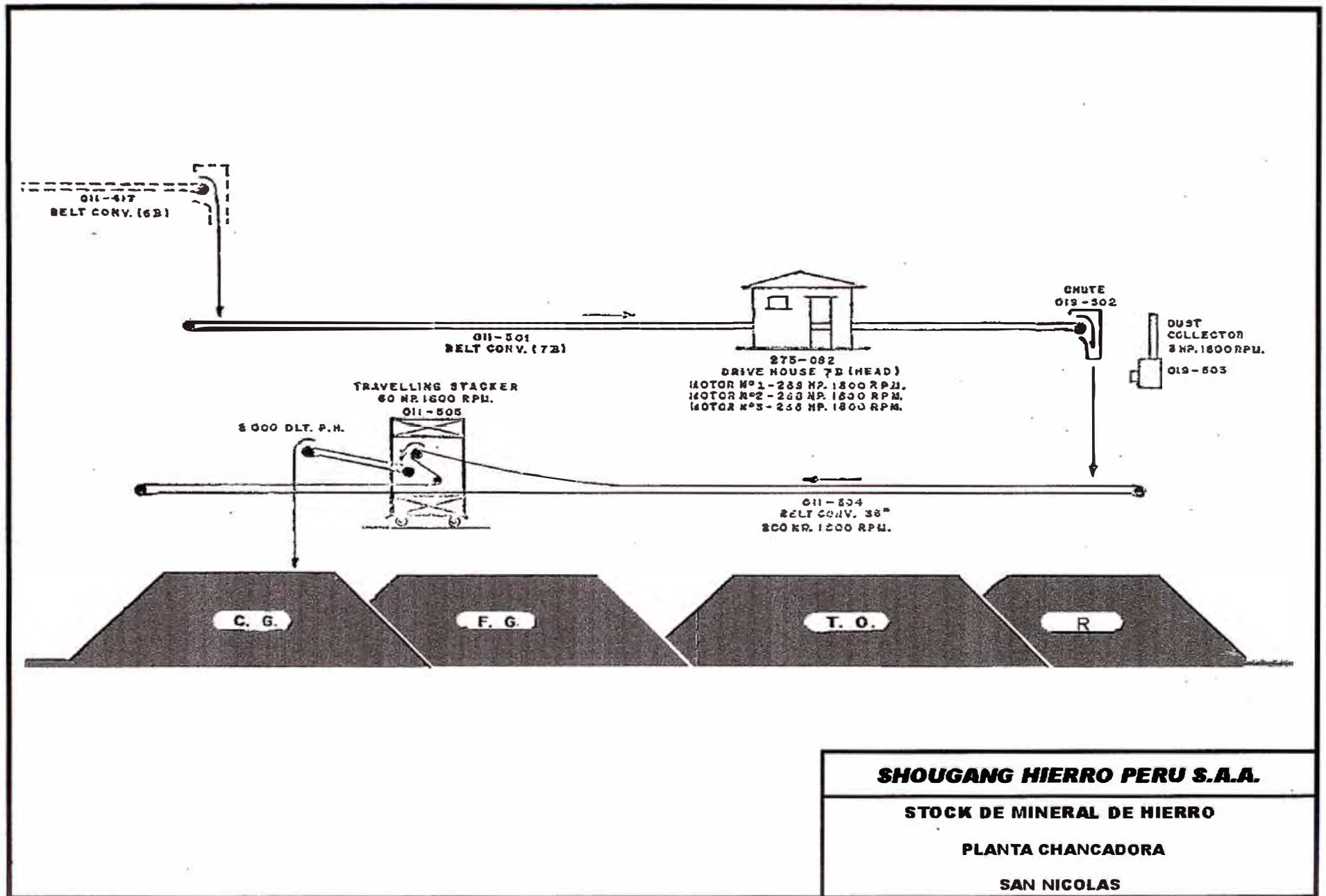
1. AREA MINA: Explotación de la Mina



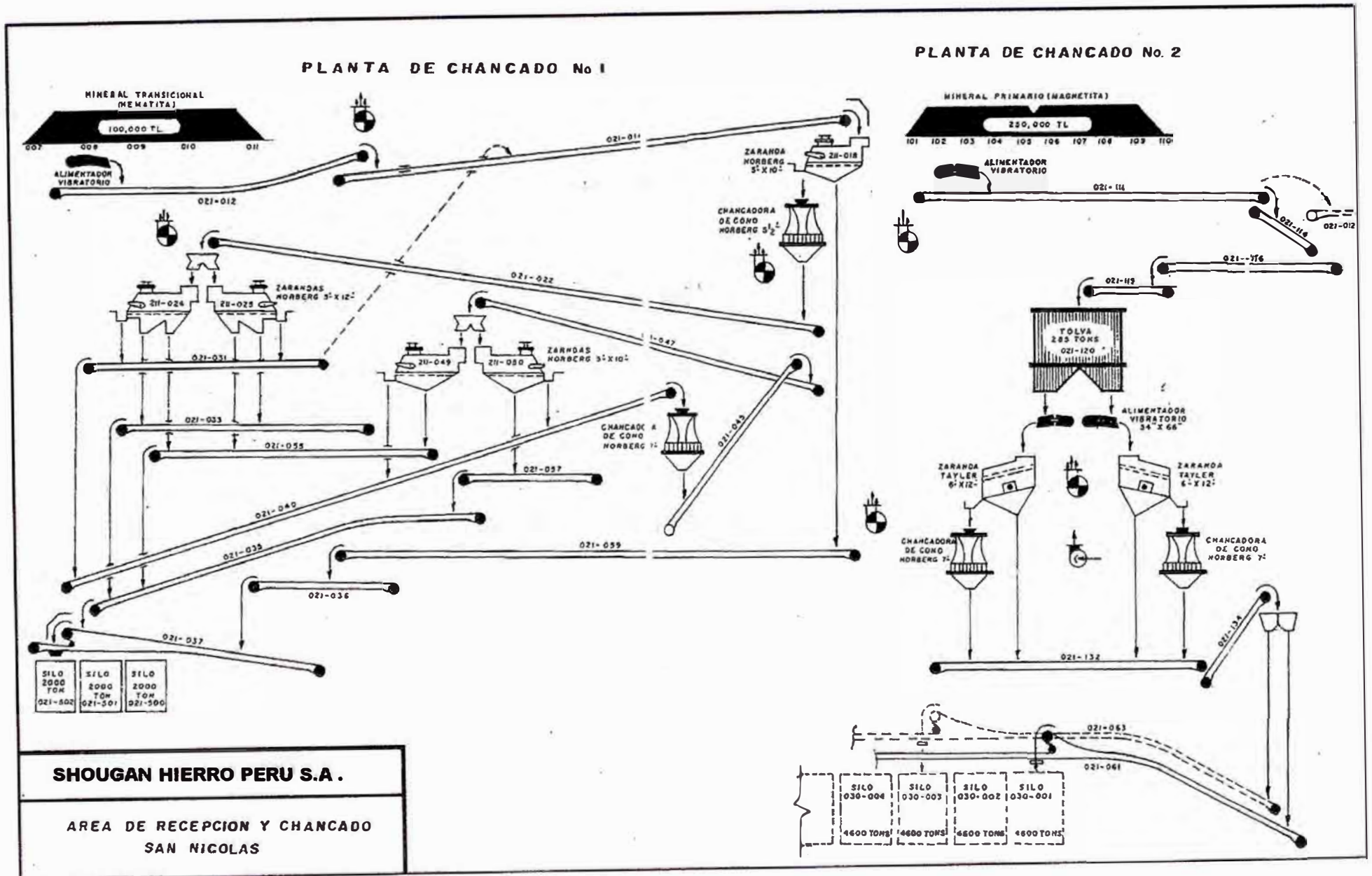
2. AREA MINA: Chancado primario Mina



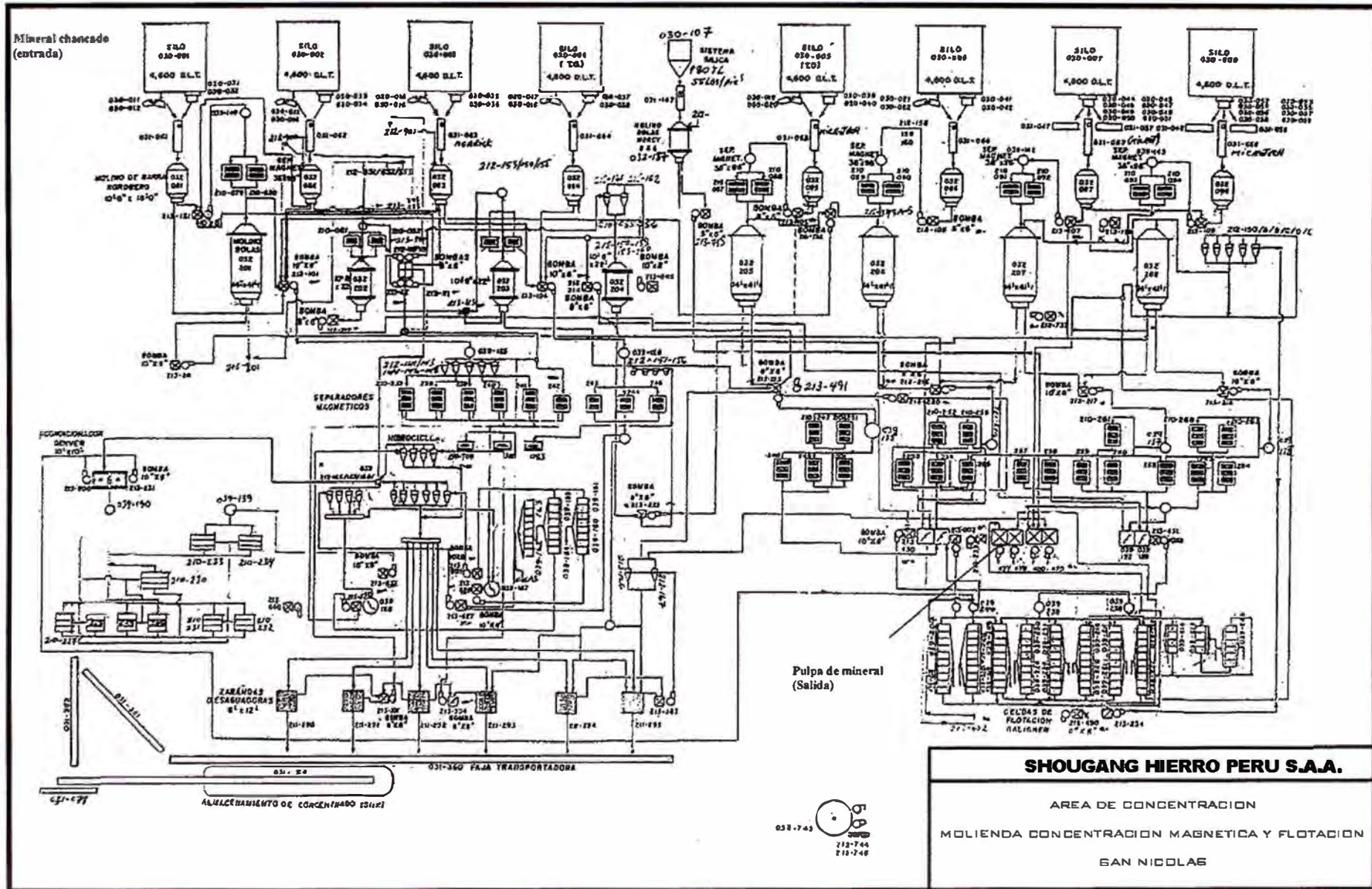
3. AREA SAN NICOLAS: Stock mineral de Hierro



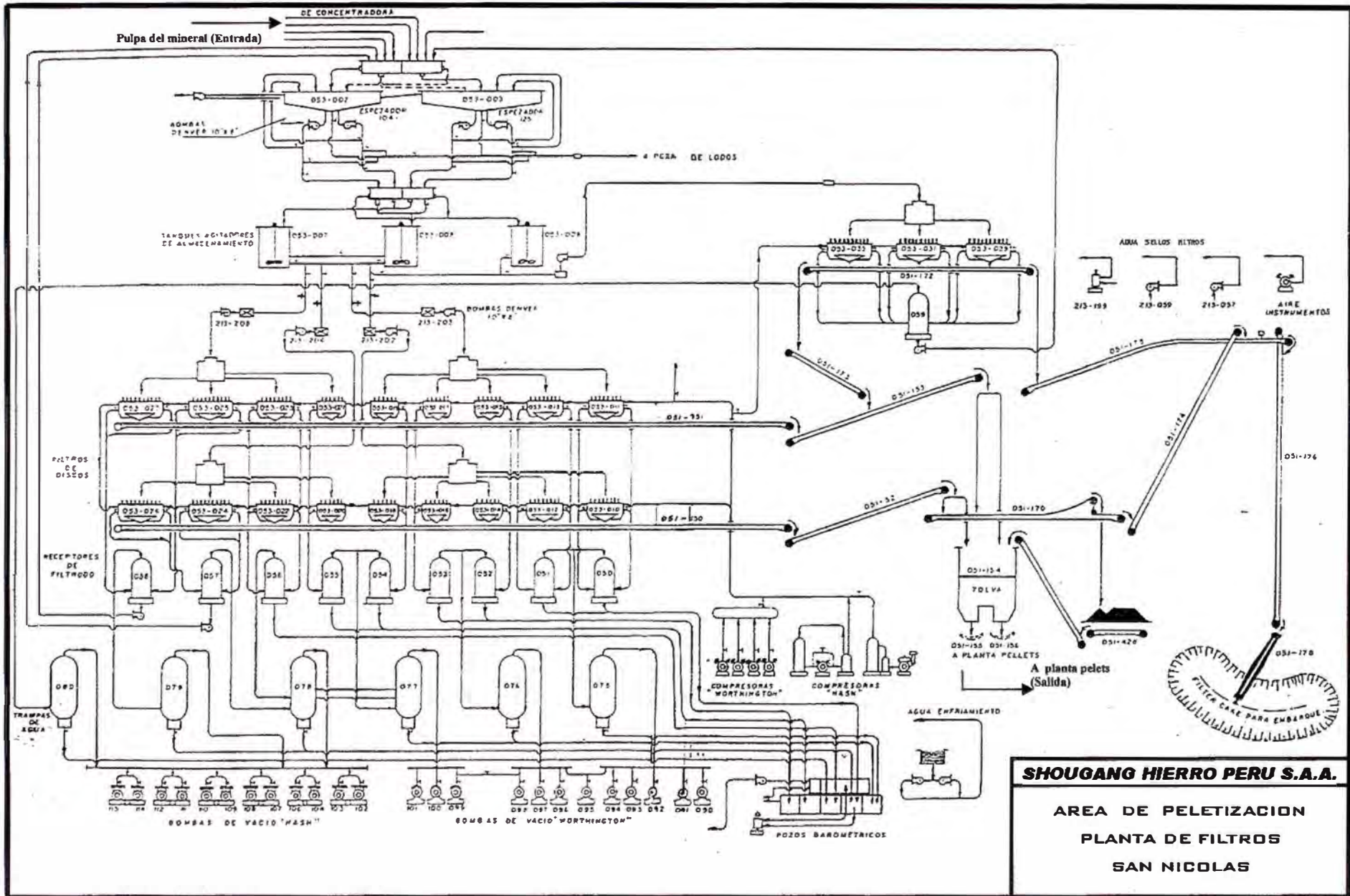
4. AREA SAN NICOLAS: Recepción y chancado



5. AREA SAN NICOLAS: Molienda de concentración magnética y flotación



6. AREA SAN NICOLAS: Planta de filtros



ANEXO 3 DESCRIPCION DE INSTRUMENTOS UTILIZADOS EN LAS MEDICIONES A NIVEL DE PLANTA

Medición de velocidad

Tubo Pitot

Este instrumento consiste básicamente en dos tubos metálicos concéntricos entre si y conectados a un manómetro diferencial. Mide puntualmente la presión de velocidad del fluido, que circula en el interior de un ducto o tubería, como la diferencia (Δp) entre su presión total tomada por el tubo interno y su presión estática medida por el tubo externo. A partir de esta diferencia obtiene la velocidad puntual del fluido mediante la ecuación:

$$V=K \sqrt{\frac{2g(\Delta P)}{D}}$$

Algunas de las características del tubo Pitot son las siguientes:

- Utilizado principalmente para gases y también para líquidos.
- Puede obstruirse cuando el fluido arrastra sólidos.
- Su rango de utilización es de 0 a 2500 mm H₂O.
- Permite mediciones en un amplio rango de temperaturas.
- Es utilizado en ductos de diámetro mayor de 1 50 mm.
- Las pérdidas de carga que origina son despreciables.
- Su diámetro debe ser menor o igual a 1/40 el del ducto.
- Para velocidades inferiores a 2 m/s debe usarse anemómetros.
- En caso de obstrucción puede limpiarse usando aire comprimido.
- Su precisión varía de 1,0 a 4,0%, según su operación.

Medición de Temperatura

Termocupla

Está formada por dos alambres de diferentes metales, unidos con soldadura, formando un anillo. La diferencia de temperatura entre las uniones soldadas origina un voltaje que produce una corriente eléctrica en el anillo. Este voltaje, medido por un milivoltímetro, es proporcional a la diferencia (ΔT) entre la temperatura T (unión en contacto con el medio a medir) y una temperatura de referencia T_a (0°C o la temperatura ambiente), según la siguiente ecuación:

$$T = T_a + (\Delta T)$$

Algunas de las características de la termocupla son las siguientes:

- Es muy versátil y de velocidad de respuesta alta.
- Su salida eléctrica acepta varios tipos de lectura.
- De costo relativamente bajo y de manejo simple.
- Sus señales son fáciles de almacenar y permiten su transmisión a larga distancia.
- Puede cometer error por falta de alimentación.
- Los sensores se desgastan después de un largo tiempo de uso.
- Necesita calibraciones periódicas.
- Las industriales tienen una precisión del orden del 1%

Cuando medimos con la termocupla debemos tomar en cuenta lo siguiente:

La medición de la temperatura de gases de chimenea se realiza perforando un agujero en el ducto correspondiente para introducir el instrumento. La superficie alrededor del agujero debe estar aislada.

En el caso de líquidos o vapores presurizados, la temperatura se toma en un punto de la superficie exterior del tubo en cuyo interior circula el fluido. Esta superficie debe estar limpia, no presentando oxidación, grasa, etc. La punta del sensor de contacto debe estar limpia y pulida.

Pequeños movimientos de la superficie contra la que se mantiene la sonda de contacto puede hacer variar la medida de la temperatura en algunos grados.

Cuando se mide en superficies extendidas debe tomarse en cuenta que estas pueden presentar gradientes de temperatura considerables por lo que necesitan medir la temperatura en varios sectores y calcular la media.

Pirómetros

Los pirómetros son instrumentos que pueden ser usados para medir la temperatura de un cuerpo, sin contacto físico con él. Se fundamentan en la ley de Stefan-Boltzmann ($E=KeT^4$) que sostiene que la energía radiante (E) emitida por la superficie de un cuerpo aumenta proporcionalmente a la cuarta potencia de su temperatura absoluta. Es difícil determinar la temperatura exacta por la emisividad (e) de la superficie.

Dos de los pirómetros más usados son: el de radiación infrarroja y el óptico.

El pirómetro de RADIACIÓN INFRARROJA filtra las radiaciones recibidas del área cuya temperatura se desea conocer para concentrar únicamente *las* radiaciones infrarrojas sobre termocuplas. La medida del voltaje generado en las termocuplas permite determinar la temperatura superficial del cuerpo. Es adecuado hasta 2 000⁰C. Su tiempo de respuesta es corto. Está sujeto a error ante la presencia de gases y vapores. Las emisividades totales de algunas superficies, encontradas por H. C. Hotel.

El pirómetro OPTICO se fundamenta en la comparación entre las intensidades luminosas producidas por la radiación visible emitida por el punto focalizado, cuya temperatura de desea averiguar, y por un filamento. Cuando se consigue igualar estas intensidades, el instrumento mide la corriente que se ha hecho pasar por el filamento en una escala de temperatura. Es un instrumento muy sensible y preciso hasta 3 500°C. Es relativamente caro. Está sujeto a errores humanos. Necesita ser calibrado. Su precisión varía de 1 a 3°C.

Medición de Presiones

Manómetro Diferencial

Es el más usado de los manómetros de columna de líquido. Está constituido de un tubo en forma de “U” en cuyo interior está colocado un líquido manométrico que puede ser agua coloreada, aceite o mercurio. La determinación de la presión (P) se efectúa midiendo la diferencia ($\sim h$) entre los niveles del líquido, de masa específica conocida, en cada una de las dos columnas y aplicando la ecuación:

$$P = \rho g(\Delta h)$$

Algunos comentarios sobre el manómetro diferencial son los siguientes:

- Son de bajo costo y de fácil mantenimiento.
- Mide presiones bajas, próximas a la atmosférica (760 mmhg), como el tiro de chimeneas.
- Cuando se miden gases debe evitarse la condensación de líquidos.
- Cuando se miden líquidos debe evitarse las bolsas de aire.
- Necesita mantención periódica.
- Evitarse líquidos manométricos miscibles con el fluido a medir.

Mediciones de composición de gases (SO₂, CO)

Aparato Fyrite

Este instrumento analiza el CO₂ y O₂ contenido en los gases de chimenea, utilizando también el método de absorción. El conjunto completo consta de: dos botellas, soluciones absorbedoras, bomba de goma, filtro, sonda y manguera de látex. Como absorbedores emplea comúnmente una solución alcohólica de potasa y una solución de pirogalato sádico, para el CO₂ y O₂ respectivamente.

Una muestra de la mezcla de gases es introducida a la botella, que contiene la solución correspondiente. Usando la bomba de goma. Por medio del contacto íntimo entre la solución y la muestra, parte del volumen gaseoso, es absorbido por la solución provocando una depresión en el interior de la botella. Esta depresión origina la elevación de la solución a través de la columna graduada del instrumento. La lectura se realiza directamente en porcentaje volumétrico en base seca.

Algunos aspectos a considerar cuando se mide con el Fyrite son los siguientes:

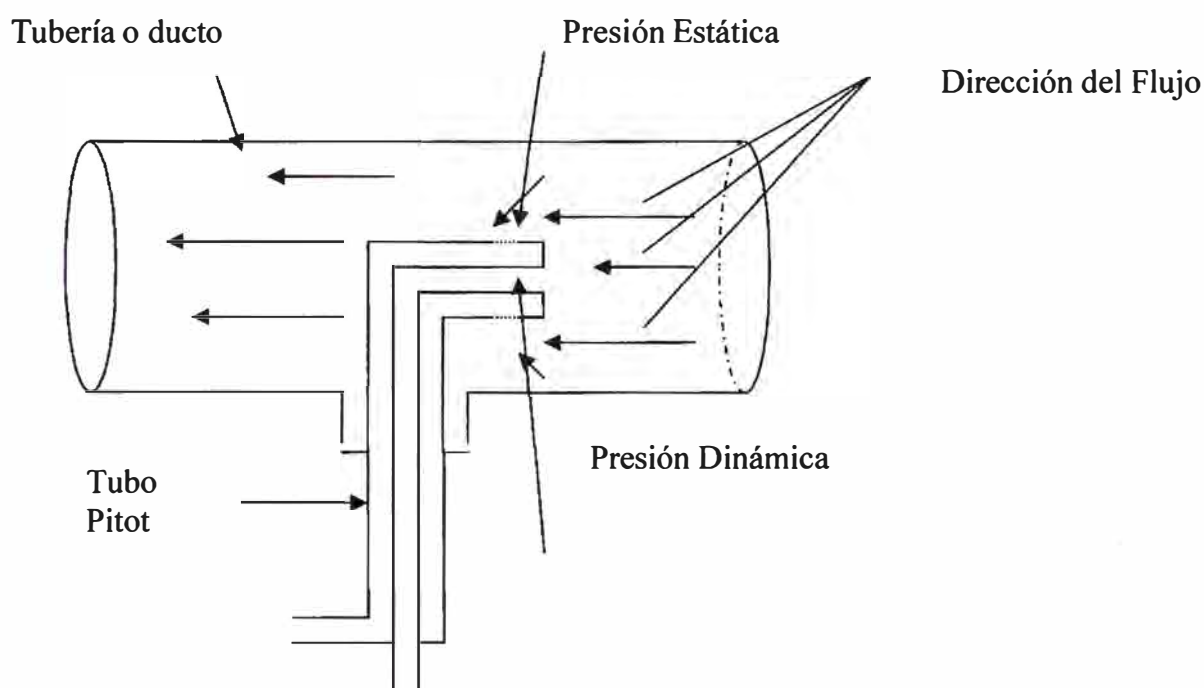
- Este aparato es frágil, liviano y portátil.
- Sus rangos son de 0 - 7%, de 0 - 21% y de 0 - 60%.
- Su temperatura de trabajo es la ambiental.
- Mediciones continuas de gases calientes causan errores de medición por la disminución de la densidad de los gases.
- La solución para el CO₂ puede analizar 350 muestras.
- La solución para el O₂ puede analizar 1 00 muestras.
- Una manera rápida de chequear las soluciones absorbedoras del CO₂ y del O₂ es analizando aire expirado (4,0% CO₂) y aire ambiente (20,9% O₂) respectivamente.
- Las soluciones pueden ser preparadas por el usuario.
- Su precisión es de $\pm 0.5\%$ independiente del valor leído.

ANEXO 4 PRUEBAS REALIZADAS A NIVEL DE PLANTA

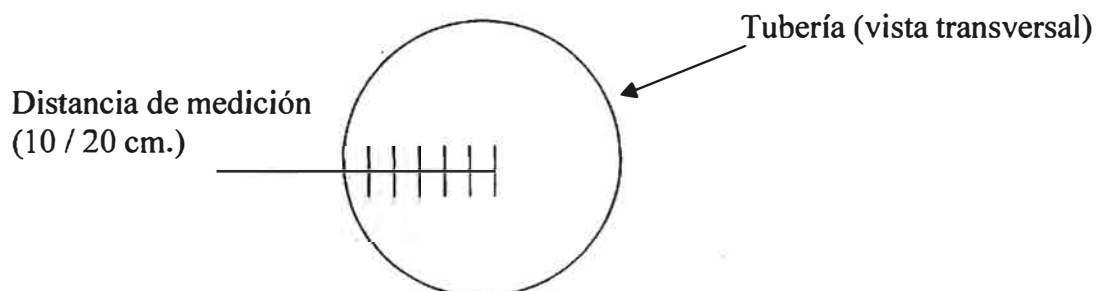
Medición de Flujo de Gases

En el anexo 3 se presenta el instrumento Tubo Pitot, el cual es utilizado en la medición de flujo de gases.

El instrumento se coloca de forma perpendicular en sentido contrario a la dirección del flujo, según se muestra en el diagrama:



Se realizan lecturas cada 20 cm. desde la zona lateral hasta llegar a la zona central (para tuberías mayores a 1m de diámetro) y cada 10 cm. para tuberías menores a 1m.



El tubo pitot esta conectado a un manómetro en U, en el cual se lee la diferencia de nivel que es producto de la presión dinámica vs. presión estática.

Luego de realizar la medición con el tubo pitot, se procede a realizar mediciones de temperatura mediante una termocupla Tipo J, la cual es portátil (largo de 1m.).

El cálculo de la velocidad promedio que pasa por el ducto se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$V = (2 * (d_1 * g * h) / d_2)^{0.5} \dots\dots\dots (Sección 3.3.2.3)$$

Donde h (diferencia de altura) se obtiene mediante el promedio de las alturas obtenidas a diferentes distancias (cada 10/20 cm.).

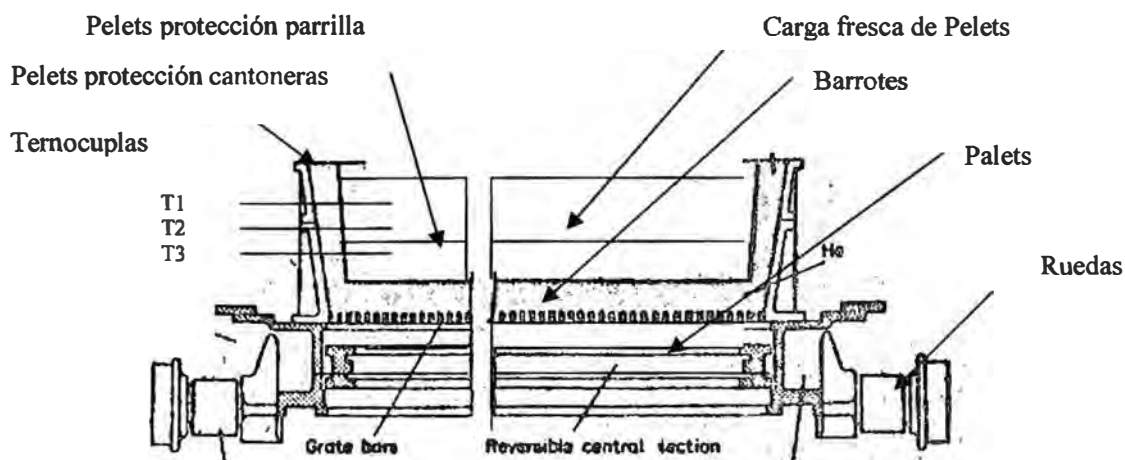
Prueba de Termocuplas

La prueba de termocupla tiene como objetivo establecer la temperatura a la cual se encuentra el pelets durante la trayectoria del horno desde el inicio hasta la descarga de este, pasando los pelets por las diferentes zonas del horno (etapas de secado, quemado y enfriamiento).

Para el inicio de la prueba, se requiere un carro (palets) que se encuentre acondicionado con tres orificios en el lado lateral del carro (generalmente lado izquierdo), en el cual van ha entrar las termocuplas que censan la temperatura del horno

En la parte terminal de cada termocupla se coloca un registrador de temperatura.

La prueba inicia al colocar las 3 termocuplas a la vez en el Wind box según se ilustra en la figura:



Las 3 termocuplas están distribuidas en la siguiente forma:

- 1° Termocupla a 3" de la superficie de cama del pelets.
- 2° Termocupla, en la parte intermedia de la cama.
- 3° Termocupla, sobre la protección de parrilla (a 3" sobre la parrilla).

El cable eléctrico que lleva la señal al registrador de temperatura, se coloca al costado de la rueda, para su normal control (el aislante del cable debe ser resistente para temperaturas elevadas).

Para la colocación de las termocuplas se realiza estando operativo el horno, solamente antes de pasar el carro en evaluación a la descarga, se para por un momento el carro y se saca las termocuplas.

Las termocuplas censan la temperatura del pelets que pasa a través de cada Wind box en las 3 zonas de la cama del pelets y mediante el promedio de las 3 temperaturas se obtiene de manera aproximada la temperatura de la masa del pelets que se encuentra en el proceso (WB N°1 al 44).

ANEXO 5 DATOS EXPERIMENTALES

Medición de Flujo de gases:

Se tiene el siguiente cuadro:

N°	Descripción	T (°C)	Δ (plg)	P. Gas (mm H ₂ O)	Densidad Gas (g/l)	Densidad agua (g/l)	Velocidad (ft/min)	Area (ft ²)	ACFM	SCFM	SCFM
1	059 - 690	86	0.13	15	0.986	1000	1571	129.3	203088	168864	170000
2	059 - 691	155	2.07	460	0.853	1000	6846	56.6	387504	278599	245000
3	059 - 692	342	2.21	530	0.599	1000	8439	50.2	423626	214028	215000
4	059 - 693	341	1.20	550	0.601	1000	6208	70.6	438253	222187	215000
5	059 - 694	27	2.07	500	1.223	1000	5716	69.5	397245	409764	410000
6	059 - 695	320	0.38	150	0.605	1000	3483	44.2	153937	78512	78000
7	Pos 5	325	0.49	500	0.620	1000	3897	19.6	76377	39919	40000
8	WB 22	291	0.78	460	0.655	1000	4781	6.9	32988	18209	18000
9	WB 21	220	1.50	450	0.748	1000	6221	6.9	42924	27086	27000
10	Aire Atom.	46	0.50	2465	1.373	1000	2652	3.1	8221	9515	9500
11	Ducto Bilan	315	7.41	500	0.630	1000	15069	2.18	32850	17461	18000

Se asume inicialmente la densidad del aire que pasa a través de los ductos en todos los puntos de medición. Esto luego se confirma calculando la composición en peso de los gases formados por la combustión del petróleo y las reacciones del mineral.

Nota : La densidad del agua permanece constante (a T= 25°C ρ = 1000 g/l). El agua en mención se encuentra dentro del manómetro (Instrumento de medición).

GASES DE PROCESO

En la cámara del 695 se distribuye (Entrada)

DUCTOS	N° Ductos	(%)	SCFM	SCFM
HIC 20 (50%)	1	14.3	11143	12000
HIC 23 (50%)	1	14.3	11143	12000
POS12 (100%)	5	71.4	55714	54000
Total	7	100.0	78000	78000

Características de la compuerta

Se asume que las compuertas tienen las características de sensibilidad decreciente.

abertura (%)	Qmax (%)
0	0
10	20
20	35
30	50
40	60
50	70
60	80
70	85
80	90
90	95
100	100

Prueba de termocuplas

Alimentación: 310 TLH.

Humedad : 9.0 %

Perfiles de Temperatura

TRC	T (°C)
002	800
003	950
004	1250
005	1300

TMCP 1: Termocupla superior.

TMCP 2: Termocupla intermedio.

TMCP 3: Termocupla inferior.

Se tiene el siguiente resultado de la prueba de termocupla:

Wind Box	TMCP 1 (°C)	TMCP 2 (°C)	TMCP 3 (°C)
1	22	22	22
2	33	40	48
3	41	45	55
4	47	52	63
5	52	66	81
6	58	85	102
7	64	91	118
8	82	83	112
9	98	78	94
10	125	80	85
11	192	75	80
12	359	70	75
13	531	75	75
14	683	96	80
15	814	171	98
16	929	288	141
17	1047	432	210
18	1108	575	293
19	1132	748	426
20	1148	917	534
21	1160	951	654
22	1220	1133	860
23	1248	1184	1018
24	1265	1219	1126
25	1298	1244	1192
26	1284	1247	1219
27	1213	1222	1238
28	1160	1240	1210
29	1085	1167	1222
30	1038	1275	1187
31	1009	1235	1156
32	998	1130	1085
33	926	1005	923
34	888	870	765
35	734	728	600
36	710	610	480
37	677	490	365
38	540	375	270
39	385	275	200
40	275	210	155
41	200	170	125
42	145	120	100
43	115	109	90
44	100	95	85

Características generales del horno, palets, barrotes

○ Producción (TLH)	310
○ Humedad	0.91
○ Reciclo	0.88
○ Ganancia por Oxidación	1.026
○ Altura cámara	11 pulgadas
○ Área del palets	36.9 ft ²
○ Peso del palets	9070 lb
○ N° fila en el palets donde se coloca los barrotes	4
○ Largo del palets	7.5 ft
○ Ancho del palets	4.92 ft
○ Ancho del barrote	1.25 pulgadas
○ Peso del barrote	8.38 lb
○ Altura protección parrilla	2.5 pulgadas
○ Espesor pelets en cantonera	3 pulgadas
○ Profundidad de pelets en cantonera.	15 pulgadas

	Entrada (°C)	Salida (°C)
Pelets	20	93
Protección	85	117
Barrotes	52	86
Palets	58	92

Disposición de Quemadores en el Horno

Quemador	N°	T (°C)	Perfiles (°C)
10	0	705	
11	0	748	
12	1	796	800
13	0	831	
14	1	914	
15	0	948	950
16	2	1142	
17	2	1218	
18	2	1234	
19	2	1251	1250
20	2	1272	
21	2	1295	
22	2	1298	
23	2	1303	1300
24	2	1300	

ANEXO 6 DETERMINACIÓN DE LAS ESPECIES MINERALOGICAS EN LOS PELETS (PELETS VERDES, TRANSICIONAL Y QUEMADO)

PELETS VERDES (% peso) (Base seca)

Elementos	Peso Atom.
Fe	55.85
S	32.0
Cu	63.57
O ₂	32.00
Si	28.06
Ca	40.08
Mg	24.32
Na	23.00
K	39.10
Al	26.97
Mn	54.93
P	30.98
C	12.00

Humedad : 9.00

BENTONITA (% peso) (Base seca)

Componentes	(%)	Peso (%)
Fe ₃ O ₄	4.500	0.031
FeS ₂	3.330	0.023
SiO ₂	56.220	0.383
Al ₂ O ₃	11.920	0.081
CaCO ₃	13.599	0.093
MgCO ₃	5.061	0.034
Na ₂ O	3.940	0.027
K ₂ O	1.286	0.009
P ₄ O ₁₀	0.144	0.001
Total	100.000	0.681

Humedad : 7.500

Adición de bentonita: 15 lb./ TL de mineral

Observación :

La Bentonita presenta un LOI (pérdida de peso por ignición del mineral) que se encuentra en el rango de 10 - 15% , de los cuales se considera que esta perdida se produce en el horno , por estar a condiciones similares de alta temperatura (1000 °C). Asimismo esta pérdida va a ser atribuida a los componentes no especificados de la Bentonita, y a la oxidación del FeS₂.

De acuerdo a la composición mineralogica de la mina, se forman los siguientes compuestos:

Componentes	Peso Molec.	Peso (%)		
		Sin Bentonita	Con Bentonita	
FeO	71.9	----	----	----
Fe ₂ O ₃	159.7	1.246	1.237	1.237
Fe ₃ O ₄	231.6	92.169	91.541	91.572
FeS ₂	119.9	0.275	0.273	0.296
CuFeS ₂	183.4	0.023	0.023	0.023
Cu ₂ O	143.1	----	----	----
SiO ₂	60.1	3.838	3.812	4.195
MnO ₂	86.9	0.047	0.047	0.047
P ₄ O ₁₀	283.9	0.021	0.020	0.021
Na ₂ O	62.0	0.176	0.175	0.202
K ₂ O	94.2	0.065	0.065	0.073
Al ₂ O ₃	101.9	0.440	0.437	0.518
MgO	40.3	0.920	0.914	0.914
MgCO ₃	84.3	----	----	0.034
CaCO ₃	100.1	0.780	0.775	0.867
Bentonita		----	0.681	----
Total		100.000	100.000	

Asunciones (1980 Meyer: Pelletizing of iron ores.)

El % S presente en la Bentonita se encuentra como sulfuro (FeS₂).

Los compuestos no especificados pueden estar en la forma de Carbonatos o Nitratos.

La humedad de la Bentonita esta en el rango de 7 - 9 % .Para efectos de cálculo se toma el valor de 7.5 %.

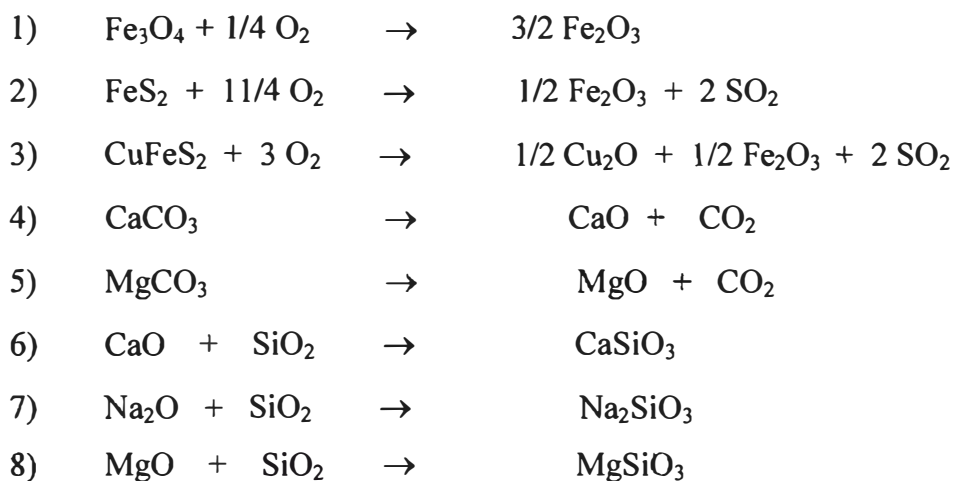
En la transformación de Pelets Verdes a Quemados se pierde: 0.972 % Bentonita (LOI).

El contenido de otros compuestos no especificados se oxidan, generando perdida de peso.

Bentonita : A 1300 °C (Reacciona el 90
% Fe₃O₄ y el 100 % FeS₂)

Componente	Peso (%)
Fe ₃ O ₄	0.003
Fe ₂ O ₃	0.044
SiO ₂	0.383
Al ₂ O ₃	0.081
CaO	0.093
MgO	0.034
Na ₂ O	0.027
K ₂ O	0.009
P ₄ O ₁₀	0.001
Total	0.674
Δ peso	0.007
LOI	0.972

Reacciones que se producen en el pelets:



De acuerdo a las reacciones y a los análisis químico de los pelets verdes y quemado, se analiza el aporte del Fe, S de las especies mineralógicas:

Componente	Inicio	Fin
Fe (Fe ₂ O ₃)	0.865	65.765
Fe (Fe ₃ O ₄)	66.262	1.500
Fe (FeS ₂)	0.138	0.007
Fe (CuFeS ₂)	0.007	0.000
Fe (Total)	67.272	67.272
S (FeS ₂)	0.158	0.008
S (CuFeS ₂)	0.008	0.000
S (SO ₂)	0.000	0.158
S (Total)	0.16605	0.16605

Se recalcula la composición del pellets quemado:

Productos	PM	Peso (%)
Fe ₂ O ₃	159.700	91.647
Fe ₃ O ₄	231.550	2.021
FeS ₂	119.850	0.015
Cu ₂ O	143.140	0.009
CaSiO ₃	116.140	0.981
MgSiO ₃	100.38	2.257
Na ₂ SiO ₃	122.054	0.387
MnO ₂	86.930	0.046
P ₄ O ₁₀	283.920	0.021
K ₂ O	94.200	0.071
Al ₂ O ₃	101.940	0.505
SiO ₂	60.060	2.040
Total		100.000

El requerimiento de O₂ y formación de SO₂ y CO₂ será: (Para 310 TLH alimentación)

Componentes	Lb /min	scfm
SO ₂	30.2349	185.0
O ₂	316.688	3875.8
CO ₂	38.19495	340.0

Aire requerido para la oxidación de los pellets :

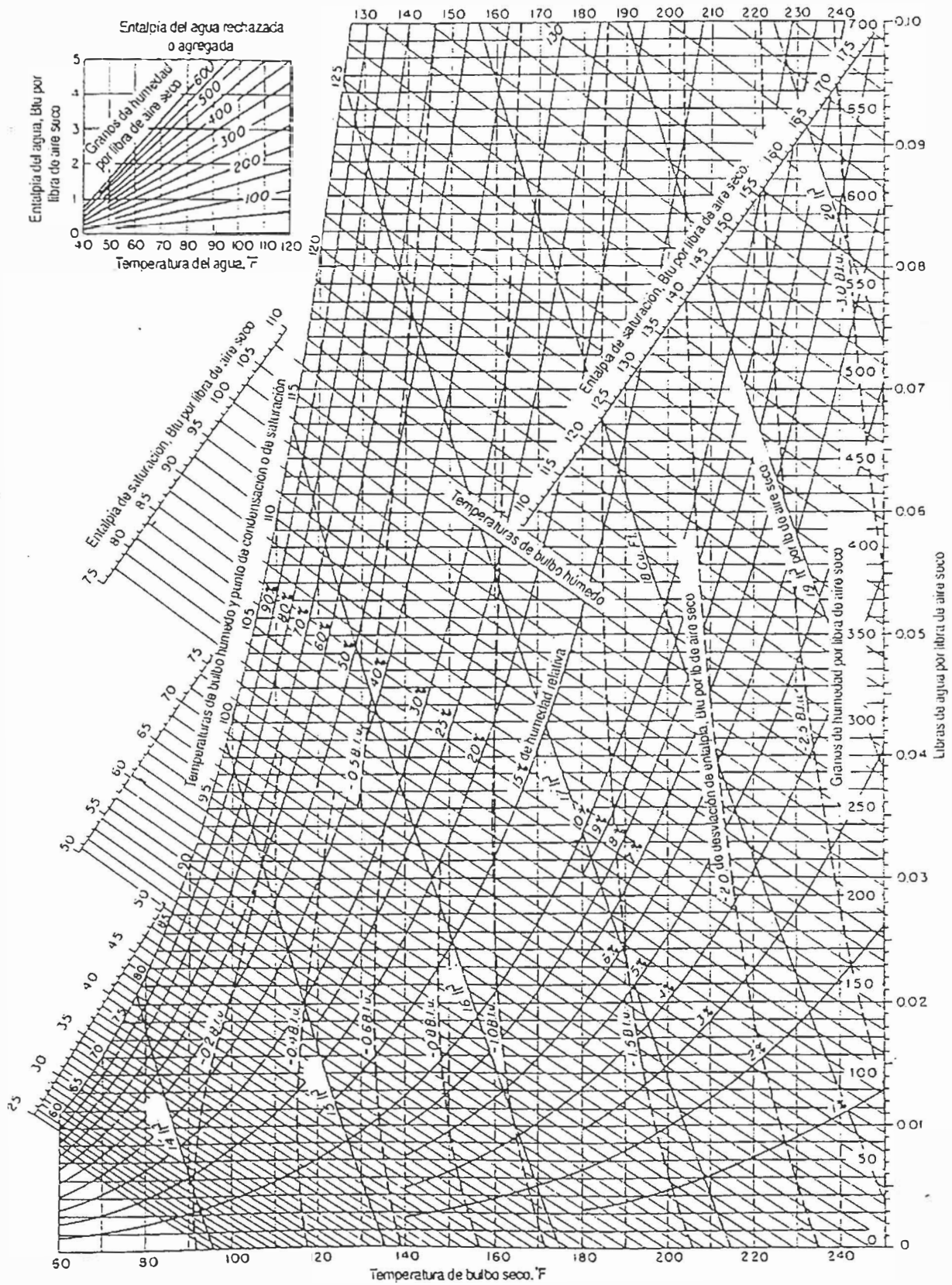
Aire: 18456 SCFM

Para la determinación de la composición química del mineral transicional, se considera:

El mineral que se encuentra en la posición del WB 21 ha reaccionado los siguientes compuestos: 100% $MgCO_3$, 100% $CaCO_3$, 70% del FeS_2 , 70% $CuFeS_2$. Asimismo el requerimiento de O_2 ha sido utilizado en un 75 %. Se tiene la siguiente composición:

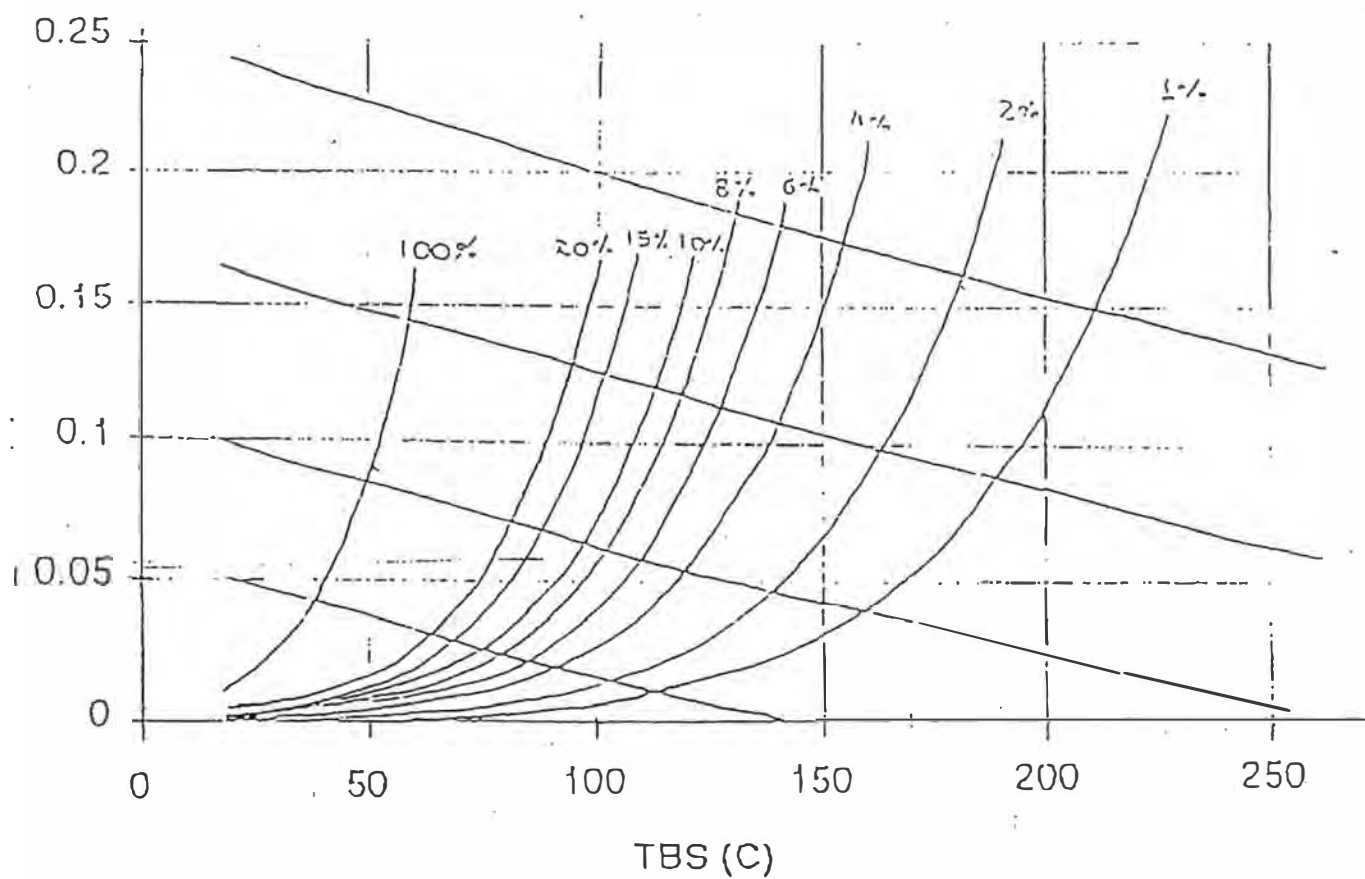
Compuestos	Peso (%)
Fe_2O_3	71.08
Fe_3O_4	22.47
FeS_2	0.09
$CuFeS_2$	0.01
Cu_2O	0.01
SiO_2	3.09
MnO_2	0.05
P_4O_{10}	0.02
Na_2O	0.10
K_2O	0.07
Al_2O_3	0.51
MgO	0.46
CaO	0.24
$CaSiO_3$	0.49
$MgSiO_3$	1.14
Na_2SiO_3	0.19
Total	100.00

ANEXO 7 CARTAS PSICOMETRICAS DEL AIRE



Carta psicrométrica de temperaturas elevadas. Presión barométrica, 29.92 in. de Hg.

CARTA PSICROMETRICA PARA ALTAS TEMPERATURAS



ANEXO 8 DETERMINACION DE CAPACIDADES CALORIFICAS MEDIA

De la sección 3.3.3.2 se define la capacidad calorífica media.

Se tiene los valores de capacidades caloríficas individuales:

Capacidades Calorificas
(T = 25 °C)

Compuesto	Cp (cal/mol - K)
Fe ₂ O ₃	24.732
Fe ₃ O ₄	35.748
FeS ₂	14.681
SO ₂	9.206
CuFeS ₂	11.387
Cu ₂ O	13.356
CaSiO ₃	20.371
MgSiO ₃	18.891
Na ₂ SiO ₃	26.715
SiO ₂	10.750
CaO	10.226
CaCO ₃	19.560
MgO	8.867
MgCO ₃	18.048
Na ₂ O	17.309
K ₂ O	18.53
AL ₂ O ₃	18.869
MnO ₂	13.318
P ₄ O ₁₀	48.262

T(K)	Barrotes	Palets
	AISI 304	AISI 316
300	0.114	0.112
400	0.123	0.120
600	0.133	0.131
800	0.139	0.138
1000	0.146	0.144
1200	0.153	
1500	0.163	

Siguiendo con la metodología del cálculo de capacidad calorífica media se obtuvo los siguientes ecuaciones para los compuestos:

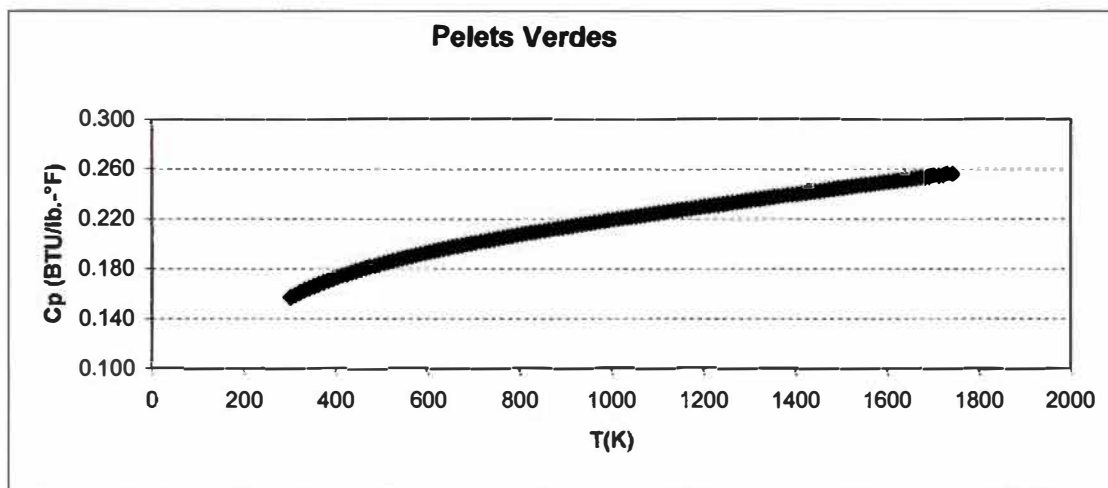
- Pelets (Verdes, Transicional y Quemado). Ver anexo 6 para su composición química.

- Gases de proceso (Ventiladores 690, 691, 692, 693, 694, 695). Ver Cuadro 3 – para su composición química.
- Material de transporte (palets y barrotes)

Pelets Verdes

$$C_p = 0.00000000002646 * T^3 - 0.00000010427718 * T^2 + 0.00018366717142 * T + 0.11400305288222$$

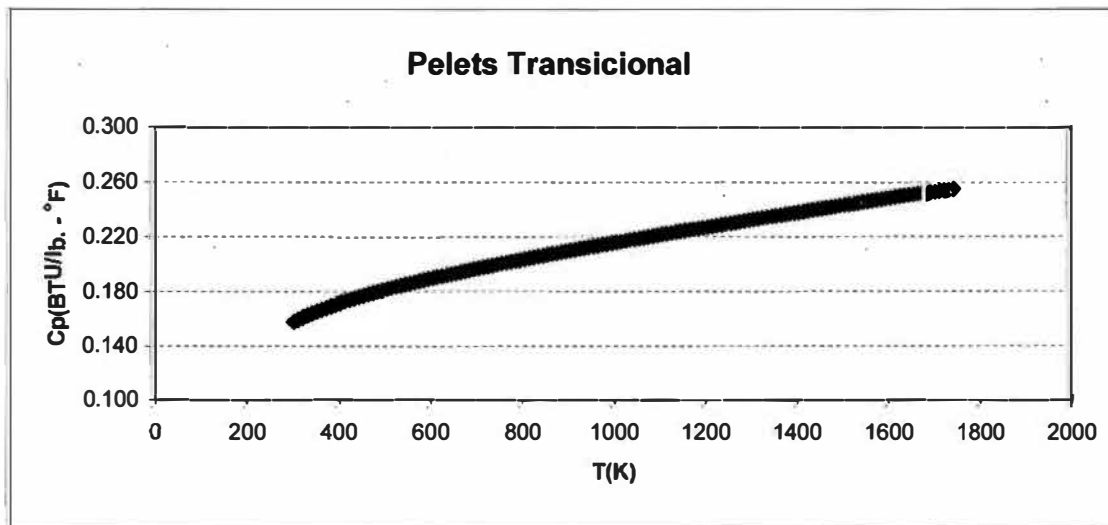
$$R^2 = 0.99927624887899$$



Pelets Transicional

$$C_p = 0.00000000001965 * T^3 - 0.00000007745683 * T^2 + 0.00015340072982 * T + 0.11993012940739$$

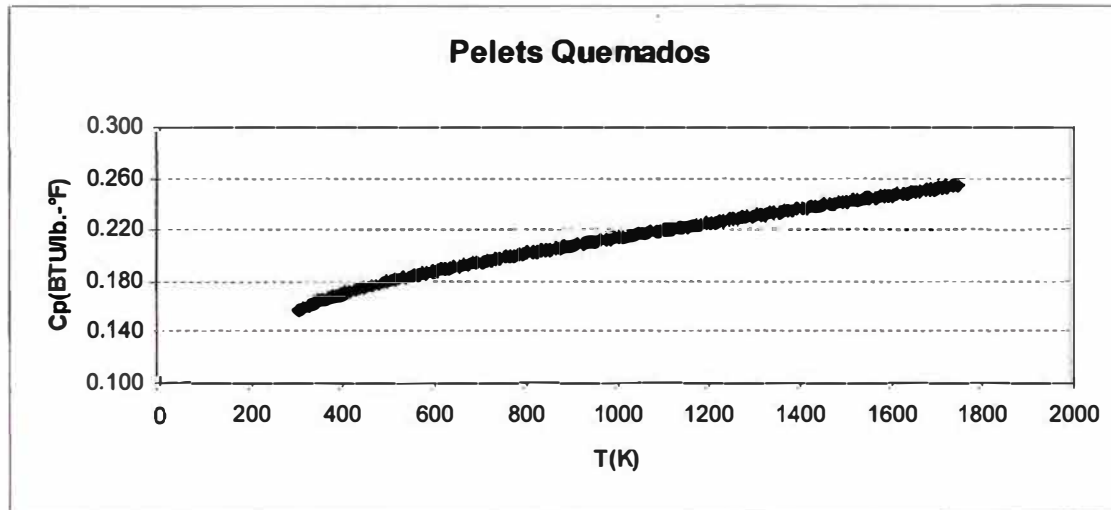
$$R^2 = 0.99961022999557$$



Pelets Quemado

$$C_p = 0.00000000001787 \cdot T^3 - 0.00000007043113 \cdot T^2 + 0.00014527049809 \cdot T + 0.12151306040952$$

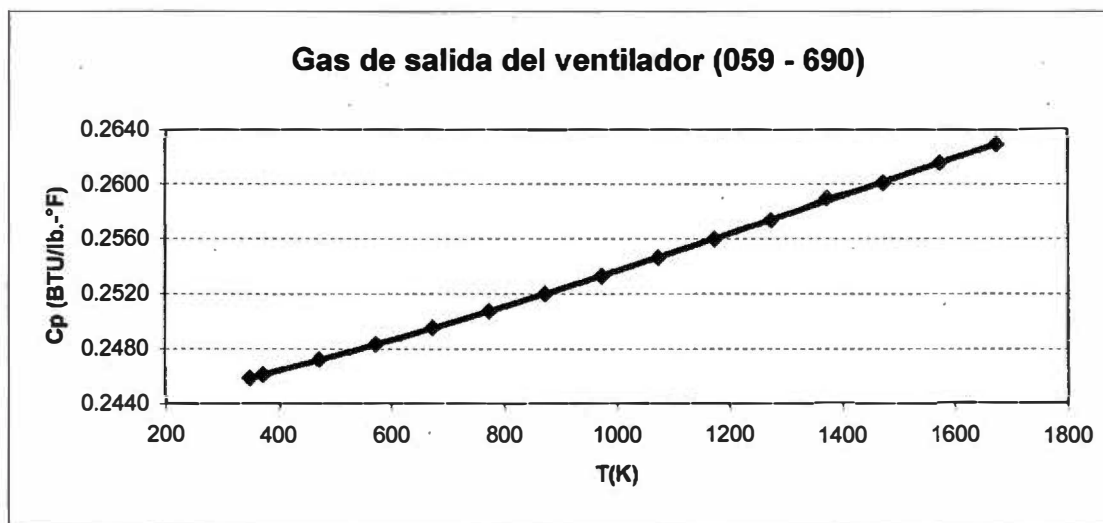
$$R^2 = 0.99967790566999$$



Gas de salida del ventilador 059 - 690

$$C_p = -0.00000000000108 \cdot T^3 + 0.00000000455915 \cdot T^2 + 0.00000746099931 \cdot T + 0.24273987559259$$

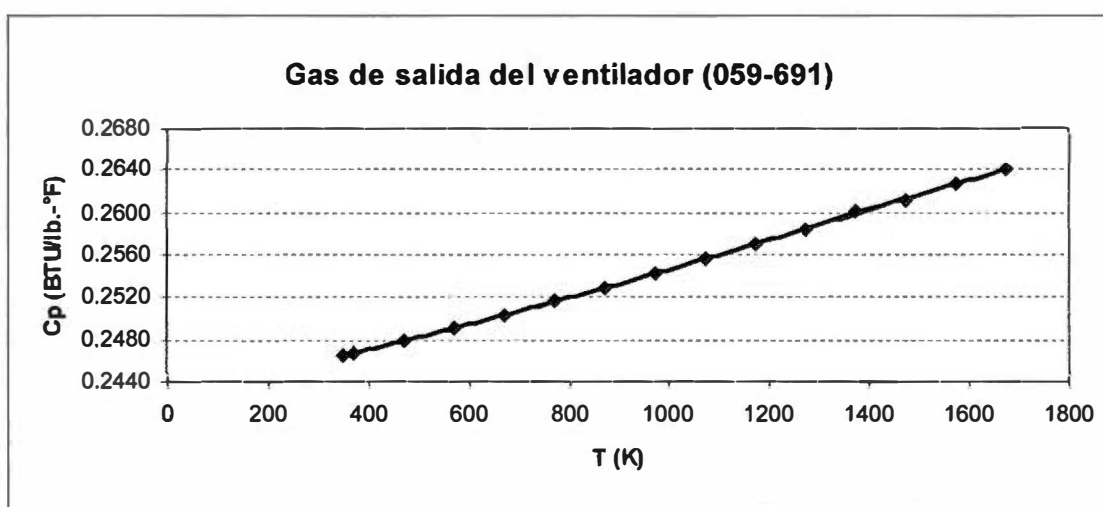
$$R^2 = 0.99987289836660$$



Gas de salida del ventilador 059 - 691

$$C_p = -0.00000000000108 \cdot T^3 + 0.00000000452094 \cdot T^2 + 0.00000789134203 \cdot T + 0.24327613428759$$

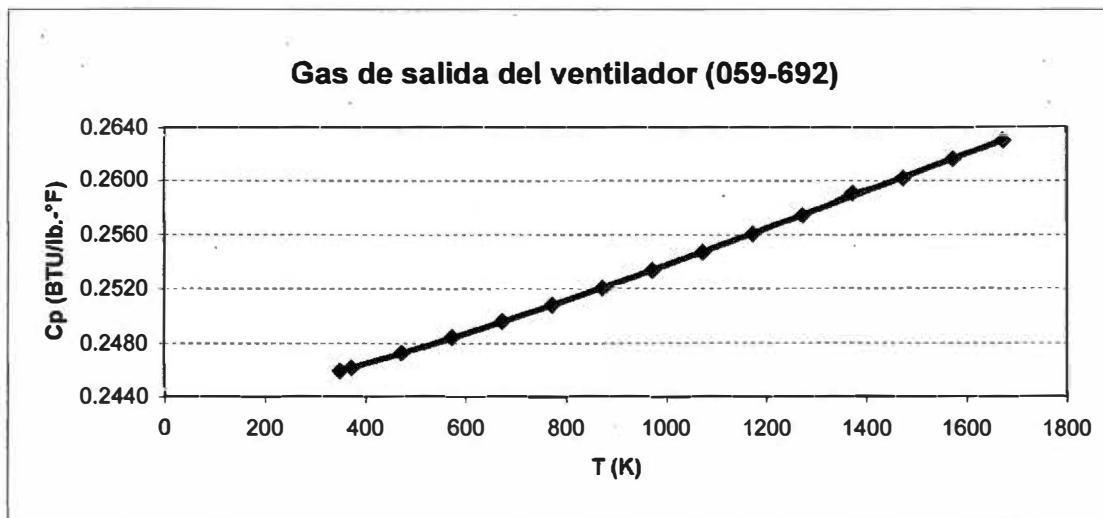
$$R^2 = 0.99987834496800$$



Gas de salida del ventilador 059 - 692

$$C_p = -0.00000000000108 \cdot T^3 + 0.00000000455602 \cdot T^2 + 0.00000749889168 \cdot T + 0.24279894004302$$

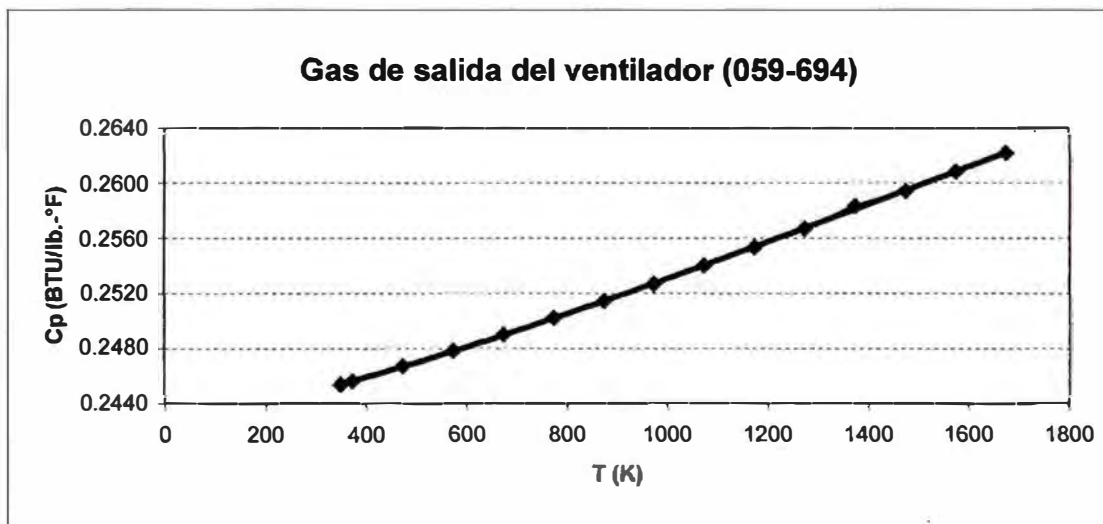
$$R^2 = 0.99987344931215$$



Gas de salida del ventilador 059 - 694

$$C_p = -0.0000000000108 * T^3 + 0.00000000457918 * T^2 + 0.00000721886644 * T + 0.24236245277766$$

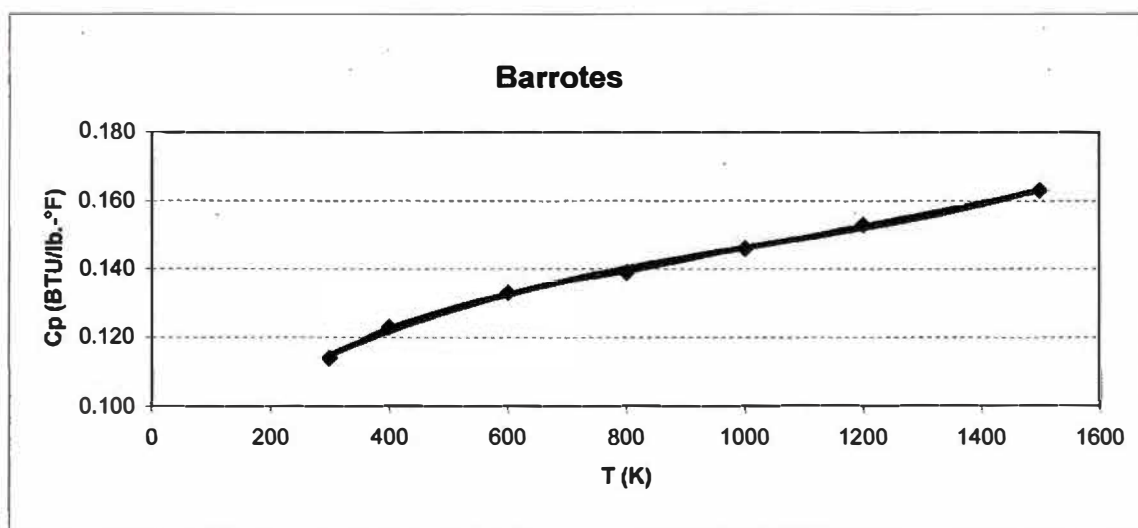
$$R^2 = 0.9998692821036$$



Barrotes

$$C_p = 0.00000000002936 * T^3 - 0.00000009132793 * T^2 + 0.00012274146226 * T + 0.08543212036438$$

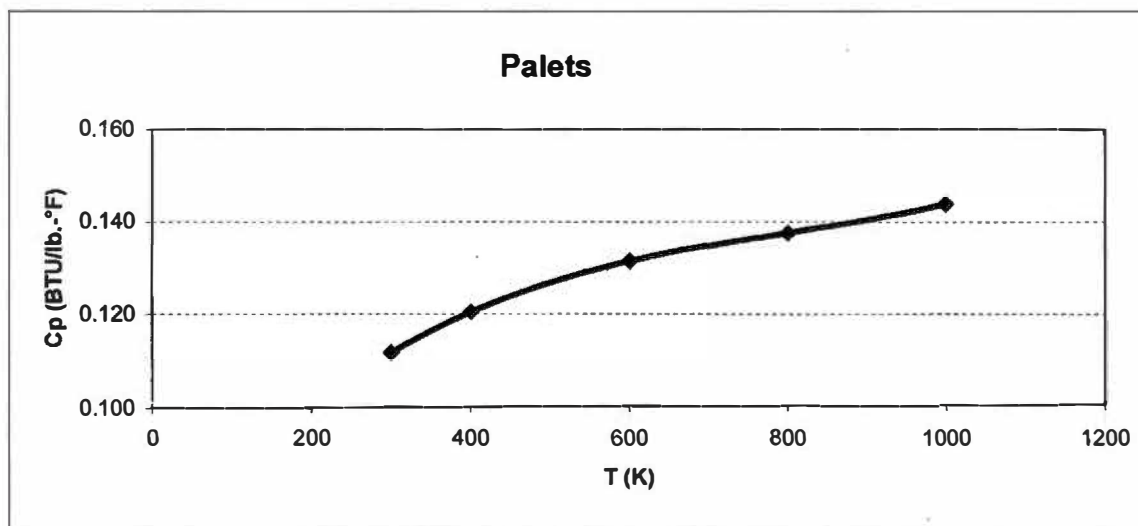
$$R^2 = 0.9971468254254$$



Palets

$$C_p = 0.00000000009560 \cdot T^3 - 0.00000023037485 \cdot T^2 + 0.00021233440369 \cdot T + 0.06621753999930$$

$$R^2 = 0.9999961265216$$



ANEXO 9 ENTALPIAS DE REACCIÓN

Calores de Formación

Compuesto	ΔH (Kcal/mol)
Fe ₂ O ₃	-198.5
Fe ₃ O ₄	-266.9
FeS ₂	-38.62
SO ₂	-70.94
CuFeS ₂	-36.53
Cu ₂ O	-43
CaSiO ₃	-377.9
MgSiO ₃	-347.5
Na ₂ SiO ₃	-383.91
SiO ₂	-202.62
CaO	-151.7
CaCO ₃	-289.5
MgO	-143.84
MgCO ₃	-261.70
CO ₂	-94.05
Na ₂ O	-99.45

Para las reacciones mostradas en el Anexo 6, se calcula las entalpías de reacción:
(T = 25 °C. Temperatura de referencia)

Reacciones	ΔH (Kcal/mol)	ΔH (Kcal/g)	ΔH (BTU/Lb)
1	-30.85	-0.1332	-239.82
2	-202.51	-1.6897	-3041.45
3	-226.10	-1.2327	-2218.84
4	43.75	0.4371	786.83
5	23.81	0.2824	508.24
6	-23.58	-0.4205	-756.85
7	-81.84	-1.3201	-2376.23
8	-1.04	-0.0258	-46.43

ANEXO 10 CORROSIÓN ÁCIDA

El azufre del combustible es el mayor responsable de la corrosión en la sección de convección a la baja temperatura.

Un 90 - 95% de dicho azufre se oxida en la llama como SO_2 , y 1 - 3% de este se oxida posteriormente a SO_3

Reacciones de formación de SO_2 y SO_3

Mecanismo de formación de SO_3

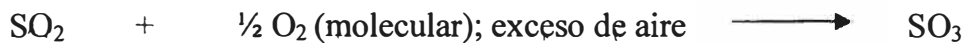
El SO_3 se produce por los siguientes mecanismos:

- Oxidación del S por O atómico (de la combustión)
- Oxidación del S por O_2 molecular (del exceso de aire)
- Oxidación catalítica (por V_2O_5 por Fe_2O_3 o por óxidos de nitrógeno)

Reacciones de formación de SO_2



Reacciones de formación de SO_3



Al combinarse el SO_3 con el vapor de agua (producto de la combustión y de la atomización) se forma H_2SO_4 ; parte del cual se condensa en las superficies metálicas frías (con temperatura inferior al punto de rocío ácido) y, además de ofrecer condiciones adherentes que propician el ensuciamiento, se presenta procesos corrosivos.

Para reducir parcialmente la oxidación de SO_2 a SO_3 , causada por los mecanismos enumerados arriba, y disminuir considerablemente la cantidad de depósitos (cenizas) y por ende, la corrosión por H_2SO_4 condensado, por lo mismo para controlar la lluvia ácida de partículas que causan contaminación ambiental, se puede tomar las siguientes medidas:

- Operacionales: Reducir fuertemente el alto exceso de aire (oxígeno) y mejorar la atomización del combustible.
- Químicas: Inyectar al combustible aditivos del tipo órgano metálico (principalmente benzoato de magnesio) pues el magnesio iónico liberado en la llama produce MgO el cual inhibe la catálisis del SO_2 a SO_3 por V_2O_5 al formar $MgSO_4$ (polvo seco suelto). El magnesio forma compuestos con oxígenos, vanadio, sodio, azufre, calcio, etc. La velocidad de reacción del magnesio con el vanadio es mayor que la del vanadio con oxígeno.

CORROSION POR CENIZAS FUNDIDAS

Comportamiento de las cenizas del residual

Aunque los combustibles residuales contienen una gran variedad de impurezas, para efectos prácticos y la relación con la corrosión que se producen en hornos y calderos solo tres resultan determinantes: azufre, sodio y vanadio, y algunos otros tienen algún tipo de influencia considerable.

Los sistemas Na-V-S generan tres clases de vanadatos de sodio que tienen diferentes grados corrosivos y cuya formación depende del radio molar Na/V en el combustible, al aumentar esta relación debe esperarse compuestos mas corrosivos, el cuadro a continuación muestra los compuestos de Na-V y el punto de fusión correspondiente.

Fórmulas y puntos de fusión de constituyentes mas comunes

DEPÓSITOS	FORMULAS	PUNTO DE FUSIÓN(F)
Pentóxido de vanadio	V_2O_5	1247-1247
Vanadato de sodio	$Na_2O \cdot 6V_2O_5$	1255
Vanadil vanadato de sodio	$5Na_2O \cdot V_2O_4 \cdot 11V_2O_3$	995
Vanadato de sodio	$NaVO_3$	1140
Sulfato de sodio	Na_2SO_4	1625

La presencia importante de otros contaminantes compiten con el Na para atrapar el V generando para el caso de Ni, Fe, Cr, forma un efecto contradictorio, por un lado elevan

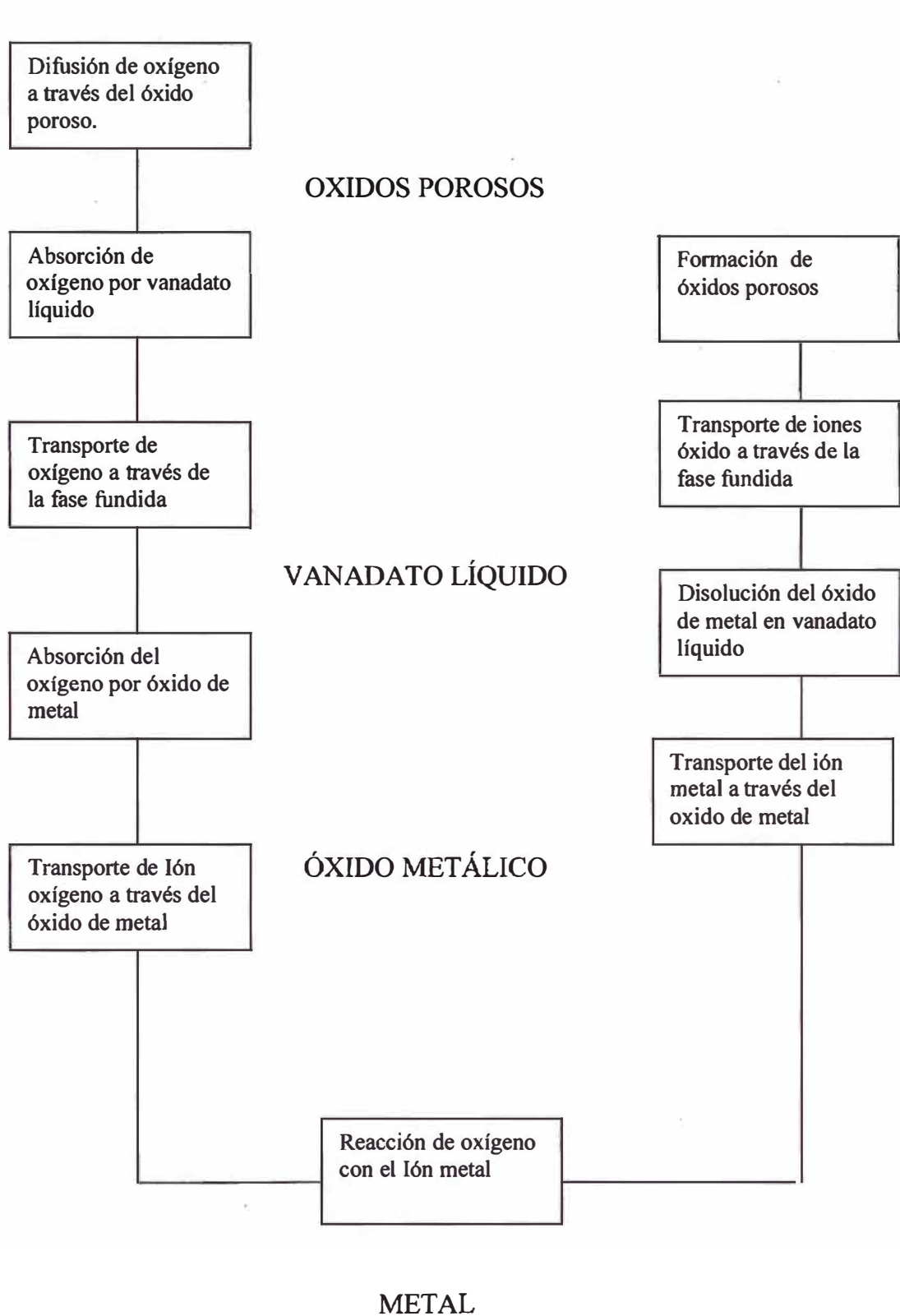
el radio efectivo Na/V y por otro lado pasiva la corrosividad de la ceniza al disminuir la concentración de corrosivos en los depósitos de ceniza.

Los productos corrosivos tienen una excepcional facilidad para absorber oxígeno en la interfase gas/fase fundida y reabsorberlo en la interfase fundida/metal.

RADIO	REACCIONES
1<R<3	$2\text{Na}_2\text{SO}_4 + 4\text{V}_2\text{O}_5 \rightarrow 2\text{Na}_2\text{VO}_3 + \text{Na}_2\text{O} \cdot 3\text{V}_2\text{O}_5 + 2\text{SO}_3$
3<R<6	$2\text{Na}_2\text{SO}_4 + 9\text{V}_2\text{O}_5 \rightarrow \text{Na}_2\text{O} \cdot 3\text{V}_2\text{O}_5 + \text{Na}_2\text{O} \cdot 6\text{V}_2\text{O}_5 + 2\text{SO}_3$

Niveles importantes de azufre pueden originar una corrosión por cenizas a temperaturas relativamente bajas sobre la superficie de los tubos de procesos.

MECANISMOS DE CORROSIÓN DE LA SUPERFICIE METÁLICA CENIZAS DE COMBUSTIBLE



Mecanismos y velocidades de corrosión

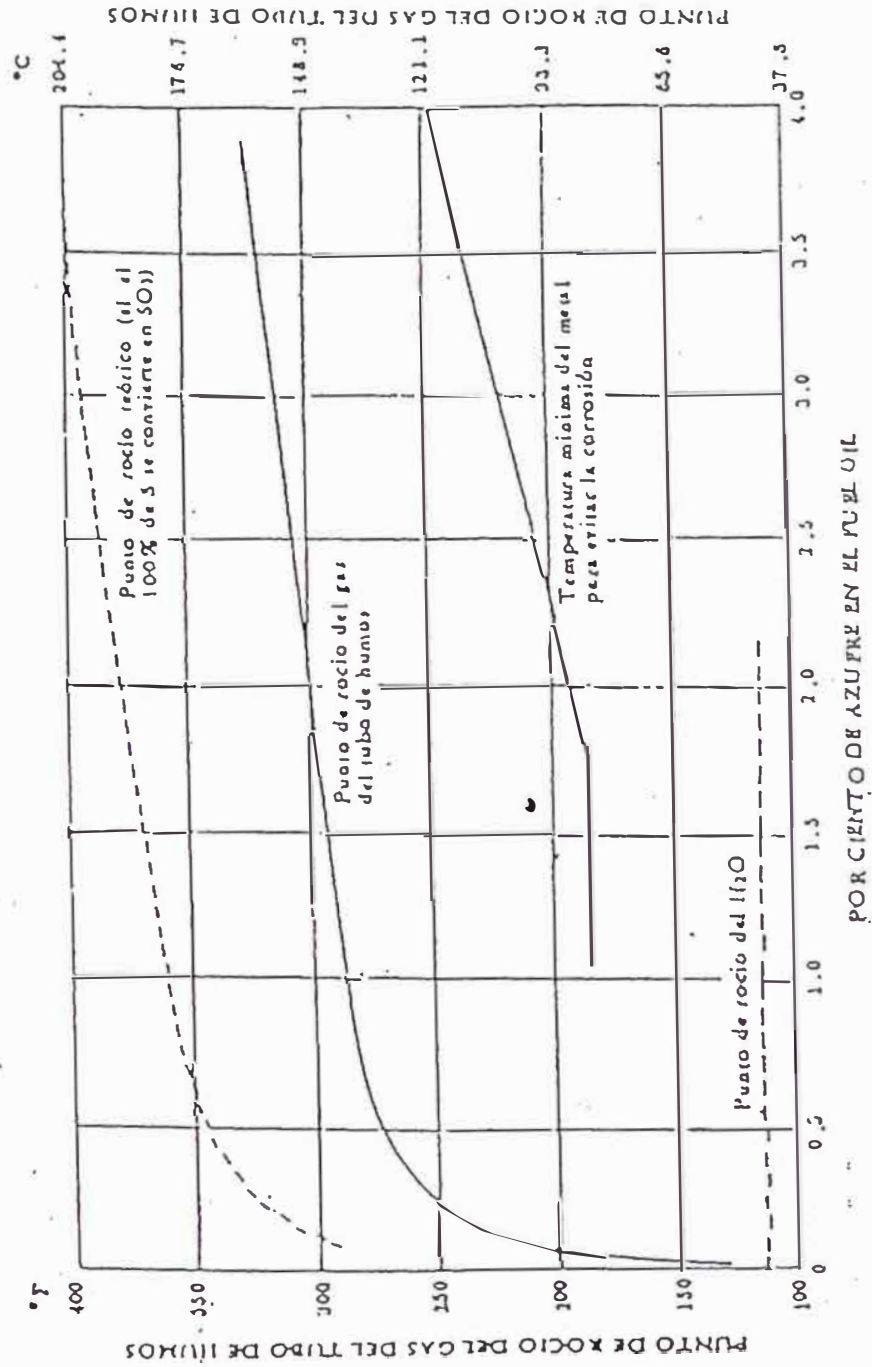
Ciclos alterados de oxidación y sulfurización a temperaturas por encima de los 550°C (1.100°F).

Implica una secuencia de:

- Desprendimiento del film de óxido protector.
- Penetración de la superficie y ataque del cromo por una especie azufre.
- Oxidación por oxígeno de las áreas deficitarias en cromo.

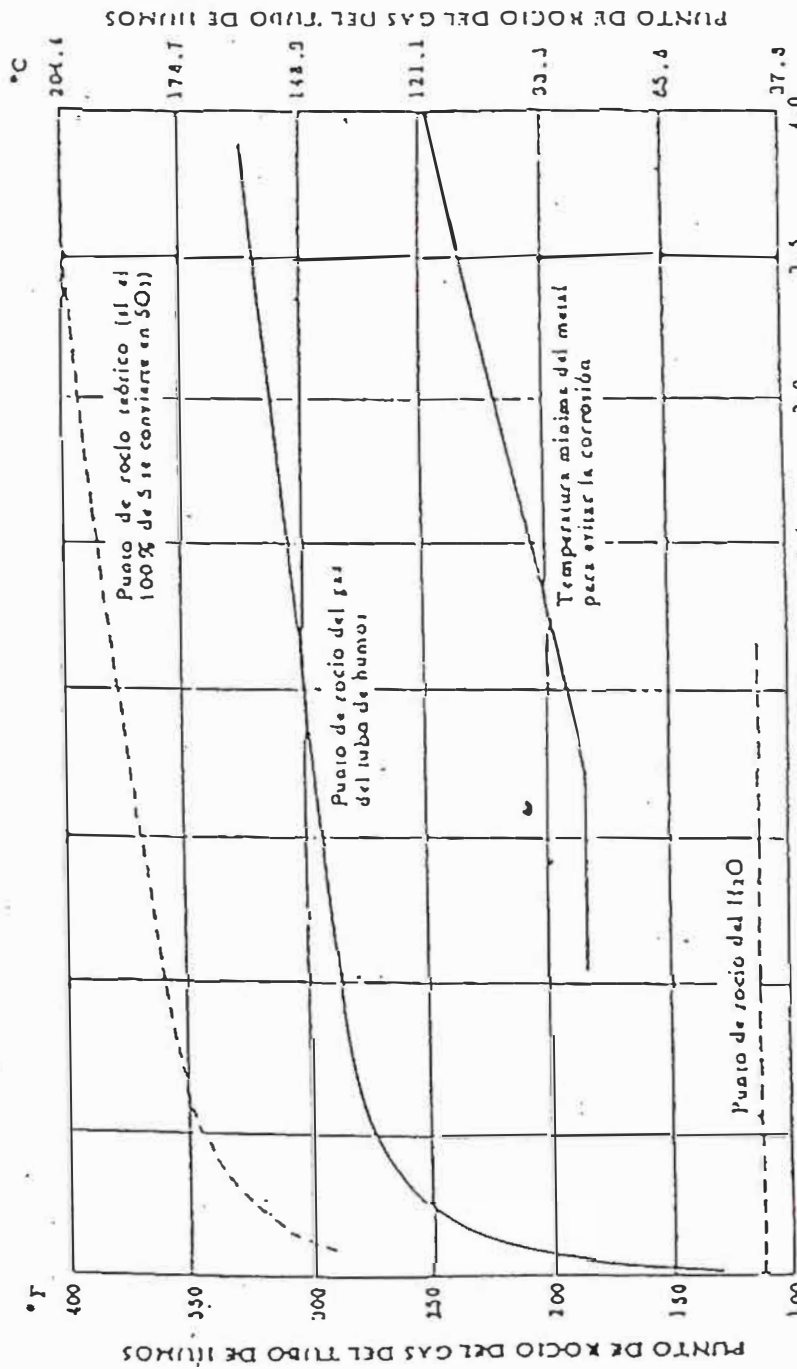
La corrosión por cenizas implica siempre una fase fundida que ataca el óxido protector y permite la oxidación transportando oxígeno. Las propiedades de transporte para la fase fundida para generar la oxidación son de naturaleza eléctrica considerándose que el oxígeno es reducido en la ceniza líquida.

PUNTO DE ROCIO VS AZUFRE EN EL FUEL OIL



El sulfúrico es gaseoso mientras la temperatura del flue-gas es mayor al "punto de rocío".

PUNTO DE ROCIO VS AZUFRE EN EL FUEL OIL



PUNTO DE ROCIO DEL GAS DEL TUBO DE HUMOS

PUNTO DE ROCIO DEL GAS DEL TUBO DE HUMOS

El sulfúrico es gaseoso mientras la temperatura del flue-gas es mayor al "punto de rocío".

ANEXO 11 QUEMADORES

Pre calentamiento para atomización

Para una buena atomización el residual debe ser calentado hasta reducir su viscosidad dentro de los límites de operación del quemador.

En los sistemas actuales es muy utilizado el calentamiento con resistencia eléctrica, así como el uso de intercambiadores de calor que utilizan vapor, sistemas mixtos o cualquier otra fuente de calor disponible en planta.

Para determinar la temperatura de atomización, según el tipo de residual utilizado, el gráfico viscosidad - temperatura, presenta algunos valores en el cuadro siguiente:

TEMPERATURA DE ATOMIZACIÓN

Viscosidad SSF a 122° F	TEMPERATURA DE ATOMIZACIÓN (°F)			
	Tiro Forzado		Tiro Natural	
	MIN	MAX	MIN	MAX
100	188	200	200	220
150	195	205	205	235
200	205	215	215	245
250	215	225	225	255
300	215	230	238	260
400	220	240	248	265
500	230	250	258	275

En el caso del residual 6 con una viscosidad de 300 SSF , este deberá ser calentado en el rango de temperaturas de 215°F – 260°F (102°C – 125°C), para obtener una buena atomización.

Quemadores para residuales

El quemador representa el corazón de cualquier sistema de combustión industrial y su diseño, montaje y funcionamiento, son factores determinantes para lograr el aprovechamiento racional del potencial calorífico del combustible.

En el caso particular de la utilización de residuales, su importancia en el proceso es aun mayor, por tener que soportar condiciones más agresivas y compensar su menor combustibilidad. (el petróleo residual contiene mayor cantidad de impurezas, lo que produce la formación de cenizas y coque , el cual se deposita en los quemadores por lo que se requiere un mantenimiento continuo).

Cualquier quemador debe cumplir 5 funciones:

1. Aportar combustible.
2. Aportar aire.
3. Mezclar aire y combustible.
4. Encender y quemar la mezcla.
5. Desplazar los productos de la combustión .

Las condiciones básicas que un quemador debe satisfacer para conseguir una buena combustión, se analizan en los siguientes puntos:

a) Elegido en función del hogar o cámara de combustión y del proceso

El diseño o selección del quemador debe elegirse de acuerdo a:

La forma, dimensiones y temperaturas de las paredes del hogar o cámara de combustión.

El tipo de funcionamiento: continuo o intermitente.

El tipo de combustible y exceso de aire requerido.

b) Margen de regulación adecuado

El margen de regulación indica la relación entre el caudal máximo y mínimo del combustible que gasta un quemador.

Esta relación es propia de cualquier tipo de quemador y depende fundamentalmente de los siguientes factores;

Combustible utilizado.

Dimensiones de los conductores de aire y combustible.

Velocidad del aire y del combustible.

Forma de mezcla de los mismos.

c) Estabilidad de funcionamiento

La estabilidad de un quemador se define como la capacidad de mantener la llama dentro de los límites de su campo de regulación, es decir, mantener estable el frente de llama, incluso con la cámara de combustión fría o en condiciones de presión distintas de las diseñadas para el quemador.

La estabilidad del frente de llama depende, en gran medida, del equilibrio que debe existir entre la velocidad de la mezcla aire-combustible y la de propagación de la llama. Si la velocidad de la mezcla aire-combustible que ingresa a la cámara de combustión u horno es mayor que la velocidad con la que se quema, se producirá el despegue de llama y en caso contrario, la "retrollama" o retroceso de la llama hasta extinguirse en el quemador.

d) Control sobre la forma y dimensiones de la llama.

La forma y dimensiones de una llama vienen determinadas fundamentalmente por la potencia del quemador; sin embargo, pueden modificarse dentro de ciertos límites, por una serie de variables entre las que se pueden destacar:

Grado de turbulencia.

Velocidad de la mezcla.

Exceso de aire.

Presión del aire de combustión.

Tamaño de las gotas pulverizadas en los combustibles líquidos.

e) Sistemas de protección adecuados

Los quemadores deben disponer de sistemas de protección, principalmente en los siguientes puntos:

Puesta en marcha: Antes de la ignición debe procederse al barrido de la cámara de combustión para evitar el riesgo de explosiones.

Protección ante el fallo de llama: La pérdida de llama por cualquier causa debe cortar inmediatamente la alimentación de combustible.

Protección ante situaciones peligrosas: Bajo nivel de agua en la caldera o interrupción de la alimentación de un horno, deben cortar inmediatamente la alimentación de combustible.

Deberían producir el paro del quemador:

- Presión mínima del combustible.
- Temperatura mínima del residual.
- Falta de aire de combustión.
- Presión elevada en la cámara de combustión.
- Falta de fluido atomizador.

Las exigencias fundamentales a las que tienen que responder los quemadores en planta son:

Lograr una intensidad elevada de combustión, es decir, quemar la mayor cantidad de combustible 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 (relación entre el calor liberado y el poder calorífico), 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 llama dentro de algunos límites, para permitir la posibilidad de adaptación a las dimensiones de la cámara de combustión

Energía de atomización

Los combustibles líquidos se pueden quemar de dos formas, mediante su vaporización para que combustionen como gases, o mediante su pulverización en pequeñas gotas, que calentadas por la radiación de la llama y con la ayuda de una mezcla turbulenta se evaporaran durante la combustión.

La eficiencia del quemador depende fundamentalmente del grado de atomización, el cual deberá tener las siguientes características:

- Las partículas del combustible deben alcanzar un pequeño diámetro; mientras mas pequeñas sean las gotas, mas rápido se vaporizan y combustionan en forma completa.
- El tamaño de las gotas debe ser uniforme; de otra manera, la evaporación será irregular y las gotas de mayor tamaño pueden pasar a través de la zona de combustión sin vaporizarse.
- Las gotas deben ser uniformemente distribuidas por el atomizador; en caso contrario, la eficiencia de la combustión será afectada por la dificultad para controlar el suministro de aire.

CUADRO 11 - 1

VISCOSIDAD REQUERIDA POR DIFERENTES TIPOS DE QUEMADORES

	°E		CST	
	MIN	MAX	MIN	MAX
Atomización mecánica				
Copa mecánica	2.5	3	17	21
Presión directa			20	32
Con retorno			20	32
Ranuras regulables			20	32
Tipo piston			20	32
Doble circuito			20	32
Atomización c/fluido auxiliar	MIN	MAX	MIN	MAX
Con vapor de alta presión	5	8	40	60
Presión directa vapor (3-10 atm)	2	3	11	21
Presión directa (1, 5-8 atm)aire	2	3	11	21
Aire de alta presión (1, 5-8 atm)	3	8	21	60
Aire a presión media (0.5-1.5 atm)	2	8	11	60
Aire a baja presión (500-1.000 mmH ₂ O)	2	8	11	60
Copa rotativa	MIN	MAX	MIN	MAX
(250 – 300 mmH ₂ O)	3	8	21	60

Quemadores de atomización por aire

Debido a que el aire de atomización se mezcla íntimamente con el combustible y comprende parte del aire requerido de combustión, la combustión se inicia más rápidamente y se completa más pronto con este tipo de quemadores que con cualquier otro.

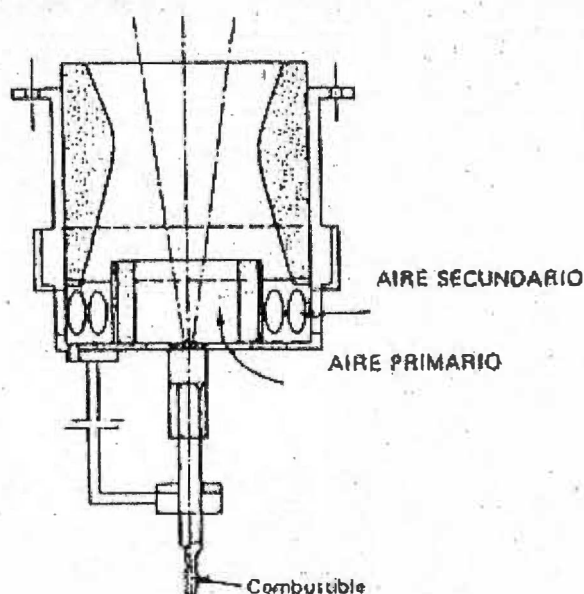
La atomización por aire produce una llama mas corta y compromete un espacio más pequeño para su combustión. Sin embargo, esta característica puede no ser siempre una ventaja, especialmente cuando se desea una llama larga y una lenta combustión.

Igualmente, para compensar el efecto enfriante del aire de atomización puede ser mayor el precalentamiento del combustible que en el caso de atomización par vapor.

Los quemadores que emplean la atomización por aire pueden utilizar aire a baja, media o alta presión. El consumo de aire, expresado en peso, para los pulverizadores de alta presión, oscila alrededor del 25% en peso de combustible atomizado, mientras que para los de presión media puede llegar al 50%.

Las presiones varían entre 0,5 y 1,5 atmósferas para el combustible y para el aire. Los atomizadores a presión alta y media representan una excelente solución, sobre todo para pequeñas capacidades, en los casos que se necesiten variar la forma de la llama, para adaptarla a las dimensiones del hogar. Sin embargo, tienen algunos inconvenientes frente a otros sistemas de atomización, como son el ruido y el elevado costo del servicio del compresor.

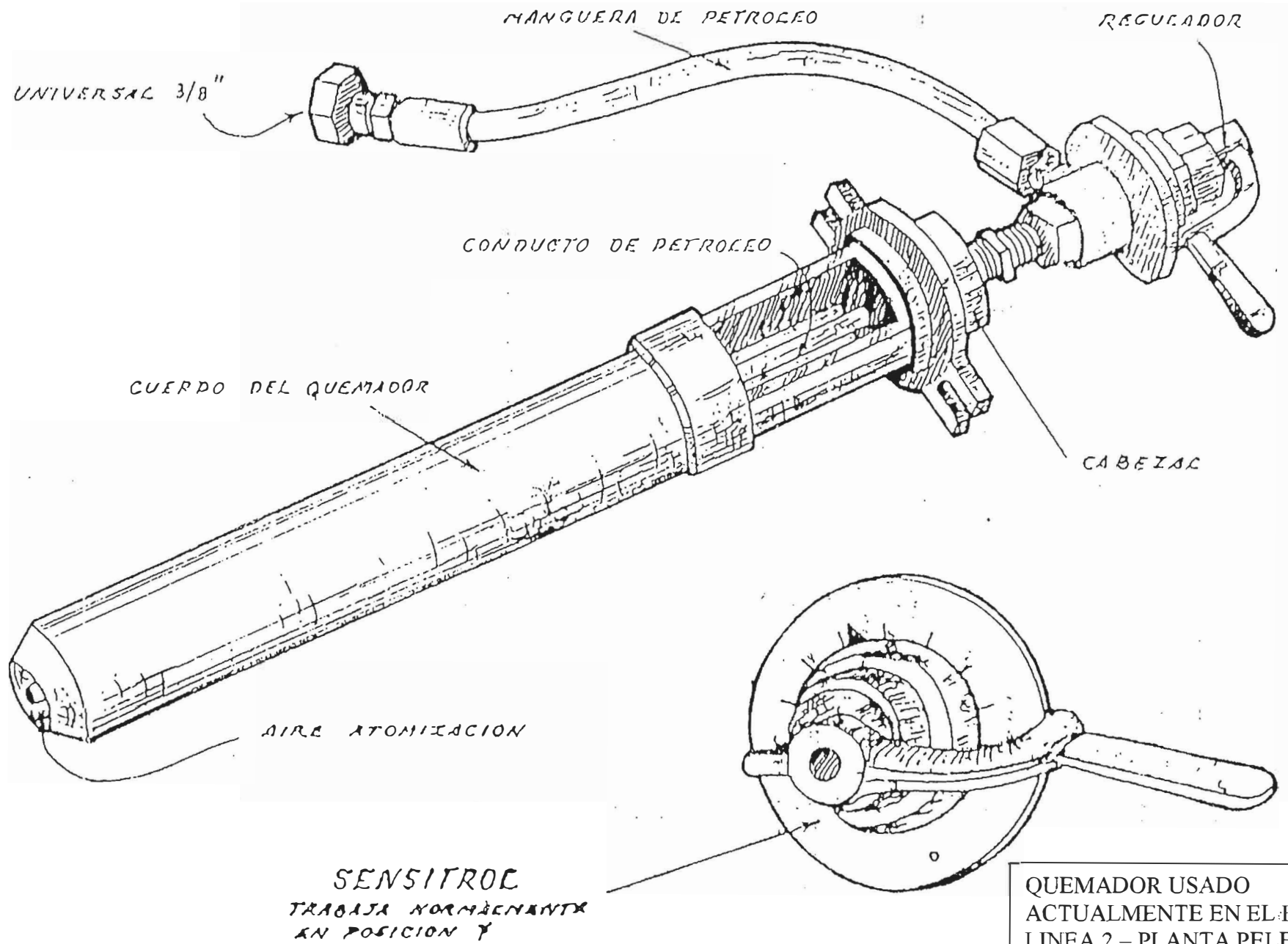
Atomizador por aire



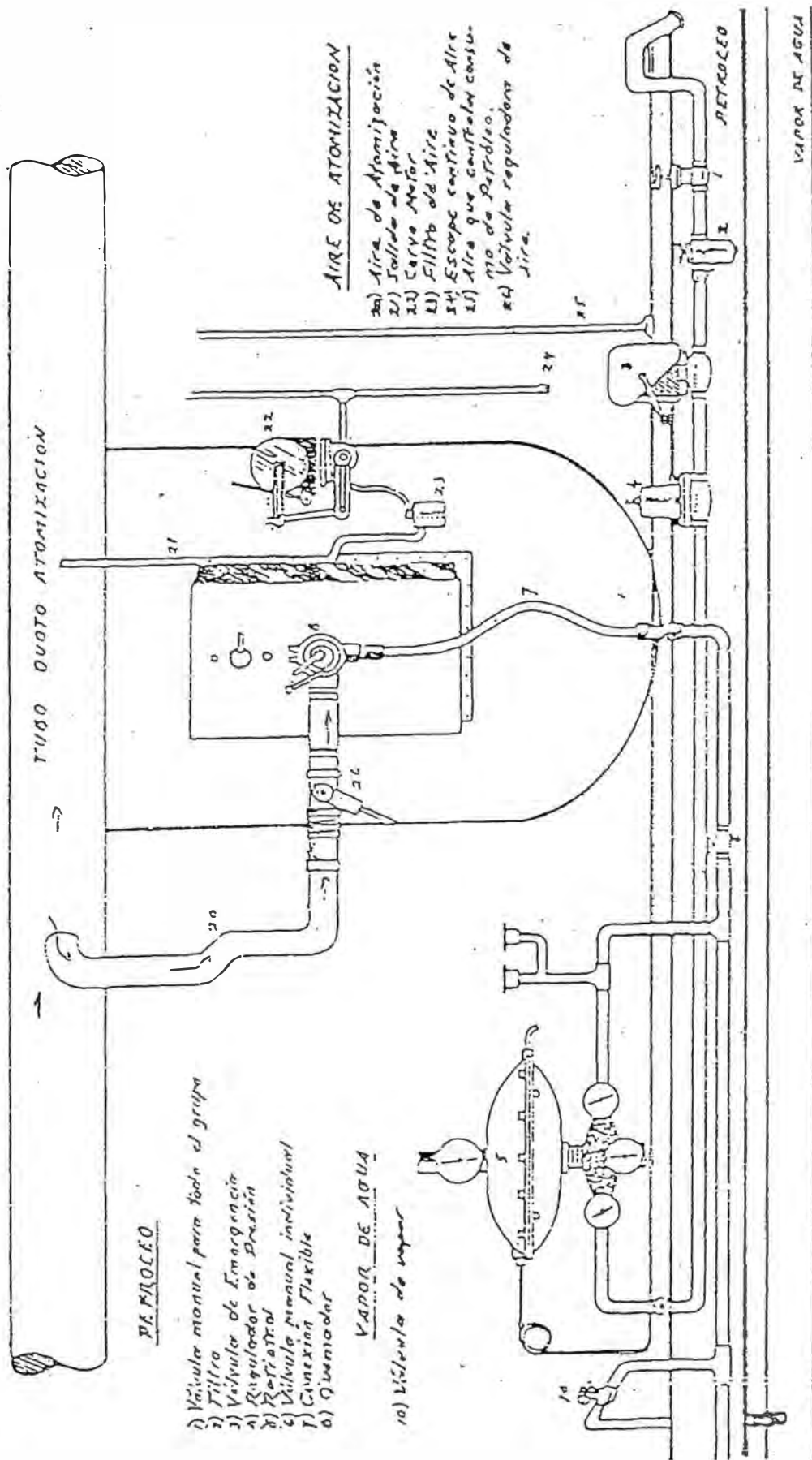
**TEMPERATURAS CORRESPONDIENTES A COLORES OBSERVADOS EN
LA LLAMA**

Color	°F	°C
Rojo suave	875	475
Rojo suave a rojo oscuro	875-1200	475-650
Rojo oscuro a rojo cereza	1200-1375	650-750
Rojo cereza a rojo cereza brillante	1375-1500	750-825
Rojo cereza brillante a naranja	1500-1650	825-900
Naranja a amarillo	1650-2000	900-1090
Amarillo a amarillo brillante	2000-2400	1090-1320
Amarillo brillante a blanco	2400-2800	1320-1540-
Blanco a blanco deslumbrante	Mas de 2800	Mas de 1540

QUEMADOR

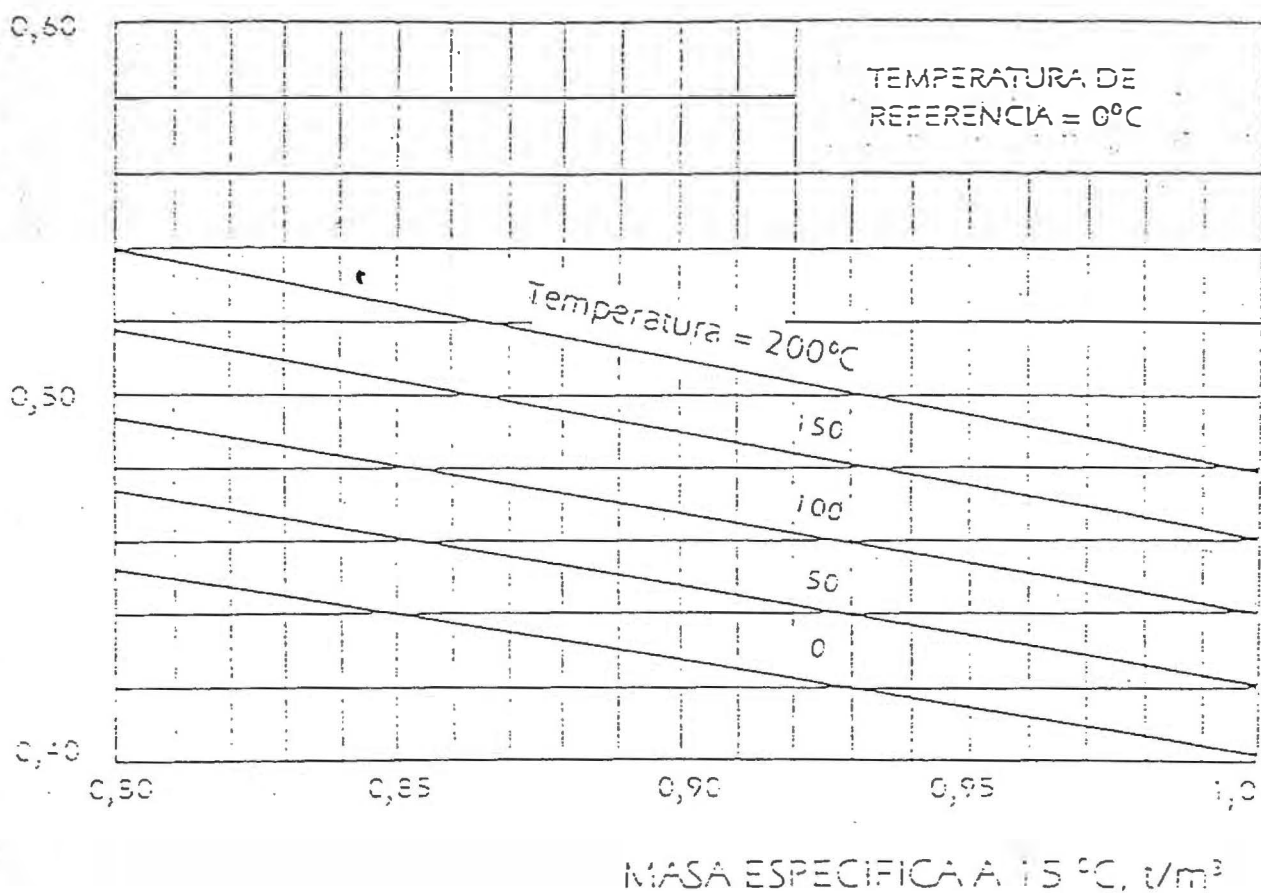


SISTEMA ACTUAL DE MECANISMO DE COMBUSTIÓN
EN EL HORNO LINEA 2 - PLANTA PELETS



VAPOR DE AGUA

CALOR ESPECIFICO MEDIO DE UN PETROLEO RESIDUAL, kcal/kg °C



ANEXO 12 FACTORES QUE AFECTAN LA CALIDAD DE LA COMBUSTIÓN

La calidad de combustión de los residuales depende de muchos factores, entre ellos:

- Propiedades físicas
- Propiedades físico-químicas del residual
- Condiciones de operación

En cuanto a las condiciones de operación, estas son muy variadas y su influencia se manifiesta rápidamente en los calderos u hornos. Entre los factores más comunes tenemos:

- a) Deficiente atomización, genera gastos de combustibles muy grandes, así, la superficie específica, es decir, el área por unidad de volumen se ve reducida. Esto implica un menor contacto entre el combustible y el aire de combustión, provocando una deficiente combustión.
- b) Relación aire / combustible, debe ser la mas adecuada. Un aumento o reducción, afecta la calidad de combustión, generalmente un pequeño porcentaje de exceso de aire es utilizado para una buena combustión. Puede considerarse muy buena si el exceso de aire esta por debajo de 20% y excelente por debajo del 10%.
- c) La viscosidad, es quizás el factor más importante de la combustión, en el caso de los residuales, su importancia aún es mayor, esta propiedad asociada a la tensión superficial son determinantes para una buena atomización del combustible, en algunos casos se queman residuales con una viscosidad muy elevada, presentándose depósitos en la cámara de combustión y formación de hollín, incrementándose notablemente al consumo de combustible.

- d) Un quemador inapropiado, puede generar problemas en la combustión de residuales. En algunos casos, los quemadores para diesel 2, son utilizados en residual ó, si no están diseñados para ambos combustibles pueden obturarse rápidamente, deformando la llama y provocando no solo problemas de mala combustión, en caso de incidir sobre los tubos, los sobrecalienta creando fatiga térmica, deformación y corrosión.
- e) Ventilador o trampillas de aire incorrectas al estar muy abierta, podrían alterar Las condiciones de combustión, provocando la oscilaciones durante la operación del caldero u horno, esto generan inestabilidad en el frente de llama alejándola o acercándola al quemador, esto podría craquear al combustible en fase líquida, depositándose coque en la boquilla del quemador y alterando totalmente la llama.
- f) Aire falso, cuando ingresan por filtración en el hogar afectan la combustión, y que provocan el enfriamiento de la llama, sin permitir que el combustible atomizado, pueda ser quemado totalmente.
- g) Regulador de tiro, cuando están en mal estado o el tiro es insuficiente, no permiten la eliminación de los gases de combustión, creándose una contrapresión en el interior de la cámara y un retroceso de Llama. En caso de ser muy alto, los gases serán desalojados rápidamente sin tener tiempo de dejar su calor sensible en el caldero u horno.
- h) Ángulo de pulverización, al no ser el adecuado a la conformación del hogar, provoca que la llama incida sobre las superficies metálicas o sobre el refractario, deteniéndose la combustión del residual atomizado.
- i) Los electrodos de ignición, desgastado o mal ajustado, retarda la ignición y en algunos casos no se lleva a cabo la combustión.

ANEXO 13 COTIZACIONES DE CAMBIO DE QUEMADORES

EQUIPOS TERMICOS S.A.



Presupuesto S.O.T. -

Señores:

Presente.-

Atn.: SR. PEDRO TENOCHE.

Muy señores nuestros:

De conformidad con su amable consulta nos place cotizarles lo siguiente:

Un QUEMADOR automatico para petroleo Bunker (Diesel 6) o Residual 500 (R-500). Construido localmente de las siguientes características:

MARCA	TERMICOS
CAPACIDAD	3'100.000 BTU/h.
CONSUMO	50 Gal/h.
COMBUSTIBLE	PETROLEO BUNKER (76) o RESIDUAL 500 (R-500).
POTENCIA	180 BHP.

El equipo tiene las siguientes características:

- Atomizacion por medio de aire comprimido producido por un compresor de paletas para obtener flujo continuo de aire.
- El encendido se realiza con gas propano, con un transformador de ignicion y electrodo, el equipo incluye la valvula solenoide de gas.
- Lleva como control de seguridad una celula fotoelectronica que controla la llama y que a traves de un programador corta el combustible en caso de falla de llama.
- Posee un precalentador de petroleo Residual, que incluye una resistencia electrica y un intercambiador de calor a vapor en caso exista vapor en sus instalaciones.
- Posee un motor modutrol, que modula la relacion aire-petroleo para encender el caldera en llama baja y pararlo despues de llama alta, segun el consumo.
- Cuenta con un tablero electrico que incluye los contactores para el encendido de los motores (petroleo, compresora y ventilador del quemador) y los controles que conectan la resistencia electrica de calentamiento del precalentador.

EQUIPOS TERMICOS S.A.



- El equipo incluye un programador que controla todo el funcionamiento del caldero, un amplificador ultravioleta para captar la señal de la fotocelda.
- PRECIO PUESTO EN EL ALMACEN DEL FABRICANTE \$22.500.00 + I.G.V.
=====
- Tiempo de Fabricacion: Aproximadamente 45 dias despues de recibida la orden de compra y cuota inicial.

INSTALACION.

El presente presupuesto no considera la instalacion del quemador, pero el fabricante prestara la asesoria tecnica necesaria para su adecuada instalacion.

PUESTA EN MARCHA Y ENTRENAMIENTO DEL PERSONAL ENCARGADO.

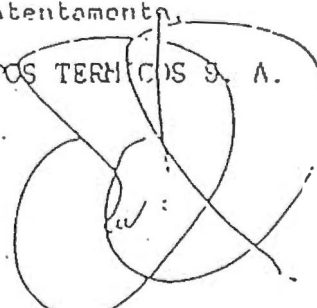
El fabricante del quemador asume la responsabilidad de ponerlo en marcha y entrenar al personal encargado del servicio del equipo, sin cargo alguno para ustedes.

VALIDEZ DE LA OFERTA.

30 dias. Despues de esta fecha el fabricante se reserva el derecho de revisar el precio y tiempo de entrega.

FORMA DE PAGO.	50% con la orden.
-----	30% con el avance.
	20% con la entrega.

Esperando vernos favorecidos con su apreciable orden, nos suscribimos de ustedes:

Atentamente,
EQUIPOS TERMICOS S. A.

ING. JUAN QUIROLO

FISHER

VAMSA

Señores
M y M Servicios
Presente.-

ATT.: Ing. Daniel Herencia

REF.: Control de temperatura

Estimados señores:

En atención a su amable solicitud, tenemos el agrado de presentarles nuestra oferta por el equipo en referencia.

Nuestra oferta se encuentra sujeta a las siguientes condiciones comerciales:

STOCK	En Lima
Tiempo de Entrega	5 - 9 Semanas
Forma de Pago	50% con orden de compra 50% contra entrega
Vigencia	30 Días
Precios	U.S. Dólares o su equivalente en nuevos soles a la fecha de pago
Garantía	1 (un) año y supervisión, configuración de los equipos

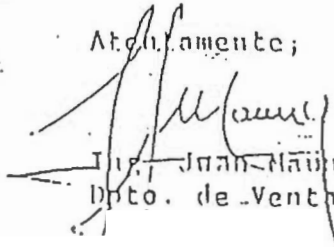
Lamentamos no aceptar cancelaciones luego de haber sido aceptado su pedido.

En caso de vernos favorecidos por su amable orden de compra, agradeceremos emitirla a nombre de:

V A M S A

Su orden de compra deberá contener la aceptación de las condiciones comerciales indicadas en la presente.

Sin más por el momento nos reiteramos de Ustedes.

Atentamente;

Ing. Juan Ramón A.
Dpto. de Ventas

FISHER

VAMSA

LISTA DE MATERIALES

Item	Descripción / Modelo	Precio Unitario
	Controlador-registrador dual, electrónico con indicador digital, de carta circular Modelo : 392 CHESSILL N° de canales : DOS (2) N° de controladores : DOS (2) Entradas : Termocupla (J,K,T,R,S, L,N) configurable por software Salidas : 4 - 20 mAdc Comunicación con computadora: RS-422 Voltaje de operación : 110 VAC Incluye 500 Cartas circulares y paquetes de 5 plumas (azul, rojo)	4,618.00
2	2 Convertidor de corriente a neumática Modelo: 646 FISHER Entrada : 4 - 20 mAdc Salida : 3 - 25 psig Acción : Directa Conexión neumáticas : 1/4" NPT Conexión eléctrica : 1/2" NPT Clasificación eléctrica : A prueba de explosión NEMA 3	717.00
3	2 Regulador de presión de aire Modelo : 67 AFR FISHER Entrada : Hasta 250 psig Salida : 5 - 35 psig Conexiones : 1/4" NPT Manómetro : 0 - 30 psig	110.00
4	4 Válvula de control de petróleo Modelo : FZ-1"-667-30-Microform 1/4" FISHER Material del cuerpo : Hierro fundido Trim : Acero inoxidable Actuador : 3-15 psig aire para abrir Bridas : 125 # ANSI	1,590.00
Opción de Item		
1.1	2 Controlador electrónico con indicador digital y de barras, configurable Modelo : DM900 FISHER Señales de entrada : Cuatro (4) análogas de 4 - 20 mA Señales de salida : Dos (2) análogas de 4 - 20 mA Modos de operación : Manual/Automático Set-Point local y remoto	2,100.00

FISHER

VAMSA

<u>Item</u>	<u>Qty.</u>	<u>Descripción / Modelo</u>	<u>Precio Unitario</u>
//...			
1.1	2	Módulos de control : PID Comunicación con computadora: RS-485 Fuente eléctrica : 24 Vdc. incorporada Voltaje de operación : 120 VAC Montaje : En panel	
1.2	2	Módulo de temperatura para controlador DPR900 FISHER Modelo : DPR 100 FISHER Entrada : Termocupla tipo "K"	250.00
1.3	3	Registrador electrónico con indicador digital, con carta de rollo Modelo : DPR745 FISHER N° de canales : DOS (2) Entrada : Termocupla ó 4-20 mA Comunicación con computadora: RS-485 Voltaje de operación : 120 VAC Montaje : En panel Incluye : 12 rollos	3,975.00

NOTAS:

- Los precios NO Incluyen el I.G.V. (18%)

CUADRO N ° 3

EVALUACION ECONOMICA (MUS\$/año)

ALTERNATIVA 2 : APROVECHAMIENTO DE GASES DE ESCAPE

AÑO	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I: INVERSION ACTIVO FIJO	(228.70)										
II. COSTO DE OPERACION		(7,903.30)	(7,903.30)	(7,903.30)	(7,903.30)	(7,903.30)	(7,903.30)	(7,903.30)	(7,903.30)	(7,903.30)	(7,903.30)
III. COSTO DE MANTENIMIENTO		(62.00)	(62.00)	(62.00)	(62.00)	(62.00)	(62.00)	(62.00)	(62.00)	(62.00)	(62.00)
III. COSTO TOTAL	(228.70)	(7,965.30)	(7,965.30)	(7,965.30)	(7,965.30)	(7,965.30)	(7,965.30)	(7,965.30)	(7,965.30)	(7,965.30)	(7,965.30)
IV. FLUJO DE FONDO		(7,965.30)	(7,965.30)	(7,965.30)	(7,965.30)	(7,965.30)	(7,965.30)	(7,965.30)	(7,965.30)	(7,965.30)	(7,965.30)
VALOR PRESENTE AL 12 %		(45,234.42)									

ANEXO 15 EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL EXISTENTE

Lazos de control

A continuación describiremos los lazos de control que operan en el horno 2, los cuales son de tipo analógico. Dichos lazos se han agrupado según su principio de funcionamiento.

En la mayoría de lazos, el elemento final de control es una compuerta, en el caso de los quemadores de petróleo es una válvula.

Para la descripción haremos uso de algunas abreviaturas:

TIC:	controlador e indicador de temperatura
TRC:	Controlador y registrador de temperatura
TD:	Traductor
TM:	Transmisor
ACT:	Actuador
COMP:	Compuerta
TC:	Termocupla
POS:	Indicador de posición de compuerta
WB:	Wind Box
PI:	Proporcional e integral
PID:	Proporcional, integral y derivativa
REF:	Referencia

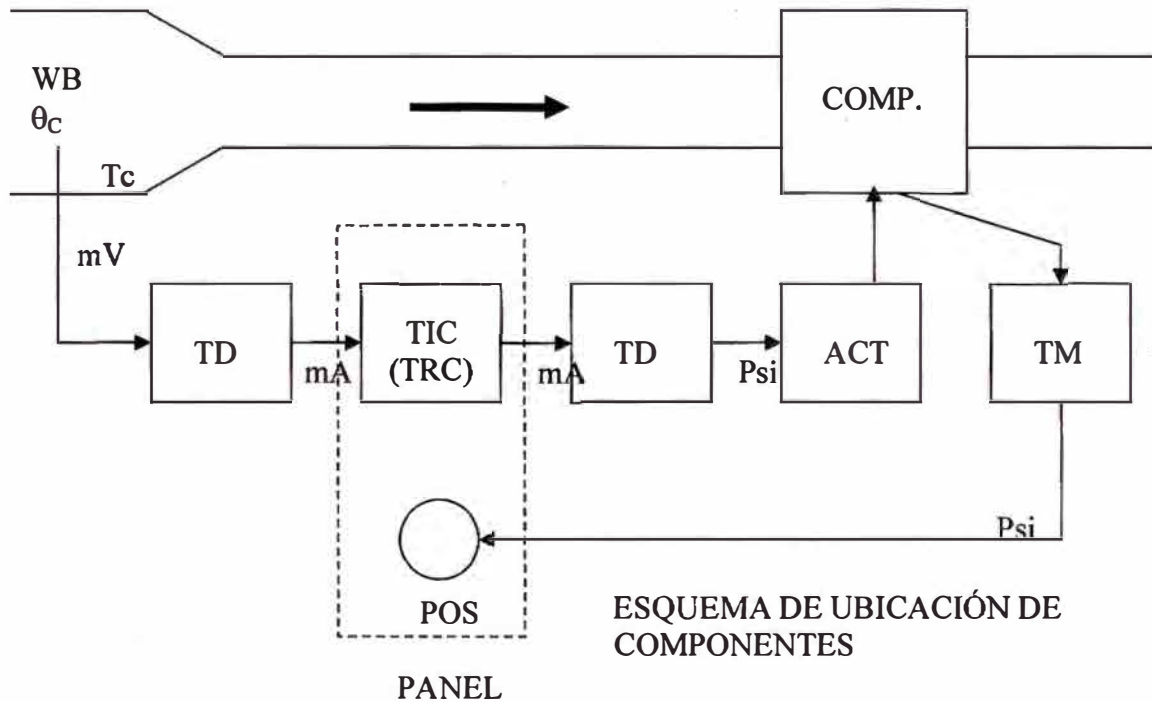
Control de temperatura en las cajas (WB) de post- quemado

Este es un lazo de control de la temperatura que se repite para varias cajas de la zona de post – quemado, el cual se emplea también para controlar la compuerta del ventilador 059-693 (POS 9). Para todos los casos el elemento final de control es una compuerta.

La acción de control en todos estos casos es proporcional e integral (PI)

Este tipo de lazo de control lo encontramos en:

TIC 002	WB 25	POS 14
TIC 003	WB 27	POS 16
TIC 006	WB 28	POS 17
TIC 009	WB 26	POS 15



ESQUEMA DE UBICACIÓN DE COMPONENTES

Si θ_c supera la temperatura de referencia (REF), el controlador ordena cerrar la compuerta.

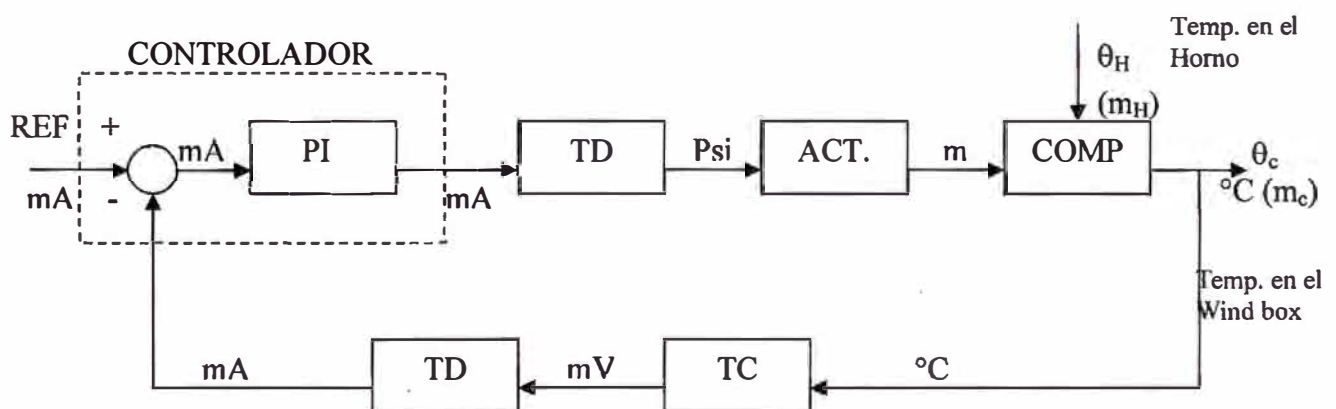


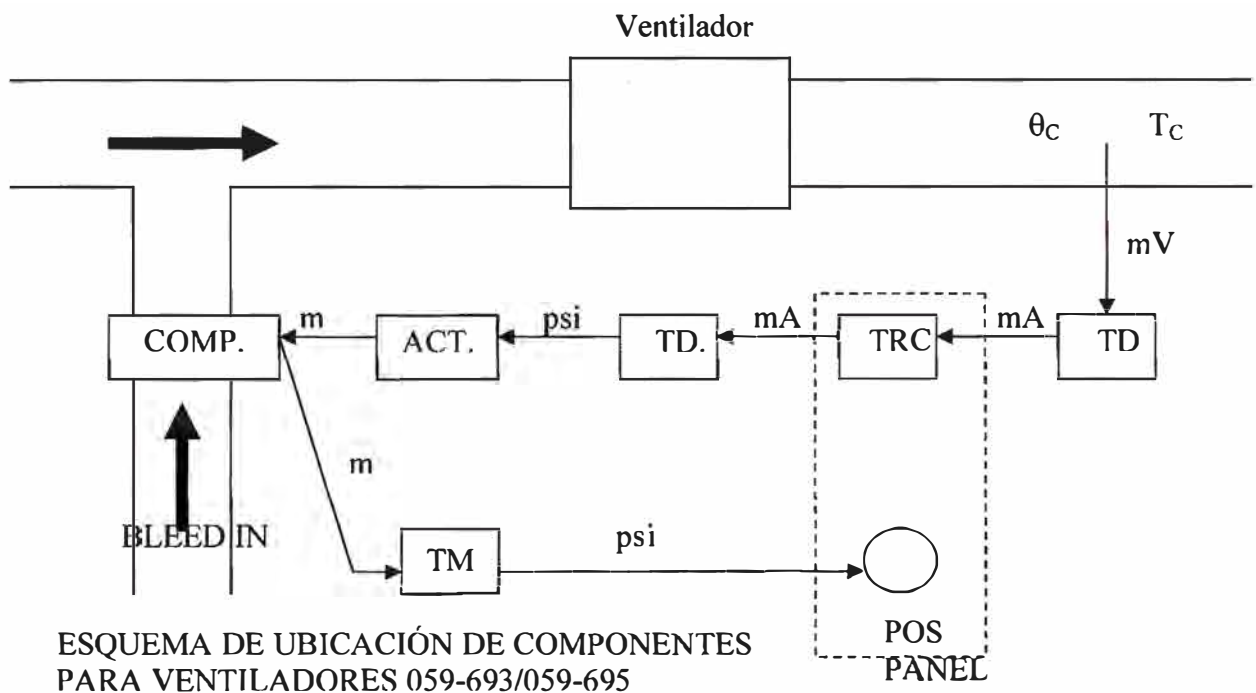
DIAGRAMA DE BLOQUES O FUNCIONAL

Control de temperatura para proteger los ventiladores 059-695,693 y 691

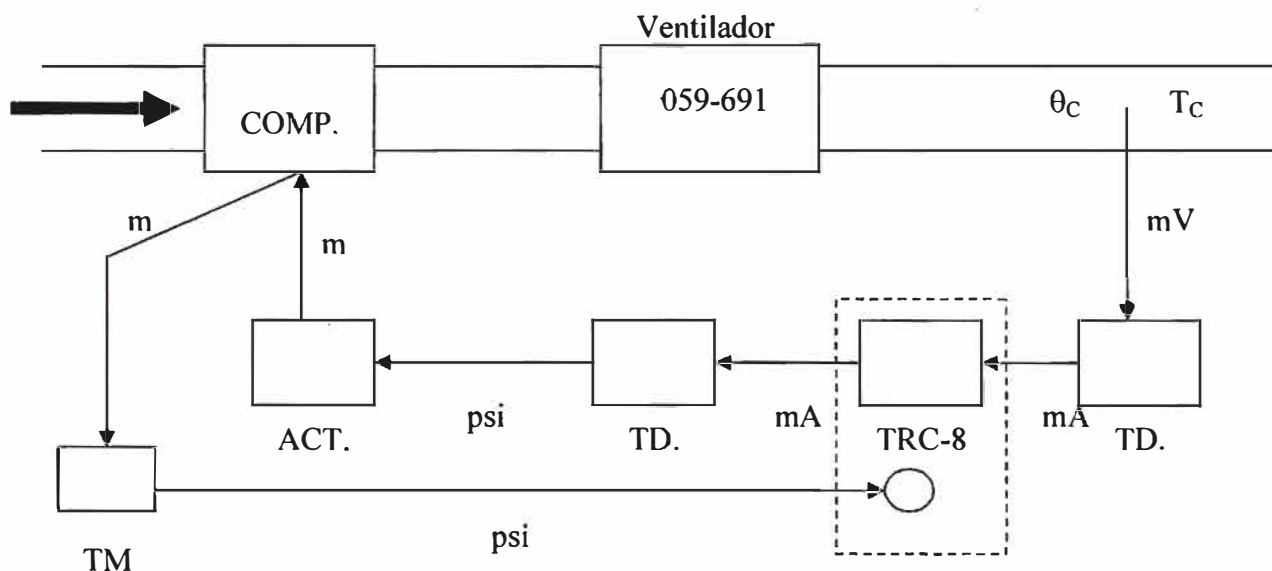
El principio de funcionamiento de este lazo de control es semejante a los descritos en el punto anterior. Para este caso la acción de control es también proporcional e integral (P1).

Este tipo de lazo lo encontramos en:

TRC 008	059-691 POS 8
TRC 007	059-693 POS 7
TRC 006	059-695 POS 11



Para los ventiladores 059-693 y 694 tenemos que si θ_c supera la temperatura de referencia (REF), el controlador ordena abrir la compuerta.



ESQUEMA DE UBICACIÓN DE COMPONENTES
PARA VENTILADOR 059-691

POS 8
PANEL

En el caso del ventilador 059-691 se cumple que si θ_c supera la temperatura de referencia (REF), el controlador ordena cerrar la compuerta.

El diagrama de bloques para ambos esquemas es el mismo y se muestra a continuación:

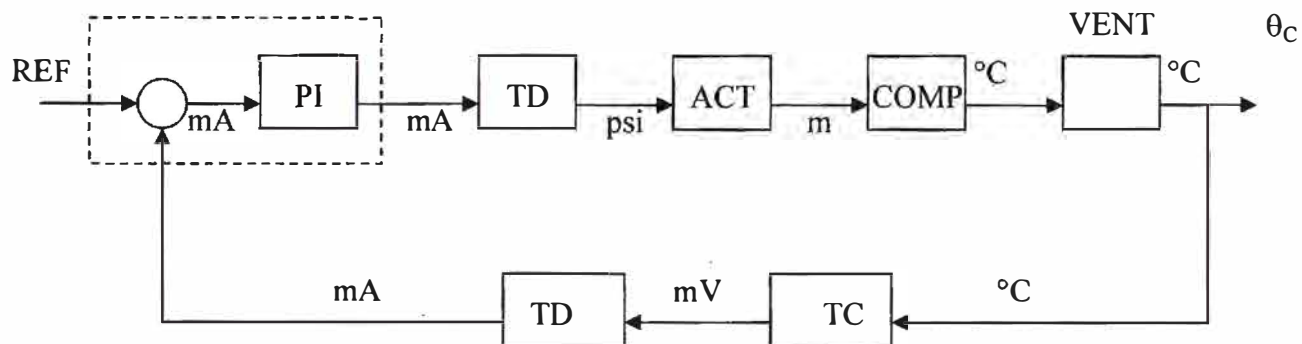


DIAGRAMA DE BLOQUES O FUNCIONAL

Control de temperatura de las cámaras del horno

Este es el más importante de los lazos de control del proceso puesto que regula el calor proporcionado por la fuente de energía (quemadores de petróleo) para producir el pelet.

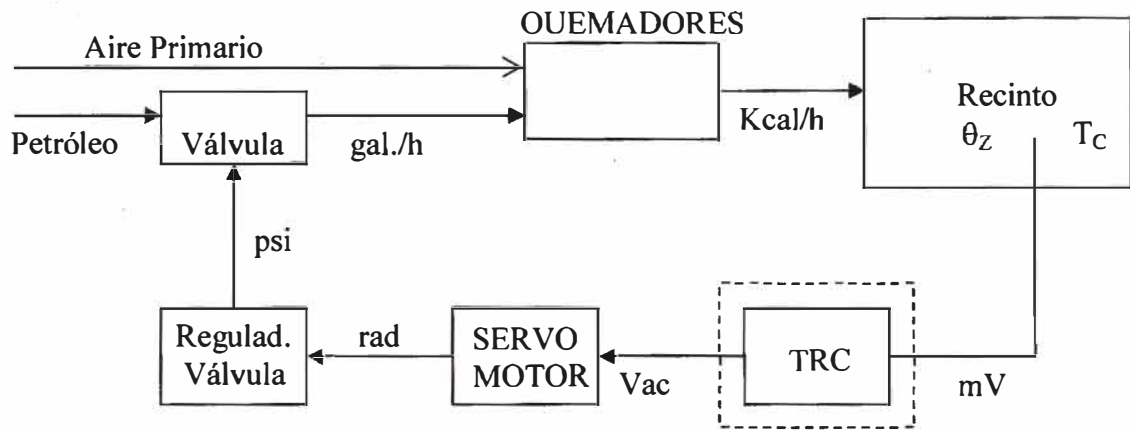
Se trata en total de 5 lazos idénticos de control de temperatura, distribuidos a lo largo del horno. En realidad estos lazos regulan el flujo de petróleo que va hacia los quemadores, por lo tanto son los encargados de mantener el perfil de temperaturas que garanticen una óptima reacción del pelet.

Actualmente durante el funcionamiento del horno solo operan 4 lazos controlando un total de 20 quemadores de petróleo, 10 al lado sur (S) del horno y 10 al lado norte (N) con idéntica numeración conforme se muestra en el cuadro a continuación.

CONTROLADOR ZONA	QUEMADORES S/N	
TRC – 002	12-14	Pre-Quemado
TRC – 003	16/16-17/17	Pre-Quemado
TRC – 004	18/18-19/19-20/20	Pre-Quemado
TRC – 005	21/21-22/22-23/23-24/24	Quemado

La opción de control en este tipo de lazo es Proporcional, Integral y Derivativo (PID)

El objetivo en este caso es controlar la temperatura en una zona determinada del horno, regulando el flujo de petróleo hacia los quemadores; observemos que el TRC 002 controla 2 quemadores, que el TRC 003 controla 4 quemadores, el TRC 004 controla 6 quemadores y TRC 005 controlan 8 quemadores.



ESQUEMA DE UBICACIÓN DE COMPONENTES

Si θ_c supera la temperatura de referencia (REF), el controlador ordena cerrar la Válvula para disminuir el flujo del petróleo.

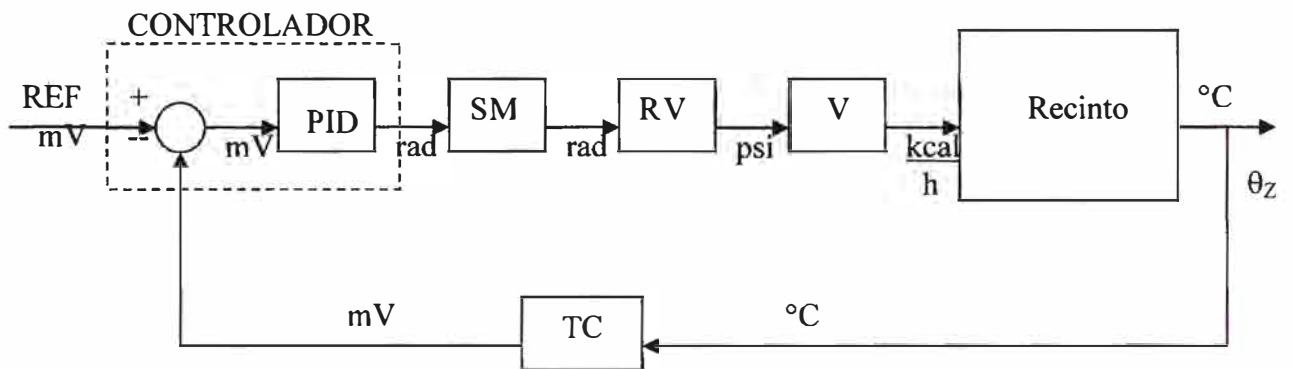
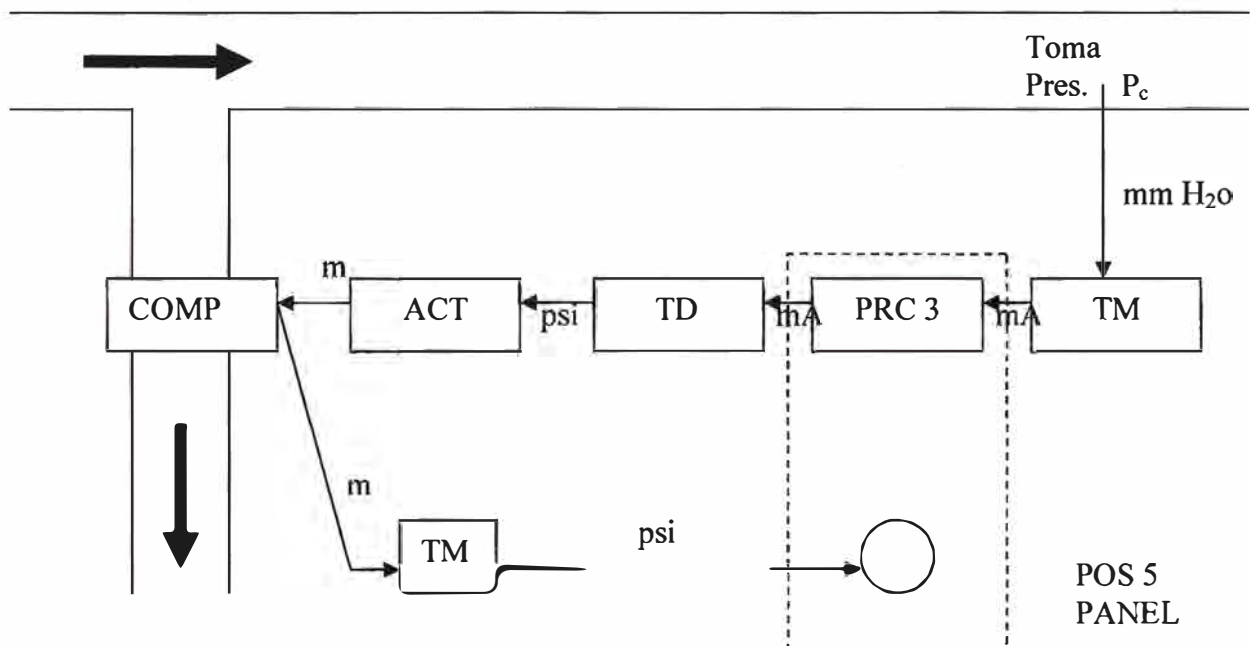


DIAGRAMA DE BLOQUES O FUNCIONAL

Control de presión de secado ascendente

Este lazo controla la presión en la canalización situada después del ventilador 059-692.

En este caso se trata de un control de acción PI.



ESQUEMA DE UBICACIÓN DE COMPONENTES

Si P_c supera la presión de referencia (REF), el controlador ordena abrir la compuerta.

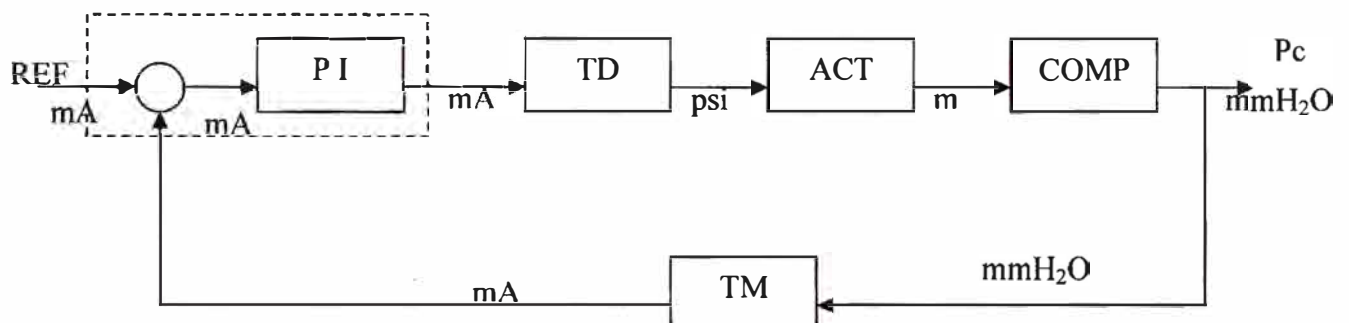
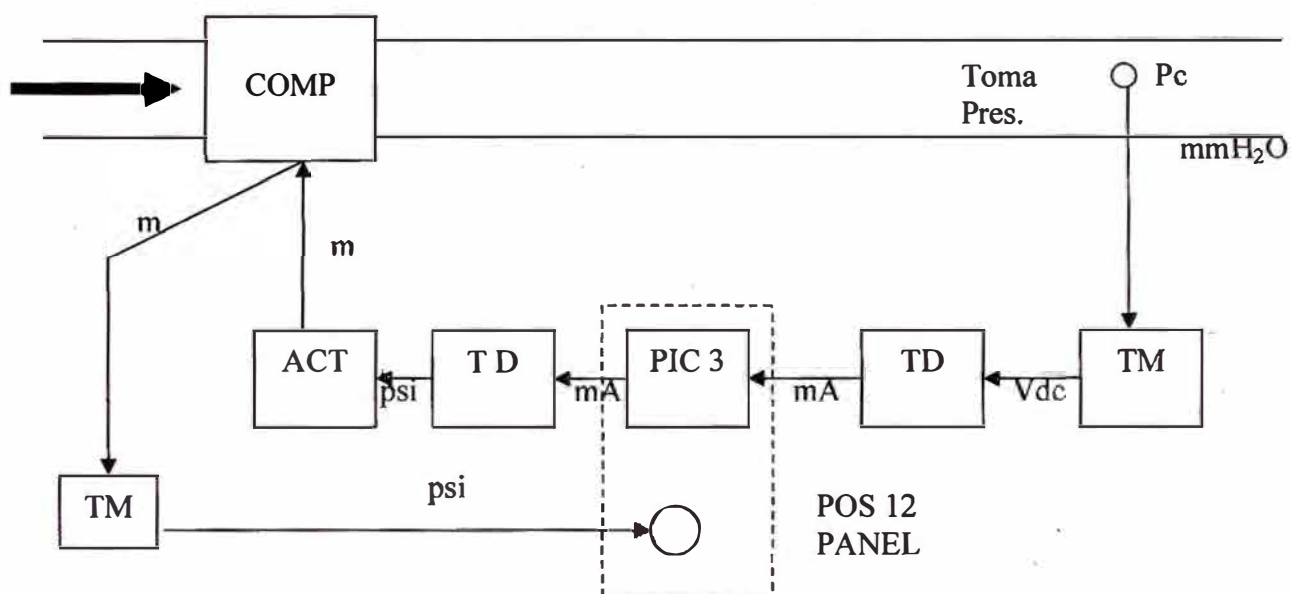


DIAGRAMA DE BLOQUES O FUNCIONAL

Control de presión de secado descendente

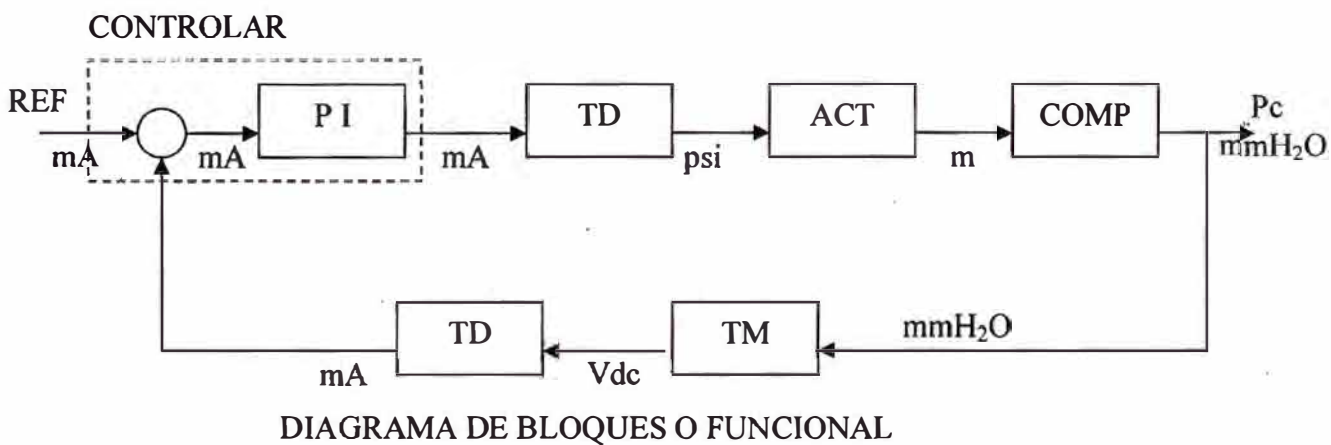
El lazo controla la presión en la zona de secado descendente dentro de la cámara del horno.

Se trata del control de acción PI



ESQUEMA DE UBICACIÓN DE COMPONENTES

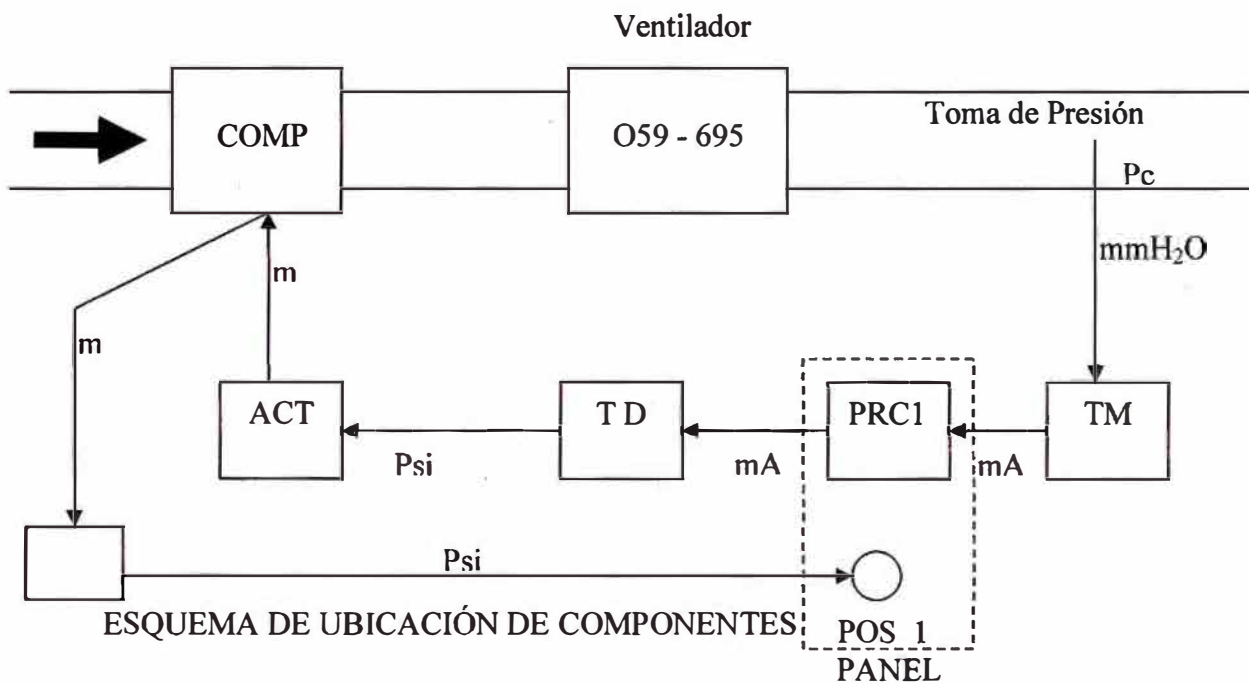
Si P_c supera la presión de referencia (REF), el controlador ordena cerrar la compuerta.



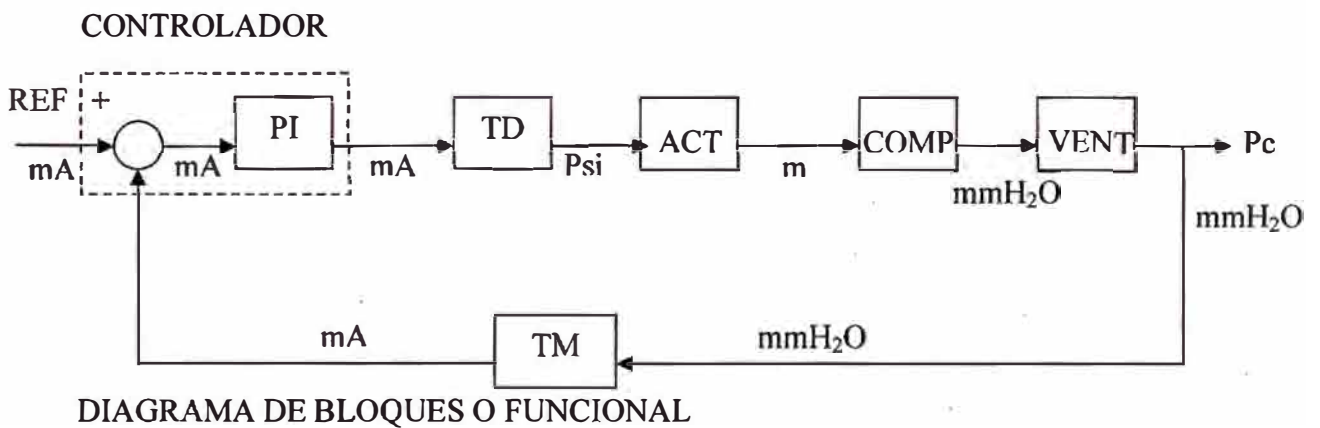
Control de presión a la salida del ventilador 059 – 695

Este lazo controla la presión a la salida del ventilador 059-695 y por ende la presión en el ducto para el secado descendente.

Se trata de un control de acción PI



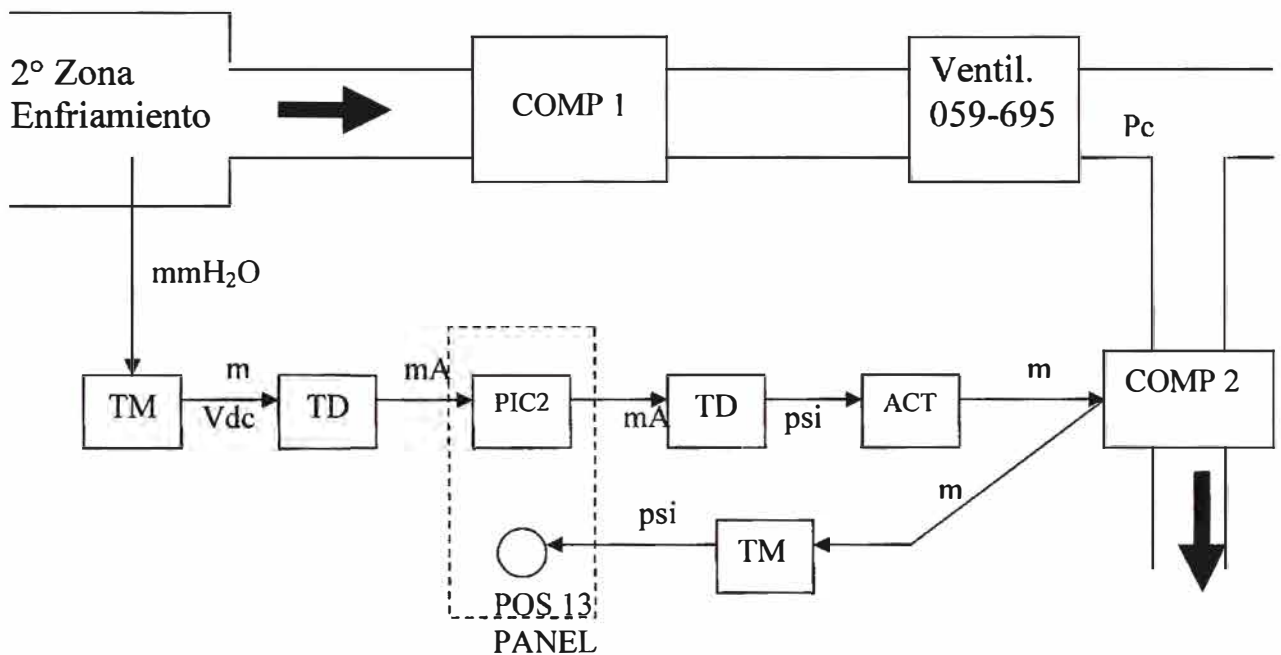
Si P_c supera la presión de referencia (REF), el controlador ordena cerrar la compuerta.



Control de presión en la segunda zona de enfriamiento

Este lazo controla la presión de la cámara de la segunda zona de enfriamiento correspondiente a los wind boxes N° 42, 43 y 44.

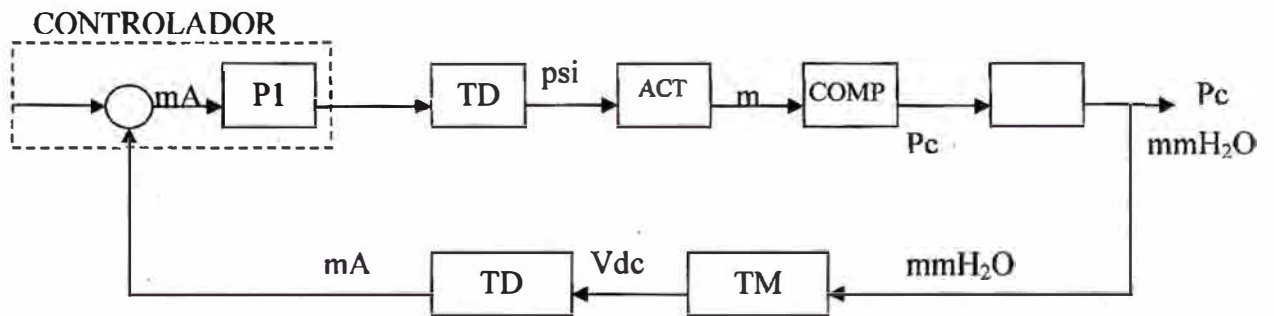
Se trata de un control de acción PI.



ESQUEMA DE UBICACIÓN DE COMPONENTES

Si P_c supera la presión de referencia (REF), consignada en PIC 2, el controlador ordena abrir la COMP.2 originando un descenso en la presión P_c , lo que a su vez provoca la apertura de la COMP.1 obligando así a descender la presión P_c .

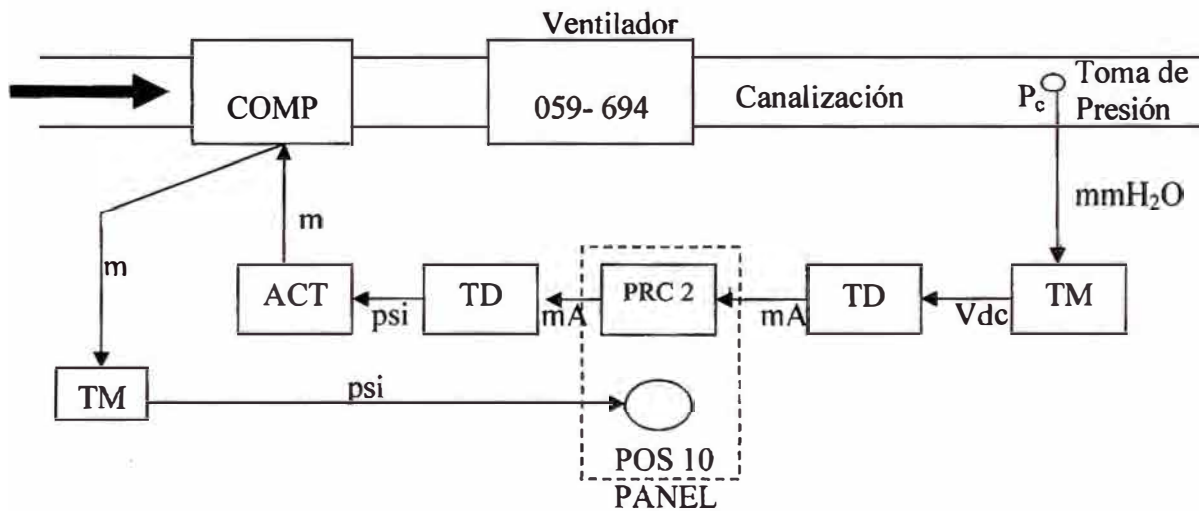
Este lazo de control es prioritario frente al lazo de PRC 1, que también actúa sobre el ventilador 059-695.



Control de presión en la zona de quemado

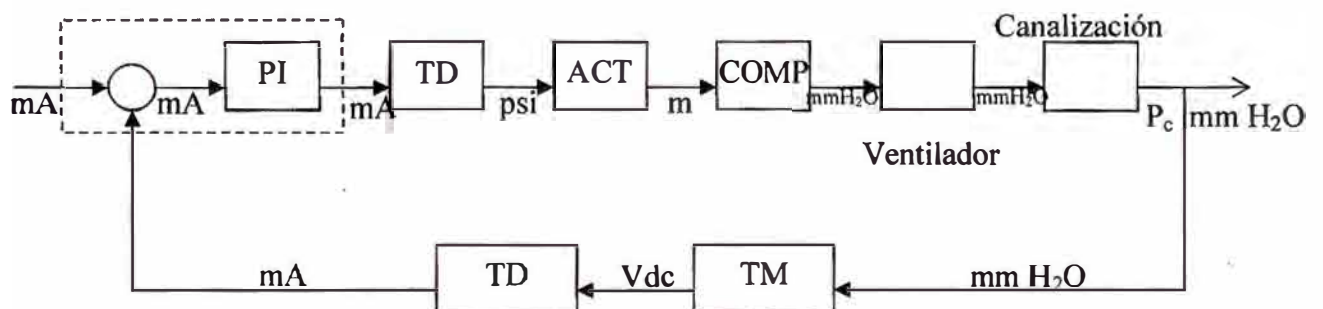
Este lazo controla la zona de presión de quemado dentro de la cámara horno.

Se trata de un control de acción PI.



Si P_c supera la presión de referencia (REF), el controlador ordena cerrar la compuerta.

Controlador



Evaluación de la performance del sistema de control

Existen tres parámetros fundamentales para analizar (cuantificar) el comportamiento (performance) de un sistema de control; estos son: estabilidad, rapidez y precisión del sistema.

Haremos a continuación un estudio de cada uno de estos parámetros en el sistema de control (horno 2) para evaluar su performance.

Estabilidad

Uno de los factores que introducen inestabilidad en los sistemas de control es el llamado “tiempo muerto”, tiempo de recorrido o también tiempo de transporte; el método para peletizar empleado en el horno 2 precisamente introduce estos tiempos de recorrido debido a la presencia de canalizadores de apreciable longitud.

La experiencia (y la teoría) demuestran que un método adecuado para compensar o corregir estos tiempos de recorrido, es el empleo de reguladores proporcional- integral (PI)

Justamente en los lazos de control estudiados constatamos la presencia de la acción PI que corrige la acción desestabilizadora de los tiempos de recorrido presentes en el proceso.

Para obtener una mejor respuesta a las variaciones producidas en el proceso se usa un controlador PID, este lazo de control elimina toda posibilidad de inestabilidad y amortigua el tiempo de respuesta (mayor rapidez que un controlador PI).

Rapidez

El proceso de peletización como todo proceso térmico es lento; en nuestro caso se ha podido comprobar que después de una variación y perturbación, el proceso toma entre 20 y 30 minutos para retornar al estado estable o estacionario.

Dado que la duración de una parada (cambio de carro) durante la producción continua es corta, el tiempo de recuperación del estado estacionario también es corto (puede llegar a 10 minutos)

Para concluir mencionaremos que la acción derivativa del controlador PID ayuda a aclarar el proceso de recuperación del estado estacionario o estable.

Precisión

El hecho comprobado que todos los lazos de control contengan la acción integral (RESET) hace que cualquier error respecto del SET_POINT (REFERENCIA) tienda a desaparecer, consiguiéndose así los valores deseados del proceso.

ANEXO 16**GLOSARIO DE SIMBOLOS**

ACFM	Pie cúbico por minuto a condiciones normales.
BSA	superficie especifica del mineral (Cm^2/gr).
C_G	Molienda gruesa (%5 < 0.800% en -10 Mesh)
F_G	Molienda fina (fine grand) (%5 > 0.800% en - 10 Mesh)
gal/TL	Galones (combustible) por tonelada larga (mineral).
HIC	Compuerta de posicionamiento manual.
Mesh	Abertura lineal expresado en pulgadas.
Ox	Mineral oxidado (predominio Fe_2O_3).
PO	Mineral primario (predominio Fe_3O_4).
POS	Compuerta de posicionamiento de control automático.
ppm	Partes por millón (concentración).
R	Mineral refractario (contenido FeS_2 – pirrotita).
SCFM	Pie cubico por minuto a condiciones Standard (p= 1 atom T= 25°C)
TD	Tasa de descuento.
TIR	Tasa interna de retorno.
TL	Tonelada larga (1 TL=1.016 tonelada métrica).
TLH	Tonelada larga por hora.
TO	Mineral transicional (Fe_3O_4 a Fe_2O_3 a mayor cantidad).
VPN	Valor presente neto.
WB	Wind box (caja de viento).

ANEXO 17 GLOSARIO DE TERMINOS

Atomizadores

Abastece el aire primario que es necesario para la acción de quemado por medio de los quemadores.

Barrotes

Pieza metálica de características particulares que en conjunto permiten la formación de parrilla dentro del carro. Tiene importancia en la permeabilidad de la cama y en el proceso de endurecimiento. Esta sometido a las altas temperaturas y a los cambios bruscos que se suceden en el proceso.

La forma de los barrotes permite una mayor aireación permitiendo una buena permeabilidad para el flujo de gases.

Cajas de aire (Wind box)

Son cajas por donde fluyen los gases a las diferentes zonas del horno. Se encuentran ubicadas en la parte inferior de los carros de la parrilla; están revestidas por un aislamiento interior que resiste a las altas temperaturas y a un posible ataque de ácidos.

Ducto de gases

Son tuberías por donde fluyen los gases movidos por los soplantes (ventiladores). El diámetro de esos ductos es muy variable y en su cara interior están vestidos por refractarios.

Horno

Como ya se ha visto el endurecimiento de los pelets verdes se realizan en hornos de parrillas móviles o deslizantes que se mueve dentro de un túnel de material refractario.

Quemador

Es el creador y el que mantiene la llama (después de la ignición inicial).

Funciones:

- Aportar el combustible
- Mezclar o propiciar la mezcla aire - combustible.

- Encender y quemar la mezcla.
- Desplazar los productos de la combustión.

Palets

Estructura metálica que corresponde a los carros deslizantes que ingresan dentro del horno y donde se alojan los barrotes, formando una parrilla móvil.

Pelets

Son bolas producidas por la concentración de minerales de hierro naturales, de composición mineralógica y química diferente. Tiene las siguientes propiedades:

- Distribución de tamaño uniforme en un rango de 9 – 15 mm de diámetro.
- Alto contenido de hierro, mayor a 65 %.
- Composición mineralógica uniforme.
- Baja tendencia a la abrasión y buen comportamiento durante el transporte.

Refractarios

Son materiales ladrillos que resisten las altas temperaturas en el horno y en los ductos.

Toberas o Troneras

Son compartimientos del horno ubicados al costado de él. En estas toberas se encuentran instalados los quemadores que gradúan automáticamente la cantidad de aire y petróleo a inyectarse.

Ventiladores

Se emplean en el sistema de circulación de gases en el horno. El horno utiliza 6 ventiladores (059 – 690/691/692/693/694/695). El ventilador que sopla mayor flujo de aire es el ventilador de enfriamiento (059 – 694).