

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA



PROYECTO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
QUÍMICO

**MODELO DE OPERACIÓN PARA MANEJO DE
GASES DE LA FUNDICIÓN CALETONES**

Claudia Rodríguez Alegría

Profesor Guía:
Horacio Aros M.

2009

RESUMEN

Manejo de Gases de la Fundición Caletones está encargado de los gases de salida de los Convertidores Teniente y los Convertidores Peirce Smith, por regularización ambiental estos gases no se pueden emanar a la atmósfera por lo que es obligación captarlos, en la necesidad de producir un compuesto a partir del SO_2 (dióxido de azufre), la fundición cuenta con 2 Plantas de Ácido Sulfúrico. El objetivo de esta memoria es mejorar el funcionamiento de Sistema de Manejo de Gases (MAGA) y al mismo tiempo llevar a las plantas de ácido a su condición de diseño. Si bien el núcleo de la Fundición son los equipos de fusión y conversión, el aumento continuo en la rigurosidad de las normativas ambientales ha llevado a que las áreas de MAGA, PLG y PTE, cobren importancia en el contexto de la Fundición. Esto se debe principalmente a que los problemas en estas áreas obligan a detenciones de la fusión para evitar sobrepasar los límites de emisiones. De este modo, cualquier detención no programada de estas áreas, afecta el cumplimiento del programa de producción. Por lo tanto, el aumento en la disponibilidad de estos sistemas se torna una tarea de alta importancia para la Fundición. Este trabajo es una herramienta matemática basada en balances de masa, energía y energía mecánica que permite analizar y simular en Excel el área de Manejo de Gases, además de probar condiciones de operación de forma tal de escoger los mejores parámetros operacionales para un escenario de fusión/conversión dado. De esta forma se cuenta con una visión global del proceso, desarrollando un trabajo teórico/práctico que se realizó para los equipos puntuales del proceso, análisis de antecedentes (manuales de operación y antecedentes recopilados en terreno), modelamiento de equipos. Todo ello con el fin de entregar un producto de calidad, que se ajuste a las condiciones de operación de la Fundición.

Metodología

Para cumplir los objetivos planteados, se dividió el trabajo en las siguientes etapas:

- La primera, consistió en el desarrollo del balance de masa y energía de los Convertidores Teniente y Peirce Smith, para así poder determinar la cantidad de gases y específicamente la cantidad de SO_2 , que ingresará al área de Manejo de Gases.
- En la segunda etapa, conociendo la cantidad de SO_2 que producen los CT y CPS respectivamente, la cual ingresa al Sistema de Manejo de Gases se realiza el balance de masa, energía y mecánico para cada equipo del circuito, hasta la entrada de las Plantas de Ácido.
- En la tercera etapa, ya con los balances de los circuitos de gases calculados más los balances de los Convertidores, se procede a crear en planilla Excel una herramienta computacional para simular el proceso de la Fundición de Caletones, una vez realizado dichos balances se procede a unir las planillas de cálculo para lograr tener un archivo donde cada etapa se relacione.
- La cuarta etapa, consistió en validar la herramienta computacional para lo cual se realizaron muestreos en terreno, complementándolos con datos del sistema PI Datalink. Estos datos se ingresaron al programa y los resultados obtenidos se compararon con datos reales medidos. Para ciertas variables existían diferencias, sobre todo las que se encuentran a la salida de los VTI y las uniones de los ductos de CT con CPS, por esta razón se modificaron algunos valores para acercarnos a los datos reales.
- En la quinta etapa, con la validación hecha se comenzó a realizar una serie de simulaciones para distintos casos, donde se encontró la mejor forma de operación. La más importante es el caso en que funcionan 2 CT's y 2 CPS's donde se encontró la apertura de válvulas ideal para que no existan sobrepresiones en el sistema. Con esto se presenta los beneficios que trae al área esta herramienta computacional donde cualquier cambio en la operación que se quiera hacer, se puede probar antes de realizarla.

INDICE DE CONTENIDOS

CAPITULO 1 INTRODUCCION	11
1.1 OBJETIVOS.....	13
1.2 ANTECEDENTES GENERALES.....	14
1.3 GENERALIDADES NORMATIVAS	19
1.4 REGULACIONES EXISTENTES.....	20
1.5 SISTEMA MANEJO DE GASES.....	22
1.5.1 <i>Proceso de Fusión</i>	23
1.5.2 <i>Conversión</i>	27
1.6 MANEJO DE GASES	31
1.7 TRATAMIENTO DE LOS GASES EN PLANTAS DE LIMPIEZA DE GASES.....	34
1.7.1 <i>Planta de Limpieza de Gases N°1</i>	35
1.7.2 <i>Planta de Limpieza de Gases N°2</i>	38
1.8 PLANTAS DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES.....	44
CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN MANEJO DE GASES	51
2.1 MANEJO DE GASES CONVERTIDORES TENIENTE	52
2.1.1 <i>Campana Convertidor Teniente</i>	52
2.1.2 <i>Cámara Enfriamiento Evaporativo</i>	54
2.1.3 <i>Precipitador Electrostático JOY.</i>	57
2.2 MANEJO DE GASES CONVERTIDORES PIERCE SMITH.....	63
2.2.1 <i>Campana CPS</i>	63
2.2.2 <i>Sistema de Enfriamiento Radiativo</i>	66
2.2.3 <i>Sistema de Precipitación Electrostática</i>	71
2.2.4 <i>Sistema de Impulsión Gases</i>	76
2.3 SISTEMA DE MANEJO DE POLVOS	82
2.3.1.- <i>Sistema de Agua de Refrigeración</i>	88
2.4 SISTEMA DE REGULACIÓN DE FLUJOS DE GASES	89
2.4.1 <i>Válvulas Guillotina</i>	89
2.4.2 <i>Válvulas Mariposa</i>	92

2.4.3 Juntas de Expansión.....	94
CAPÍTULO 3 ALTERNATIVAS OPERACIONALES	100
3.1 ALTERNATIVAS OPERACIONALES.....	101
3.1.1 Operación 2 CT y 1 CPS.....	103
3.1.2. 2 CT y 2 CPS.....	104
3.1.3. Operación con 1 CT y 1 CPS.....	106
3.1.4.- Operación con 1 CT y 2 CPS.....	106
3.1.5. Sin CPS	108
3.1.6. Parada Planta	109
CAPÍTULO 4 MODELACIÓN MANEJO DE GASES.....	111
4.1 BALANCE DE MASA.....	112
4.2 BALANCE DE CALOR	113
4.3 BALANCE ENERGÍA MECÁNICA.....	118
4.4 BALANCE DE MASA, ENERGÍA Y ENERGÍA MECÁNICA DE MANEJO DE GASES CT	125
CAPÍTULO 5 VALIDACIÓN DEL MODELO OPER. MANEJO DE GASES	138
5.1 CASOS A ANALIZAR PARA VALIDACIÓN DE MODELO.....	138
5.1.1 Primer Caso.....	138
5.1.2 Segundo Caso.	141
5.2 OPTIMIZACIÓN DE PROCESO.....	149
CAPÍTULO 6 SIMULADOR PROCESO MANEJO DE GASES.....	153
6.1 PANTALLAS DE INTERACCIÓN	153
6.2 PARÁMETROS DE OPERACIÓN PANTALLAS	153
CAPÍTULO 7 ANÁLISIS DE SIMULACIONES MANEJO DE GASES	161
CONCLUSIONES	166
BIBLIOGRAFIA	169

ABREVIATURAS.....	170
ANEXO I PROPIEDADES FÍSICAS	171
A.1.1. VISCOSIDAD	172
A.1.2 DENSIDAD	174
ANEXO II PROPIEDADES FÍSICAS EQUIPOS	175
A.2.1 CARACTERÍSTICAS Y ACCESORIOS MAGA CT.....	176
A.2.2 CARACTERÍSTICAS Y ACCESORIOS CPS'S.....	181
ANEXO III BALANCE MASA CONV. PEIRCE SMITH Y CONV. TENIENTE	186
A.3.1 CÁLCULO BALANCE MASA Y ENERGÍA CONVERTIDOR PIERCE SMITH.....	187
A.3.2 CÁLCULO BALANCE DEL AZUFRE EN EL CONVERTIDOR TENIENTE.....	193
ANEXO IV CÁLCULOS PÉRDIDAS DE CALOR.....	204
A.4.1 CAPACIDAD CALORÍFICA DEL GAS	205
A.4.2 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	205
ANEXO V CÁLCULO TEÓRICO CHIMENEA	208
ANEXO VI CAMPAÑA MUESTREO	213
A.6.1 CAMPAÑA DE MUESTREO CPS 2.....	214
A.6.1.1 Descripción Actividad.	214
A.6.2 MATERIALES.....	215
A.6.3 DISPOSICIÓN DE LUGARES DE MUESTREO.....	216
A.6.4. PROCEDIMIENTO.....	218
A.6.5 CAMPAÑA MUESTRO TENIENTE N°2	219
A.6.6 ESPACIO FÍSICO DE MUESTREO	220
A.6.7 MÉTODO REICH	221
A.6.8 RESULTADOS CAMPAÑAS DE MUESTREO	227
ANEXO VII MUESTREO ISOCINÉTICO	236
ANEXO VIII PROGRAMA MUESTREO BOCA CONV. PIERCE SMITH N°2	240
ANEXO IX ANÁLISIS MEJORA.....	252

FIGURAS

Fig 1.1 Foto Caletones.....	14
Fig 1.2 Esquema del Proceso de Fundición Caletones.....	18
Fig 1.3 Diagrama Convertidor Teniente	26
Fig 1.4 Curva de cantidad de azufre en cobre blíster versus cantidad de oxígeno	29
Fig 1.5 Diagrama de Tendencia Flujo de Soplado CPS.....	30
Fig. 1.6. Esquema General del Manejo de Gases (MAGA).....	33
Fig. 1.7. Esquema proceso Planta de limpieza de gases.....	35
Fig. 1.8: Reactor Zona de contacto	41
Fig. 1.9: Diagrama General de Planta de Limpieza de Gases N°1	42
Fig. 1.10: Diagrama General de Planta de Limpieza de Gases N°1	43
Fig. 1.11: Variaciones en el pH y sus efectos sobre el nivel de solubilidad de As en soluciones de $\text{Ca}(\text{OH})_2$	46
Fig. 1.12: Diagrama esquemático de planta de tratamiento de efluentes.	48
Fig. 1.13. Diagrama General de Planta de Tratamiento de Efluentes N°1	49
Fig.1.14. Diagrama Planta de Tratamiento de Efluentes N°2.....	50
Fig. 2.1 Diagrama MAGA CT's.....	52
Fig. 2.2. Lanzas rociadoras que componen el sistema Sonic	55
Fig. 2.3: Esquema operación de cámara de enfriamiento evaporativo.	55
Fig. 2.4 Vista lateral cámara enfriamiento.....	56
Fig 2.5 Principio Funcionamiento Precipitador.....	58
Fig 2.6 Diagrama Interior Precipitador	58
Fig. 2.7. Diagrama Manejo de Gases Teniente 1	61
Fig 2.8 Diagrama Manejo de Gases Teniente 2.....	62
Fig. 2.9 Campana Convertidores Pierce Smith	65
Fig 2.10 Cámara Enfriamiento Radiativo	67
Fig.2.11 Cámara Enfriamiento Radiativo	70
Fig. 2.12 Precipitador Electrostático CPS MILJO.....	74
Fig. 2.13 Precipitador Electrostático MILJO	75

Fig 2.14 Ventiladores Tiro Inducido.....	78
Fig 2.16 Ducto Alta Velocidad MAGA salida Cámara Enfriamiento Radiativo	81
Fig 2.17 Válvula Guillotina	90
Fig 2.18 Vista Frontal Válvula Mariposa.....	93
Fig. 2.19 Vista Lateral Válvula Mariposa.....	94
Fig 2.20 Junta de Expansión.....	97
Fig 2.21 Marco Junta de Expansión.....	97
Fig 2.22 Vista Junta de Expansión Ducto a PLG's.....	98
Fig 2.23 Vista Completa Manejo de Gases.....	99
Fig 3.1 Diagrama PI posición dampers	103
Fig 4.1 Correlación Operación Válvula Mariposa	124
Fig 4.2 Balance Campana Convertidor Teniente	126
Fig. 4.3 Balance Masa Cámara Enfriamiento Evaporativo.....	128
Fig. 4.4 Balance Masa Precipitador Electrostático	129
Fig 4.5 Balance Campana Convertidor Peirce Smith	131
Fig 4.6 Balance Masa Cámara Enfriamiento Radiativo.....	132
Fig. 4.7 Balance Masa Precipitador Electrostático MILJO	134
Fig. 4.8 Diagrama Ventilador Tiro Inducido.....	135
Fig.4.9 Diagrama Ductos hacia Plantas.....	137
Fig 5.1 Esquema PI, Vista General Manejo de Gases	139
Fig 5.2 Esquema PI, Vista General Manejo de Gases	142
Fig 5.3 Pantalla Excel Convertidor Teniente 1	146
Fig 5.4 Pantalla Excel Convertidor Teniente 2	147
Fig 5.5 Pantalla Excel Gases hacia Plantas.....	148
Fig 5.6 Esquema aplicación Bernoulli	150
Fig 6.1 Pantalla Convertidor Teniente 1	155
Fig 6.2 Pantalla Convertidor Teniente 2.....	155
Fig. 6.3 Diagrama Pantalla Convertidor Peirce Smith.....	157
Fig. 6.4 Pantalla Cámara Radiativa y Precipitadores MILJO	158
Fig. 6.5 Pantalla VTI y Plantas PLG1 y PLG2.....	159
Fig. 7.1 Diagrama de Tendencia del Convertidor Teniente 1 durante 8 horas.....	162
Fig. 7.2 Gráfico Flujo de Gases y %SO2 variando Concentrado a CT.....	163

Fig. 7.3 Gráfico Inf v/s T y Inf. V7s %SO ₂	164
Fig.A.5.1 Niveles de chimenea para cálculo de tiro	209
Fig.A.6.1 Fotografía a) varilla de fierro, manguera y pera; b) Bolsa captura de gases; c)Bomba.....	216
Fig.A.6.2 Manómetro (pulgadas de agua).....	216
Fig.A.6.3 Toma Muestra Cámara Enfriamiento Radiativo	217
Fig. A.6.4 Toma Salida Cámara Enfriamiento Radiativo	218
Fig.A.6.5 Toma muestra a Precipitadores MILJO	218
Fig. A.6.6 Diagrama Punto de Muestreo	221
Fig A.6.7 Equipo Reich	227
Fig. A.8.3. Medición de las presiones	246

Tablas

Tabla 1.1 Cronograma de Reducción Emisiones de SO ₂ y Material Particulado	21
Tabla 1.2. Proyectos programa reducción emisiones.	22
Tabla 1.3 Características Convertidor Teniente	26
Tabla 1.4: Características Físicas Convertidor Peirce-Smith	31
Tabla 1.5: Perfil General del gas de entrada a la PLG-2.....	38
Tabla 2.1 Características Campana Convertidor Teniente	53
Tabla 2.2 Características Cámara Enfriamiento Evaporativo.....	55
Tabla 2.3. Características Precipitador Electrostático.....	59
Tabla 2.4. Condiciones Operacionales Campanas CPS.....	64
Tabla 2.5. Dimensiones Sistema de Enfriamiento.....	68
Tabla 2.6. Condiciones Operacionales Sistema de Enfriamiento.....	68
Tabla 2.7. Condiciones Operacionales PE por diseño	72
Tabla 2.8. Características Ductos Alta velocidad.	80
Tabla 2.9. Características de polvos de gases de CPS (Mediciones).....	82
Tabla 2.10. Elementos de Manejo de Sólidos	83
Tabla 2.11. Valores de los polvos en Enfriadores Radiante.....	85
Tabla 2.12. Valores de polvos en Precipitadores.....	86

Tabla 2.13. Elementos de Manejo de Sólidos PE (Rastra-Harnero-Silo).....	87
Tabla 2.14 Descripción Válvulas Guillotina	91
Tabla 2.15. Descripción Válvulas Mariposa.	92
Tabla 2.16 Descripción Juntas Expansión.	95
Tabla 3.1 Alternativas Operacionales	100
Tabla 3.2 Válvulas Mariposas	101
Tabla 3.3 Válvulas Guillotinas	102
Tabla 3.4 Alternativas Operacionales según Equipos en Operación	110
Tabla 4.1 Valores de K para Codos	122
Tabla 4.2 Valores de K para Accesorios	122
Tabla 4.3 Coeficiente de Accesorio para Válvula Mariposa	122
Tabla 4.4 Coeficiente de Accesorio.....	123
Tabla 4.5 Balance Masa Campana.....	126
Tabla 4.6 Balance Masa Cámara Enfriamiento Evaporativo	128
Tabla 4.7 Balance Masa Cámara Enfriamiento Evaporativo	129
Tabla 4.8 Balance Masa Cámara Enfriamiento Evaporativo	131
Tabla 4.9 Balance Masa Cámara Enfriamiento Evaporativo	132
Tabla 4.10 Balance Masa Cámara Enfriamiento Evaporativo	134
Tabla 4.11 Datos en Curva Característica VTI.....	135
Tabla 4.12 Balance Masa Cámara Enfriamiento Evaporativo	136
Tabla 4.13 Balance Masa Cámara Enfriamiento Evaporativo	137
Tabla 4.14 Balance Masa Cámara Enfriamiento Evaporativo	137
Tabla 5.1 Variables que se ingresan al modelo	139
Tabla 5.2 Resultados entregados por Modelo.....	140
Tabla 5.3 Variables que se ingresan al modelo	142
Tabla 5.4 Resultados entregados por Modelo.....	143
Tabla 5.5. Aperturas Válvulas Mariposa Optimizadas.....	151

CAPITULO 1 INTRODUCCION

La Fundición Caletones, actualmente procesa cerca de 3800 [ton/día] de concentrado en 2 Convertidores Teniente (CT), que funcionan de manera simultánea y continua. Los productos líquidos del CT son metal blanco, que es tratado en 3 Convertidores Peirce Smith (CPS) y escoria, que es procesada en 4 Hornos de Limpieza de Escoria (HLE) para extraer el cobre remanente. El producto principal de los CPS es cobre blister, que es alimentado a 2 Hornos de Refinación Anódica (HA) o a 2 Hornos de Refinación a Fuego (HRAF) (un tercero se utiliza como auxiliar).

El gas generado en los CT y CPS debido a la fusión y conversión de concentrados de cobre, que contiene SO_2 , neblina ácida, H_2O , arsénico, selenio, entre otros, es capturado y enviado al sistema de Manejo de Gases (MAGA), donde se le realiza un acondicionamiento a los gases, los cuales alimentan a 2 Plantas de Limpieza de Gases (PLG) para limpiarlos de polvo, neblina ácida y otras impurezas, dejando un gas conteniendo SO_2 , que es convertido en SO_3 y absorbido en ácido para formar H_2SO_4 .

El residuo líquido de la limpieza del gas (ácido débil, conteniendo arsénico y otras impurezas) es enviado a las Plantas de Tratamiento de Efluentes (PTE), en donde el ácido se neutraliza con cal, precipitando los iones metálicos y produciendo arseniato de calcio, el cual es envasado y enviado a la empresa Hidronor para su confinamiento.

Si bien el corazón de la Fundición son los equipos de fusión y conversión (CT y CPS), el aumento continuo en la rigurosidad de las normativas ambientales ha llevado a que las áreas de manejo de gases, plantas de ácido y tratamiento de efluentes cobren vital importancia, esto se debe a que los problemas en estas áreas obligan a reducir o detener la fusión para evitar sobrepasar los límites de emisiones establecidos, por lo tanto cualquier problema que ocurra en estas áreas afecta a toda la Fundición, retrasando las metas de producción.

Este trabajo tiene entre sus objetivos, estudiar las capacidades operacionales del área de Manejo de Gases, además se revisarán las alternativas que entrega el proceso para su operación, de esta forma determinar los puntos de mayor dificultad, las cuales llevan a que las Plantas de Ácido tengan una baja producción.

El trabajo está estructurado, inicialmente con un estudio y conocimiento general del proceso, se analizan las alternativas operacionales y las variables fundamentales del proceso que se incorporarán en el modelo, el cual representará en que condiciones llegan los gases a las Plantas de Ácido. Y por último una validación del modelo y una optimización de éste.

El aumento en la disponibilidad de estos sistemas de tratamiento y limpieza de gases se torna una tarea de alta importancia para la Fundición.

1.1 OBJETIVOS

- **Objetivo General**

Generar y optimizar un modelo que represente el proceso del Área Manejo de Gases de la Fundición Caletones.

- **Objetivos Específicos:**

1.- Analizar la fluodinámica de los gases para distintos esquemas de operación.

2.- Identificar de manera conceptual las características físicas y químicas, del proceso de Manejo de Gases.

3.- Analizar criterios operacionales actuales de manejo de gases.

4. Desarrollar un modelo de Balances de Masa, Energía y Energía Mecánica, para el Área de Manejo de Gases, para analizar el comportamiento operacional actual.

5. Desarrollar muestreos y análisis, que permitan identificar el actual comportamiento operacional.

6. Establecer nuevos criterios óptimos operacionales de captura.

7. Generar un modelo que simule el comportamiento actual optimizado del sistema de captura de gases.

1.2 Antecedentes Generales

La Corporación Nacional del Cobre (CODELCO) es una empresa minera estatal industrial y comercial orientada a la exploración y explotación de yacimientos mineros, principalmente de Cobre a través de sus 5 divisiones, cuya producción se comercializa internacionalmente. Adicionalmente uno de sus principales negocios, es la comercialización de cobre refinado y sus subproductos, como el ácido sulfúrico y el molibdeno.

La división El Teniente es una de las cinco Divisiones operativas de Codelco Chile, ubicada en la VI Región de Chile a ochenta kilómetros al sur de Santiago, donde se encuentra La Fundición Caletones, Figura 1.1, que está ubicada a 44 km de Rancagua y 1.560 msnm. Su actual ubicación data del año 1922 como reemplazo a la primera fundición construida en Sewell junto con el inicio de las operaciones del Mineral El Teniente, la que ha llegado a ser la mina subterránea de cobre más grande del mundo. Esta mina que comenzó a ser explotada en 1904 posee 2.400 kilómetros de galerías subterráneas. El Teniente produce 435.658 toneladas métricas finas anuales de cobre en la forma de lingotes refinados a fuego (RAF), y cátodos de cobre al año. Como resultado del procesamiento del mineral también se obtienen 3.919 toneladas métricas de molibdeno y 1.100.000 toneladas anuales de ácido sulfúrico.

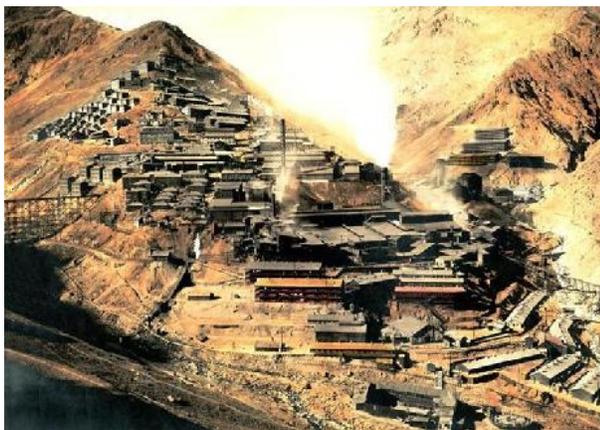


Fig 1.1 Foto Caletones

La producción del cobre consta con varias etapas, las que son divididas por gerencias encargadas de su control y manejo:

- ***Gerencia Minas encargada de la extracción de mineral***

La fase de extracción de mineral, dada la riqueza del mineral secundario presente en las capas superiores -roca blanda y de fácil fragmentación- la extracción se lleva a cabo por el método block caving (hundimiento de bloques), en que el mineral cae por gravedad desde el nivel de hundimiento al de producción. En los sectores profundos, de roca primaria -más dura y de menor ley- el método extractivo es altamente mecanizado y se usan jumbos, cargadores (LHD) y martillos picadores hidráulicos.

- ***Gerencia Plantas Concentración (Sewell y Colón) encargada de Flotación y Molienda Convencional.***

La fase de concentración se realiza en las plantas de Colón y Sewell, donde por medio de molinos SAG (semiautógenos) y líneas de molienda convencional se reduce el tamaño del mineral mediante etapas de chancado y molienda. Además, se separan las partículas de cobre y molibdeno a través de un proceso de flotación. La ley aproximada que se llega a este punto es de un 30-35% Cu.

- ***Gerencia Fundición***

Recepción y Preparación Carga (PRECA)

La línea de proceso de Caletones comienza con la recepción de la materia prima, el concentrado de cobre, que tiene un 10% de Humedad, un 30% de cobre, 32% de Azufre, un 27% de hierro, un 6% de Sílice, un 0.2% de arsénico y un 4% de otros elementos, los cuales se eliminan para la obtención de un producto de calidad.

En primer lugar, la materia prima debe ser sometida a un proceso de secado para bajar la humedad y dejarla en un 0.2%, para esto se cuenta con 3 plantas de secado de fluosólido para lo cual hay una en standby y dos en funcionamiento con una capacidad de secado de 200 Ton/hora. Este proceso previo es fundamental para obtener una buena calidad de cobre.

Una vez seco, el concentrado está listo para el proceso de fundición donde será transformado en metal rojo.

Fusión-Conversion (FUCO)

La fundición se compone por hornos de gran volumen, en su paso por estos el concentrado es sometido a una serie de reacciones que provocarán la fusión y la alteración de su composición química hasta convertirse en cobre fino.

La etapa de fundición se realiza en Caletones donde se efectúa el tratamiento del concentrado (con un 32 % de pureza) en operaciones pirometalúrgicas que permiten obtener el cobre metálico. La fusión se ejecuta en Convertidores Teniente, convertidores convencionales (Pierce Smith) y hornos de fusión de escorias. De estos procesos se obtienen principalmente ánodos de cobre y cobre refinado a fuego. Los gases resultantes del proceso de fusión-conversión son tratados en las plantas de limpiezas de gases, donde a la vez se obtiene ácido sulfúrico que es comercializado principalmente en mineras del norte del país.

Refinación y moldeo (REMO)

Una vez obtenido el cobre blister, el siguiente paso es la refinación, en donde tres hornos de refinación a fuego y dos de refinación anódica, son eliminadas impurezas presentes en cantidades mínimas.

La refinación a fuego tiene dos fases, la oxidación que consiste en inyectar oxígeno al líquido fundido y la reducción mediante la inyección de combustible para producir finalmente cobre de 99.9% de pureza.

La refinación anódica consiste en la oxidación del azufre y la reducción de las impurezas mediante la inyección de combustible para obtener cobre de 99.7%, al terminar este proceso el cobre está listo para ser moldeado.

En el caso de los ánodos de cobre, estos no son aún el producto final ya que son transportados a las plantas de refinación electrolíticas de Chuquicamata y Ventanas que son transformados en cátodos de cobre, listos para su comercialización.

Los lingotes son un producto final, siendo Caletones una de las dos fundiciones del mundo que entregan al mercado este tipo de cobre.

POAN (Planta Oxígeno, Aire, Nitrógeno)

Esta división cuenta con tres plantas de oxígeno en su zonal de Fundición, ubicada en Caletones. La planta de oxígeno 3, que opera desde el año 2005, es considerada una de las más modernas del mundo y es la que se ocupa actualmente.

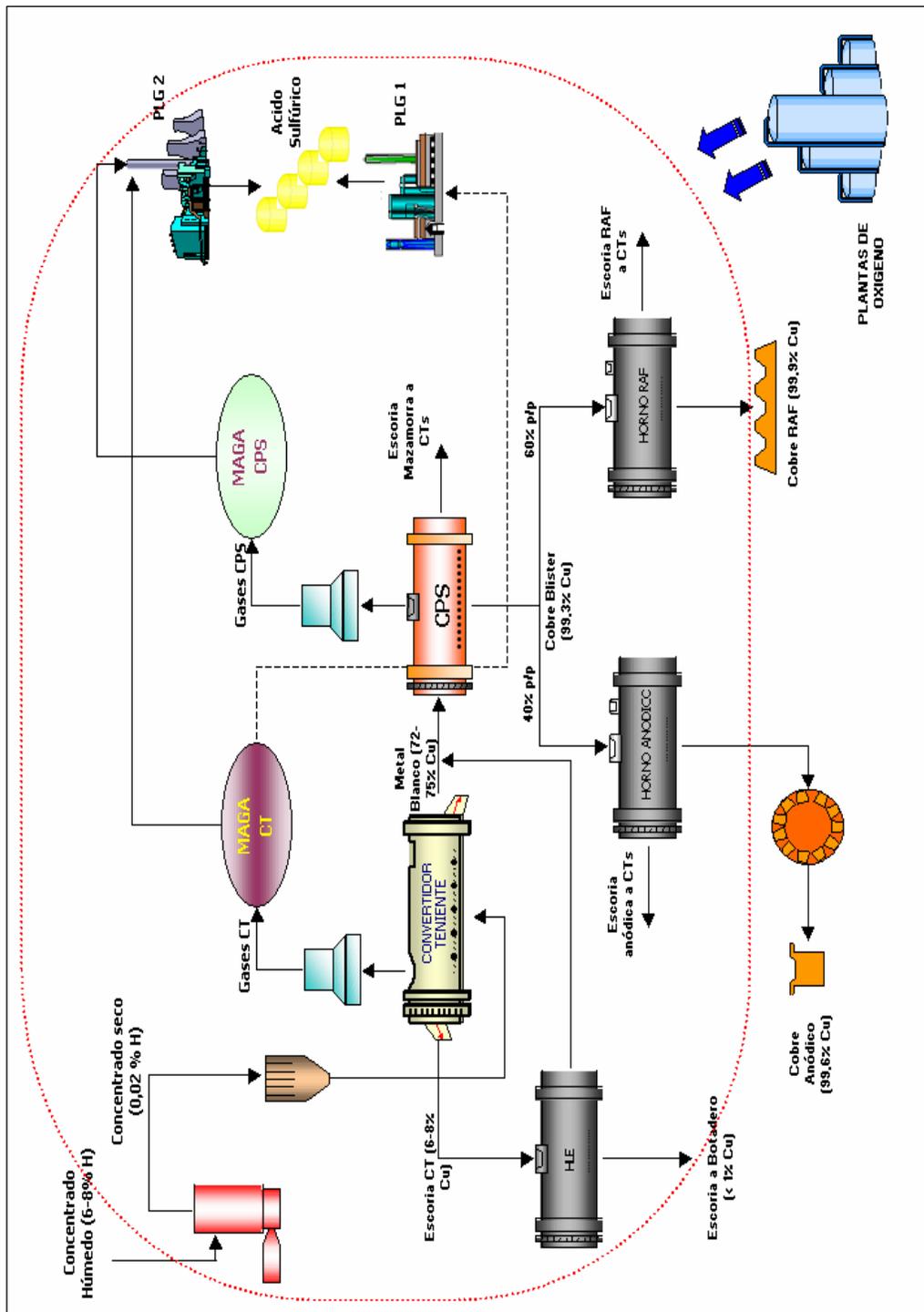
Con un consumo de energía de 10.200 KWH, y una producción cercana a 800 ton/día, la planta de oxígeno 3, abastece el oxígeno necesario para la energía y oxidación necesarias para la producción de cobre. También proporciona nitrógeno gaseoso y el cual es usado en otros procesos, como gas de sello o inertizante.

LIGA (Limpieza de Gases)

La Planta de Limpieza de Gases que está compuesta por: Manejo de Gases (MAGA), donde son captados los gases provenientes del proceso de fusión-conversión donde tenemos como componente principal anhídrido sulfuroso, estos gases son enviados a las plantas de ácido (PLG1 y PLG2). En estas plantas se produce ácido sulfúrico de 98.5% de pureza que se comercializa preferentemente en el mercado nacional, controlando las emisiones de gases al ambiente.

Además en el proceso de captura y manejo de gases se obtiene otros subproductos los que son procesados en las plantas de tratamiento de efluentes (ETP1 y ETP2) y se tiene zonas de Carguío y Lechada Cal.

A continuación se presenta el diagrama general de la Fundición Caletones (Fig. 1.2).



Esquema del Proceso de Fundición Caletones

Fig 1.2

1.3 Generalidades Normativas

La Fundición de Caletones, perteneciente a Codelco Chile- División el Teniente, en su permanente y progresiva búsqueda de aumentar su capacidad de fusión de concentrados sobre la base del desarrollo y consolidación de tecnología tiene como efecto paralelo la generación y un aumento progresivo de emisiones gaseosas que afectan las áreas circundantes a la División.

En el Decreto Supremo N° 185/1991 del Ministerio de Minería dispuso la instalación de una red permanente de monitoreo de calidad del aire en la zona circundante a Caletones. En 1992 la División El Teniente instaló una red de monitoreo con 5 estaciones ubicadas en Sewell, Colón, Caletones, Coya y Machalí, por las grandes emisiones alcanzadas, debido a esto en el Decreto Supremo N° 179/1994 emitido por el Ministerio Secretaría General de la Presidencia, declaró zona saturada por Anhídrido Sulfuroso (SO_2) y material particulado respirable (PM-10) el área circundante a la Fundición de Caletones, en las áreas jurisdiccionales de las comunas de Mostazal, Codegua, Machalí y Requinoa, en un área equivalente a 120.000 [Há]¹. Por ello, el Decreto Supremo N° 81/1998 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia, estableció un plan de descontaminación para el área circundante a la Fundición de Caletones, documento que estipula que entre el 1 de Enero del año 2001 y el 31 de Diciembre del año 2002 la Fundición Caletones debía limitar sus emisiones atmosféricas de SO_2 a un máximo de 230.000 [ton/año] (19.166 [ton/mes] para los meses de Marzo, Abril, Mayo y Junio y 21.082 [ton/mes] para los meses de Enero, Febrero, Julio, Agosto, Septiembre, Octubre, Noviembre y Diciembre).²

¹ D.S. No. 81 de 1998, Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República (D.O.03.06.1998)

² UCV, Manual de Proceso. Descripción General Manejo de Gases Fundición. Asistencia Técnica Proyecto Maga CT-CPS, 2003.

Desde el 1 de Enero del año 2003 debe dar cumplimiento a la norma de calidad ambiental en el área saturada. En el caso del PM-10, el plan mencionado contempla el cumplimiento de la norma de calidad ambiental a contar del 1 de Enero del año 2001.

El programa de descontaminación ambiental que la División El Teniente propuso a la autoridad pertinente, considera que luego de la instalación de 2 plantas de limpieza de gases y la detención del horno de reverbero (cambio esquema operativo), se optimiza la captación y manejo de gases primarios generados en los Convertidores Peirce Smith (CPS), los que deben ser tratados integralmente en las plantas de limpieza de gases desde enero del 2003. A partir de esta fecha se debe cumplir la normativa de calidad del aire en áreas circundantes a la Fundición de Caletones.

Para cumplir este compromiso la División El Teniente desarrolló el proyecto Sistema de Captación y Manejo de Gases Primarios de CPS. Este proyecto forma parte de las modificaciones necesarias en la Fundición de Caletones para aumentar la captura sobre el 92 % del SO₂.

Los beneficios sobre la imagen de la División El Teniente corresponden a la disminución de riesgos de aplicación de restricciones de carácter ambiental a las exportaciones de cobre chileno en algunos importantes mercados. Sin embargo, es de difícil evaluación y por lo tanto no es posible estimar un valor asociado a este, además está la existencia de beneficios intangibles asociados a la imagen en el medio local, tanto para los trabajadores de la misma empresa como en habitantes, producto de la descontaminación.

1.4 Regulaciones Existentes

La normativa vigente obliga, a CODELCO-Chile División El Teniente, a dar cumplimiento al Plan de Descontaminación, el cual involucra la disminución de las emisiones de SO₂ y PM-10 durante los años 1999 al 2002, con el objetivo final de cumplir a partir del 2003 las normas de calidad del aire en el área de influencia respecto de estos dos contaminantes (ver Tabla 1.1³).

Respecto de la emisión de arsénico, las disposiciones contenidas en el D.S. N°165/1998 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia establecen una norma de emisión para la regulación del contaminante arsénico emitido al aire, que, específicamente para Caletones, establece una emisión máxima de 375 [ton/año] de Arsénico a partir del año 2001.

Tabla 1.1 Cronograma de Reducción Emisiones de Anhídrido Sulfuroso (SO₂) y Material Particulado Total (1998 – 2003)

Año	Emisión Anual Máxima de SO ₂ [t/año]	Emisión Mensual Máxima de SO ₂ [t/mes]	Emisión Anual Máxima Material Particulado Total [ton/año]
Desde 1998	--	62.500	3.017
Desde 1999	494.000	41.166	1987
Desde 2000	494.000	41.166	1.987
Desde 2001	230.000	19.166	(*)
Desde 2002	230.000	19.166	(*)
Desde 2003	(*)	(*)	(*)

(*) Cumplimiento de Norma de Calidad Ambiental Anhídrido Sulfuroso y Material Particulado Respirable según corresponda.

Para dar cumplimiento a esta normativa, la División definió las siguientes acciones:

- Erradicación del Campamento de Sewell;
- Construcción de dos plantas de limpieza de gases;

³ D.S. No. 81 de 1998, Ministerio Secretaria General de la Presidencia de la República (D.O. 03.06.1998)

- Adecuación de la red de monitoreo e incorporación de tubos pasivos
- Cambio del esquema operativo de la Fundición.

El programa tiene el siguiente cronograma como se indica en la Tabla 1.2.⁴

Tabla 1.2. Proyectos programa reducción emisiones.

Año	Proyecto	Emisión Anual Máxima de SO ₂ [ton/año]
1999	Primera Planta Limpieza de Gases (1CT a 1PLG)	478.835
2000	Detención Horno Reverbero (Cambio Esquema Operativo)	494.000 (*)
2001	Segunda Planta Limpieza de Gases (2CT a 2PLG)	230.000 (*)
2002	Implementación Proyecto Sistema Captación y Manejo de Gases Primarios CPS's	230.000 (*)
2003	Tratamiento Integral Gases Primarios CT y CPS	< 95.000(**)

(*) Máximo permitido Plan Descontaminación.

(**) Emisión estimada que permite cumplir la Norma de Calidad Ambiental en zona de mayor impacto (Coya Club).

1.5 Sistema Manejo de Gases

El sistema de Manejo de Gases tiene la función de captar y procesar los gases generados en la etapa de Fusión-Conversion del cobre.

⁴ UCV, Manual de Proceso. Descripción General Manejo de Gases Fundición. Asistencia Técnica Proyecto Maga CT-CPS, 2003.

1.5.1 Proceso de Fusión

Los hornos de fusión instantánea utilizan el calor que se origina en la oxidación de los sulfuros presentes en el concentrado. El proceso de fusión consiste en la inyección de concentrado seco (aprox. 1% agua) junto con aire enriquecido con oxígeno dentro de un reactor caliente. Dentro del reactor, las partículas de sulfuro reaccionan rápidamente con los gases oxidantes. Esto da como resultado una oxidación parcial controlada de los concentrados y un gran desprendimiento de calor, ya que todas sus reacciones son exotérmicas.

Este proceso se realiza en la Fundición de Caletones en un Convertidor Teniente, la función de este convertidor es producir Metal Blanco con un contenido de cobre entre 74% a 76% de cobre y se basa en el fenómeno físico-químico de inmiscibilidad en fase líquida, en este caso entre el Metal Blanco y la Escoria debido a la diferencia en sus densidades, donde el Metal Blanco se va al fondo del convertidor:

Densidad (baño): 4,8 (FeS) a 6 (Cu₂S) gr/cm³

Densidad (escoria): 2,8 a 3,8 gr/cm³

La fusión se produce a temperaturas cercanas a los 1240 °C mediante la inyección de aire comprimido a baja presión, enriquecido al 35%-36% de oxígeno, por medio de toberas.

El soplado continuo de aire permite la agitación del baño fundido y la oxidación parcial del sulfuro de hierro y del azufre contenido en el concentrado seco, el cual es inyectado continuamente en el baño, mediante toberas especiales.

Además a través del garr-gun se alimenta fundente o sílice y material circulante o también denominado como carga fría.

Por lo que en el convertidor ocurren varios hechos simultáneamente:

Descomposiciones Piríticas: A medida que aumenta la temperatura, la carga sufre una serie de descomposiciones térmicas, las cuales generan fases sólidas y gases. Las principales descomposiciones son:

Descomposición de Covelina:



Descomposición Bornita:



Descomposición Calcoripita:



Descomposición Pirita:



Descomposición de Enargita:



Todas las reacciones dan como resultado la aparición de sulfuro de cobre (Cu_2S), sulfuro de fierro (FeS) y azufre pirítico (S_2).

Fusiones y Disoluciones: El proceso de la formación de las dos fases líquidas. De metal blanco y escoria, nace de la fusión y disolución de FeS y el Cu_2S en el baño. El Metal Blanco es una mezcla de 2 componentes Cu_2S y FeS que por el hecho de tener el mismo enlace covalente son mutuamente solubles, es decir no se separan forman una sola fase. En cambio la escoria se forma con la reacción que se produce con los fundentes y los óxidos generados por el soplado.

Las principales reacciones de Oxidación que ocurren debido al soplado son:

Oxidación Azufre



Oxidación de FeS



Dependiendo de la cantidad de FeS oxidado la ley de Metal Blanco puede aumentar, disminuir o permanecer constante.

Los procesos químicos secundarios que se presentan en la etapa de fusión es la formación de escoria fayalítica, donde FeO que se forma es un líquido muy reactivo frente al oxígeno y a los refractarios, para disminuir este oxido se hace reaccionar con oxígeno para formar magnetita, y también reacciona con el fundente SiO₂ formando el ortosilicato ferroso (fayalita) en estado sólido.

La cual corresponde a la siguiente reacción:



Otra reacción secundaria es la formación de magnetita, donde el FeO en el baño fundido gracias al aire enriquecido que se inyecta se favorece la formación de magnetita, cuya ecuación es la siguiente:



De este proceso se generan 3 flujos, Metal Blanco, Escoria y Gases, como se aprecia en la Fig 1.3.

Metal Blanco: Tiene como promedio una composición de 75% de Cu, 3% de Fe y 21% de S, este se extrae a una temperatura de 1220 °C, mediante tazas de una forma intermitente, las cuales tienen una capacidad de 400 pie³ y se transportan mediante puente grúa a los Convertidores Peirce Smith.

Escoria: Se encuentra formada por óxidos, fayalita, magnetita, sílice libre y ganga, los cuales tienen un contenido promedio de un 8% Cu, 37,5% Fe, 28% SiO₂ y Fe₃O₄, esta se extrae a una temperatura de 1240°C también por un sangrado intermitente donde las tazas tienen una capacidad de 500 pie³, por un pasaje de

sangría refrigerado con agua, las cuales son trasladadas a los hornos de Limpieza de Escoria.

Gases: Estos se contienen principalmente anhídrido sulfuroso aproximadamente 25% SO₂ en volumen, estos se extraen de forma continua a una temperatura promedio de 1250°C por las campanas y son llevados a la Planta de Acido.

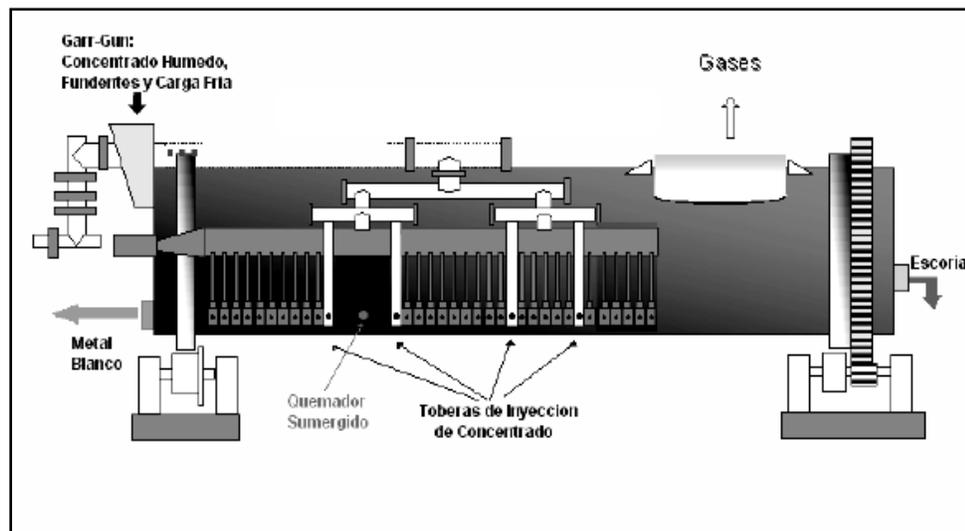


Fig 1.3 Diagrama Convertidor Teniente

Características del Convertidor Teniente

En la fundición Caletones cuentan con 2 Convertidores Tenientes, las características de estos se muestran en la tabla N°1.3.

Tabla 1.3 Características Convertidor Teniente

Diámetro Exterior (m)	5
Longitud Exterior (m)	22
N° Equipos en Operación	2

N° de Toberas de Aire de Soplado	38
N° de Toberas de Inyección de Concentrado	4
Descarga de Escoria	Hornos de Fusión de Escoria
Descarga a Metal Blanco	Convertidores Pierce Smith
Descarga del Gas	PLG N°1 o PLG N°2

1.5.2 Conversión

La función de la conversión es la eliminación de fierro, azufre y otras impurezas del metal blanco para así producir cobre blíster.

La conversión del metal blanco se lleva a cabo en los Convertidores Peirce Smith, en los cuales las tazas de material fundido se cargan por la boca del convertidor y el aire se inyecta al interior por medio de toberas situadas a lo largo del convertidor.

El convertidor es un reactor líquido-gas destinado a eliminar el azufre y el fierro que acompañan al cobre mediante reacciones con el oxígeno, debido al gran calor

asociado a las reacciones se dice que el proceso se desarrolla de una forma autógena, ya que no necesita algún combustible adicional.

Dependiendo del líquido con que se alimente los convertidores, el proceso se desarrolla en 1 o 2 etapas en este caso como es alimentado por metal blanco, el proceso se desarrolla en 1 etapa el cual consiste en oxidar el azufre que acompaña al cobre (Cu_2S) a SO_2 y por lo tanto se forma el cobre blíster (98%Cu), un gas rico en SO_2 y escoria (mazamorra).

El Metal Blanco: Es un material cuyo componente principal es el sulfuro de cobre (Cu_2S), contiene además sulfuro de hierro (FeS), magnetita (Fe_3O_4) y pequeñas cantidades de arsénico, antimonio, bismuto, plomo, níquel entre otros.

Cobre Blister: Es el producto final de la conversión y su contenido puede variar entre 98% a 99,3% de Cu dependiendo del grado de oxidación y del nivel de impurezas. Este cobre entre más alto sea su nivel de oxidación, menor va a ser su contenido de azufre, como se puede apreciar en la Fig. 1.4, la cual nos muestra una curva de cantidad de azufre en cobre blíster versus cantidad de oxígeno, eso si esta curva depende del contenido de impurezas.

El cobre blíster que se forma es inmiscible con el metal blanco y por su mayor densidad se deposita en el fondo del convertidor.

Escoria: Un componente de la escoria es la magnetita (Fe_3O_4), la cual se produce por la oxidación del Hierro que se encuentra en el FeS del Metal Blanco. Dependiendo del nivel de oxidación del cobre blíster, la escoria tendrá mayor o menor contenido de óxido de cobre (Cu_2O), también estará compuesta por ferritas de cobre ($\text{CuO Fe}_2\text{O}_3$) y cobre metálico (Cu).

Gases: Este gas es evacuado por la boca del convertidor a una temperatura entre 1220 y 1250°C, este gas es rico en anhídrido sulfuroso SO_2 , este depende del enriquecimiento del aire de soplado y de la eficiencia del oxígeno, además este gas posee impurezas que se volatilizan como el arsénico (As), antimonio (Sb), plomo(Pb), además del arrastre de polvo.

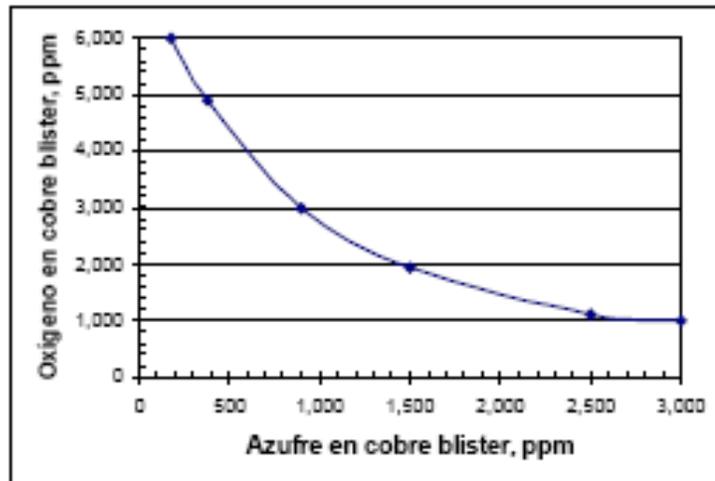


Fig 1.4 Curva de cantidad de azufre en cobre blíster versus cantidad de oxígeno

- **Fundamentos Pirometalúrgicos**

El proceso de conversión es una oxidación selectiva del metal blanco a alta temperatura y se lleva a cabo en dos etapas. La primera en la cual se oxida el hierro según:



y el óxido de hierro producido es escorificado mediante sílice formando su compuesto más estable, fayalita $2FeO \cdot SiO_2$.

En la segunda etapa se produce la reacción de oxidación del Cu_2S , produciéndose globalmente, un cobre blister y un gas rico en SO_2 .



La oxidación selectiva del hierro en una primera etapa y el sulfuro de hierro en una segunda etapa se explica por la mayor afinidad que posee el hierro, comparada con la del cobre, tiene por el oxígeno. En la Fig. 1.5 se puede apreciar la curva de soplado de los CPS, según muestra la pantalla de control PI.

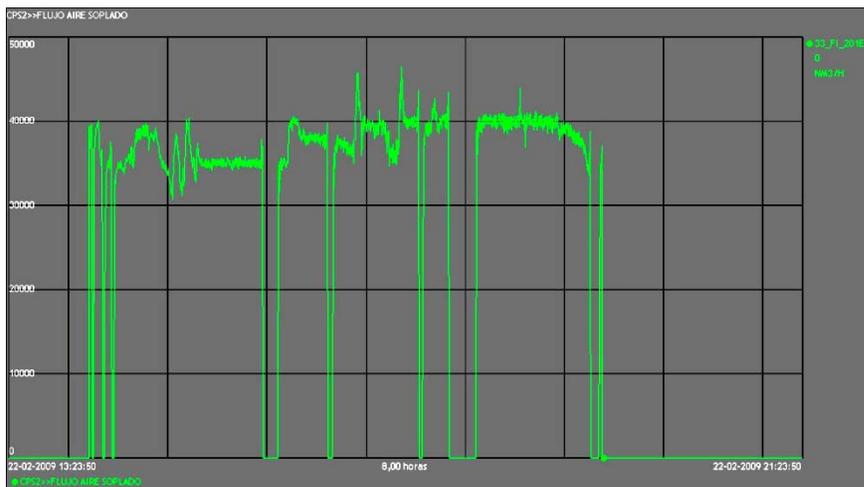


Fig 1.5 Diagrama de Tendencia Flujo de Soplado CPS

A continuación se muestran las características de los Convertidores Peirce Smith:

Tabla N°1.4: Características Físicas Convertidor Peirce-Smith

Diámetro Exterior (m)	4.6
Longitud Exterior (m)	10.7
N° Equipos en Operación	3
N° de Toberas de Aire de Soplado	46
Descarga de Escoria	Convertidor Teniente
Descarga a Metal Blanco	HA y HRAF
Descarga del Gas	PLG N°1 o PLG N°2

1.6 Manejo de Gases

Los gases producidos en el proceso de fusión-conversión son divididos en dos zonas, Manejo de Gases de los Convertidores Teniente (MAGA-CT) y Manejo de Gases de los 3 Convertidores Pierce Smith (MAGA-CPS).

Este proceso tiene la función de captar, enfriar, limpiar y acondicionar los gases provenientes de los Convertidores Teniente (2 CT) y Convertidores Pierce Smith (3 CPS), cada equipo posee su propio sistema de captación los cuales son distribuidos a las Plantas de Ácido Sulfúrico según su capacidad.

Los gases que salen de los convertidores son captados por campanas que se encuentran en la boca de estos, cuya temperatura es aproximadamente de 1250°C, de esta manera son enviados a cámaras de enfriamiento (evaporativo para CT, radiativo para CPS), en esta parte del proceso además de enfriar, se extraen polvos, debido a la disminución de la temperatura aprox. 350°C.

El gas que proviene de los las cámaras enfriamiento evaporativas, se dirigen a su respectivos precipitadores electrostáticos (marca JOY) donde se depositan la mayor cantidad de polvos, donde luego son enviados a las respectivas Plantas de Limpieza

de Gases (PLG) impulsados por sopladores de las mismas plantas. Así mismo los gases provenientes de los CPS se mezclan en un ducto de alta velocidad posterior a la cámara de enfriamiento radiativo, los cuales van dirigidos a 2 precipitadores electrostáticos (MILJO), los gases ya con aproximadamente un 95% menos de polvos, ingresan nuevamente a ductos de alta velocidad impulsados en esta zona por dos ventiladores de tiro inducido, los cuales son enviados hacia las Plantas de Limpieza de Gases. El sólido colectado en los enfriadores radiativos (fracción gruesa) es enviado a proceso a los CT y CPS, junto a otros materiales (rechazos, fondos de ollas, etc), como carga fría.

El resto de los polvos, la fracción fina, captados por los precipitadores electrostáticos, son enviados a la Planta de Tratamiento de Polvos de Fundición (PTPF) para su posterior tratamiento.

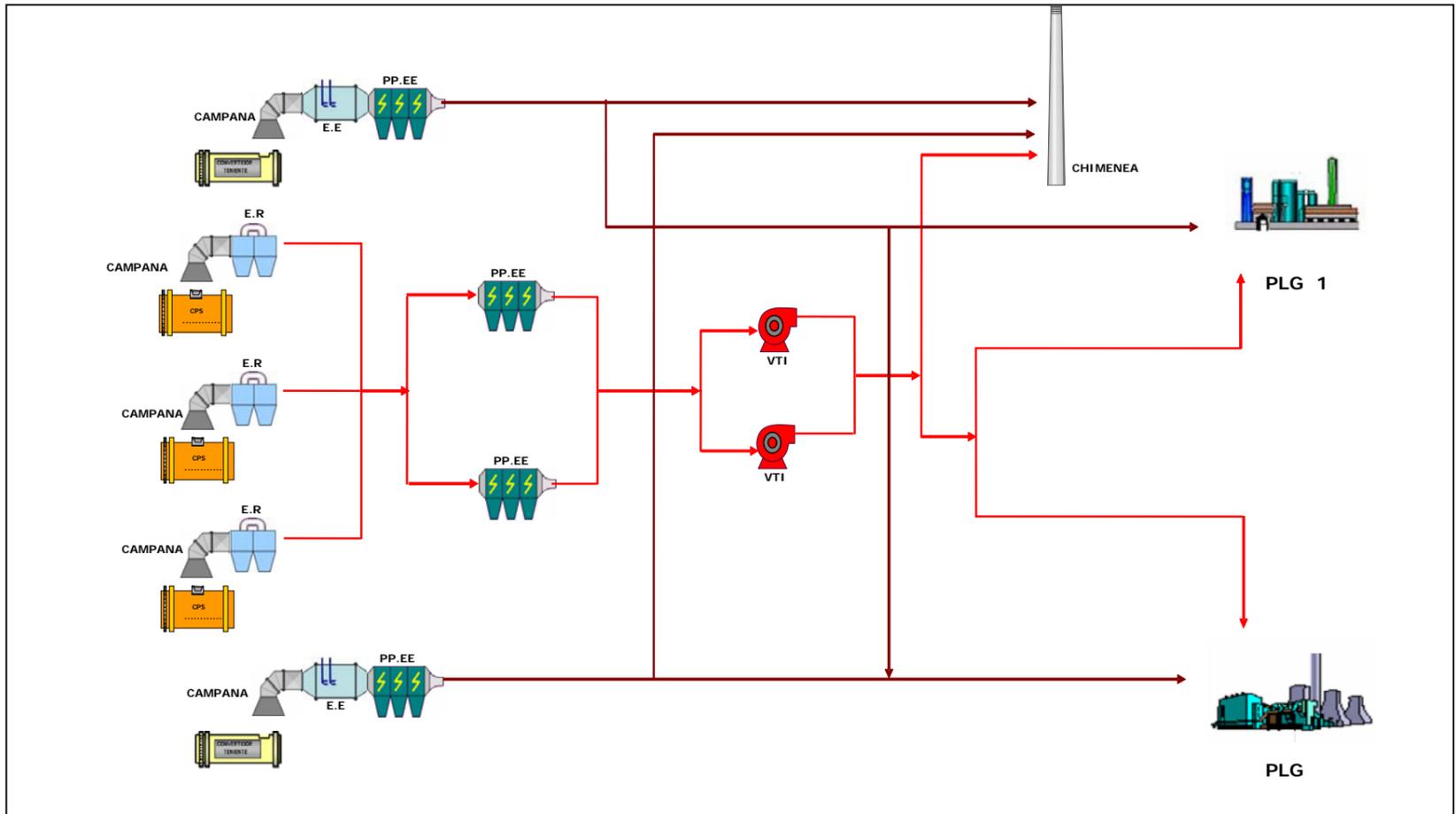


Fig. 1.6. Esquema General del Manejo de Gases (MAGA)

1.7 Tratamiento de los gases en Plantas de Limpieza de Gases

Los gases primarios de los CT's y de los CPS's, una vez que abandonan los precipitadores electrostáticos, son procesados en las PLG's con el propósito de recuperar el anhídrido sulfuroso que contienen y controlar su emisión a la atmósfera.

La planta de limpieza de gases N°1 es de tecnología Mitsubishi Lurgi, esta unidad es una planta de producción de ácido sulfúrico del tipo de contacto único, capaz de producir 1500 TM/día de ácido sulfúrico (como H₂SO₄ de 100wt %).

La planta de limpieza de gases N°2 tiene una capacidad de producción de ácido sulfúrico de 2485 TM/día (como 100% de H₂SO₄), diseñada por el conglomerado internacional Kvaerner Chemetics.

Tanto como la planta de limpieza de gases 1 y 2 poseen básicamente el mismo proceso, y por tal efecto se dividen en tres pasos principales en la producción de ácido sulfúrico. En el primer paso, el gas se limpia, es una etapa netamente de acondicionamiento.

En el segundo paso, el dióxido de azufre se combina con oxígeno en presencia de un catalizador para producir trióxido de azufre. En el paso final, el trióxido de azufre se transforma en ácido sulfúrico (H₂SO₄) mediante absorción.

Las reacciones de los dos últimos pasos son



En la siguiente esquema (Fig. 1.7) se muestra la disposición de cada etapa de en el proceso:

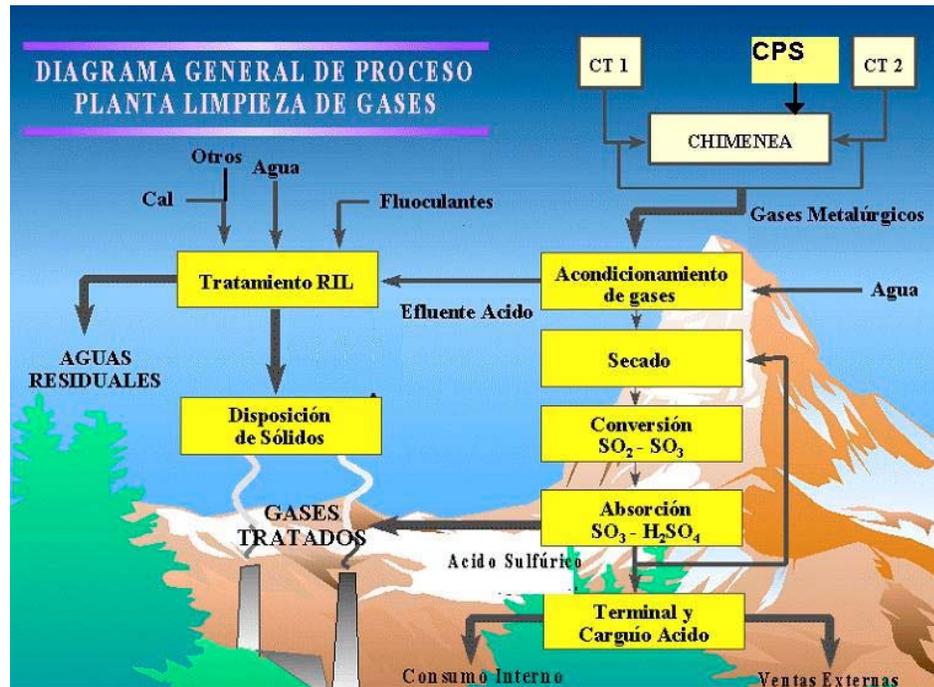


Fig. 1.7. Esquema proceso Planta de limpieza de gases

1.7.1 Planta de Limpieza de Gases N°1

El proceso está basado en el Proceso de Contacto Único Mitsubishi - Lurgi, el cual tiene las siguientes etapas descritas en su manual de operación:

Sección de planta purificadora del gas (GCP)

Sección de planta de contacto con Acido (CAP)

Sección de servicios (UF)

Además la planta cuenta con su respectiva planta de tratamiento de efluentes. A continuación se describen las 2 primeras secciones de la planta ya que la tercera escapa del estudio.

Sección de planta purificadora del gas (GCP)

El gas de SO_2 que viene desde la etapa de manejo de gases y que es utilizado para la producción de ácido sulfúrico debe estar libre de materiales extraños que podrían afectar la operación de la planta, el gas no debe contener polvo, impurezas, vapor de ácido, etc., estas impurezas podrían afectar negativamente la operación del proceso, mantención de los equipos y la calidad del ácido, por lo tanto en la GCP es necesario eliminar las impurezas ya antes mencionadas, además el gas de SO_2 es enfriado para mantener el balance hídrico.

La sección consta de los siguientes equipos principales, conectados una después de otra:

- **Torre de lavado:** También llamada torre humedecedora, esta torre no posee relleno en su interior, lava en contracorriente el gas proveniente de la sección de manejo de gases (MAGA) con ácido sulfúrico diluido, la función principal de este equipo es la eliminación de impurezas y co-ayudar al enfriamiento del gas.

El efluente generado de la torre de lavado es bombeado a una torre Stripper o desgasificadora, para retirar el SO_2 residual. Desde el desgasificador o Stripper, el efluente libre de SO_2 es enviado a la planta de tratamiento de efluente y el SO_2 recuperado en la torre Stripper es reintegrado a la corriente gaseosa.

- **Depurador Venturi:** Realiza una limpieza del gas para eliminar el arsénico y el polvo mediante el paso por la garganta del Venturi, en ese lugar, el gas aumenta su velocidad causada por una disminución del diámetro del equipo, lo que provoca una decantación de los polvos y su consecuente limpieza del gas. El lavador Venturi está provisto de un circuito de ácido débil.
- **Torre empacada de enfriamiento de gas:** En esta torre el gas llega a una temperatura final de alrededor de 27°C , el gas cuando entra al equipo lo hace de forma ascendente mientras que el ácido de circulación lo hace pulverizado desde arriba, en la sección empacada de la torre se produce el intercambio de calor entre el gas y el ácido de circulación.

- **Precipitadores Electroestáticos de Efluente:** Su finalidad es retirar toda impureza que viaje junto con el gas, especialmente el arsénico. En la PLG 1 existen tres trenes de estos precipitadores electroestáticos por vía húmeda.

En el sistema de limpieza descrito, el efluente generado contiene variadas impurezas, el cual se va enriqueciendo constantemente por estas, por lo que es fundamental que este efluente se vaya sustrayendo con el objeto de que las impurezas no se incrementen infinitamente en él. El efluente que se extrae desde el sistema de limpieza es llevado hacia las plantas de tratamiento de efluentes en el cual se hace precipitar las impurezas y el agua retorna al proceso.

Sección de planta de Contacto con Ácido (CAP)

Esta sección convierte el dióxido de sulfuro (SO_2) en trióxido (SO_3) mediante un catalizador adecuado (en el caso de la fundición Caletones se utiliza el pentóxido de vanadio) y produce ácido sulfúrico por absorción del trióxido de sulfuro en el ácido sulfúrico concentrado. A continuación se presentan los pasos más importantes de la sección cronológicamente establecidos:

Secado del gas de SO_2 : El secado del gas se realiza en un equipo llamado torre de secado, el gas sin polvo ni vapor pero húmedo y con aire de dilución necesario para la conversión catalítica se contacta de forma vigorosa con ácido sulfúrico concentrado, a través de este contacto la humedad que viene en el gas es absorbida por el ácido.

Oxidación catalítica del SO_2 en SO_3 : Para que la reacción oxidación del dióxido de azufre ocurra, el gas proveniente de etapas posteriores debe estar seco, con una proporción de O_2 a SO_2 no inferior a 1.1:1 y a una temperatura de encendido de 400°C , además esta reacción ocurre solo en presencia de un catalizador, en el caso de la fundición Caletones se utiliza pentóxido de vanadio. Para que se produzca la reacción, la planta cuenta con tres equipos de intercambiadores de calor, los cuales se utilizan para adecuar la temperatura del gas, el convertidor propiamente tal, que consiste en un reactor de 4 lechos o etapas de contacto, en cada lecho hay

presencia de catalizador y el ultimo equipo es el enfriador de SO₃ que se sitúa a la entrada de la etapa de absorción.

Absorción del SO₃ en ácido sulfúrico concentrado: Esta absorción se realiza en un reactor llamado “Torre de absorción”, el gas SO₃ formado en la etapa anterior es absorbido por el H₂SO₄ de 98,5% que recircula continuamente en la torre mediante bombas. El gas que sale de la torre pasa a través de un eliminador de vapor tipo vela para evitar goteo ácido (vapor ácido) con lo cual se evita ser expulsado a la atmósfera a través del conducto vertical de la planta de contacto de ácido.

1.7.2 Planta de Limpieza de Gases N°2

La planta de limpieza N°2 de la fundición fue diseñada por el conglomerado internacional Kvaerner Chemetics y entró en funcionamiento el año 2002, la planta se puede subdividir en 3 secciones, las cuales son limpieza de gases, zona de contacto y sección de absorción, además de su respectiva planta de tratamiento de efluentes.

Tabla 1.5: Perfil General del gas de entrada a la PLG-2

	Unidad	Rango
Tasa de Flujo (base húmeda)	Nm ³ /h	235,000 - 280,000
Temperatura	°C	280 - 370
Presión en Ducto Conexión	mmH ₂ O	-10 - -30
Composición		
SO ₂	% Vol.	9.8 - 8
O ₂	% Vol.	12.6 - 11.0
N ₂	% Vol.	64.5 - 65.9
CO ₂	% Vol.	1.6 - 3.0
CO	ppm	180 - 190
H ₂ O	% Vol.	11.4 - 12.4

Sección Limpieza de Gases

El objetivo de esta sección de la planta, como su nombre lo indica, es limpiar el gas de toda impureza para así asegurar que no se afecte negativamente la eficiencia de operación del proceso, mantención de los equipos y calidad del ácido.

Es importante resaltar que en la sección existen dos flujos, por un lado tenemos el gas que se va purificando y por el otro un efluente líquido ácido que se enriquece con todas las impurezas que contenía el gas.

Para lograr el objetivo la planta dispone de equipos de lavado, enfriamiento y precipitación electrostática, los equipos más importantes de la sección, los cuales son conectados progresivamente son:

- **Quench Venturi:** Equipo que recibe los gases metalúrgicos cuyo propósito es saturar adiabáticamente (humedecer y reducir la temperatura) el gas, el cual se lava con ácido diluido débil que es inyectado por una serie de roceadores que logra enfriar el gas a su temperatura de saturación (63°C).
- **Torre de Retención o Torre Vacía:** Recibe el flujo proveniente del quench venturi y separa el gas del líquido, el cual retiene cierta cantidad de partículas que acompañaban al gas.
- **Limpiador Venturi o Venturi Scrubber:** Este es un equipo que se encarga de limpiar el gas, esta limpieza la realiza ya que posee una garganta variable (precipita las partículas finas por diferencia de velocidad en el gas) que le confiere la posibilidad de retener las partículas que acompañan al gas.
- **Torre de Enfriamiento de Gases:** Como el nombre lo dice esta torre se utiliza para enfriar el gas y retirar su humedad mediante condensación. Este retiro de humedad es necesario para asegurar que se logre el equilibrio en la sección de contacto de la planta de ácido sulfúrico.
- **Precipitadores Electroestáticos:** Último equipo de la zona de limpieza de la planta cuya finalidad es quitar la neblina ácida y las partículas de ácido. La planta de limpieza de gases posee 4 precipitadores electroestáticos, cada uno de ellos compuestos de 300 tubos circulares (superficie colectora) en donde se instala un electrodo en el centro de cada tubo colector, la eficiencia de los precipitadores para eliminar neblina ácida e impurezas es alrededor de un 99%.

Los equipos descritos anteriormente generan un efluente ácido que contiene entre otras partículas indeseadas y dióxido de azufre disuelto, el cual se retira mediante el equipo llamado lavador de ácido débil donde se le inyecta aire para poder quitar el SO_2 , finalmente este efluente libre ya de SO_2 se bombea hacia la planta de tratamiento de efluentes.

Sección de Contacto y absorción

El gas proveniente de la zona de limpieza libre de impurezas esta listo para ingresar a la zona de contacto y absorción. En la zona de contacto el dióxido de Azufre contenido en el gas reacciona con el azufre para formar trióxido de azufre. Bajo condiciones normales esta oxidación procede en forma muy lenta para ser de algún uso práctico. Sin embargo, en la presencia de un catalizador, la reacción ocurre más rápidamente.

En la zona de absorción, el trióxido de azufre convertido en la zona de contacto es retirado mediante absorción con ácido sulfúrico.

Los equipos utilizados en estas dos últimas secciones son:

- **Torre de secado:** Este equipo es el encargado de secar el gas que proviene de la zona de limpieza, este objetivo mediante absorción con ácido sulfúrico, como resultado de aquello el gas queda seco. Como resultado de esta operación se genera calor.
- **Soplador:** El soplador es una unidad centrifuga impulsado por un motor eléctrico, la función de este equipo es darle impulso necesario para que el gas se mueva dentro de los distintos equipos de la planta y le da una compresión a este.
- **Contacto:** El gas ya comprimido es ingresado al reactor donde se produce la oxidación del dióxido de azufre, esta oxidación se realiza en presencia

de un catalizador (V_2O_5) el cual tiene como objetivo aumentar la cinética de la reacción, para ello el gas debe aumentar su temperatura a 400°C antes de ingresar al reactor.

El reactor utilizado en la zona de contacto es un reactor que posee 4 camas catalizadoras, cada una de ellas con sistema de intercambiadores de calor para mantener la temperatura, en la figura 1.8 se muestra el reactor utilizado.

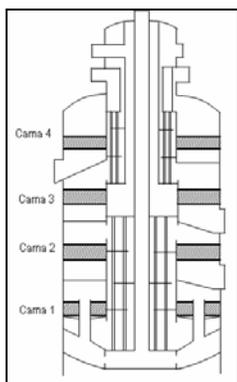


Fig. 1.8: Reactor Zona de contacto

- **Torre de absorción:** Su función es quitar el trióxido de azufre que viene en el gas absorbiéndolo en el ácido sulfúrico. En la torre de absorción se produce ácido sulfúrico y se genera calor. El proceso consiste en contactar el gas con ácido al 98.5%, el cual recircula constantemente. De esta forma el SO_3 es absorbido generando más ácido, esta reacción es exotérmica por lo que el calor producido es retirado por medio de intercambiadores de calor.

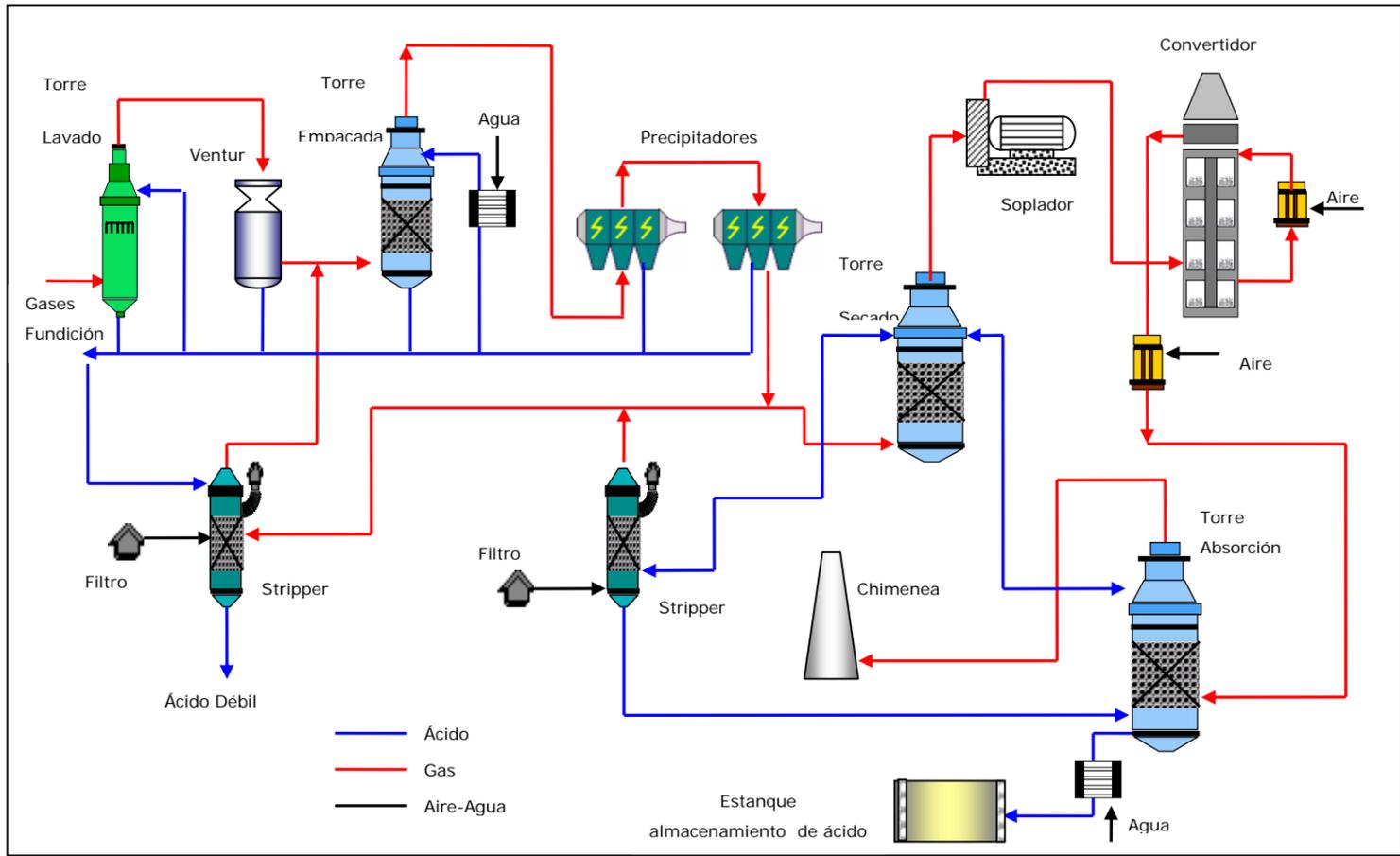


Fig. 1.9: Diagrama General de Planta de Limpieza de Gases N°1

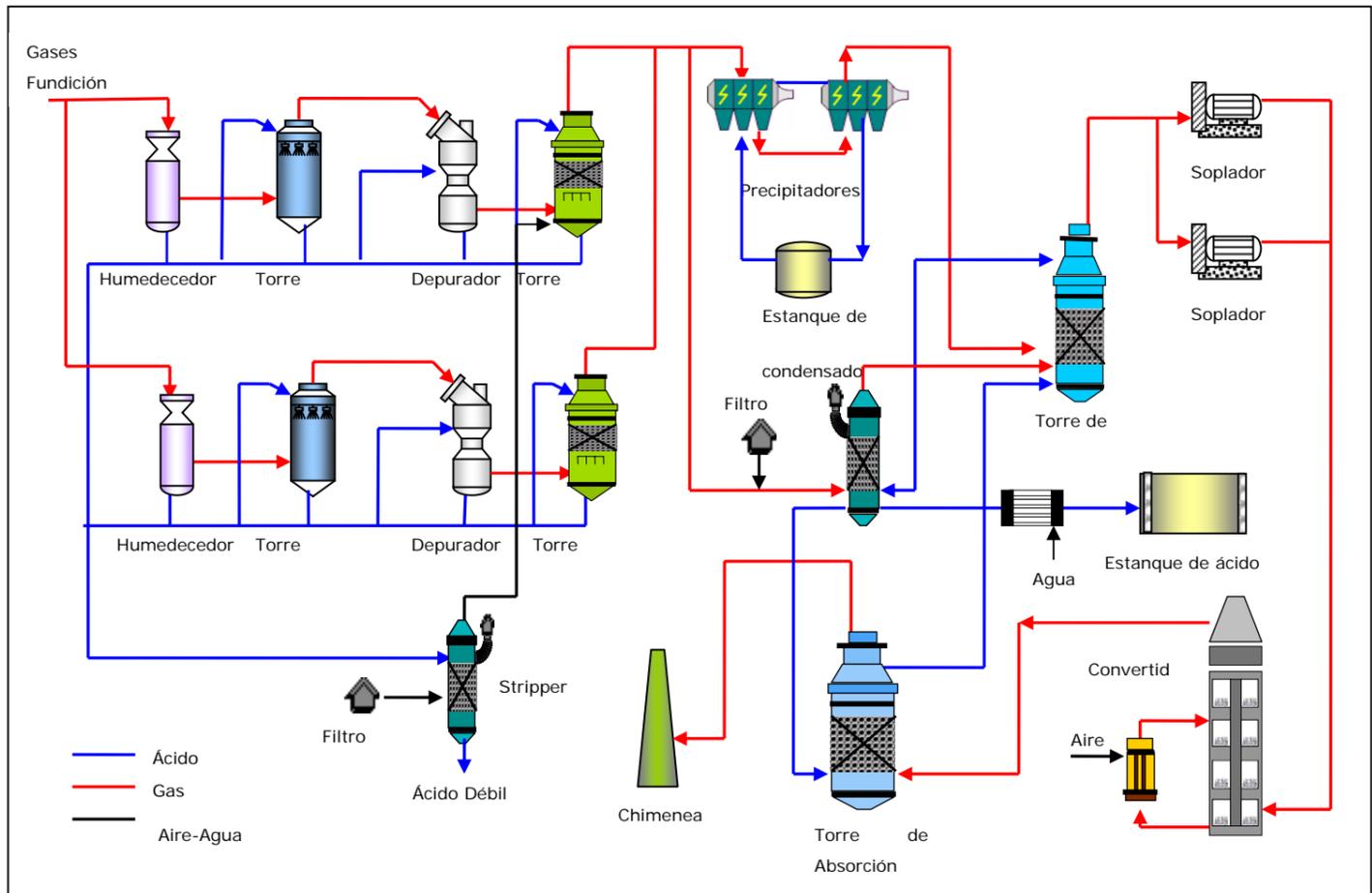


Fig. 1.10: Diagrama General de Planta de Limpieza de Gases N°1

1.8 Plantas de Tratamiento de Efluentes

La Fundición Caletones cuenta con dos plantas de tratamientos de efluentes, conocidas normalmente con las siglas ETP 1 y ETP 2. Estas plantas trabajan en trenes distintos, es decir, La ETP 1 capta los efluentes generados por la planta de limpieza de gases N°1 (PLG 1) y la ETP 2 los de la planta de limpieza de gases N°2 (PLG 2). Ambas utilizan los mismos conceptos fisicoquímicos en el tratamiento de efluentes, la única diferencia radica en los equipos utilizados.

El objetivo de las ETP's es tratar los efluentes generados por las plantas de limpieza de gases, obteniendo de este tratamiento residuos sólidos y líquidos seguros medioambientalmente.

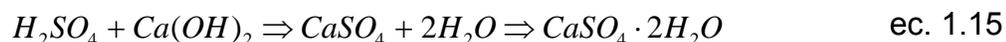
En ambas plantas el reactivo utilizado para neutralizar las soluciones ácidas es lechada de cal ($\text{Ca}(\text{OH})_2$).

El tratamiento de efluentes para ambas plantas consiste en 4 pasos fundamentales:

Neutralización de Ácido Sulfúrico.

El efluente que es enviado desde las primeras etapas de la planta de limpieza de gases es un efluente con bastantes "impurezas" y levemente ácido, este efluente es enviado por medio de bombas centrifugas a estanques de neutralización, en estos estanques se pone en contacto el efluente con lechada de cal empezando formar cristales de yeso (sulfato de calcio)(Reacción 2.17), estos cristales servirán como matriz encapsuladora para el arseniato de calcio, además, los estanques son insuflados con oxígeno para que el arsénico contenido en el efluente se oxide a As^{+5} que es más fácil de precipitar que su forma de As^{+3} .

La reacción más importante que ocurre en esta etapa del proceso:



Precipitación de los iones metálicos y retiro parcial del arsénico desde el proceso.

En estos estanques ocurre la precipitación de los iones metálicos (Zn, Cu, Pb, Fe) y retiro parcial del Arsénico gracias a la adición suplementaria de lechada de cal con la finalidad de llevar el pH a 11,5 lo que genera la precipitación de una gran parte de iones metálicos fijándolos como hidróxidos del metal.

Las principales reacciones que ocurren en esta parte del proceso son ⁴:

	pH al comienzo de la precipitación	
$FeSO_4 + Ca(OH)_2 \Rightarrow Fe(OH)_2 + CaSO_4$	2,0	(ec. 1.16)
$CuSO_4 + Ca(OH)_2 \Rightarrow Cu(OH)_2 + CaSO_4$	5,3	(ec. 1.17)
$PbSO_4 + Ca(OH)_2 \Rightarrow Pb(OH)_2 + CaSO_4$	6,0	(ec. 1.18)
$ZnSO_4 + Ca(OH)_2 \Rightarrow Zn(OH)_2 + CaSO_4$	7,0	(ec. 1.19)
$2HAsO_2 + 2Ca(OH)_2 \Rightarrow Ca(AsO_2)_2 \cdot Ca(OH)_2 + 2H_2O$	11,5 -12	(ec. 1.20)
$2AsO + 4Ca(OH)_2 \Rightarrow Ca_3(AsO_2)_2 Ca(OH)_2 + 6H_2O$	11,5 -12	(ec. 1.21)

De los estanques de precipitación sale un fluido con aproximadamente 9% de sólidos, este fluido se hace pasar por medio de un espesador el cual promueve la separación sólido líquido, los flujos que se separan en este equipo son:

Corriente sólida: Precipitados de arsénico, flúor y sulfato (25 a 30% sólidos).

Corriente Líquida: Efluente neutro con arsénico disuelto.

El líquido que rebalsa desde el espesador es dirigido hacia una precipitación final de arsénico ya que el efluente líquido aun contiene aproximadamente 25 a 30 ppm de arsénico.

Cabe resaltar la relación que existe entre la concentración de As en solución con la variación de pH, esta relación queda reflejada en la figura 1.11.

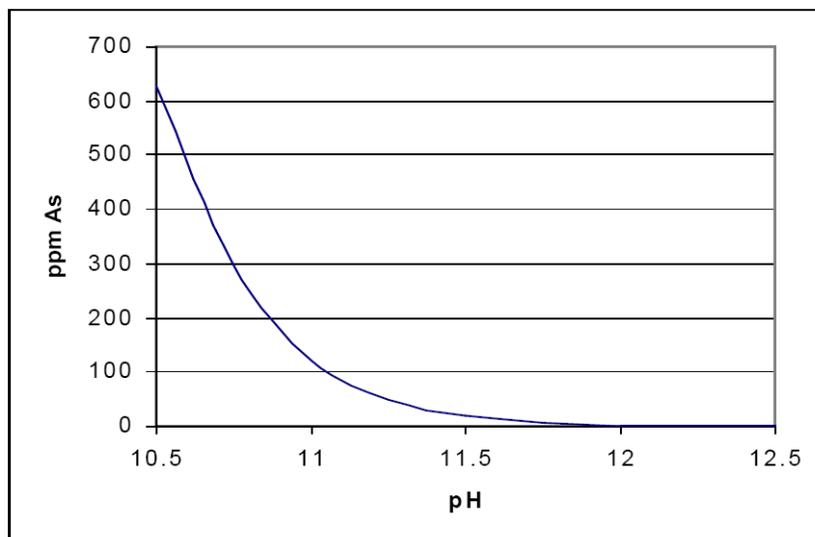


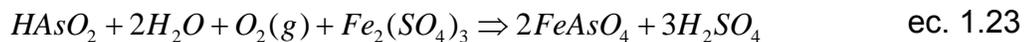
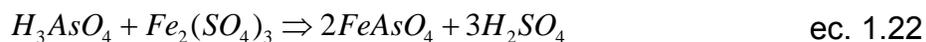
Fig. 1.11: Variaciones en el pH y sus efectos sobre el nivel de solubilidad de As en soluciones de $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Precipitador Final de Arsénico.

El arsénico contenido en el efluente líquido es precipitado en su forma más estable, es decir como Arsenato Férrico, para que se forme este compuesto el efluente es contactado con una solución de hierro y ajustando el pH entre 7 y 8 ajustando con ácido sulfúrico. En el caso de ambas ETP's se contacta con cloruro férrico.

De modo que el arsénico precipita y el efluente termina con una concentración de aproximadamente de 1mg/l de Arsénico.

Las reacciones químicas de la etapa (reacciona con sulfato férrico) son:



Luego este efluente es tratado en un espesador para la separación sólido-líquido, los líquidos obtenidos de la separación se les ajusta el pH entre 7 y 8 donde pasa al estanque de agua tratada.

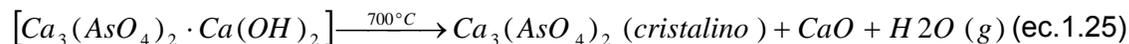
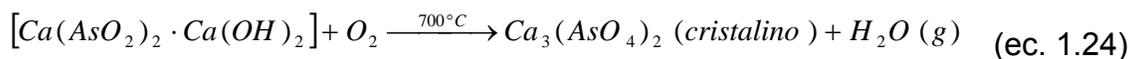
Secado y Calcinación de los sólidos captados en los filtros, obteniendo como resultado Arseniato de Calcio encapsulado en una matriz de sulfato de calcio, con aproximadamente 0,2 % de humedad.

Los flujos sólidos (25-30% sólidos) proveniente de los espesadores se bombea hacia un estanque receptor de borras en donde se adiciona lechada de cal para asegurar un óptima razón de Ca/As para obtener un producto estable del calcinador.

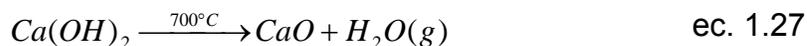
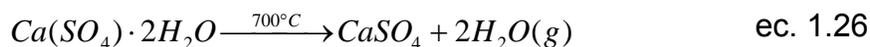
Esta borra se bombea hacia un filtro de prensa el deja al sólido con 8% de humedad, este sólido es transportado finalmente hacia un equipo de secado/calcinado, en el caso de la ETP 1 son dos equipos, uno para el secado y otro para el calcinado en cambio en la ETP 2 es un equipo mixto de secado calcinado.

Finalmente el producto calcinado y estabilizado es enfriado y almacenado en maxisacos para su posterior disposición final.

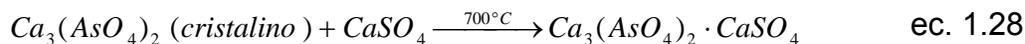
En esta etapa final del proceso las reacciones químicas que se producen son:



Por otro lado, el sulfato de calcio sufre deshidratación y el hidróxido de calcio sufre descomposición.



Finalmente se forma una matriz de yeso (sulfato de calcio) que es la que encapsula al arseniato de calcio, lo que se expresa según la siguiente ecuación.



A continuación se presenta un diagrama esquemático (Fig. 1.12) de una planta de tratamiento de efluentes.

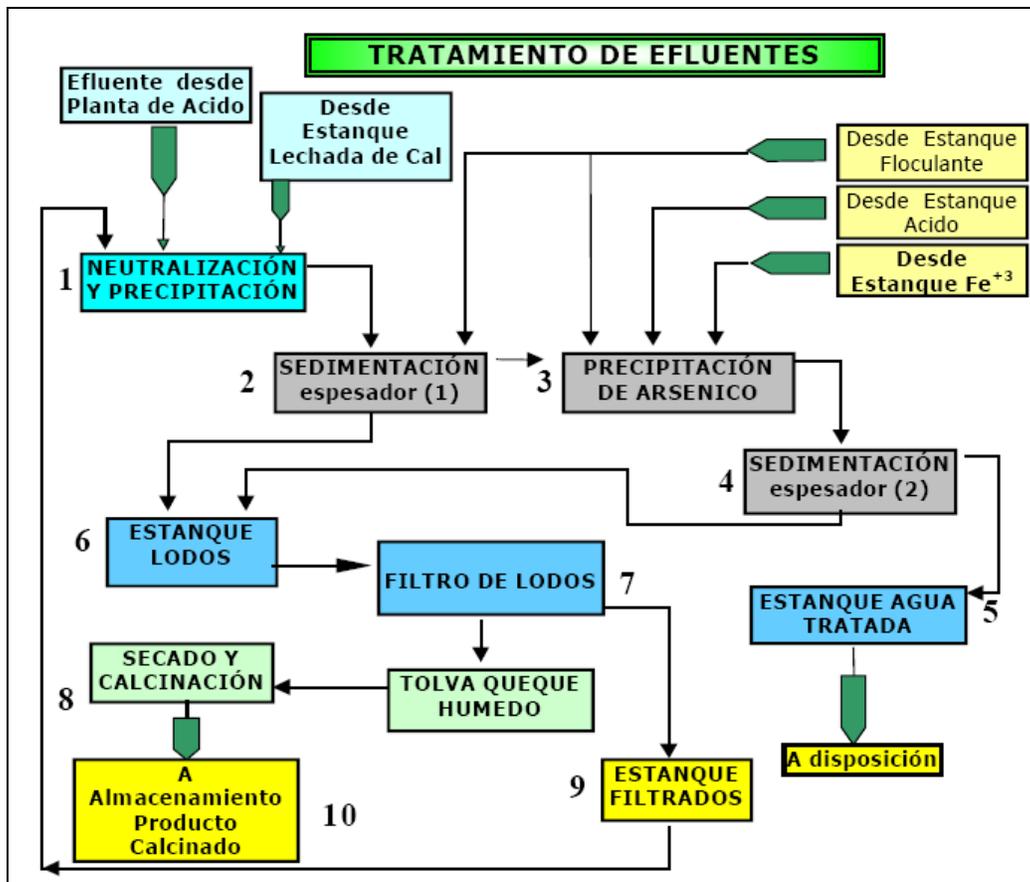


Fig. 1.12: Diagrama esquemático de planta de tratamiento de efluentes.

Debido al alza de combustible el cual se ocupaba para producir secado y calcinado del material, se decidió cambiar la modalidad de esta planta ahora el residuo arseniato de calcio (queque húmedo) se paga a Hidronor para que esta empresa haga el tratamiento necesario para que sea un residuo no peligroso.

A continuación se presenta diagramas de Generales de la Planta de Efluentes N°1 (Fig. 1.13) y Planta de Tratamiento de Efluentes N°2 (Fig.1.14):

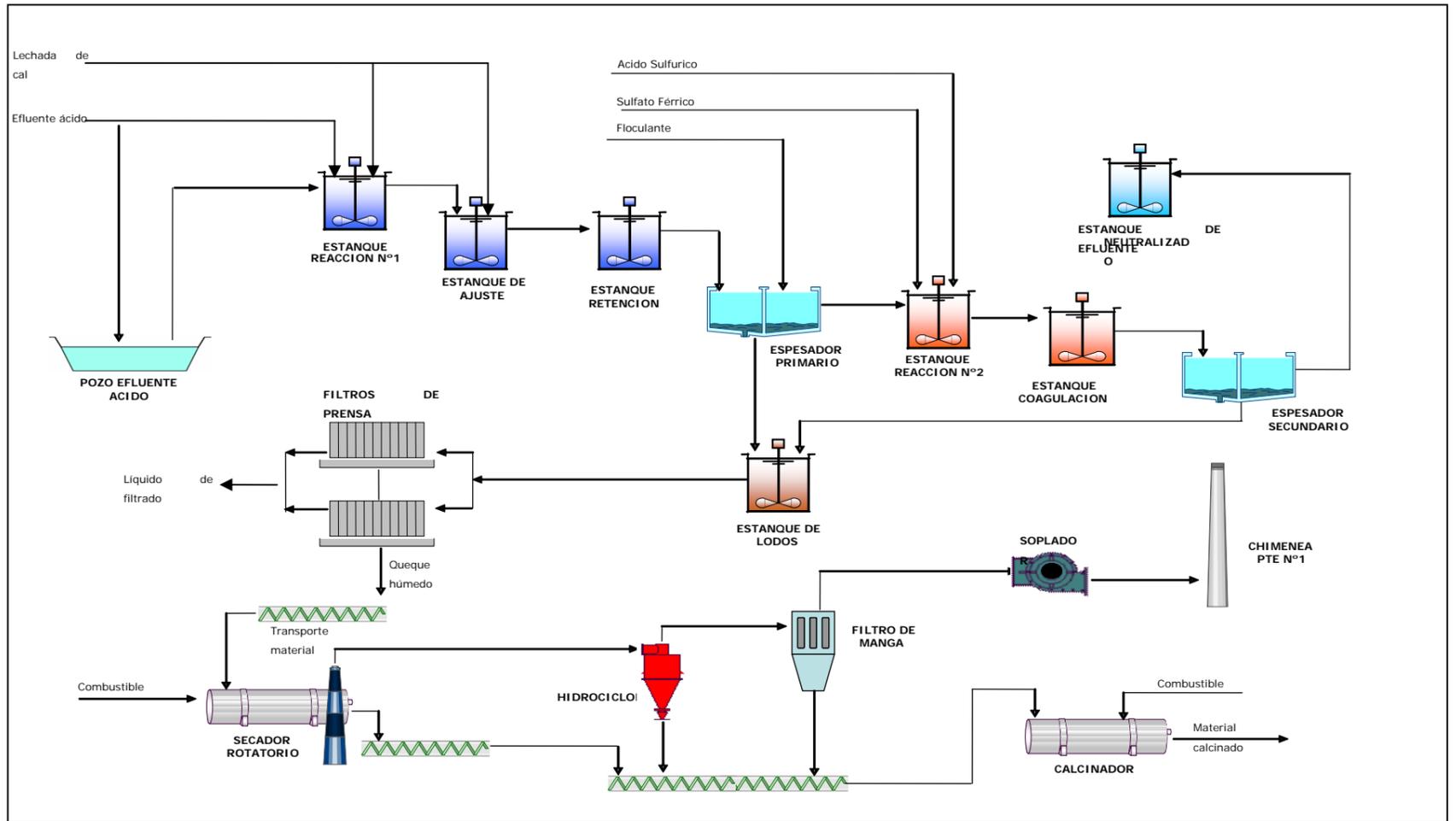


Fig. 1.13. Diagrama General de Planta de Tratamiento de Efluentes N°1

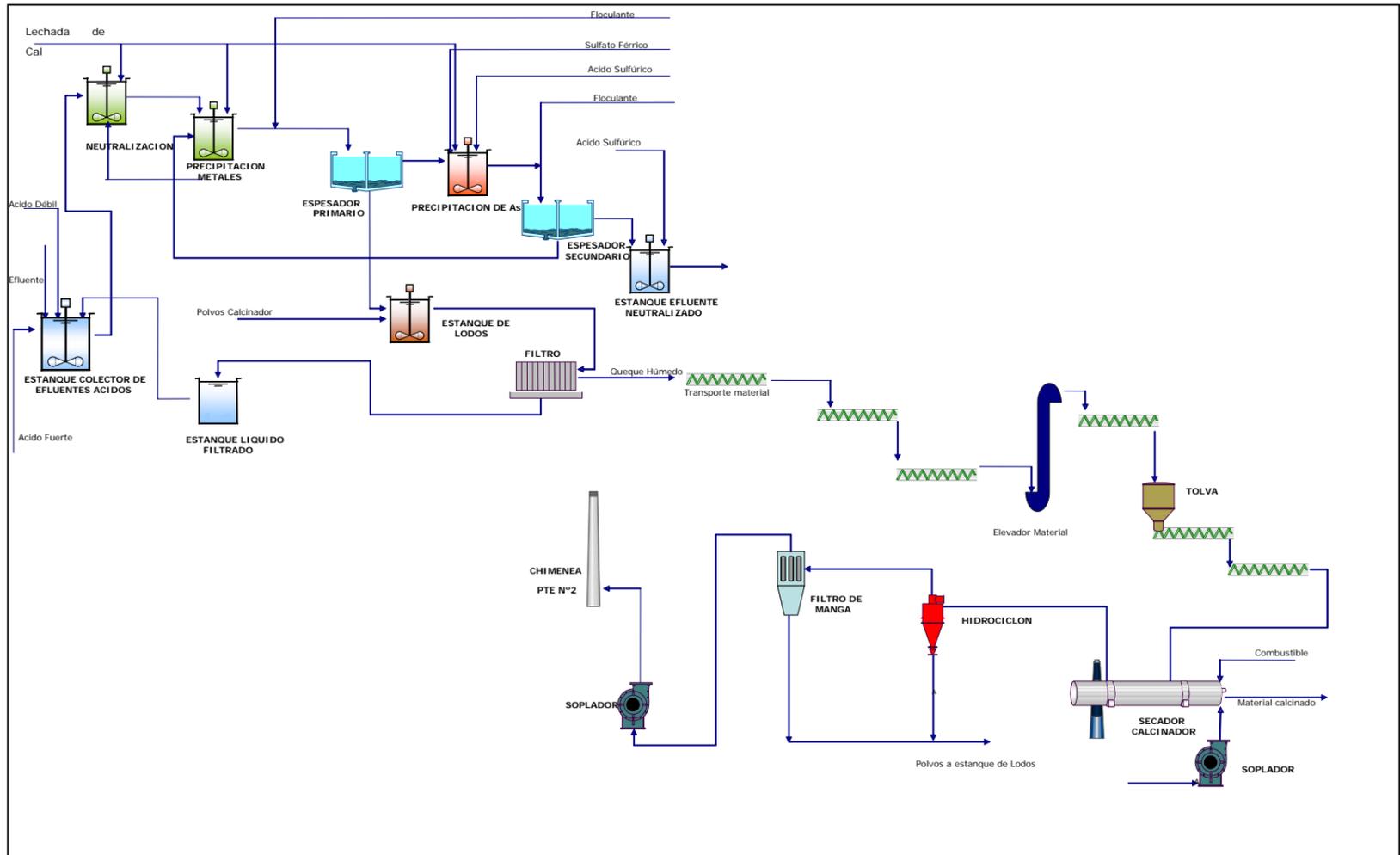


Fig.1.14. Diagrama Planta de Tratamiento de Efluentes N°2

Capítulo 2. Descripción Manejo de Gases

La Etapa de Manejo de Gases permite tratar los gases metalúrgicos generados en los equipos de fusión y conversión, Convertidores Teniente 1 y 2, además de Convertidores Pierce Smith 1, 2 y 3.

El tratamiento de los gases generados en los convertidores tiene como objetivo el enfriar y limpiar, o sea acondicionar estos gases antes de que ingresen a las Plantas para la producción de Ácido Sulfúrico.

Como se mencionó anteriormente Manejo de Gases se puede separar en 2 áreas: Manejo de Gases Convertidores Teniente (MAGA CT) y Manejo de Gases Convertidores Pierce Smith (MAGA CPS).

En el caso de *Manejo de Gases para los Convertidores Teniente*, consta con:

- Campana de Refrigeración,
- Cámara de Enfriamiento Evaporativo (SONIC)
- Precipitador Electrostático (JOY),

Manejo de Gases Pierce Smith:

- Campana de Refrigeración
- Cámara de Refrigeración Radiativo
- Precipitador Electrónico (MILJO)
- Ventiladores Tiro Inducido (VTI)

De esta forma el proceso permite una adecuada evacuación de los gases desde los equipos de fundición, un enfriamiento parcial de los gases, la separación de los polvos en suspensión y el transporte mecánico y neumático de estos polvos hasta su almacenamiento.

Además, los gases (preenfriados y prepurificados) son dirigidos mediante ductos hacia las respectivas Plantas de Acido.

2.1 Manejo de Gases Convertidores Teniente

Manejo de Gases consta con 3 etapas para el caso de los gases extraídos de los Convertidores Teniente, tal como se muestra en la siguiente Fig. 2.1:

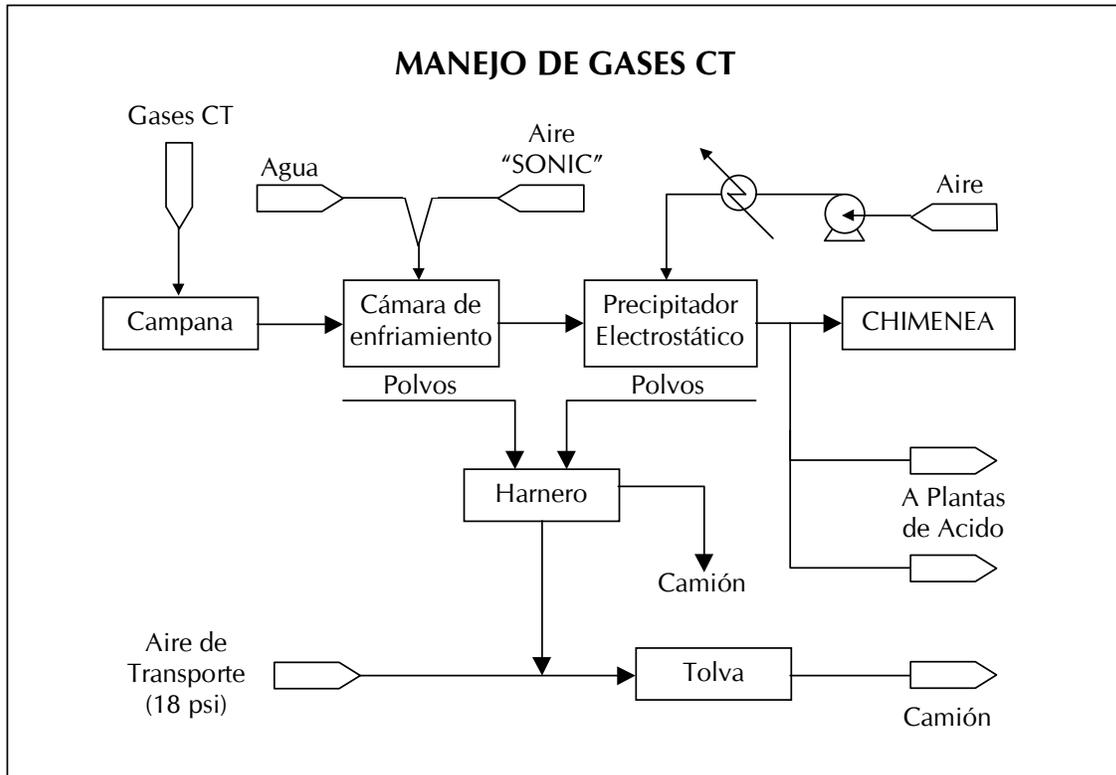


Fig. 2.1 Diagrama MAGA CT's

2.1.1 Campana Convertidor Teniente

Los gases que salen del Convertidor Teniente son captados por una campana montada justo en la boca del Convertidor, la función de esta es captar y enfriar los gases.

Los gases metalúrgicos salen con una temperatura aproximada de 1250°C desde cada convertidor, la adición de aire de dilución más el efecto de enfriamiento de los paneles refrigerados por agua de la campana reducen la temperatura del gas que sale de campana a alrededor de 625 °C, opera con un flujo de gases máximo de 70.000 Nm³/hr a una presión de 0 a -2 mm C.A, debido a la succión de gases por las Plantas de Ácido.

La campana están construidas de acero al carbono, en donde la compuerta delantera de esta es enfriada por aire y el resto de los paneles son enfriados por agua. En la Tabla 2.1 se muestran las dimensiones de la Campana CT.

La tolerancia entre el convertidor y la parte inferior de la campana ha sido diseñada para permitir una dilución con aire de 100%, en volumen estándar (es mayor en la operación normal). La refrigeración viene dada por las torres alpinas, es la encargada de entregar el suministro necesario para el enfriamiento en campanas y cámaras de enfriamiento del sistema MAGA.

Tabla 2.1 Características Campana Convertidor Teniente

Características	Unidades
Ancho (m)	4
Alto (m)	7
Largo (m)	4,4
Área (m2)	17,6
Codo	90°

Estos gases pasan a continuación a la Cámara de Enfriamiento Evaporativo (CEE).

2.1.2 Cámara Enfriamiento Evaporativo

El funcionamiento de la cámara de enfriamiento se basa en el agua que pasa del estado líquido a la fase de vapor, y es en este estado forma parte de la mezcla aire agua.

Para poder pasar del estado líquido a vapor, el agua necesita llegar a su estado de ebullición, y por lo tanto requiere de energía en forma de calor. Cuando este cambio ocurre en el seno de la mezcla agua aire, el calor lo tomará la mezcla de su energía interna, provocando una disminución de la temperatura de esta, este efecto de enfriamiento que toma calor de sí mismo, se le llama enfriamiento adiabático, por lo tanto la Cámara se denomina de enfriamiento evaporativo.

La Cámara de Enfriamiento Evaporativa (CEE) es la que dirige los gases provenientes de la campana hacia el ducto de traspaso y, los enfría además, recoge el polvo precipitado conduciéndolo por el traspaso de cadenas dispuesto al fondo y a lo largo del buzón continuo de la cámara y ducto de traspaso.

La cámara está diseñada para enfriar el gas hasta aproximadamente 350 °C, la mayor parte del enfriamiento es producido por el sistema evaporativo, el cual posee 9 lanzas rociadoras fabricadas por “SONIC”, conectadas desde el techo de las cámaras hacia abajo: 3 largas (4,2 [m]), 3 medianas (3,8 [m]) y 3 cortas (3,2 [m]), como muestra Fig. 2.2. La lluvia fina requerida es producida mezclando agua con aire comprimido a aproximadamente 6.2 bar (90 psig), el aire que ingresa por lanza es de aproximadamente 198 [Nm³/h] y en promedio el agua utilizada alcanza 160 l/min.

Tiene un diseño horizontal, la parte frontal que conecta a la campana, la cual está expuesta a la temperatura más alta, está construida de paneles de acero fundido enfriados por aire que son los primeros 6,5 m y el resto de los paneles son de acero al carbono. Más detalladamente se pueden ver las características en la Tabla 2.2.



Fig. 2.2. Lanzas rociadoras que componen el sistema Sonic

Tabla 2.2 Características Cámara Enfriamiento Evaporativo

	CT1	CT2
Ancho (m)	6,5	6,5
Alto (m)	5,4	5,4
Largo (m)	28	34,5
Área transversal (m2)	35,1	35,1

A continuación una descripción general del proceso de la Cámara de Enfriamiento Evaporativo de los Convertidores Teniente (Fig. 2.3).

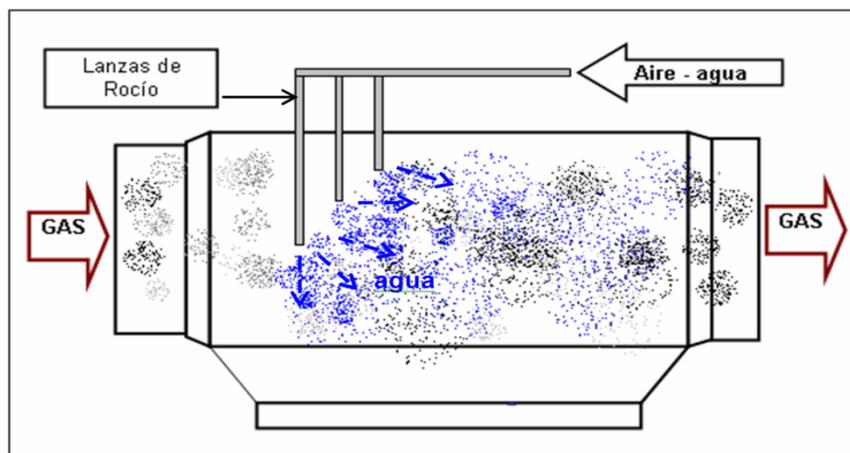


Fig. 2.3: Esquema operación de cámara de enfriamiento evaporativo.

Aproximadamente un 10-15% de los sólidos totales en el gas se deposita en la cámara de enfriamiento y el ducto de descarga. La mayor parte de estos sólidos consisten en escoria granulada y partículas relativamente gruesas que salen del CT. Bajo la cámara y el ducto de descarga se ha instalado un transportador de cadena para recuperar los sólidos captados aquí. El polvo se junta con el proveniente del PE y se lleva al harnero vibratorio donde se separa el material superior a $\frac{1}{4}$ ". El material grueso, superior a $\frac{1}{4}$ ", cae dentro de un depósito para retornar el proceso. El material fino, polvo y partículas de menos de $\frac{1}{4}$ ", caen dentro de una tolva del sistema de transporte neumático y desde éste, mediante aire a 18 psig se lleva por tubería hacia el silo de almacenamiento de polvo. Desde este silo se retirará mediante el empleo de un camión con un estanque sellado de transporte de polvo.

En la siguiente Fig. 2.4, se puede apreciar la parte lateral inferior de la cámara de enfriamiento evaporativo.



Fig. 2.4 Vista lateral cámara enfriamiento.

2.1.3 Precipitador Electrostático JOY.

La precipitación eléctrica utiliza las fuerzas que actúan sobre las partículas cargadas eléctricamente en la presencia de un campo eléctrico para efectuar la separación de aerosoles líquidos o sólidos de una corriente de gas. Por definición, puede considerarse aerosol cualquier partícula con un diámetro inferior a más o menos 2 o 3 micrómetros, que tenga velocidad terminal baja, no sujeta a fuerza de gravedad normal, y que generalmente flota en el aire por períodos de tiempo largos.

El proceso de Precipitación Electrostática puede ser descrito en tres pasos básicos.

- Carga de las partículas: El polvo, neblina o vapor suspendido en los gases es cargado eléctricamente.
- Colección de Partículas: El polvo cargado es pasado a través de un campo eléctrico donde las fuerzas eléctricas hacen que las partículas emigren hacia la superficie colectora. Luego, el polvo es separado de los gases mediante retención en las superficies colectoras.
- Remoción del Particulado: Remoción subsecuente de las partículas colectadas desde las superficies colectoras para depositarlas en las tolvas.

El Precipitador electrostático utiliza voltaje extremadamente alto para separar el polvo, vapor o niebla de la corriente del gas.

Un sistema de alimentación eléctrico convierte la corriente alterna existente en corriente continua de alto voltaje la cual es suministrada a los alambres de los electrodos emisores. Se crea un campo electrostático en el espacio entre los alambres y las placas colectoras puestas a tierra.

Además, en los alambres se produce un fenómeno de emisión de corona, indicando que se está llevando a cabo la ionización. Las partículas de polvo o neblina que se encuentren presentes se cargan eléctricamente desde las moléculas de gas ionizadas y emigran hacia las placas colectoras. El principio por el cual funciona el precipitador se describe en la Fig. 2.5.

Las placas y los alambres son sacudidos periódicamente y el material precipitado cae al fondo del Precipitador desde donde es extraído.

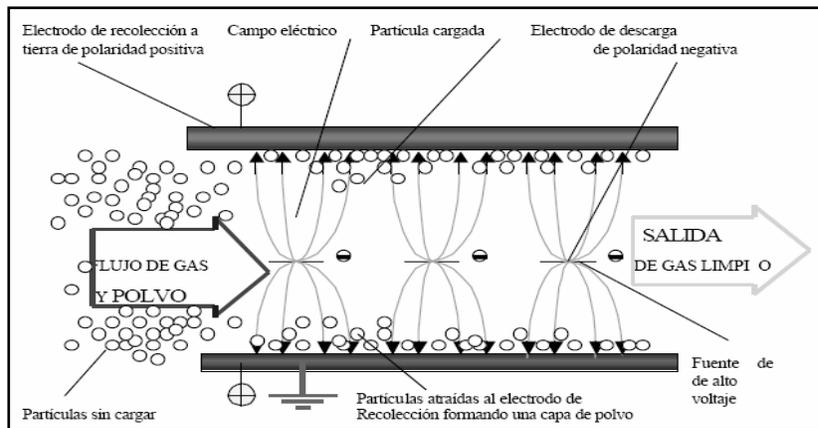


Fig 2.5 Principio Funcionamiento Precipitador

Cuando el PE está en funcionamiento, los compartimentos del aislador son presurizados en forma continua con aire caliente para repeler el polvo y la humedad que podrían ocasionar corto circuito en los aisladores.

Los sistemas de sacudimiento producen vibración en los componentes internos, y desprenden el polvo haciéndolo caer en las tolvas grandes del tipo “V”.

Los gases tratados continúan a través de la unidad para salir por la parte posterior de la caja. Estos gases más limpios y fríos son enviados mediante ductos hacia Planta de Ácido.

Los Precipitadores Electrostáticos se pueden apreciar interiormente en la siguiente Fig. 2.6 y sus características en la Tabla 2.3⁹.

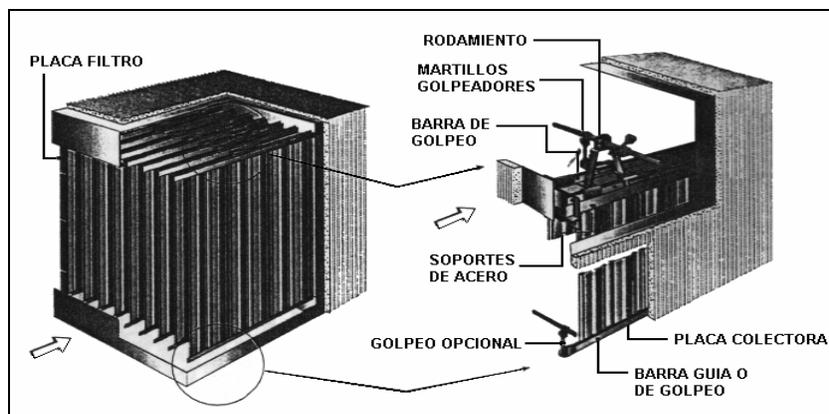


Fig 2.6 Diagrama Interior Precipitador

Tabla 2.3. Características Precipitador Electrostático⁹.

Fabricante:	Joy Manufacturing Co
Eficiencia de colección	
Máxima	97%
Mínima	88%
Area total de colección	10.000 m ²
Caída de presión: 3 campos de serie	0.25(kpa)
2 campos de serie	0.25(kpa)
Velocidad del gas: 3 campos de serie:	1.4 m/s
2 campos de serie	1.4 m/s
Tiempo de retención: 3 campos de serie	8.6 s
2 campos de serie	5.7 s
Numero de campos	3
Largo	4 m
Numero de buzón por precipitador	2
Velocidad de migración:3 campos	5.6 cm/sec
2 campos	5.08 cm/sec
Angulo mínimo del fondo del deposito	55°
Espesor cubierta	6 mm
Material del compartimento del aislador	Acero Fundido
Dispositivos internos de distribución	
Numero y tipo de golpeadores	4 martillos tipo giratorio
Numero de puertas de acceso	
Techo	3
Golpeadores	8
Buzón	3
Compartimento de los aisladores	12
Entrada al precipitador	1
Salida del precipitador	1
Sistema de colección	
Numero de pasajes por precipitador	35
Espacio de pasajes	275 mm
Espesor del material recolector	1 mm

Superficie de colección total por precipitador	10000 m ²
Máxima superficie golpeada de colección en un instante	75
Superficie de descarga	45 x 10 ⁻⁶ (mA/cm ²)

La temperatura del Precipitador debe ser cercana a los 400°C, no mayor a este valor según especificaciones de diseño, para evitar daño al equipo y asegurar un funcionamiento eficiente. Las temperaturas excesivas pueden resultar en un graves a los elementos internos del Precipitador, además las temperaturas bajas también producen deterioros dentro de estos, ya que se puede producir condensación dentro del equipo por lo que es esencial que todas las piezas del Precipitador se mantengan a una temperatura de operación superior al punto de condensación del gas que está siendo tratado.

Generalmente se produce corrosión cuando ocurre condensación en la presencia de álcali, cloruros, sulfuros u otros agentes corrosivos que pueden estar presentes en la corriente de gas.

También, la presencia de humedad en los elementos colectores formará un lodo que es extremadamente pegajoso y por lo tanto difícil de sacar y poco económico de desprender. Esto puede evitarse dejando que los gases pasen a través del tratador hasta que la unidad esté por sobre el punto de condensación, antes de aplicar la energía eléctrica al Precipitador.

Ya descrito los equipos que capturan, enfrían y limpian los gases provenientes de los Convertidores Teniente, se pueden apreciar en la Fig. 2.7 y Fig 2.8, su configuración y disposición en el espacio⁹.

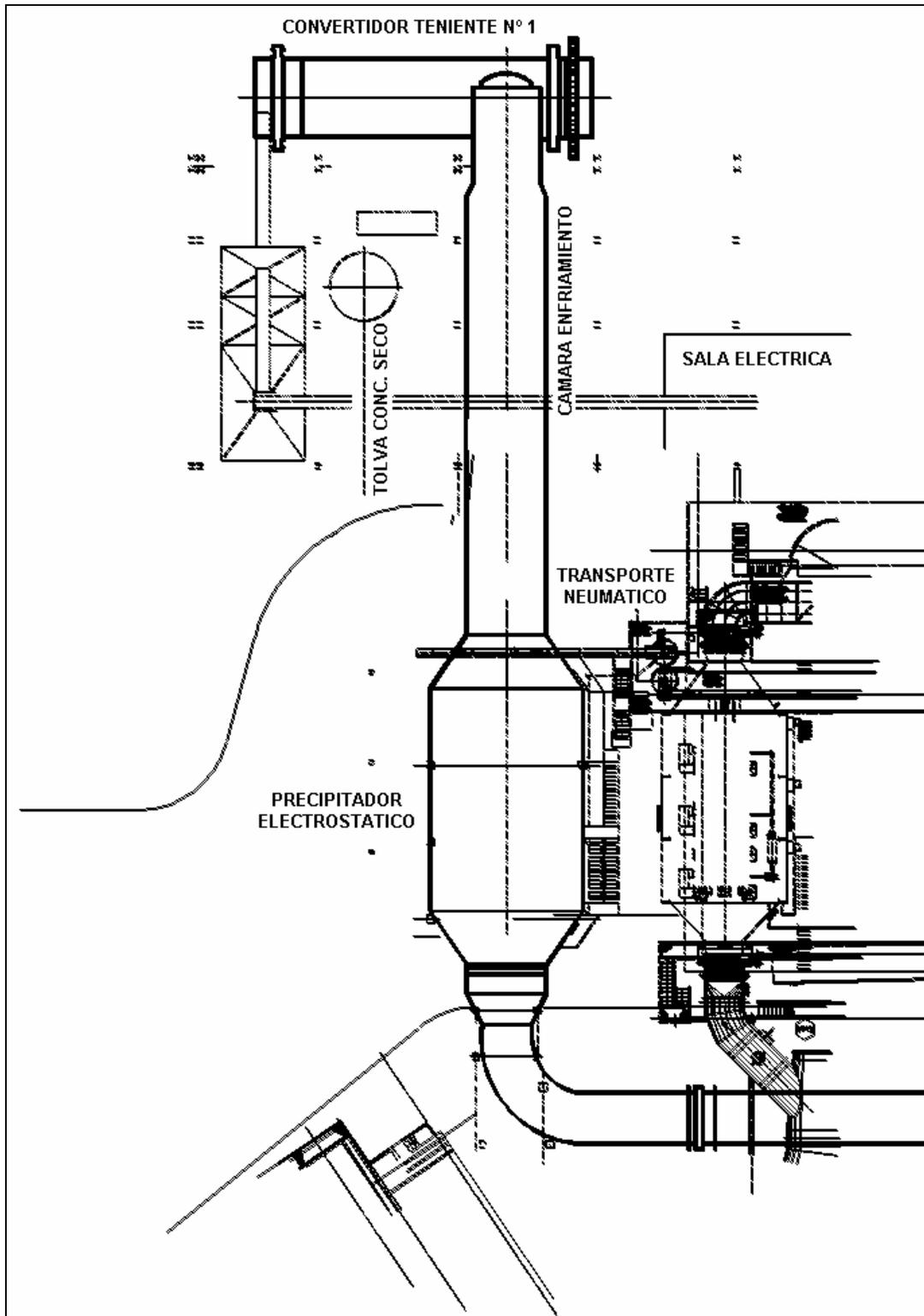


Fig. 2.7. Diagrama Manejo de Gases Teniente 1

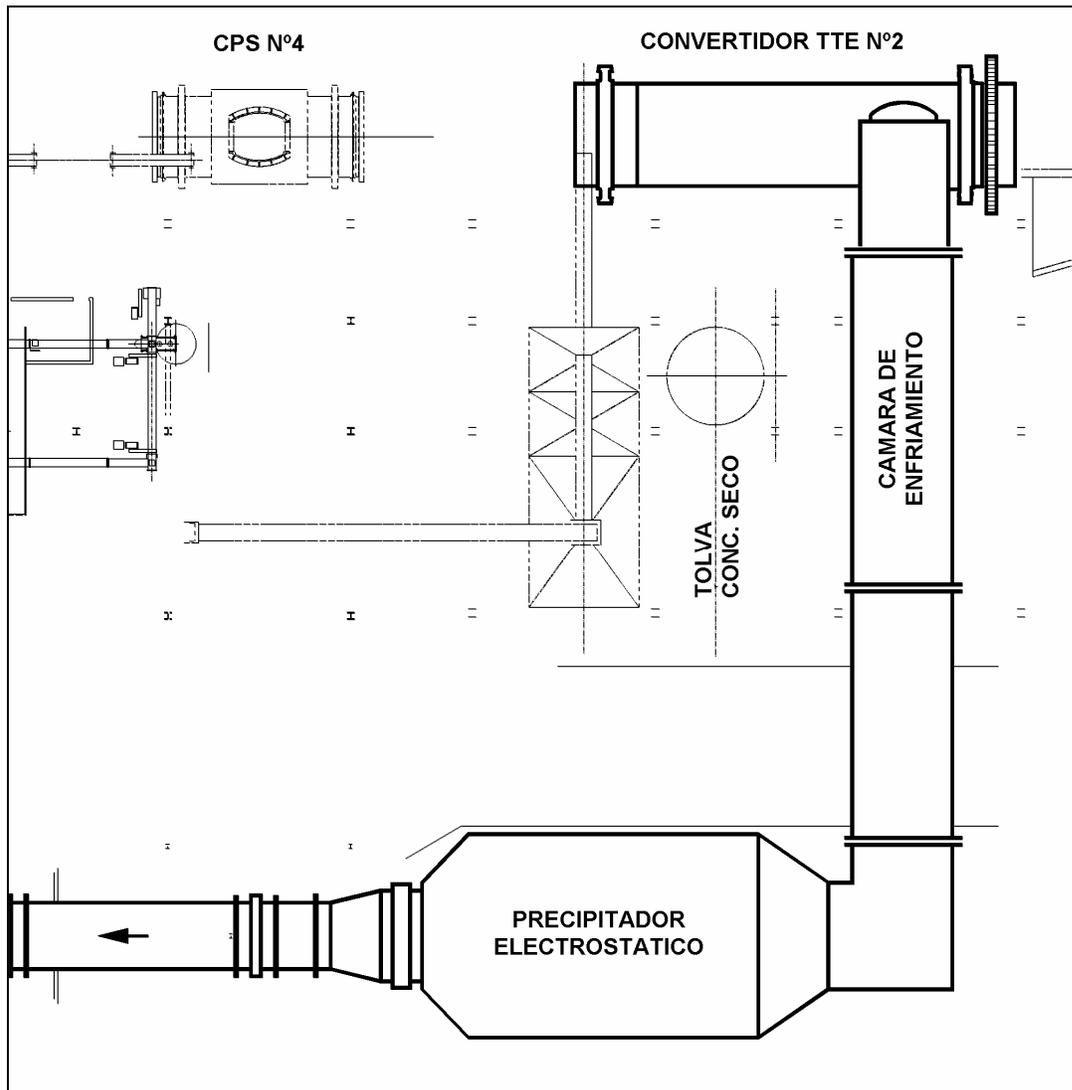


Fig 2.8 Diagrama Manejo de Gases Teniente 2

2.2 Manejo de Gases Convertidores Pierce Smith

2.2.1 Campana CPS

La captación de gases provenientes de los convertidores, consiste en campanas que se depositan en la boca de estos, estas campanas son mixtas, o sea paneles refrigerados con agua y secos de acero fundido, cada campana posee una compuerta frontal el cual tiene un sistema de accionamiento y un circuito cerrado de agua de enfriamiento.

Los paneles de acero fundido son ASTM A 148 gr 80-50, los paneles refrigerados de acero inoxidable AISI 316L y los paneles refrigerados de acero al carbono ASTM A 515 gr 70, marcos refrigerados de acero inoxidable y acero al carbono. Cada campana posee una compuerta frontal con un sistema de accionamiento y un circuito cerrado de agua de refrigeración.

La dilución en campana aproximadamente 100%-120% (respecto a gas en boca teóricamente), donde llega a una temperatura de 600°C

El gas se enfría en la campana por la circulación de agua a través de los paneles refrigerados y por la transferencia de calor por convección y radiación desde las paredes externas hacia los alrededores de la campana. Sin embargo, el mayor enfriamiento del gas, proveniente de la boca de los CPS's, se produce al mezclarse con aire de dilución que ingresa a través del espacio que queda entre la campana y el casco del CPS, este espacio junto a la presión interior de la campana provocan la entrada del aire de dilución que ingresa al sistema y determina la temperatura de los gases a la salida de la campana.

Las principales condiciones operacionales se muestran en la Tabla 2.4:

Tabla 2.4. Condiciones Operacionales Campanas CPS

Equipo	Flujos Gases [Nm ³ /h]			Temperatura [°C]	
	Entrada	Aire infiltrado	Salida	Entrada	Salida
Campanas	39040 - 47820	31232 - 47820	70272 - 95640	1250	600 - 742

Los gases fluyen a través de la campana y de todo el sistema, por la aplicación de una leve succión que es controlada por Ventiladores de Tiro Inducido, de modo de evitar emanaciones al ambiente y mantener un nivel controlado de infiltración de aire al interior de la campana.

Las campanas de captación de gases disponen de un circuito primario de agua tratada y control de pH para el enfriamiento de los paneles refrigerados. Este mismo circuito cerrado alimenta las pantallas matapolvos de las pre-cámaras.

La Fig. 2.9 muestra la configuración de las campanas de CPS's, se tiene la vista frontal y laterales de estas.

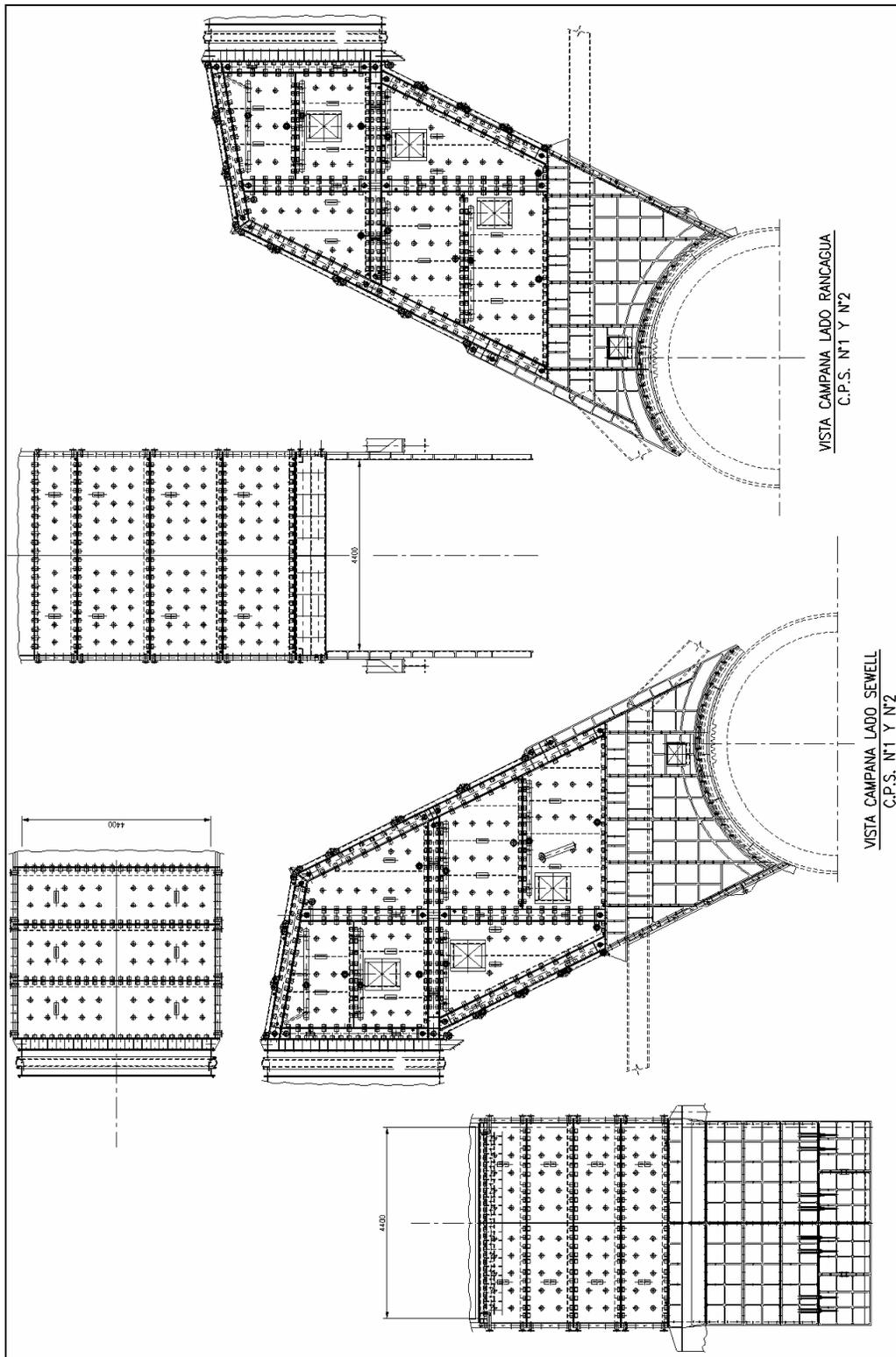


Fig. 2.9 Campana Convertidores Pierce Smith

2.2.2 Sistema de Enfriamiento Radiativo

Los gases captados por campana son conducidos al sistema de enfriamiento radiativo, donde el enfriamiento se produce por pérdida de calor por radiación y por convección en los 4 tubos radiantes que posee, además consta de una pantalla mataplovo.

Este sistema posee una precámara con una pantalla mataplovo en su interior, donde el polvo suspendido en el gas impacta produciéndose una decantación de estos, aproximadamente se recupera un 15%.

Los gases siguen su curso pasando por 4 tubos radiante, los cuales tiene forma de U invertida (LIRA) de 1,5 m de diámetro y 20 m de largo, llegando a una segunda cámara donde ya se ha perdido una gran cantidad de calor y además perdiendo polvos debido a los cambio de dirección del flujo de gas (Fig 2.10). Este polvo es descargado hacia un sistema de transporte neumático que los retorna al proceso.

La temperatura conseguida en esta zona es de 350°C a 390°C y la infiltración es de un 3% (respecto a gas entrada cámara de enfriamiento según diseño).

El Sistema de Enfriamiento Radiativo, se caracteriza principalmente por enfriar el gas, sin aumentar la masa de él, ya que no ocupa agua. En este sistema, las partículas sólidas de mayor tamaño transportadas en el gas, se separan de la corriente del gas principal mediante cámaras de gran sección transversal que cambian la dirección y reducen la velocidad del gas, permitiendo la sedimentación y el enfriamiento de las partículas.

Los gases a la salida de las cámaras de enfriamiento son conducidos a un ducto de alta velocidad, donde estos gases son mezclados y dirigidos a 2 precipitadores electrostáticos (MILJO).

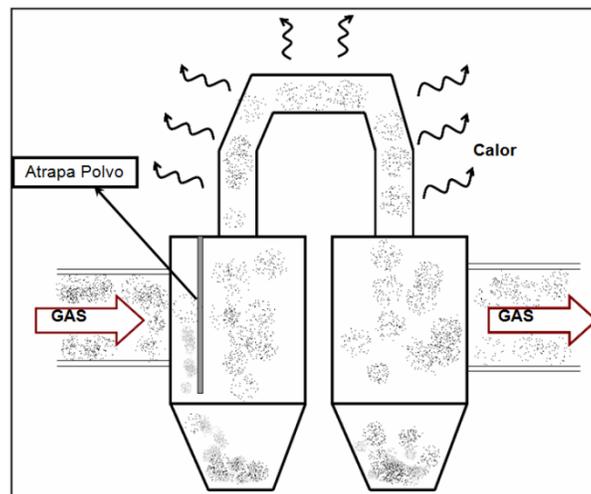


Fig 2.10 Cámara Enfriamiento Radiativo

El sistema de Enfriamiento Radiativo se puede dividir en tres partes:

- Precámara de Polvos (que incluye matapolvo)
- Enfriador Radiativo
- Cámara de Salida

Precámara de Polvos

El Sistema de Enfriamiento Radiativo posee, en primer lugar, una precámara con una pantalla matapolvo refrigerada con agua por su interior, en la cual impactan las partículas contenidas en el gas, produciéndose una decantación de una parte de las partículas más pesadas.

Enfriador Radiativo (ER)

Posteriormente los gases pasan por cuatro (4) tubos radiantes (tubos de acero, con sus estructuras de soporte y plataformas de operación correspondientes), en forma de U invertida, (Lira) de 1,5 metros de diámetro hacia una segunda cámara, liberando hacia la atmósfera en este sistema, una significativa cantidad de calor por radiación y convección.

Los tubos radiantes que salen de la primera cámara, ingresan por la parte superior a una segunda cámara, permitiendo la comunicación entre ambas.

Cámara de Salida

Desde este sistema el gas sale a una temperatura entre 350°C y 370° C, dependiendo principalmente del flujo de soplado y de la dilución de aire en las campanas.

La variación de la temperatura de salida es controlada mediante el accionamiento eléctrico de una válvula tipo mariposa, instalada en uno de los cuatro (4) tubos, de modo que se pueda aislar un tubo, es decir, variar la superficie radiativa mediante la apertura o cierre de esta válvula.

Las características principales de los ER se muestran en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5. Dimensiones Sistema de Enfriamiento.

Equipo	Precámara de Polvos			Enfriador Radiativo				Cámara de Salida		
	Largo [m]	Ancho [m]	Alto [m]	Nº de tubos	Diám. [m]	Largo [m]	Altura [m]	Largo [m]	Ancho [m]	Alto [m]
ER	4,6	8	9.7	4	1.5	40	20	7.7	10	8

Las principales condiciones operacionales se muestran en la tabla 2.6.

Tabla 2.6. Condiciones Operacionales Sistema de Enfriamiento

Equipo	Flujos Gases [Nm ³ /h]			Temperatura [°C]	
	Salida pre-cámara	Aire infiltrado	Salida enfriador	entrada	salida
ER	70.272-95.640	2.108-2.869	72.380-98.509	674-742	300-380

Otras condiciones operacionales (diseño):

Velocidad del gas en tubos : 9 – 14 m/s

Sector con aislación : tolvines y paredes laterales de cámara

Pérdidas totales de calor : 35.000 – 40.000 MJ/h

Eficiencia de captación de Polvo : 15 %

Pantalla Matapolvo refrigerada con agua:

Flujo de agua : 80 m³/h

Diferencia de Temperatura : 10 °C

El polvo grueso captado en el Sistema de Enfriamiento Radiativo, descarga desde ambas cámaras y es manejado por transportadoras de rastras hasta un punto común con el objeto de ser transportados, en forma neumática, a las tolvas de concentrado seco de los CT's.

En la Fig. 2.11 se puede apreciar la vista frontal y lateral de los enfriadores radiativos.

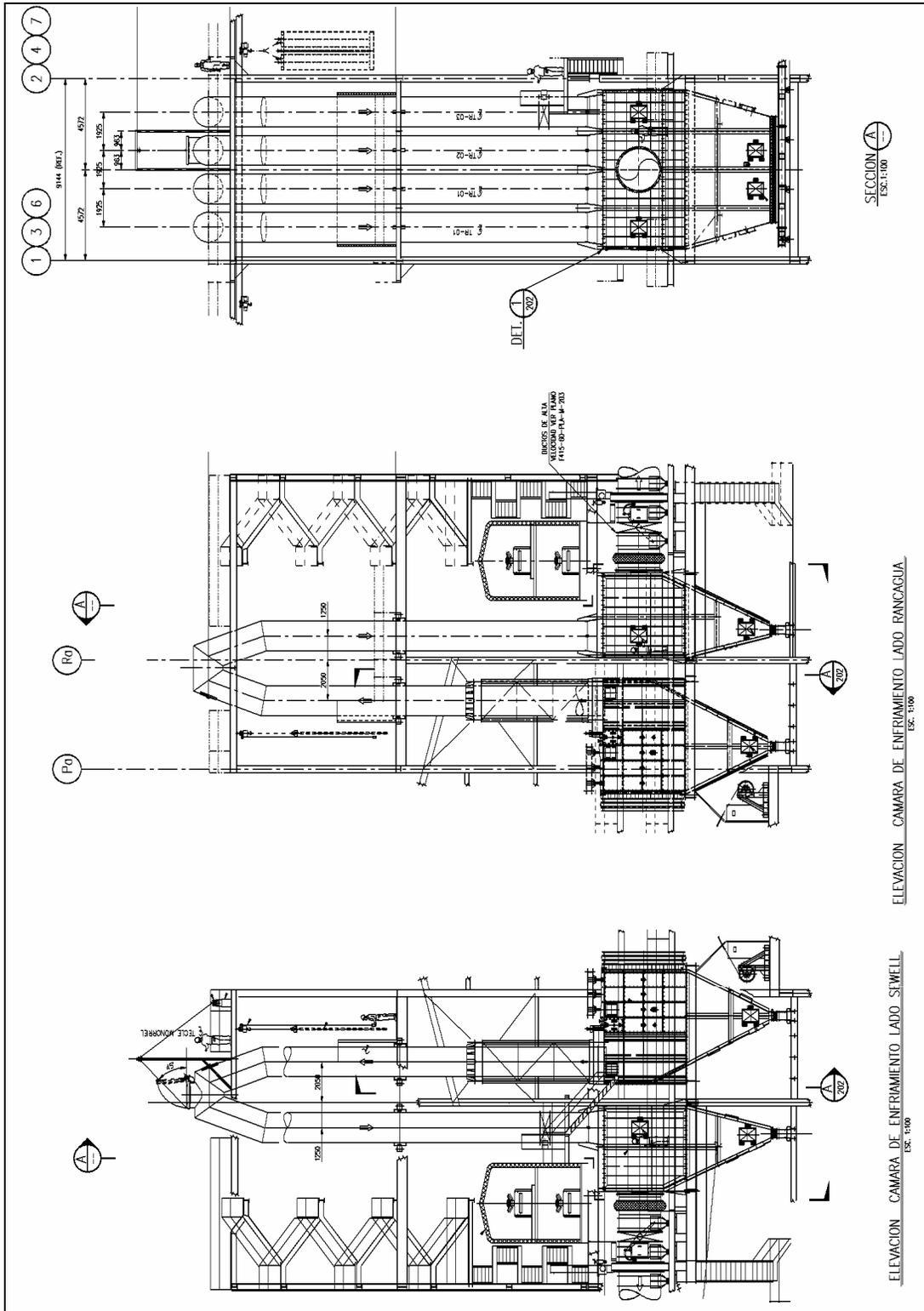


Fig.2.11 Cámara Enfriamiento Radiativo

2.2.3 Sistema de Precipitación Electrostática

Los gases provenientes de los Enfriadores Radiativos se mezclan en los Ductos de Alta Velocidad y son conducidos hacia dos Precipitadores Electrostáticos, donde son retirados los polvos finos contenidos en los gases.

Los Precipitadores Electrostáticos operan a un flujo máximo de 110.000 (Nm³/h) cada uno y a una temperatura máxima de 380°C. Una disposición general de los Precipitadores Electrostáticos se muestra en la Fig. 2.12 y 2.13.

Los Precipitadores Electrostáticos se han establecido como la tecnología más usada para la captación de partículas contenidas en gases, debido a sus ventajas comparativas con otros sistemas, entre las cuáles se pueden mencionar su baja presión diferencial, su habilidad para captar partículas muy finas, bajo costo de operación y su alta eficiencia (95 % o más). Los equipos instalados en este sistema son dos precipitadores marca FLS MILJO, suministrados por TEMAC.

Los gases ingresan y salen del equipo a través de piezas de transición, tipo “C”, localizadas en los extremos de la caja del precipitador. La entrada y salida de los precipitadores están equipadas con una placa deflectora para asegurar una distribución uniforme de los gases y un flujo aerodinámicamente equilibrado a través del equipo. Las placas colectoras están suspendidas del techo del precipitador y provistas de barras golpeadoras para evitar el depósito de polvo en ellas. Los electrodos del sistema de emisión están suspendidos en aisladores de apoyo instalados en el techo del precipitador, en cajas calentadas y aisladas térmicamente al igual que las placas colectoras. Los electrodos de emisión son golpeados en secuencia por martillos de percusión.

El fondo de cada precipitador está equipado con dos tolvas longitudinales para descarga de polvo. Las paredes de estas tolvas están provistas de calefactores eléctricos y un sistema de extracción de polvo de cada tolva, compuesto de un transportador de rastras que descarga en una válvula tipo doble compuerta que sella la entrada de aire hacia el interior del precipitador.

Los polvos captados en los Precipitadores son transportados por medio de rastras, incluidas en el suministro del PE, hacia el sistema de Transporte Neumático del tipo Vaso Presurizado, compuesto de un harnero y tolva intermedia, un estanque presurizado y un conjunto de cañerías y válvulas para enviar el polvo a las tolvas de concentrado de los Convertidores Teniente. Utiliza como aire de transporte el actual suministro de 20 PSI y como aire de control para las válvulas, aire de instrumentación de 90 PSI.

Las principales condiciones operacionales de cada uno de los Precipitadores se muestran en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7. Condiciones Operacionales PE por diseño

Equipo	Flujos Gases [Nm ³ /h]			Temperatura [°C]	
	Entrada	infiltración	salida	entrada	salida
Precip. Elec.	36918-101494	1108-3045	38026-104539	295-380	278-370

Características generales de los Precipitadores Electrostáticos

Disposición del Precipitador

- Cada precipitador posee 3 campos con una configuración de buses seccionados por campo.
- La presión de diseño de la cámara y tolva es de -4 kPa.
- Tanto la cámara como la tolva poseen espesores mínimos (6mm) y poseen 2 tolvas con paredes a 70° respecto la horizontal.

Sistema Colector

- El sistema colector esta formado por 18 pasadas de gas, por cada cámara, con una separación de 400 mm y resultando un área colectora efectiva de 5.535 m².
- Posee un sistema de limpieza por medio de martillos golpeadores internos, accionados por motorreductores.
-

Sistema de Descarga

- El sistema está compuesto por 648 electrodos del tipo "PIN" y son limpiados por sistema de martillos golpeadores internos.

Equipos Auxiliares

- La plancha de revestimiento es de aluminio de 0.7 mm de espesor.
- Posee una rastra colectora para servicio pesado con cadena tipo "flight".
- La caja tiene un ancho de 8.110 mm, 20.716 mm de alto y 20.988 mm de largo.
- Incluye válvula de doble compuerta en la descarga de 300x300.

Aspectos Eléctricos

Cada Precipitador Electrostático posee los siguientes equipos eléctricos:

- Transformadores Rectificadores (TR's) (3).
- Motor de ventilador aire de purga (1).
- Motores de accionamiento para sistema de golpeo (7).
- Sistema de calefactores de aisladores con control termostático (12).
- Motor de transportador de cadena (2).

Consumos de los Precipitadores

- Potencia Instalada T/R = 314 kVA
- Potencia Instalada Calefactores = 204 kVA
- Potencia Instalada EQ.AUX. = 22 kVA
- Total Potencia Instalada 540 kVA (@ Cos ϕ = 1)
- Potencia Consumida T/R = 2 x 118 kW
- Potencia Consumida Calefactores = 102 kW
- Potencia Consumida EQ. Auxiliares = 11 kW
- Total Potencia Consumida = 349 kW

Para los Precipitadores, considerando que se trabaja en un régimen de 24 horas diarias por 360 días al año se tiene un consumo anual de 3.015,3 MWh.

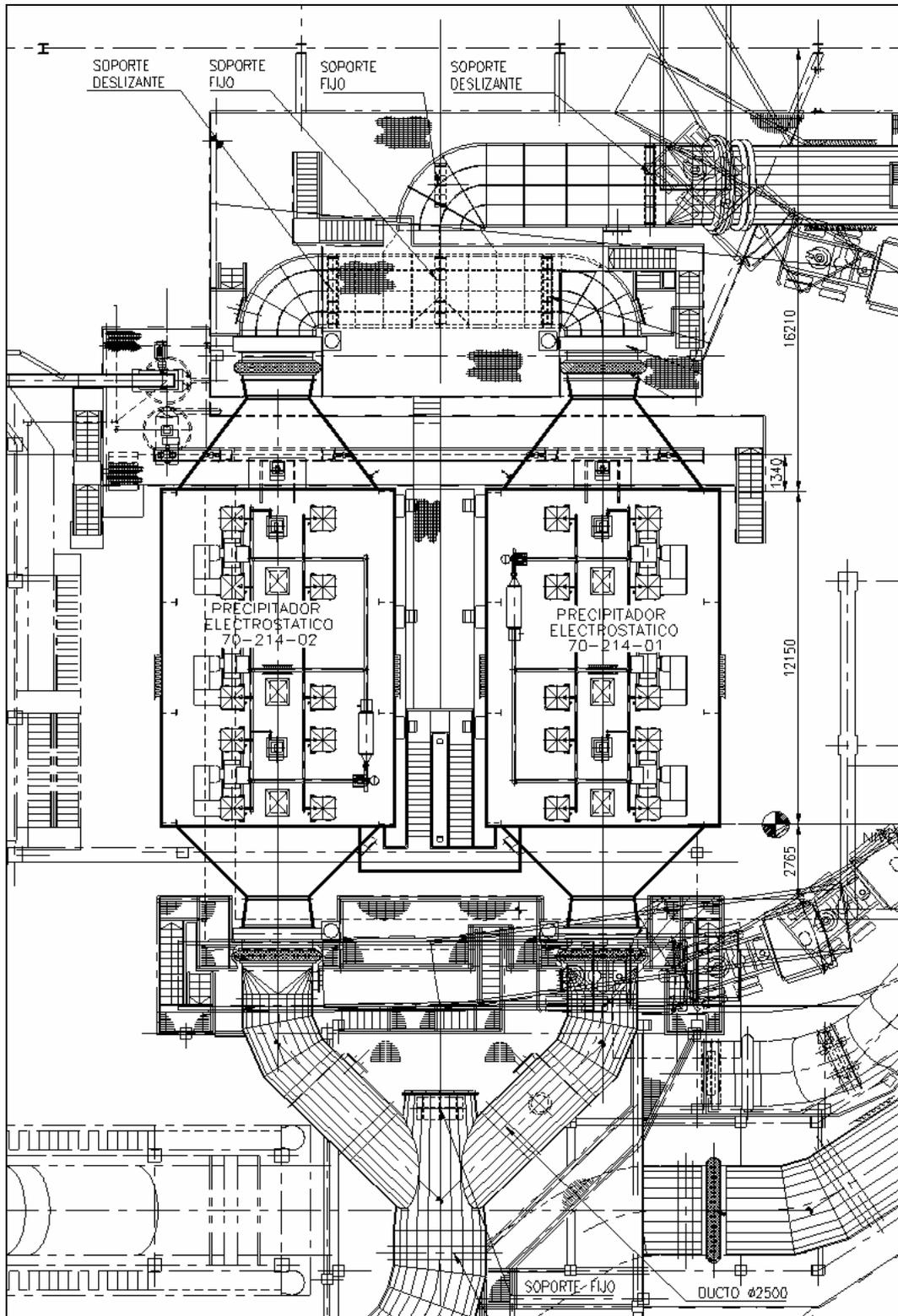


Fig. 2.12 Precipitador Electrostático CPS MILJO

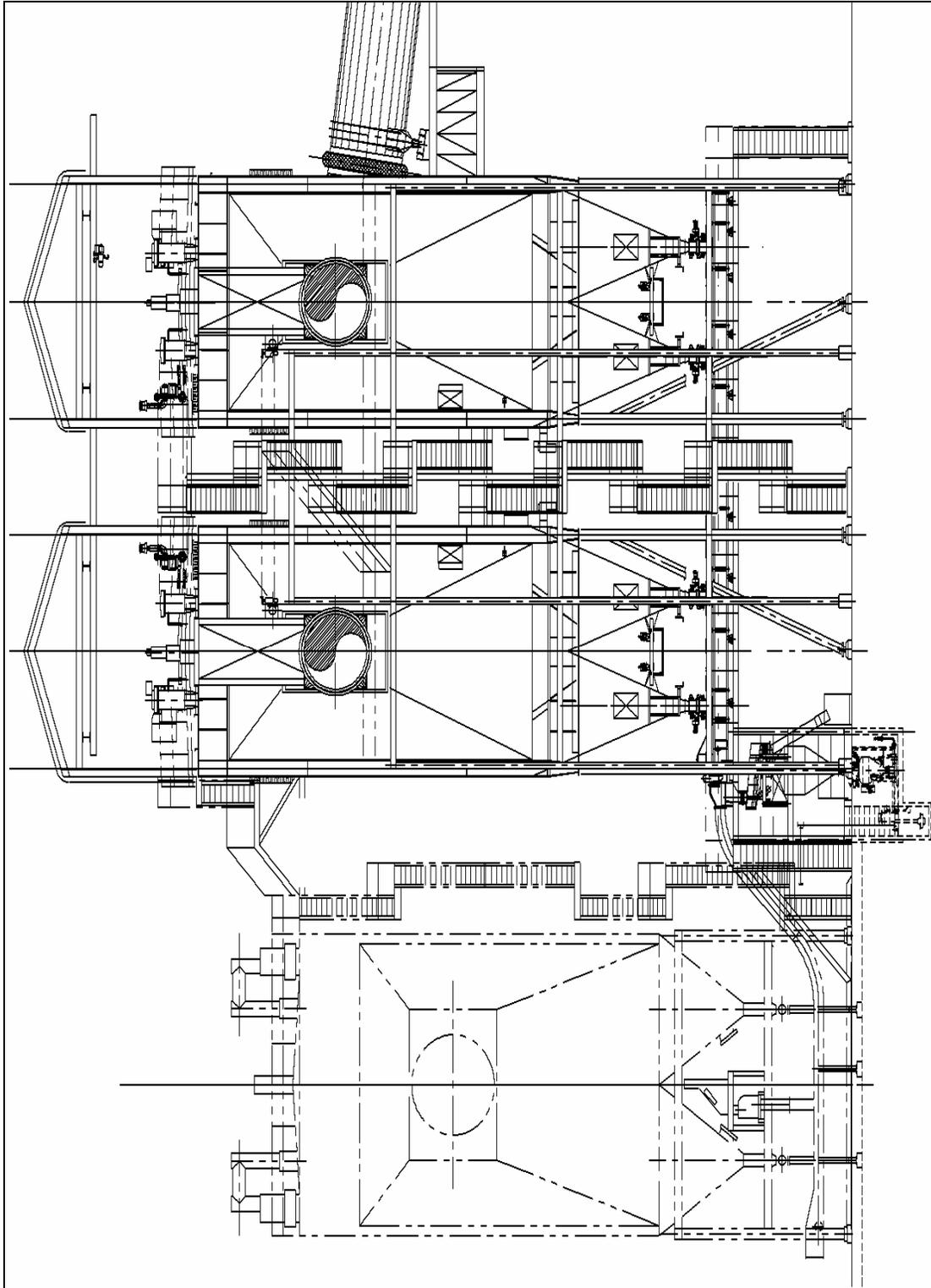


Fig. 2.13 Precipitador Electrostático MILJO

2.2.4 Sistema de Impulsión Gases

Los gases de salida de los precipitadores son conducidos a Ventiladores de Tiro Inducido los cuales aspiran los gases de cada campana, evitando así una mayor cantidad de emisiones fugitivas, además debido que para conducir los gases hacia las Plantas de Limpieza de Gases, es necesario vencer las pérdidas de carga del circuito se poseen dos Ventiladores de Tiro Inducido (una disposición general de los Ventiladores se muestra en la fig 2.14). Los Ventiladores son suministrados por BAFCO, representantes de HOWDEN BRASIL

Estos ventiladores se encuentran equipados con variadores de frecuencia (VDF), para así regular la velocidad de succión de estos equipos. Además posee un sistema de giro lento con conexión automática bajo 50 rpm y lo mantiene a 26 rpm hasta que la temperatura al interior sea inferior a 100°C, así se evitan posibles pandeos del eje del ventilador.

Y luego estos ventiladores descargan los gases a ductos de alta velocidad, ya a una temperatura de 360°C aprox.

Sus principales características son indicadas a continuación:

- Equipos de velocidad variable, con operación en paralelo (TAG: 80-172-01/02)
- Flujo de gases a VTI:
 - Mínimo 80.000 Nm³/h (1VTI operando)
 - Medio 160.000 Nm³/h (1 o 2 VTI operando)
 - Máximo 220.000 Nm³/h (2 VTI operando)
- Máxima pérdida de carga acumulada : 320 mm. c.a.
- Contenido de polvo en gases : 0.07 – 0.14 g/ Nm³
- Temperatura de gases : 271 – 385°C

Los Ventiladores son del tipo centrífugo de doble aspiración, álabes inclinados hacia atrás, carcasa de acero ASTM A 515 Gr. 70, rodete de acero inoxidable AISI 316L, Q = 80.000 a 160.000 (Nm³/h), presión estática 4,0 kPa y temperatura máxima de 400 (°C).

Motor del Ventilador de Tiro Inducido, 600 (rpm), 600 V / 50 (Hz) / 3 fases.

Sistema de giro lento para Ventilador de Tiro Inducido, con encendido automático bajo 50 rpm y conexión a 26 rpm.

Los variadores de frecuencia (VDF) son General Electric (USA). El conjunto motor-VDF es integral y el VDF cuenta con una CPU de 32 bits la cual ejecuta rutinas de protección y control en base a modelación matemática del motor con un grado de precisión de 0,2%.

Sistema de Control

Posee un suministro completo, que incluye sistemas de monitoreo para vibraciones y temperaturas

Disposición de los ventiladores.

Los ventiladores son de diseño DWDI, Arreglo 3, disposición CW, entrada vertical, descarga horizontal.

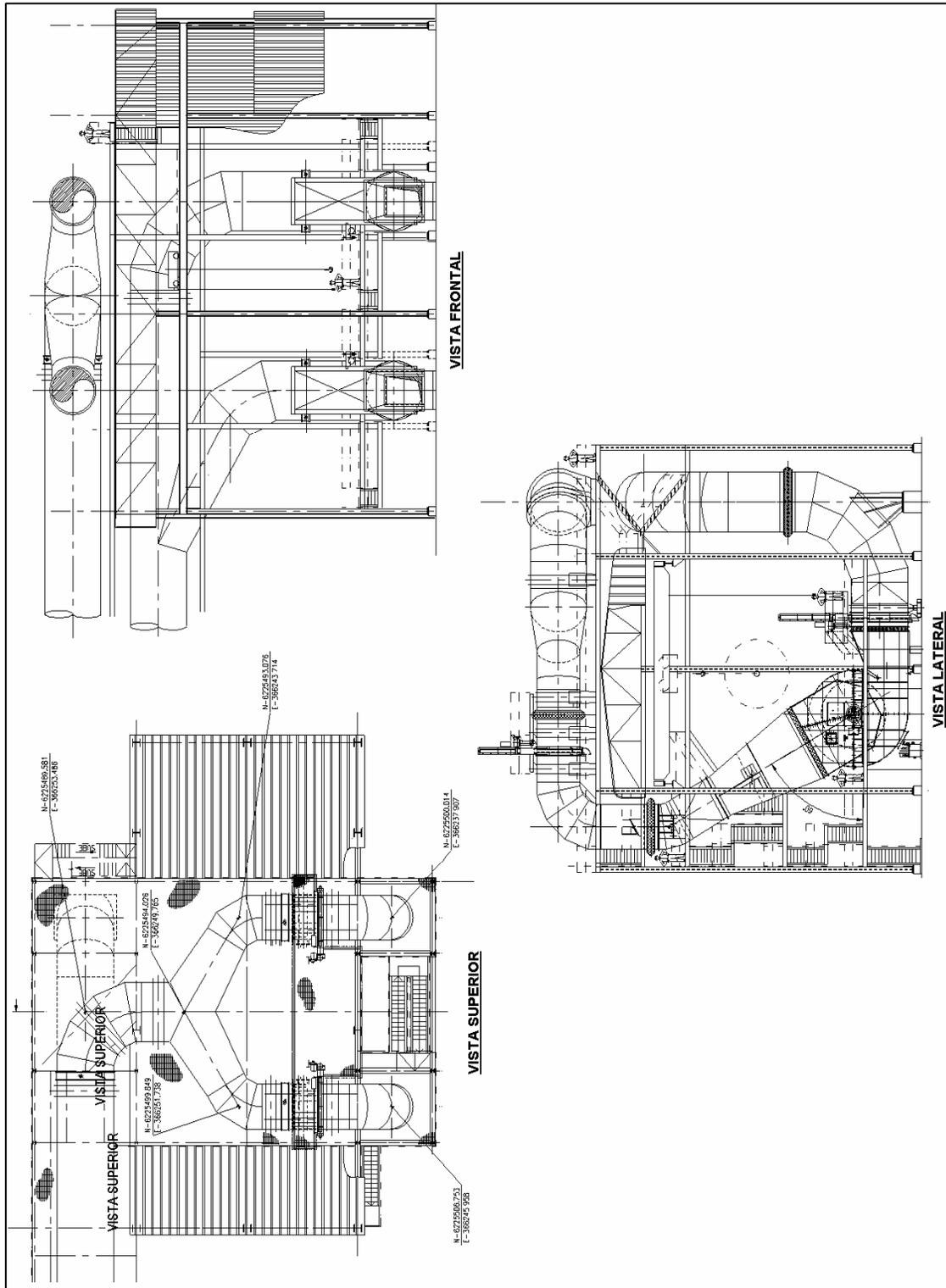


Fig 2.14 Ventiladores Tiro Inducido

La siguiente Fig 2.15 presenta la curva entregada por Howden como la curva característica de los ventiladores.

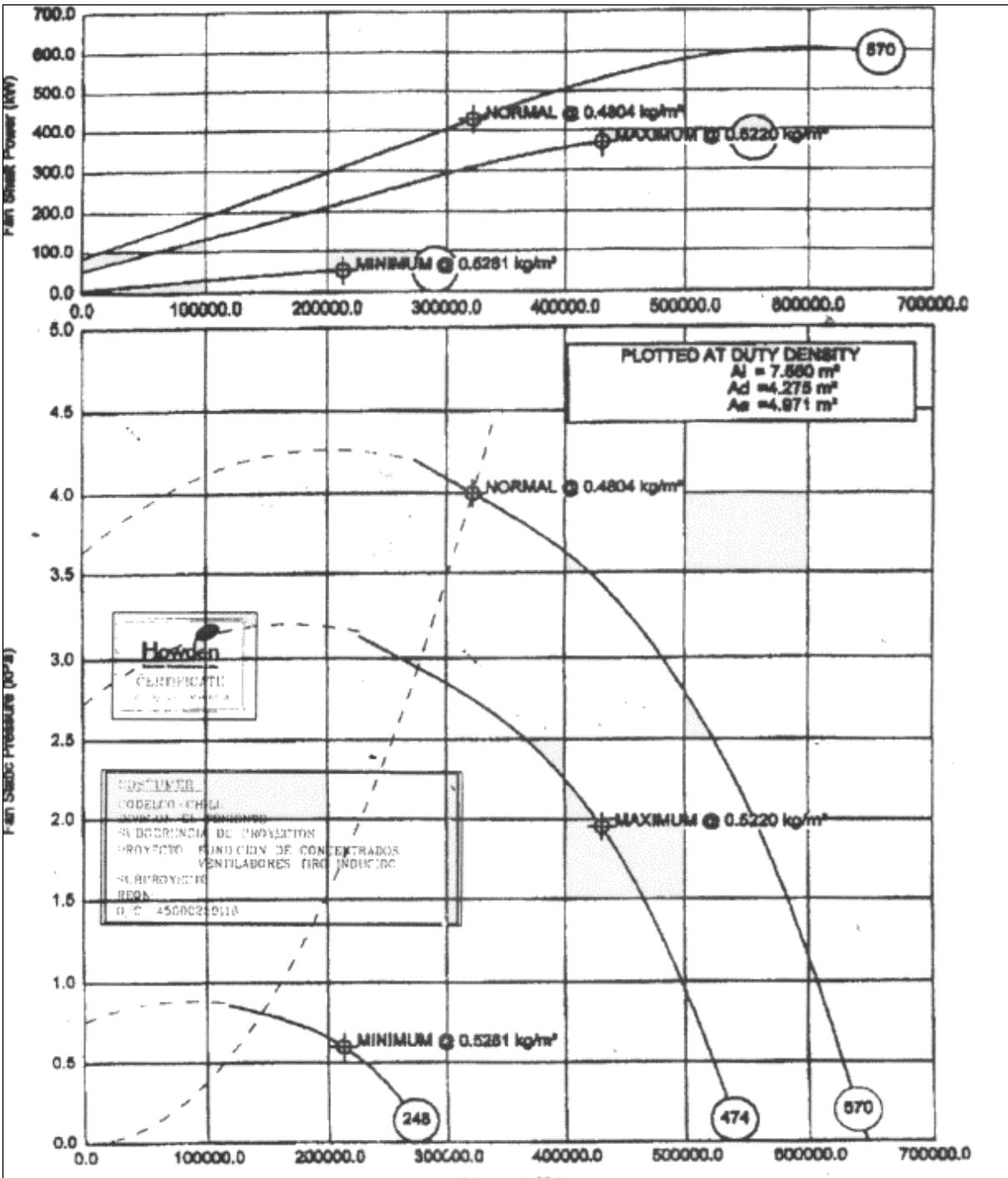


Fig. 2.15 Curva Características Ventilador Tiro Inducido

Sistema de Conducción Gases (Ductos Alta Velocidad)

Los Ducto de Alta Velocidad, suministrados por Maestranza Cachapoal, están diseñados para los gases desde las cámaras de enfriamiento hacia los Precipitadores electrostáticos. Los Ductos están contruidos en acero al carbono de espesor $e = 8$ (mm), con una aislación térmica de lana mineral de $e = 200$ (mm) y un recubrimiento de aluminio de $e = 1$ (mm).

En la siguiente tabla 2.8 se describen las características de cada tramo de los ductos, con sus datos aproximados de velocidad para los que fueron diseñados.

Tabla 2.8. Características Ductos Alta velocidad.

Ducto	Ubicación	Velocidad m/s	Infiltración %	Diámetro m
Tramo 1 (gases sucios)	Salida ER's hacia tramo 2	13 - 23	1	2100
Tramo 2 (gases sucios)	Recibe cada tramo 1 y conduce a PE	8 - 24	1	2100 - 2900
Tramo 3 (gases limpios)	Salida PE hacia VT1	7 - 18	1	3300
Tramo 4 (gases limpios)	Salida VT1	7 - 18	0	3300

A continuación se puede apreciar la configuración de los equipos para Manejo de Gases sector CPS, (Fig 2.16).

2.3 Sistema de Manejo de Polvos

La limpieza de los gases metalúrgicos se efectúa a través de los siguientes mecanismos:

- Captación de partículas gruesas en las pre-cámaras de enfriamiento, principalmente, por medio de la pantalla refrigerada (matapolvo) y captación gravitacional de partículas en las tolvas del Enfriador Radiante (ER)
- Captación de partículas finas mediante Precipitadores Electrostáticos (PE).

Los polvos captados en ambos sectores son transportados mediante un sistema de Transporte Neumático, independientes entre sí, hacia las tolvas de concentrado seco de los CT's.

Los polvos generados en los CPS's tienen las características que se dan en la tabla siguiente:

Tabla 2.9. Características de polvos de gases de CPS (Mediciones)¹⁸

Descripción	Unidades	Mínimo	Máximo
Concentración de polvo de salida campana	g/Nm ³	1,88	3,56
Gravedad específica	g/cm ³	4,82	4,82
Densidad aparente	g/cm ³	1,76	1,76
Composición Química			
Cu	% peso	59,6	59,6
Fe	% peso	7,7	7,7
S	% peso	13,4	13,4
As	% peso	1,2	1,2

Captación de Polvos en Cámaras de Enfriamiento de ER (Transporte Mecánico)

Aproximadamente un 15 % del polvo en suspensión en los gases es captado en las cámaras de enfriamiento de los ER. Los polvos captados en los ER, estimados entre 550 a 1300 kg/día, son manejados por Rastras, hasta un punto común que alimenta a un Harnero Vibratorio, que clasifica los finos hacia el Sistema de Transporte Neumático, el que los envía a la tolva de concentrado seco de los CT's. Los polvos gruesos, se descargan a un contenedor y se transportan por una grúa horquilla a la fundición para uso como carga fría en los propios CPS's. Se estima que la cantidad de polvo grueso de harnero varía entre 100 y 200 kg/día.

El sistema está compuesto de los elementos que se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 2.10. Elementos de Manejo de Sólidos (Rastras Drag Conveyor-Harnero-Silo)⁹

Descripción			Ubicación
Operación	Capac	Dimensiones	
Rastra para material recuperado. Tres bocas de carga, una boca de descarga, densidad del material 4.000 (kg./m ³), T = 400 a 500 (°C)	2 t/h	Ancho = 0,4 (m) longitud = 51 (m), montaje horizontal.	Bajo tolva primaria en cámara de enfriamiento CPS 1, 2 y 3,
Rastra para material recuperado. Tres bocas de carga, una boca de descarga, densidad del material 4.000 (kg./m ³), T = 400 a 500 (°C)	2 t/h	Ancho = 0,4 (m) longitud = 51 (m), montaje horizontal.	Bajo tolva secundaria en cámara de enfriamiento CPS 1, 2 y 3,
Rastra para material recuperado de rastras 50-105-01/02, dos bocas de carga, una boca de descarga, densidad del material 4.000 kg./m ³ , T = 400 a 500 (°C);	2 t/h	Ancho = 0,4 m longitud = 8 m, altura 3 m.	Bajo rastras 50-105-01/02

<p>Harnero Vibratorio para material recuperado de rastra 50-105-03, densidad del material 4.000 kg./m³, T = 300 a 400 (°C) número de mallas 1.</p>	<p>2 t/h</p>		<p>Bajo rastra 50-105-03</p>
<p>Silo acumulador de polvos recuperados en las cámaras de enfriamiento, construido en acero al carbono,</p>	<p>2 m³</p>		<p>Bajo Harnero 50-229-01</p>

Los polvos recuperados por cada ER se muestran en la tabla 2.11:

Tabla 2.11. Valores de los polvos en Enfriadores Radiante

Descripción	Unidades	Mínimo	Máximo
Concentración de polvo en gases salida ER	g/Nm ³	1,55	2,90
Polvo retirado del sistema ER	Kg/día	551	1.301
Polvo retirado de cada ER	Kg/día	183,6	433,6
Polvo retirado tolva prim. c/ER	Kg/día	110	260
Polvo retirado tolva sec. c/ER	Kg/día	73,6	173,6
Polvo a Transporte Neumático	Kg/día	450	1.100
T° polvos tolva primaria	°C	400	550
T° polvos tolva secundaria	°C	200	350
T° polvos rastra 50-105-01	°C	150	300
T° polvos rastra 50-105-02	°C	100	250
T° polvos rastra 50-105-03	°C	80	150

Transporte Neumático Cámaras de Enfriamiento de ER

El sistema de Transporte Neumático es del tipo Vaso Presurizado, tipo D – Pump, con válvulas de alimentación y descarga, que los lleva a las tolvas de concentrado seco de los CT’s. Utiliza como aire de transporte el suministro de 20 PSI y, como aire de control para las válvulas, aire de instrumentación de 90 PSI. El sistema incluye estanque de aire, válvulas y sistema de control.

El control del transporte esta implementado en el sistema de control distribuido (DCS) Bailey, para lo cual todas las señales se ingresara a este sistema y la lógica de funcionamiento está programada en él.

Captación de Polvos en Precipitadores Electrostáticos

El material particulado (polvo) que continua en suspensión en los gases, es captado por los Precipitadores Electrostáticos, proporcionados por TEMAC, representantes de FLS MILJO, y son manejados por rastras, suministrados junto con los Precipitadores, hasta el Sistema de Transporte Neumático, el cuál los envía a la tolva de almacenamiento de concentrado seco de los CT's. La cantidad y concentración de polvos que salen de los precipitadores se muestra en la tabla 2.12.

Tabla 2.12. Valores de polvos en Precipitadores.

Descripción	Unidades	Mínimo	Máximo
Concentración de polvo en gases salida PE	g/Nm ³	0,07	0,14
Polvo retirado del sistema PE	Kg/día	2.965	7.001
Polvo retirado de c/PE	Kg/día	988,3	2.333,6
Temperatura	°C	200	300

El sistema está compuesto de los elementos que se muestran en la tabla 2.13:

Tabla 2.13. Elementos de Manejo de Sólidos PE (Rastra-Harnero-Silo).

Descripción			Ubicación
Operación	Cap.	Dimensiones	
Rastras colectoras de polvos, transportan los polvos recolectados por los Precipitadores Electrostáticos hasta la rastra TAG. 70-105-01			Bajo Precipitador 70-214-01
Rastras colectoras de polvos, transportan los polvos recolectados por los Precipitadores Electrostáticos hasta la rastra TAG. 70-105-01			Bajo Precipitador 70-214-02
Rastra colectora - transporta de los polvos recolectados por los Precipitadores Electrostáticos hasta el harnero 70-229-01, cuatro bocas de carga, una boca de descarga, densidad del material 1.700 (kg./m ³), T = 200 a 300 (°C)	2 t/h	ancho = 0,4 m L = 19 m h = 5,5 m.	Bajo rastras 70-214-01-R1/R2 y 70-214-02-R1/R2
Harnero Vibratorio para material recuperado de rastra 70-105-01, densidad del material 1100 (kg./m ³), número de mallas 1. T= 100 a 150 (°C)	3 t/h		Bajo rastra 70-105-01
Tolva acumulador de polvos recuperados en los Precipitadores Electrostáticos, construido en acero al carbono	3 m ³		Bajo Harnero 70-229-01

2.3.1.- Sistema de Agua de Refrigeración

El Sistema de Agua de Refrigeración es el encargado de entregar el suministro necesario y adecuado a las campanas de los CPS y pantalla matapolvo de la precámara de los ER, como medio para mantener niveles adecuados de temperatura en los equipos. El sistema lo podemos dividir en dos circuitos: primario y secundario.

Circuito Primario

Este es el encargado de suministrar el agua de refrigeración a las Campanas CPS's y Pantalla Matapolvo de los ER. Consiste en tres circuitos cerrados (uno por cada CPS) que va desde los equipos hacia los Estanques de 25 m³, pasando por los Intercambiadores de Calor.

Se cuenta con seis intercambiadores de calor; tres adquiridos en el Proyecto MAGA-CPS (2002), suministrados por Westfalia y los otros tres son los equipos existentes, antes del Proyecto MAGA-CPS, reubicados. El proceso utiliza dos por cada circuito, uno de cada uno. El agua de enfriamiento que circula a través de los intercambiadores es provista por un circuito secundario que opera semi-abierto a torres de enfriamiento, existentes desde antes del Proyecto MAGA-CPS.

El agua de refrigeración posee un sistema de tratamiento suministrado por AGUASIN, que utiliza aditivos para el control de incrustaciones y control de pH.

Se cuenta con seis bombas centrífugas dos por cada circuito destinadas a impulsar el agua desde el estanque hacia los respectivos intercambiadores de calor.

Circuito Primario

Flujo de agua campana	:	220 m ³ /h
Flujo de agua matapolvo	:	80 m ³ /h
Flujo salida intercambiadores	:	290 – 310 m ³ /h
Diferencial de temperatura en agua de refrigeración	:	10°C
Temperatura entrada campana - matapolvo	:	40 – 45 °C
Temperatura salida campana - matapolvo	:	53 – 55 °C

Circuito Secundario

Este es el encargado de suministrar el agua de refrigeración a los intercambiadores de calor. El enfriamiento de esta agua es proporcionada por torres de enfriamiento del tipo en contracorriente con tiro inducido.

Circuito Secundario

Flujo de agua : 190-210 m³/h

Diferencial de temperatura en agua de refrigeración : 15°C

2.4 Sistema de Regulación de Flujos de Gases

Para el buen manejo y conducción de los gases, durante el transcurso de la operación, se requiere de mecanismos que permitan regular los flujos de gases, aislar secciones o direccionar los gases entre diferentes ductos, según sean las necesidades operacionales.

El Proceso MAGA cuenta entre sus instalaciones con dos tipos de válvulas, como medio para el manejo de sus gases: Válvulas Mariposas y Válvulas Guillotina.

2.4.1 Válvulas Guillotina

Se utilizan principalmente como medio para aislar ductos, secciones o equipos, de operación ON-OFF, además se utilizan para direccionar gases entre ductos.

Se muestran en la fig. 2.17 las principales características de las Válvulas Guillotina instaladas en el Proceso MAGA.

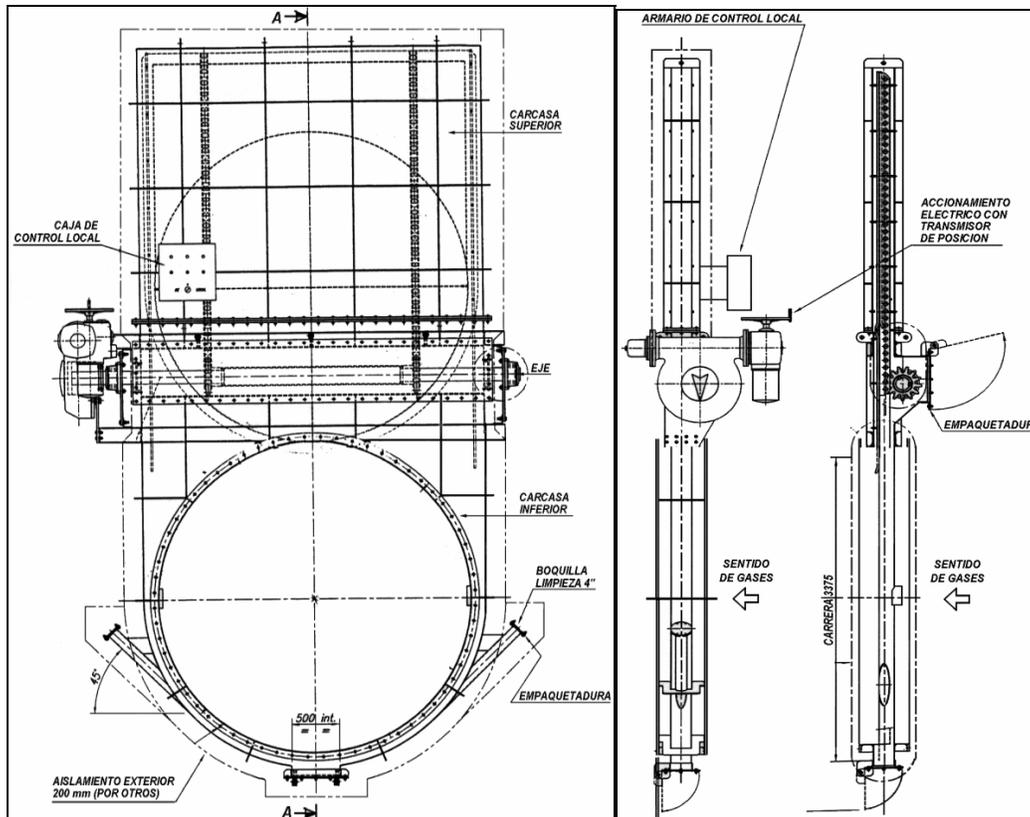


Fig 2.17 Válvula Guillotina

La temperatura de operación es de 300°C. La presión de servicio es de +/- 20 mbar.

Las válvulas guillotina tienen los siguientes diámetros nominales (DN):

Tabla 2.14 Descripción Válvulas Guillotina⁹

DESCRIPCIÓN ÍTEM	UNIDAD	ESPECIFICACIÓN
Conexión a Chimenea		
TAMAÑO CONDUCTO	mm	Ø 3300
ESPEJOR CONDUCTO	mm	6
Línea Descarga VTI a PLG 1		
TAMAÑO CONDUCTO	mm	Ø 2400
ESPEJOR CONDUCTO	mm	6
Línea Descarga VTI a PLG 2		
TAMAÑO CONDUCTO	mm	Ø 3000
ESPEJOR CONDUCTO	mm	6
Cámara Enfriamiento a Ducto AV		
CANTIDAD REQUIRIDA		3
TAMAÑO CONDUCTO	mm	Ø 2100
ESPEJOR CONDUCTO	mm	6
Ductos AV entrada VTI		
CANTIDAD REQUIRIDA		2
TAMAÑO CONDUCTO	mm	Ø 2500
ESPEJOR CONDUCTO	mm	6
Descarga VTI		
CANTIDAD REQUIRIDA		2
TAMAÑO CONDUCTO	mm	2100x3300
ESPEJOR CONDUCTO	mm	6
Entrada y Descarga Precipitador		
CANTIDAD REQUIRIDA		4
TAMAÑO CONDUCTO	mm	2500x2500
ESPEJOR CONDUCTO	mm	6

2.4.2 Válvulas Mariposa

Las Válvulas Mariposa, se utilizan principalmente como medio para regular flujos de gases en ductos. Estas válvulas permiten un rango de abertura o cierre de 100% a 0%. Su accionamiento es de tipo electromecánico.

En la tabla 2.15 se muestran las principales características de las Válvulas Mariposas instaladas en el Proceso MAGA.

Características:

Estas válvulas provocan pequeñas pérdidas de carga, tanto como si se hayan en posición entreabierta, como enteramente abiertas. Sin embargo, en posición cerrada no siempre consiguen un cierre hermético. El diseño de las Válvulas permite hasta un 2% de fugas entre secciones y 0% de fugas hacia la atmósfera cuando se encuentra completamente abierta o cerrada.

La temperatura de operación varía entre 350 y 450°C, la presión de trabajo es de 2 a 4 kPa y el flujo varía entre 80.000 y 100.000 Nm³/h un detalle de las principales características de las válvulas Mariposa se presenta en las páginas siguientes.

Tabla 2.15. Descripción Válvulas Mariposa⁹.

DESCRIPCIÓN ÍTEM	UNIDAD	ESPECIFICACIÓN
Ductos radiantes		
CANTIDAD REQUERIDA		3
DIÁMETRO DUCTO	mm	Ø = 1500
ESPEJOR DUCTO	mm	8
Descarga Cámaras Enfr.		
CANTIDAD REQUERIDA		3
DIÁMETRO DUCTO	mm	Ø = 2100
ESPEJOR DUCTO		8
Ducto AV a PLG 1		
CANTIDAD REQUERIDA		1

DIÁMETRO DUCTO	mm	Ø = 2400
ESPEJOR DUCTO	mm	8
DESCRIPCIÓN ÍTEM	UNIDAD	ESPECIFICACIÓN
Ducto AV a PLG 2		
CANTIDAD REQUERIDA		1
DIÁMETRO DUCTO	mm	Ø = 3000
ESPEJOR DUCTO	mm	8
Ducto AV a chimenea		
CANTIDAD REQUERIDA		1
DIÁMETRO DUCTO	mm	Ø = 3300
ESPEJOR DUCTO	mm	8

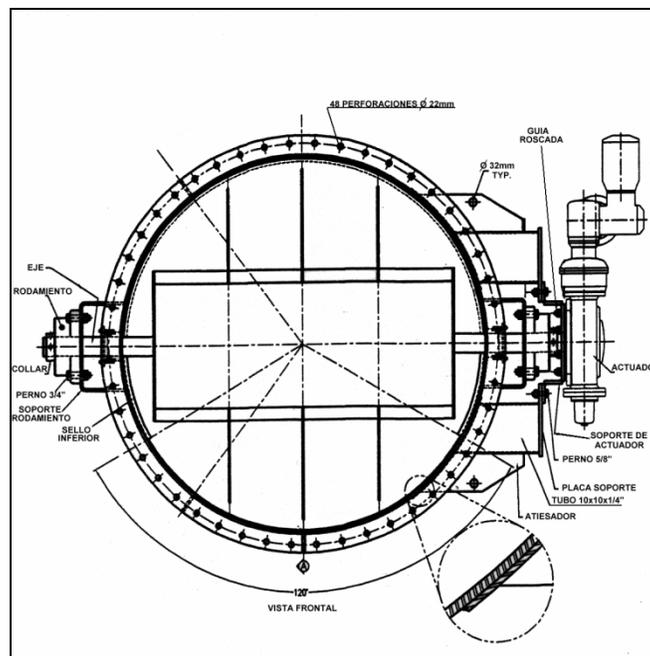


Fig 2.18 Vista Frontal Válvula Mariposa

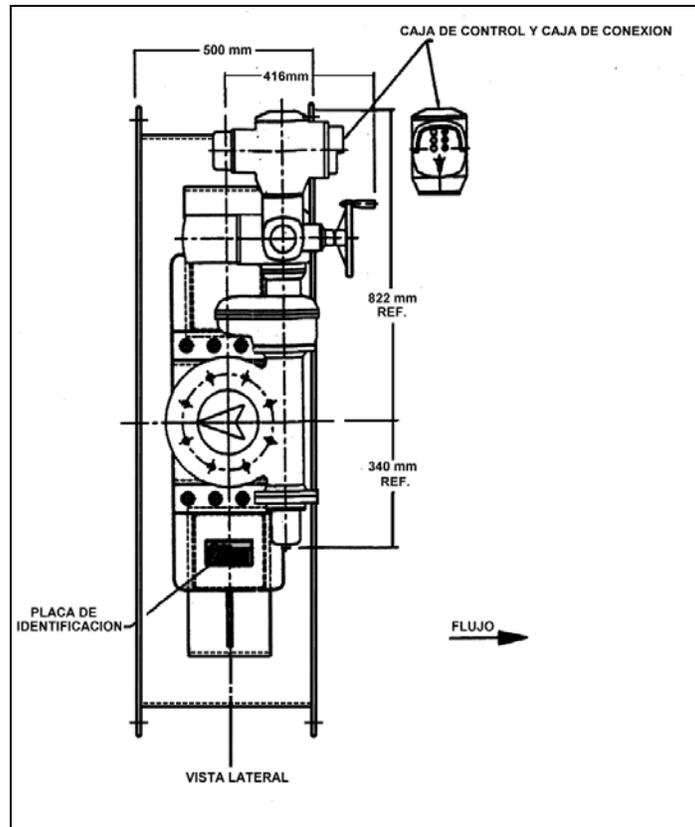


Fig. 2.19 Vista Lateral Válvula Mariposa

2.4.3 Juntas de Expansión

La función principal que cumplen las Juntas de Expansión es absorber los movimientos Axiales causados en los ductos por los cambios de temperatura. Además, actúan como aisladores de vibraciones, compensando movimientos laterales, angulares y torsionales. Esto permite tolerar ciertos desalineamientos en los ductos, facilitando su montaje.

Las principales características dimensionales se entregan en la página siguiente:

Tabla 2.16 Descripción Juntas Expansión⁹.

UBICACIÓN	Dimensión mm	Espesor mm
Salida gases campana 1	4400 x 4400	12
Salida gases campana 2	4400 x 4400	12
Salida gases campana 3	4400 x 4400	12
Salida gases cámara radiativa	∅ 2100	8
Salida gases cámara radiativa	∅ 2100	8
Salida gases cámara radiativa	∅ 2100	8
Cámara radiativa 3 a ducto común a PEE	∅ 2100	8
Ducto A. V. entre cámara radiativa y PEE	2500 x 2500	8
Ducto A. V. entre cámara radiativa y PEE	2500 x 2500	8
Ducto A. V. entre cámara radiativa y PEE	2500 x 2500	8
entrada PEE	2500 x 2500	8
entrada PEE	2500 x 2500	8
salida PEE	2500 x 2500	8
salida PEE	2500 x 2500	8
entrada a VTI 1	2500 x 2500	8
entrada a VTI 2	2500 x 2500	8
entrada a ducto VTI 1	2500 x 2500	8

entrada a ducto VTI 2	2500 x 2500	8
admisión VTI 1	4304 x 900	12
admisión VTI 1	4304 x 900	12
descarga VTI 1	2160 x 3300	8
admisión VTI 2	4304 x 900	12
admisión VTI 2	4304 x 900	12
descarga VTI 2	2160 x 3300	8
ducto descarga VTI a PLG 1	Ø 2400	8
ducto descarga VTI a PLG 1	Ø 2400	8
ducto descarga VTI a PLG 2	Ø 3000	8
ducto descarga VTI a PLG 2	Ø 3000	8



Fig 2.20 Junta de Expansión



Fig 2.21 Marco Junta de Expansión



Fig 2.22 Vista Junta de Expansión Ducto a PLG's

Para finalizar este capítulo se aprecia en la Fig 2.23, la vista superior de la Fundición de Caletones.

Capítulo 3 Alternativas Operacionales

En este capítulo se estudiará las distintas alternativas operacionales que posee la etapa de Manejo de Gases, como ya sabemos la Fundición Caletones posee 2 Plantas de Ácido (PLG1 y PLG2), las cuales son alimentadas por 2 Convertidores Teniente y por 3 Convertidores Peirce Smith, por lo tanto tenemos varias posibilidades de operación, esto es necesario para realizar el modelo operacional ya que debe representativo del sistema completo y sus variantes. A continuación se muestran las posibles alternativas Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Alternativas Operacionales

Equipo Operando	Flujos Nm ³ /hr	Precipitador Electrostático Operando	Ventiladores VTI Operando	Plantas de Limpieza Operando
1 CPS	90.000	2	2	PLG1 o PLG2
2 CPS	180.000	2	2	PLG1 o PLG2
1 CT	160.000	1	---	PLG1 o PLG2
1 CT + 1 CPS	250.000	2	2	PLG2 o PLG1 + PLG2
1 CT + 2 CPS	340.000	3	2	PLG2 o PLG1 + PLG2
2 CT	320.000	2	---	PLG1 + PLG2
2 CT + 1 CPS	410.000	4	2	PLG1 + PLG2
2 CT + 2 CPS	500.000	4	2	PLG1 + PLG2

De estas alternativas también cabe nombrar el tipo de operación que se realiza según el tipo de equipo que se encuentra en operación.

Para el sistema operacional, se tiene una gran variedad de variables a controlar, una de las principales por las que se guían los operadores es en base a presiones, para un armónico movimiento de los gases sin sobrepresionar las campanas (escape de gases).

3.1 Alternativas Operacionales

Las principales alternativas operacionales se mostraron en la Tabla 3.1. Los valores entregados se deben usar a modo referencial, debido a que cambios en la temperatura y presiones de los gases necesariamente requerirá ajustar principalmente las RPM de los VTI y sopladores. La captación de gases CPS, desde las PLG's dependerá de la operación de dichas plantas, por lo que el operador de estas es el que da los porcentajes de movimiento de válvula para la distribución de los gases.

A continuación en las tablas 3.2 y 3.3 están en detalle las válvulas que se operan en Manejo de Gases:

Variables Operacionales

Tabla 3.2 Válvulas Mariposas

TAG	LUGAR
55605	Salida Cámara Enfriamiento CPS1
56605	Salida Cámara Enfriamiento CPS2
57605	Salida Cámara Enfriamiento CPS3
50670	Entrada PLG2
50675	Entrada PLG1
50664	Salida a Chimenea
50102	Intersección CT1 y CT2

Tabla 3.3 Válvulas Guillotinas

70746A-2	Entrada PEE MILJO 2
70747A-2	Salida PEE MILJO 2
70746B-1	Entrada PEE MILJO 1
70747B-1	Salida PEE MILJO 1
80850B-2	Entrada VTI 2
80852B-2	Salida VTI 2
80850A-1	Entrada VTI 1
80852A-1	Salida VTI 1
1001A	Ducto Salida PEE CT1
500101	Ducto a PLG2
1001B	Ducto Salida PEE CT2
500103	Ducto a PLG1

A continuación se muestra un diagrama donde se puede apreciar donde se encuentra cada válvula, identificada con su respectivo TAG:

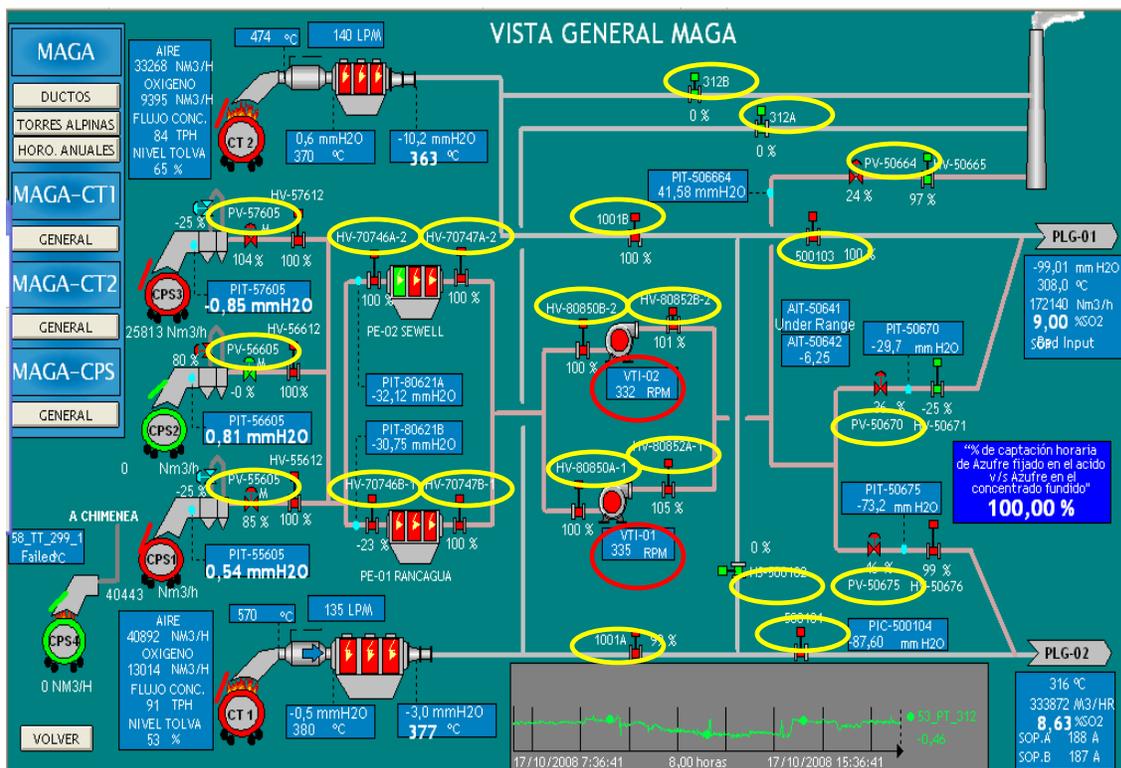


Fig 3.1 Diagrama PI posición dampers

3.1.1 Operación 2 CT y 1 CPS

- CT1 y CT2 operando se dirigen PLG2 y PLG 1 respectivamente, revisar si válvula 1001A y 500101 se encuentran abiertas 100% para el CT1 y para CT2 la válvula 1001B y 500103 también 100% abierta, además verificar que la válvula 500102 se encuentre cerrada.
- En el caso del CPS hay que coordinar el envío de estos gases con el operador de PLG.
- Dependiendo de qué convertidor se encuentre en operación se verifica que la válvula mariposa (55605, 56605 o 57605) que se encuentran a la salida de la cámara de enfriamiento radiativo, esté 100% abierta y que el resto se encuentren

cerradas. En el momento que el operador de FUCO avisa el comienzo de soplado del convertidor respectivo se abre la válvula.

- Se verifica que se encuentren abiertas las válvulas de entrada y salida de los Precipitadores y de los Ventiladores de Tiro Inducido al 100%.
- Se regula la velocidad de los VTI entre 200 y 250 rpm (se manejan en OUT)
- Dependiendo de la disponibilidad de las plantas se abrirán las válvulas mariposa, la apertura debe ser lenta y pausada de modo de no causar sobrepresiones en las campanas de los CT.

Existen 3 alternativas para el envío de estos gases:

- a) Envío de gases de 1 CPS a PLG 1 y PLG 2:** Abrir lentamente las válvulas mariposas 50670 y 50675 a PLG 1 y PLG 2 respectivamente, la apertura de válvula para el caso de la PLG 1 es aprox. un 35% y para la PLG 47% (hasta que la presión en la Campana CPS esté en el rango de 0 a -2 mmH₂O).
- b) Envío de gases de 1 CPS a PLG 2:** Abrir lentamente la mariposa 50675 hasta que la presión en la Campana CPS esté en el rango de 0 a -2 mm C.A, dependiendo la capacidad de la planta, la apertura de válvula varía entre 45 a 55%.
- c) Si están presionados CT's:** Disminuir apertura de válvula PV-50675 o PV-50670, dependiendo el caso.

3.1.2. 2 CT y 2 CPS

- Coordinar con Operadores PLG's el envío de gases de 2 CPS's.
- Verificar que la válvula mariposa salida enfriador radiativo del convertidor que no esté en servicio este cerrada y abrir las válvulas mariposa de los que entren en servicio.

En este caso está en operación CPS 1 y 2, por lo tanto basado en el comportamiento de los gases según pérdida de carga, el convertidor que se encuentra más alejado de la planta es el que tiene la apertura de válvula al 100% .

- **Si CPS 1 y 2 en servicio:** PV-55605=80%;
PV-56605=100%
PV-57605=0%
- **Si CPS 1 y 3 en servicio:** PV-55605=80-90%;
PV-56605=0%
PV-57605=100%
- **Si CPS 2 y 3 en servicio:** PV-55605=0%;
PV-56605=80-90%
PV-57605=100%

- Se verifica que estén abiertas (100%) las válvulas de admisión y descarga de los dos PE's y de los dos VTI's.
- Se da velocidad a los VTI entre 250 y 330 rpm (OUT).
- Se abren las válvulas mariposas a PLG (la apertura debe ser lenta y pausada de modo de no causar sobrepresiones en las campanas de los CT).

Alternativas:

- a) Envío de gases de 2 CPS's a PLG 1 y PLG 2:** Abrir lentamente la mariposa 670 (a PLG 1) y 675 (a PLG 2) hasta que la presión en las Campanas CPS's estén en el rango de 0 a -2 mmH₂O, a PLG 1 válvula 50670 apertura 30 – 39% y a PLG2 válvula 50675 apertura 40 – 50%

Si se encuentran presionados:

- CT's, disminuir apertura de válvula según cual fuere.
- CPS's aumentar velocidad VTI
- Apertura a Chimenea (es la más frecuente) entre un 10 – 25% apertura.

3.1.3. Operación con 1 CT y 1 CPS

- Se coordina con Operadores PLG's el envío de gases de sólo 1 CPS y recibir instrucciones acerca de la dirección de los gases.
- Se verifica que las válvulas mariposa la salida de la cámara de enfriamiento radiativo de los convertidores que no estén en servicio estén cerradas y se abren las válvulas del que entre en servicio.
- Se verifica que estén abiertas (100%) las válvulas de admisión y descarga de los dos PE's y de los dos VTI's.
- Se da velocidad a los VTI entre 170 y 190 rpm (OUT).
- Y se abren las válvulas mariposa a PLG.

Alternativas:

- **CT en operación:**

- Envío de gases a las 2 PLG's, se abre válvula 50102 aproximado un 50-60% de apertura
- Envío de gases de 1 CPS a PLG 2 y PLG 1, se abren lentamente la válvula 50675 hasta que la presión en la campana CPS esté en el rango de 0 a -2 mm C.A, apertura de válvula 47% y para PLG1 válvula 670 un 30%. (Se sube carga Teniente)

3.1.4.- Operación con 1 CT y 2 CPS

- Se coordina con Operadores de las Plantas de Ácido el envío de gases de los dos CPS's y los operadores de Manejo de Gases siguen las instrucciones acerca de la dirección de los gases.
- Se verifica que la válvula mariposa que está a la salida de la cámara radiativa del convertidor que no esté en servicio este cerrada y abrir mariposa de los que entren en servicio. Alternativas:
 - **CPS 1 y 2 en servicio:** PV-55605=80-90%; PV-56605=100%
 - **CPS 1 y 3 en servicio:** PV-55605=80-90%; PV-57605=100%

- **CPS 2 y 3 en servicio:** PV-56605=80-90%; PV-57605=100%

- Se verifica que estén abiertas (100%) las válvulas de admisión y descarga de los dos PE's y de los dos VTI's.
- Se da velocidad a los VTI entre 250 y 310 rpm (35 a 42 OUT).
- Abrir mariposa(s) a PLG.

Alternativa:

- **CT en operación:**

- Envío de gases a las 2 PLG's, se abre válvula 50102 aproximado un 50-60% de apertura
- Envío de gases de 1 CPS a PLG 2 y PLG 1, se abre lentamente la mariposa 50675 hasta que la presión en la Campana CPS esté en el rango de 0 a -2 mm C.A, apertura de válvula 47% y para PLG1 válvula 50670 un 30%. (Se sube carga Teniente).

- **CT2 en operación:**

- Envío gases de CT2 y CPS a PLG2, se abre lentamente válvula mariposa 50675 a un 20%, resto de CPS's apertura válvula 50670 en un 100% a PLG1. Válvula 500103 cerrada y 500102 abierta.
- Si CT presionado cerrar válvula 50675.

3.1.5. Sin CPS

- Condición Normal para los CT's hacia las PLG's
- Succión de aire de cualquier CPS, se abre válvula de salida de la cámara de enfriamiento radiativo que corresponda al que se encuentra en operación en un 20%.

- Los VTI operan con 120-145 rpm, se abre válvula a chimenea 20%, se cierra PV 50675 y PV 50670.

3.1.6. Parada Planta

a) Caso PLG 1

- Soplador PLG 1, baja potencia paulatinamente
- Válvula PV-50664 con un 50-60% de apertura (a chimenea).
- Válvula PV-50102, 100% apertura
- Válvulas 50670 y 50675 cerradas
- Válvula 500103 cerrada 0%
- Válvula PV-1001A se reduce apertura 60%
- Reduce velocidad VTI 160-180 rpm
- Aumenta potencia Sopladores PLG2 a 190A.

Condición

- A Chimenea 40 mmH₂O, marca alarma 50 mmH₂O (hasta 40 %)
- Boca 0 o menor presión
- Depende capacidades de planta, succión sopladores
- Condición T>400 se abre tapa campana Convertidores Teniente
- Si mucha succión se baja potencia soplador 150 A aproximadamente.
- Temperatura crítica Precipitadores Electroestáticos 200 – 250 °C (caída campos, condensación).

La siguiente Tabla muestra las alternativas según equipos en Operación

Tabla 3.4 Alternativas Operacionales según Equipos en Operación

Casos	<i>Hornos en Operación</i>				
	<i>CT1</i>	<i>CT2</i>	<i>CPS1</i>	<i>CPS2</i>	<i>CPS3</i>
1	✓	✓	✓		
2	✓	✓		✓	
3	✓	✓			✓
4	✓	✓	✓	✓	
5	✓	✓	✓		✓
6	✓	✓		✓	✓

Capítulo 4 Modelación Manejo de Gases

La Modelación se desarrolló para el Sistema de Gases de la Fundición Caletones, con el fin de lograr determinar la capacidad que tiene este sistema para manejar el flujo de gases asociado a la capacidad de gases metalúrgicos que salen como producto del proceso de fusión. El modelo realizado es un programa computacional realizado en Excel con la ayuda de Visual Basic, que representa la operación del sistema Manejo de Gases Primarios de la Fundición Caletones. La modelación es un algoritmo resolutivo de ecuaciones matemáticas que representa la fenomenología del sistema, este se basa en las ecuaciones de balance de masa, calor y energía mecánica del sistema integrado de Manejo de Gases CT y CPS.

Suposiciones Generales

Se plantea para el modelo las siguientes suposiciones:

- Mezcla perfecta de los gases
- No existen gradientes radiales de temperatura, pero se considera una temperatura de pared distinta a la del gas.
- La transferencia de calor interna del equipo es por radiación y convección forzada.
- Las propiedades de los gases son sólo función de la temperatura e independiente de la presión.
- Los gases se comportan como fluidos Newtonianos compresibles, pero con densidad dependiente de la temperatura.
- Considerando que el planteo y resolución de un balance global dinámico genera un problema de excesivo tiempo de cálculo, y como se desea usar

un sistema en línea, se ha optado por aproximar el sistema mediante el uso de balance estacionario punto a punto, el cual al ser proyectado en el tiempo produce un efecto que se puede calificar de pseudodinámico.

- Se considera la temperatura de los gases de infiltración de 25°C

Ecuaciones Fenomenológicas Generales

Las ecuaciones que describen el modelo son las siguientes:

4.1 Balance de Masa.

El balance de Masa para cada equipo consiste en determinar la variación de masa de los componentes para una diferencia de tiempo, considerando lo que entra, sale, se produce y se consume en la operación, es decir:

$$\frac{dM_i}{dt} = M_{entra} - M_{sale} + M_{producción} - M_{consumida} \quad \text{ec. 4.1}$$

Luego consideramos:

$$\frac{dM_i}{dt} = 0$$

Lo que lleva a simplificar el balance, quedando:

$$M_{entra} - M_{sale} + M_{producido} - M_{consumida} = 0$$

Donde:

dM_i/dt : Variación de masa componente i

M_{entra} = Flujo de masa entrada componente i

M_{sale} = Flujo de masa salida del componente i

$M_{producida}$ = Flujo de masa producida

$M_{consumida}$ = Flujo de masa consumida

4.2 Balance de Calor

En el balance de calor se consideran las reacciones químicas y el intercambio de calor al interior de los equipos unitarios a presión constante. Con esto podemos decir que las variaciones de entalpía son equivalentes a las variaciones de calor.

Las entalpías y capacidades caloríficas se consideran a la temperatura del gas.

El balance de calor se puede representar simplificada por la ecuación diferencial ordinaria que considera la diferencia entre la energía que entra al sistema, la que sale y la energía que se pierde al ambiente.

$$\frac{dQ}{dt} = Q_{\text{entra}} - Q_{\text{sale}} - Q_{\text{pérdidas}} \quad \text{ec. 4.2}$$

Luego, considerando la suposición:

$$\frac{dQ}{dt} = 0 \quad \text{ec. 4.3}$$

Lo que lleva a simplificar el balance, quedando como sigue:

$$Q_{\text{entra}} - Q_{\text{sale}} - Q_{\text{pérdidas}} = 0$$

Donde:

dQ/dt : Variación de calor total del sistema

Q_{entra} : Flujo calor entrada

Q_{sale} : Flujo calor salida

$Q_{\text{pérdidas}}$: Flujo pérdidas de calor

Las pérdidas de calor al ambiente están dadas por los mecanismos de convección y radiación:

$$Q_{\text{pérdidas}} = Q_{\text{convección}} + Q_{\text{radiación}} \quad \text{ec. 4.4}$$

Donde :

$Q_{\text{pérdidas}}$: Pérdidas de calor total

$Q_{\text{convección}}$: Pérdidas de calor por convección

$Q_{\text{radiación}}$: Pérdidas de calor por radiación

Transferencia de Calor por Convección

La ecuación básica para describir el proceso de convección de calor fue establecida por Newton y tiene la siguiente forma:

$$Q_{\text{convección}} = h \cdot A \cdot (T_p - T_a) \quad \text{ec. 4.5}$$

Donde:

$Q_{\text{convección}}$: Flujo de Calor por Convección

h : Coeficiente de transferencia de calor ($\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$)

A : Área normal a la dirección de flujo de calor convectivo

T_p : Temperatura de pared

T_a : Temperatura ambiente

La convección de calor puede ser natural o forzada.

Convección Natural

Se produce convección natural cuando una superficie sólida está en contacto con un fluido de temperatura distinta a la de la superficie. La diferencia de densidad

proporciona la fuerza que se requiere para desplazar al fluido, producto del intercambio de energía.

Para determinar el coeficiente de transferencia de calor se utiliza la siguiente relación adimensional:

$$h = \frac{Nu \cdot k}{L} \quad \text{ec. 4.6}$$

Donde:

h: Coeficiente de transferencia de calor

Un: Número de Nusselt

k: Conductividad térmica del fluido

L: Parámetro de longitud característica

El número de Nusselt para la convección natural tiene la siguiente forma:

$$Nu = a \cdot (Gr \cdot Pr)^b \quad \text{ec. 4.7}$$

$$Gr = \frac{\beta \cdot g \cdot (T_w - T_\infty) \cdot L}{\nu^2} \quad \text{ec. 4.8}$$

$$Pr = \frac{C_p \cdot \mu}{k} \quad \text{ec. 4.9}$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad \text{ec. 4.10}$$

Donde:

Gr: Número de Grashof

L: Parámetro de longitud característica

T_∞: Temperatura del seno del fluido

T_w: temperatura pared

β: Coeficiente de dilatación térmica del fluido (1/K)

g: aceleración de gravedad

μ : Viscosidad fluido (N s/m²)

ρ : Densidad del fluido (kg/m³)

Pr: Número de Prandtl

Cp: Capacidad Calorífica del fluido (J/ kg K)

K: Conductividad térmica del fluido (W/m K)

a, b : Parámetros depende de la geometría

Convección Forzada

En la convección forzada el fluido se mueve en relación con la intercara como resultado de una fuerza externa. El coeficiente de transferencia de calor por convección forzada es función del tamaño y la forma geométrica de la cara interna, temperatura y propiedades físicas del fluido y de la velocidad del fluido en relación con la cara interna.

De manera análoga a la convección natural, el coeficiente de transferencia de calor para convección forzada, puede ser determinado con la relación:

$$h = \frac{Nu \cdot k}{L}$$

El número de Nusselt para la convección forzada es la siguiente forma:

$$Nu = a \cdot Re^b \cdot Pr^c \quad \text{ec. 4.11}$$

$$Re = \frac{v \cdot \rho \cdot D}{\mu} \quad \text{ec. 4.12}$$

$$Pr = \frac{Cp \cdot \mu}{k}$$

Donde:

Re: Número de Reynolds

Pr: Número de Prandtl

ρ : densidad fluido (kg/m³)

v: Velocidad del fluido respecto a la intercara (m/s)

μ : Viscosidad fluido (N s/m²)

k: Conductividad térmica del fluido (W/m K)

Cp: Capacidad calórica del fluido (J/kg K)

L: Parámetro de longitud característica m

Por datos bibliográficos² los valores para a, b, c, son 0,023, 0,8 y 0,33 respectivamente. Los datos para calcular el coeficiente convectivo se encuentran en el Anexo I y IV.

Transferencia de Calor por Radiación

Para la radiación desde la superficie de un cuerpo hacia otro, se aplica la ley Stefan-Boltzmann, donde, si se considera que los cuerpos no son negros y que no necesariamente tienen una orientación perpendicular, se llega a la siguiente expresión, donde el flujo de calor por radiación es directamente proporcional a la diferencia entre la cuarta potencia de las dos temperaturas absolutas.

$$Q_{\text{radiación}} = \epsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_{\text{pared}}^4 - T_{\text{ambiente}}^4) \quad \text{ec. 4.13}$$

Donde:

$Q_{\text{radiación}}$: Flujo de calor por radiación

ϵ : Emisividad

σ : Constante de Stefan-Boltzmann (W/m²K⁴)

A: Area de transferencia de Calor (m²)

T_{pared}: Temperatura de la pared (K)

T_{ambiente}: Temperatura Ambiente (K)

Los datos ocupados para el caso son los siguientes⁵:

Símbolo	Valor	Unidad
ε acero oxidado	0,8	adimensional
ε acero fundido	0,4	adimensional
σ	5,68E-08	W/m ² *K ⁴

4.3 Balance Energía Mecánica

Los flujos compresibles pueden ser clasificados de varias maneras, la más común usa el número de Mach (Ma) como parámetro para clasificarlo.

$$Ma = \frac{V}{a} \quad \text{ec 4.14}$$

Donde V es la velocidad del flujo y a es la velocidad del sonido en el fluido, asumiendo que el aire es similar al gas tratado, la velocidad del sonido del aire es de 340 m/s y la velocidad de los gases tratados en esta etapa no sobrepasan los 35 m/s, por lo tanto el número de March es ínfimo, según su clasificación tenemos:

- Prácticamente incompresible: Ma < 0.3
- Flujo subsónico: Ma > 0.3
- Flujo transónico: 0.8 ≤ Ma ≤ 1.2.

- Flujo supersónico: $1.2 < Ma \leq 3$.
- Flujo hipersónico: $Ma > 3$.

Según la clasificación trabajaremos con el gas como un fluido incompresible ya que no representa grandes variaciones en los resultados.

El balance de presiones considera tanto las pérdidas de carga producidas por las singularidades como las friccionales de los diferentes equipos.

El balance se plantea como sigue :

$$\frac{1}{\rho} dP + v \cdot dv + z \cdot dz - H_f = 0 \quad \text{ec. 4.15}$$

$$\frac{P}{\rho} + \frac{v^2}{2 \cdot g} + z - H_f = \text{constante}$$

$$H_f = h_f + h_a \quad \text{ec. 4.16}$$

Donde:

ρ : Densidad del gas (kg/m^3)

g : Constante de aceleración de gravedad (m/s^2)

v : Velocidad del gas (m/s)

z : altura

P : Presión del gas (Pa)

H_f : Pérdidas de carga del sistema (m)

h_f : Pérdidas de carga debido a la fricción (m)

h_a : Pérdida de carga debido a singularidades (m)

- **Pérdidas de carga por fricción**

Para la evaluar la pérdida producida por la fricción que realiza el fluido que circula por el ducto se utiliza la siguiente expresión:

$$h_f = f_D \frac{L v^2}{D 2g} \quad \text{ec. 4.17}$$

Donde:

h_f = pérdida de carga debido a la fricción (m)

f_D = Factor de fricción de Darcy

v = Velocidad del gas (m/s)

g = Aceleración de gravedad (m/s^2)

L = Largo del ducto (m)

D =Diámetro del ducto

El factor de fricción se puede determinar por la expresión de Wood's

$$f = a + b \cdot Re^{-c} \quad \text{ec. 4.18}$$

Donde:

f : Factor de fricción

Re : Número de Reynolds

a, b, c : Constantes

Constantes:

$$a = 0,0235 \cdot \left(\frac{\epsilon}{D}\right)^{0,258} + 0,1325 \cdot \left(\frac{\epsilon}{D}\right)$$

$$b = 22 \cdot \left(\frac{\epsilon}{D}\right)^{0,44}$$

$$c = 1,62 \cdot \left(\frac{\epsilon}{D}\right)^{0,124}$$

Donde:

ϵ : Rugosidad de la superficie (m)

D: Diámetro del ducto (m)

La rugosidad se incluye para representar la condición de superficie del ducto y puede pensarse en ella como representativa de la acumulación de polvo y acreciones en la pared interior del ducto.

- **Pérdidas de carga debido a accesorios o singularidades**

Además de la pérdida de carga por fricción existen las pérdidas que se producen en los accesorios como válvulas, codos y otros elementos que impliquen un cambio en la dirección del flujo o en el tamaño del ducto.

Estas pérdidas de carga se pueden considerar independientes del número de Reynolds y la rugosidad, por lo que se pueden calcular de la siguiente manera:

$$h_a = K \frac{v^2}{2g}$$

ec. 4.19

Donde:

h_a : Pérdida de carga debido a las singularidades (m)

K: Coeficiente que depende del accesorio o singularidad

g: Aceleración de gravedad (m/s^2)

A continuación se muestran los valores de los accesorios que se encuentran en MAGA.

- Para obtener los valores de Codos, ver la siguiente tabla:

Tabla 4.1 Valores de K para Codos¹⁶

Accesorio	K
Codo 90°, estándar	0,75
Codo 90°, radio largo	0,45
Codo 90°, radio corto	0,9
Codo 45°, estándar	0,35
Codo 45°,radio largo	0,2
Codo 180°, retorno cerrado	1,5

- Para obtener los valores de Válvulas:

Tabla 4.2 Valores de K para Accesorios¹⁶

Accesorio	K
Válvula Guillotina ON_OFF (abierta)	0,17
Junta Expansión	0,67

En el caso de la válvula mariposa el coeficiente K, está en función del grado de apertura, como se ve en la siguiente tabla 4.3:

Tabla 4.3 Coeficiente de Accesorio para Válvula Mariposa¹⁰

Angulo de Apertura	K	Angulo de Apertura	K
5	0,24	40	10,8

10	0,52	50	32,6
15	0,9	60	118
20	1,54	65	256
25	2,51	70	751
30	3,91	90	Infinito

Además de estos se pueden considerar accesorios contracciones y expansiones de ductos las cuales pueden ser bruscas o progresivas, como se ve a continuación en la Tabla 4.4:

Tabla 4.4 Coeficiente de Accesorio⁶

Accesorios	Coeficiente K	Condición
Contracción Brusca	$K = \left(\frac{1}{C_c^2} - 1 \right)$	
(D1>D2)	$C_c = 0.328 + \left(\frac{0.0418}{1.1 - D_2/D_1} \right)$	
Contracción Progresiva	$K = \frac{0.8 \text{Sen}(\theta/2) \left[1 - (D_2/D_1)^2 \right]}{(D_2/D_1)^4}$	$\theta \leq 45^\circ$
(D1>D2)	$K = \frac{0.5 \left[1 - (D_2/D_1)^2 \right] \sqrt{\text{Sen}(\theta/2)}}{(D_2/D_1)^4}$	$45^\circ < \theta \leq 180^\circ$
Expansión Brusca	$K = \left(1 - \frac{D_1^2}{D_2^2} \right)^2$	

(D1<D2)	
Expansión Progresiva	$\theta \leq 45^\circ$
(D1<D2)	$K = \frac{2.05 \sin(\theta/2) \left[1 - (D_1/D_2)^2 \right]^2}{(D_1/D_2)^4}$
	$45^\circ < \theta \leq 180^\circ$
	$K = \frac{\left(1 - (D_1/D_2)^2 \right)^2}{(D_1/D_2)^4}$

Válvula Mariposa

Como fue descrita anteriormente esta válvula restringe el paso del flujo de gas, como no se logró obtener las curvas características de las válvulas con las que el área Manejo de Gases trabaja para su incorporación al modelo, el efecto de las posiciones de estas en la predicción del sistema fueron basadas en una curva genérica de válvula mariposa¹⁷.

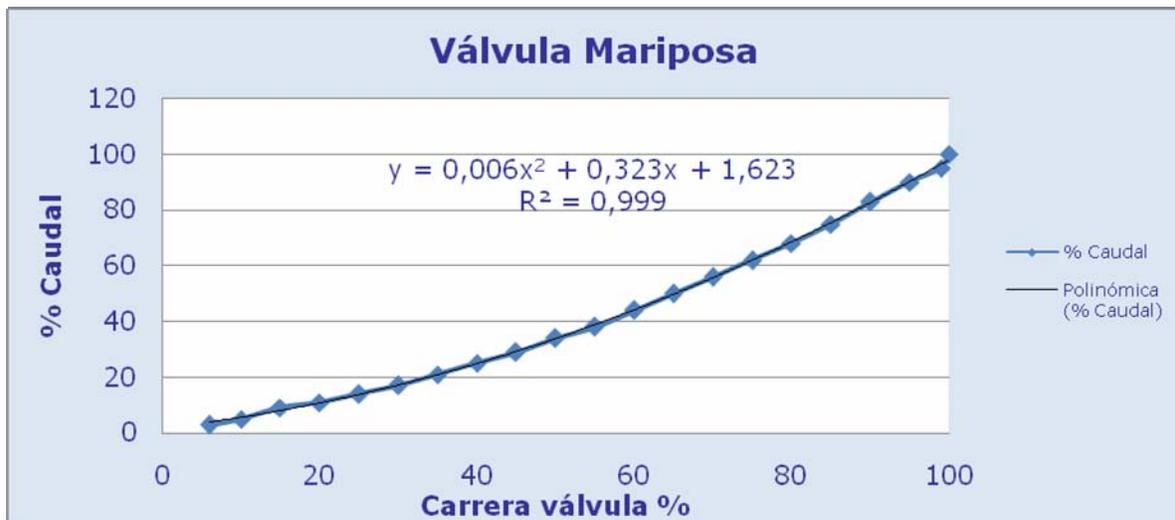


Fig 4.1 Correlación Operación Válvula Mariposa

Donde se obtuvo una correlación la cual se ingreso al modelo:

$$y = 0,0064 \cdot x^2 + 0,3235 \cdot x + 1,6235 \quad \text{ec 4.20}$$

Donde el usuario al ingresar el dato de % apertura de válvula (x), se entrega el % de caudal que esta deja circular (y).

4.4 Balance de Masa, Energía y Energía Mecánica de Manejo de Gases CT

Sabemos que los gases provienen del proceso fusión-conversión, para el modelo teórico partiremos de la base que el Convertidor Teniente procesa 90 tph de concentrado, con un flujo de enriquecimiento de O₂ del 36% y el Metal Blanco posee un 74% de Cobre.

- a) Campana: En esta ingresan los gases producto de la fusión del Convertidor Teniente, además ingresa aire de infiltración debido a la succión realizada por sopladores. Esta infiltración aproximadamente debería variar entre un 120%, para el enfriamiento de los gases tratando de no disminuir además la concentración de SO₂, para la óptima llegada de este a las Plantas de Ácido.

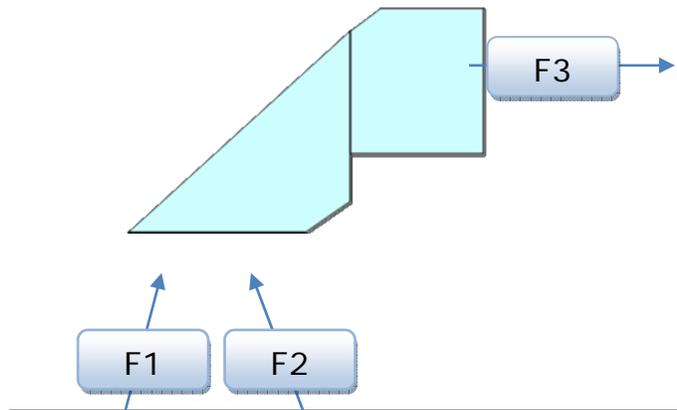


Fig 4.2 Balance Campana Convertidor Teniente

Balance Masa

$$F1 + F2 = F3$$

Este equipo posee pérdidas de calor por convección, radiación, además que posee paneles refrigerados y el ingreso de aire por infiltración lo que hace disminuir la temperatura del gas.

Otra variable es la presión de succión asumida ya que tiene conocimiento a ciencia cierta de la operación de los sopladores de las plantas se sabe que funcionan en un rango basado en Amperes.

Tabla 4.5 Balance Masa Campana

Número de corriente		F ₁	F ₂	F ₃
Descripción		Gases Salida Convertidor	Aire de Dilución	Mezcla de Gases con Aire
Flujo	Nm ³ /h	54.096	64.915	119.012
Concentración SO ₂	%	27,71	-	12,59
Concentración O ₂	%	1,39	20,75	11,95
Concentración N ₂	%	69,16	78,05	74,01

Concentración H ₂ O	%	1,75	1,20	1,45
Temperatura	°C	1250	25	643
Presión	mmH ₂ O	Atm	Atm	-2

- La variable de entrada al balance de campana hace referencia a la corriente de gases proveniente de CT, esta variable es el aire de infiltración la cual es modificable en el modelo, además de la presión de succión -2 mmH₂O, temperatura de 1250°C gases de salida de campana.

b) Cámara Enfriamiento Evaporativo. Esta cámara cuenta como se mencionó anteriormente con un Sistema Sonic, el cual ingresa agua y aire por 9 lanzas en forma de spray y además ingresa un flujo de aire de infiltración por las rastras de polvos que están abiertas, sin mencionar cual rotura de las paredes del equipo.

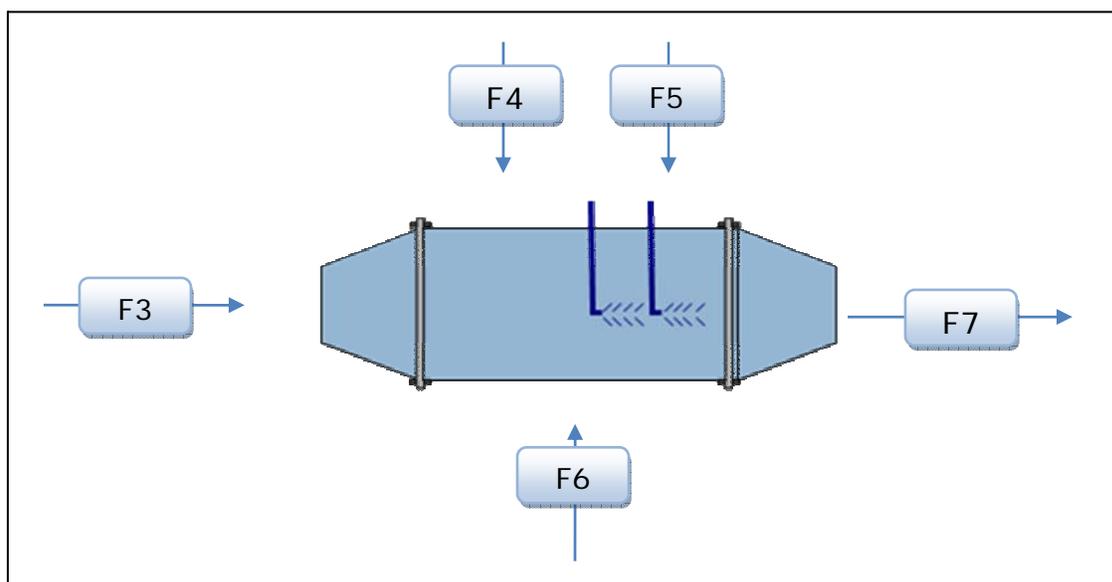


Fig. 4.3 Balance Masa Cámara Enfriamiento Evaporativo.

Balance Masa: $F_3+F_4+F_5+F_6=F_7$

Tabla 4.6 Balance Masa Cámara Enfriamiento Evaporativo

Número de corriente		F ₃	F ₄	F ₅	F ₆	F ₇
Descripción		Gases Campana	Aire	Agua	Aire Infiltración	Gases Salida
Flujo	Nm ³ /h	119.012	1600	7,48	3570	124.188
Concentración SO ₂	%	12,59	-	-	-	12,07
Concentración O ₂	%	11,95	20,75	-	20,75	12,31
Concentración N ₂	%	74,01	78,05	-	78,05	74,17
Concentración H ₂ O	%	1,45	1,20	100	1,20	1,43
Temperatura	°C	648	40	40	25	391
Presión	mmH ₂ O	-2,0	-	-	-	-2,6

- En esta etapa posee 3 variables modificables en el modelo, que son las del sistema Sonic (aire y agua) y el aire de infiltración, en este caso tiene un

3% de infiltración, se agregó 140 lpm es lo que promedio de agua se agrega y 1600 Nm³/h de aire junto con el agua.

c) Precipitador Electrostático.

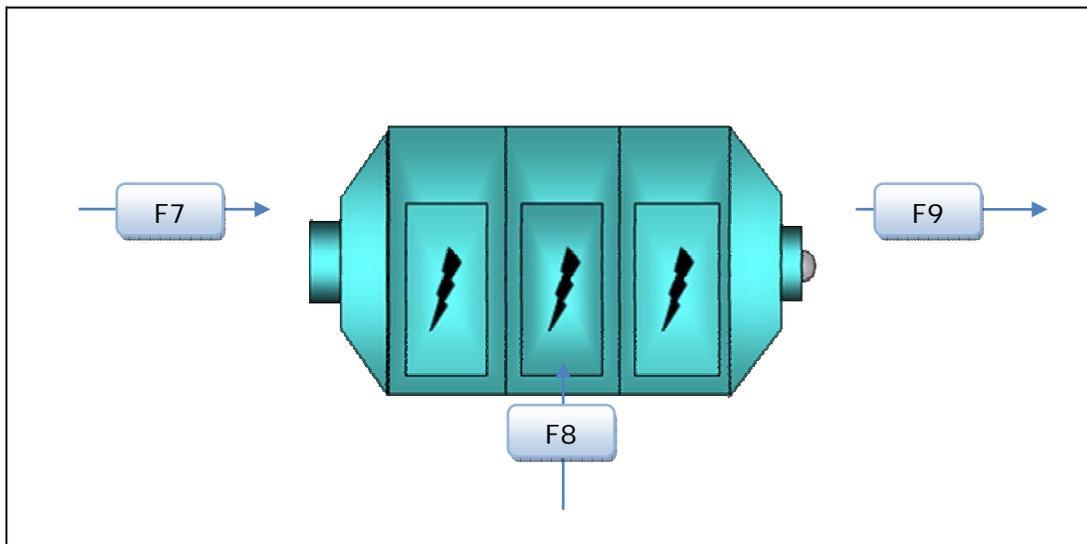


Fig. 4.4 Balance Masa Precipitador Electrostático

Balance Masa: $F_7 + F_8 = F_9$

Tabla 4.7 Balance Masa Cámara Enfriamiento Evaporativo

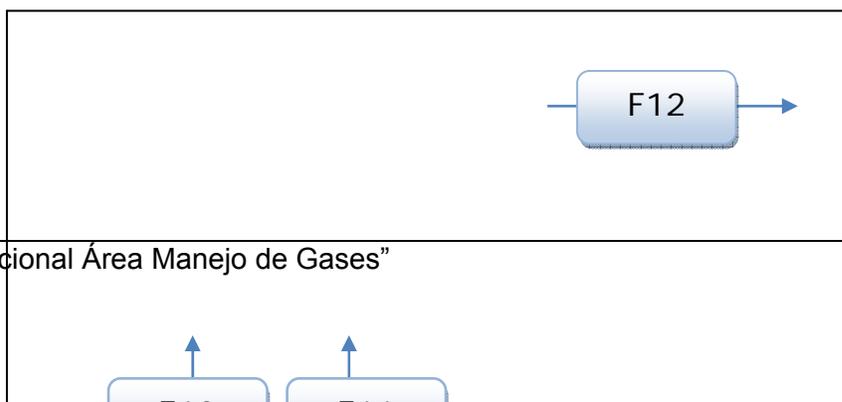
Número de corriente		F ₇	F ₈	F ₉
Descripción		Gases Cámara	Aire Infiltración	Gases Salida
Flujo	Nm ³ /h	124.188	3726	127.914
Concentración SO ₂	%	12,07	-	11,72
Concentración O ₂	%	12,31	20,75	12,56
Concentración N ₂	%	74,17	78,05	74,28
Concentración H ₂ O	%	1,43	1,20	1,42
Temperatura	°C	391		380
Presión	mmH ₂ O	-2,6	-	-5,2

- La infiltración de aire que se agrega a este equipo es de un 3%.

4.5 Balance Masa Manejo de Gases CPS

Para el Balance de la línea de CPS, partiremos de la base que se procesan 240 ton de Metal Blanco (5 tazas), 40.000 Nm³/h flujo de soplado

- Campana. Realiza la misma función que la campana para CT, es más pequeña en dimensiones capta menor gas, e idealmente tiene una infiltración de aire del 100%.



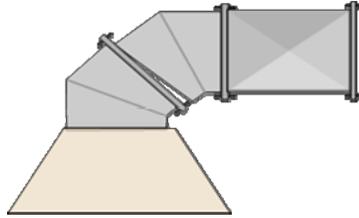


Fig 4.5 Balance Campana Convertidor Peirce Smith

Balance Masa: $F_{10} + F_{11} = F_{12}$

Tabla 4.8 Balance Masa Cámara Enfriamiento Evaporativo

Número de corriente		F_{10}	F_{11}	F_{12}
Descripción		Gases Salida Convertidor	Aire de Dilución	Mezcla de Gases con Aire
Flujo	Nm ³ /h	39.445	39.445	78889
Concentración SO ₂	%	18,63	-	9,32
Concentración O ₂	%	1,05	20,75	10,90
Concentración N ₂	%	79,3	78,05	78,68

Concentración H ₂ O	%	1,01	1,20	1,11
Temperatura	°C	1250	25	682
Presión	mmH ₂ O	Atm	atm	-2,0

b) Cámara Enfriamiento Radiativo. En base al diseño posee una infiltración del 3%, aunque para el modelo esta puede ser modificable, los datos son extraídos para el caso del CPS 3.

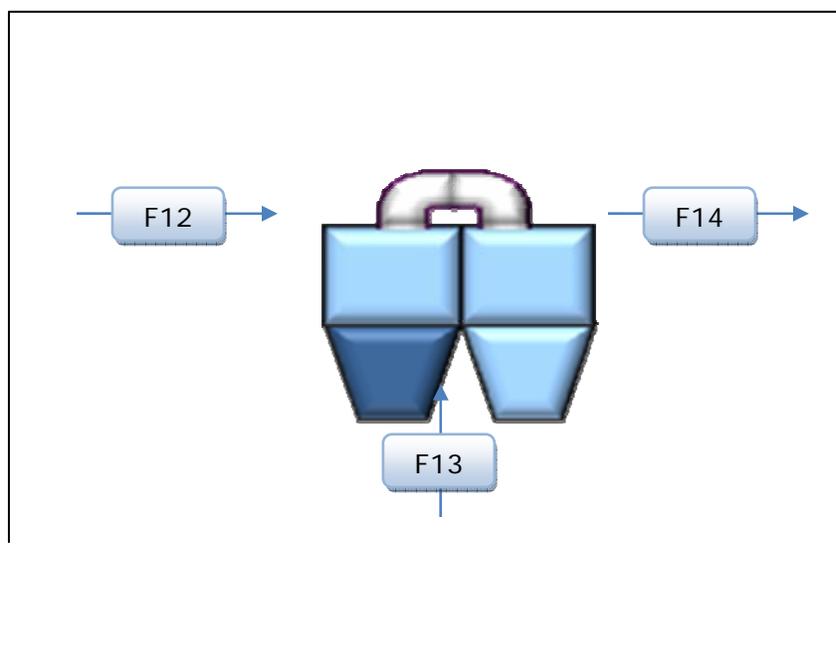


Fig 4.6 Balance Masa Cámara Enfriamiento Radiativo

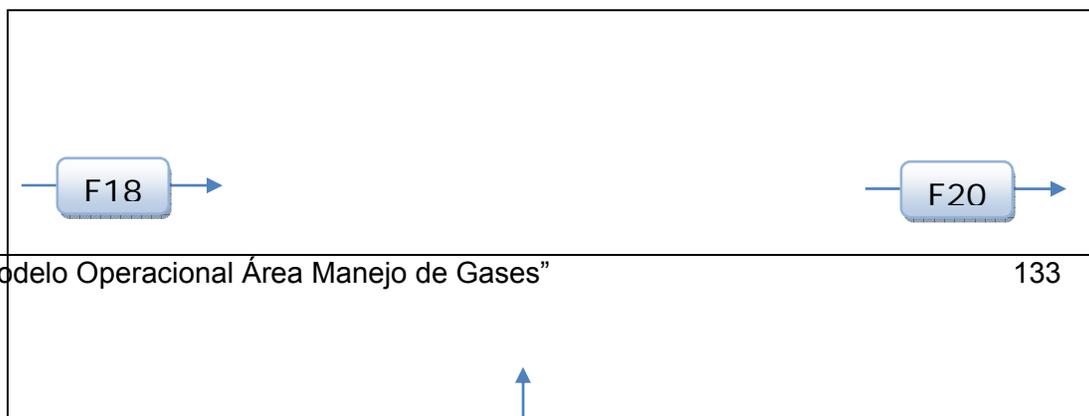
Balance Masa: $F_{12} + F_{13} = F_{14}$

Tabla 4.9 Balance Masa Cámara Enfriamiento Evaporativo

Número de corriente	F ₁₂	F ₁₃	F ₁₄
---------------------	-----------------	-----------------	-----------------

Descripción		Gases Salida Campana	Aire Infiltración	Salida Gases
Flujo	Nm ³ /h	78.889	2.367	81.256
Concentración SO ₂	%	9,32	-	9,04
Concentración O ₂	%	10,90	20,75	11,19
Concentración N ₂	%	78,68	78,05	78,66
Concentración H ₂ O	%	1,11	1,20	1,11
Temperatura	°C	683	25	395
Presión	mmH ₂ O	-2,0	-	-36,71

c) Precipitador Electrostático MILJO. Son 2 precipitadores que se encuentran en paralelo, estos reciben los gases de 1 o 2 Convertidores Peirce Smith (este caso CPS3), además posee por diseño una infiltración del 3% por equipo, pero el balance se realiza de forma global a los 2 precipitadores, asumiendo que se comportan de forma similar.



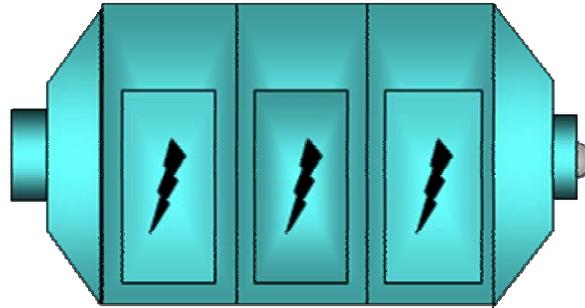


Fig. 4.7 Balance Masa Precipitador Electrostático MILJO

- Para 1 CPS

- Balance Masa: $F_{18}+F_{19}=F_{20}$

Tabla 4.10 Balance Masa Cámara Enfriamiento Evaporativo

Número de corriente		F ₁₄	F ₁₅	F ₁₆
Descripción		Gases Salida Cámara	Aire Infiltración	Salida Gases
Flujo	Nm ³ /h	81.256	4.875	84.484
Concentración SO ₂	%	9,04	-	8,78
Concentración O ₂	%	11,19	20,75	11,47
Concentración N ₂	%	78,66	78,05	78,64
Concentración H ₂ O	%	1,11	1,20	1,11
Temperatura	°C	395	25	385
Presión	mmH ₂ O	-36,71	-	-64,37

d) Ventiladores Tiro Inducido: Según los datos entregados por la curva característica del sistema, se muestra 3 puntos específicos, menor, mayor y operación óptima del ventilador como muestra la siguiente tabla 4.11:

Tabla 4.11 Datos en Curva Característica VTI

x		y
rpm	Q (m ³ /h)	P (Pa)
248	145000	80
474	285000	296
570	335000	408

De esta manera se agregó un complemento de Excel el cual interpola los puntos según los datos de rpm que se ingrese al modelo, y este nos otorgará la presión entregada que ayuda a reducir las pérdidas de carga del sistema. Se está evaluando el caso de que se encuentra en funcionamiento solo 1 CPS cuando esto ocurre los operadores siguen ciertas pautas de control, en este caso el rango de operación de los ventiladores es entre los 200-250 rpm.

Asumiremos que se ingresó el valor de 230 rpm en los 2 ventiladores, además la corriente F21 está evaluada a la entrada de los ventiladores, por lo tanto aumento su pérdida de carga, como muestra en la tabla 4.12

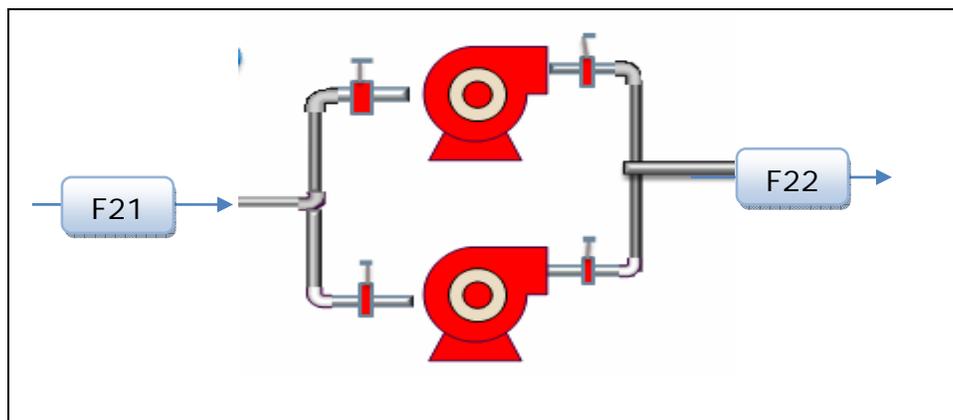


Fig. 4.8 Diagrama Ventilador Tiro Inducido

Balance Masa: $F_{21}=F_{22}$

Tabla 4.12 Balance Masa Cámara Enfriamiento Evaporativo

		F_{21}	F_{22}
Descripción		Entrada VTI	Salida VTI
Flujo	Nm ³ /h	84.484	84.484
Concentración SO ₂	%	8,78	8,78
Concentración O ₂	%	11,47	11,47
Concentración N ₂	%	78,64	78,65
Concentración H ₂ O	%	1,11	1,11
Temperatura	°C	385	385
Presión	mmH ₂ O	-64,37	-32,42

- Asumiendo que no hay infiltraciones en los ductos antes de llegar a los ventiladores.

e) Empalme Ductos CT y CPS

Como se está analizando los balance para el caso de que se encuentren en operación 2 CT's y 1 CPS, en el cual se mandará el flujo de gases de CPS a PLG1 y PLG2, con un porcentaje proporcional a los ductos .

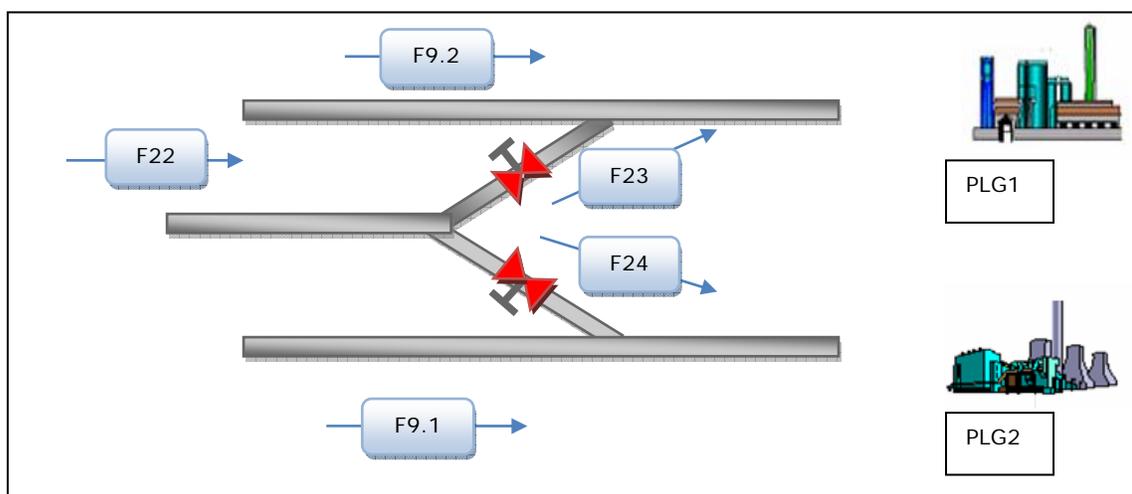


Fig.4.9 Diagrama Ductos hacia Plantas

Se supone en este caso los 2 Convertidores Teniente tienen la misma operación, solo se diferencia en las pérdidas de carga acumulada.

Balance Masa: $F_{9,1} + F_{9,2} + F_{23} + F_{24} = A \text{ plantas}$

Tabla 4.13 Balance Masa Cámara Enfriamiento Evaporativo

Número de corriente		F _{9,1}	F _{9,2}	F ₂₃	F ₂₄
Descripción		Antes Empalme CT1	Antes Empalme CT2	CPS a PLG1	CPS a PLG 2
Flujo	Nm ³ /h	127914	127914	34.957	44.344
Concentración SO ₂	%	11,72	11,72	-	8,67
Temperatura	°C	380	380	25	377
Presión	mmH ₂ O	-30,19	-87,1	atm	-65,01

- Gases a PLG 1 y PLG 2

La siguiente tabla muestra los parámetros de los gases a la llegada de las Plantas 1 y 2.

Tabla 4.14 Balance Masa Cámara Enfriamiento Evaporativo

Descripción		A PLG1	a PLG2
Flujo	Nm ³ /h	162.871	172.258
Concentración SO ₂	%	10,50	10,50
Temperatura	°C	350	333

Presión	mmH ₂ O	-122,78	-83,37
---------	--------------------	---------	--------

Capítulo 5 Validación del Modelo Operacional Manejo de Gases

En este capítulo se presenta algunos resultados obtenidos por el modelo desarrollado en Excel para la etapa Manejo de Gases de la Fundición Caletones.

El capítulo consta de 2 simulaciones realizadas para distintas alternativas de operación las cuales posteriormente serán comparadas con datos del sistema PI DataLink y de datos tomados en terreno ya que se sabe que hay sensores mal calibrados.

El caso de comparar el balance de masa realizado por el modelo con lo que sucede en terreno solo se puede realizar para el caso de la PLG1, ya que el sensor de flujo de la PLG2 entrega datos erróneos al sistema, solo se puede realizar la comparación haciendo la relación de ácido producido por la planta, para saber aproximadamente el gas que entra a esta, ya que sabemos que la conversión de SO₂ a H₂SO₄ es 1:1.

5.1 Casos a Analizar para Validación de Modelo

5.1.1 Primer Caso

En este caso se encuentran en operación CT1, CT2 y el CPS3, como se aprecia en la Fig 5.1, sacado de las pantallas PI DataLink. Sabemos que los equipos de color rojo se encuentran en operación y los verdes no, además la pantalla muestra

los datos de operación de una forma general, ya que están los datos que han ingresado los operadores, los cuales están en la tabla 5.1, más claro y detallado, también están los datos de resultado del sistema, que están en la tabla 5.2 .

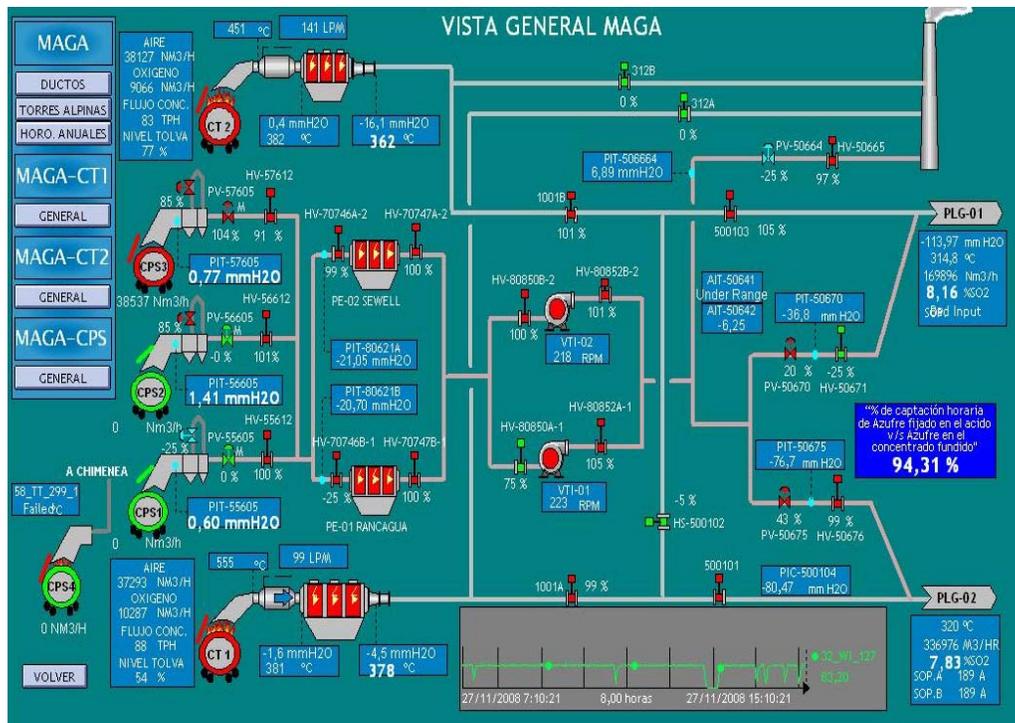


Fig 5.1 Esquema PI, Vista General Manejo de Gases

Tabla 5.1 Variables que se ingresan al modelo

Variables	Valores Ingresados
Concentrado CT2	83 tph
Soplado CT2	36%
Concentrado CT1	88 tph
Soplado CT1	36%
Soplado CPS3	40000 Nm ³ /h
Válvula Mariposa	100% abierta
Agua Enfriamiento CEE2	141 lpm
Agua Enfriamiento CEE1	99 lpm

VTI (rpm)	223
Válvula 50670	20%
Válvula 50675	43%

Con el ingreso de los datos al modelo realizado, este entrega los siguientes resultados. En el caso de los equipos que poseen infiltración, este dato también se tiene que ingresar, para esto es necesario ir tanteando la infiltración para llegar a la temperatura real, y así sabremos que nivel de infiltración esta ingresando al sistema de Manejo de Gases

Tabla 5.2 Resultados entregados por Modelo

Variables	Valores Reales	Valores Modelo	%Error
Temperatura Salida CEE2	382	384	0,5
Temperatura Salida CEE1	381	383	0,2
Presión Entrada PEE2	0,4	0,2	0,5
Presión Entrada PEE1	-1,6	-1,5	6,0
Presión Entrada PLG1	-36,8	-44,71	21,49
Presión Entrada PLG2	-76,7	-35,38	53,87
Flujo PLG1	169996	172714	1,59
Flujo PLG2	336976	503319	33,0
Temperatura PLG1	314,8	338	7,36
Temperatura PLG2	320	331	3,4
Presión PLG1	-113,97	-139,02	18

Presión PLG2	-80,47	-93,39	12,8
% SO₂ PLG1	8,16	9,49	14,01
%SO₂ PLG2	7,83	9,88	20

- Haciendo un análisis de las diferencias en los resultados, como en el caso de los % de SO₂ a la entradas de Planta y de las temperaturas se debería a que existen infiltraciones de aire el ductos de alta velocidad.

5.1.2 Segundo Caso.

En está ocasión se encuentra operando, los 2 CT's y CPS1 y CPS3 como se aprecia en la Fig 5.2, sacado de las pantallas PI DataLink también. Al igual que en caso anterior la tabla 5.3 muestra los datos ingresados por operadores y la tabla 5.4 muestra los resultados con su respectivo error.

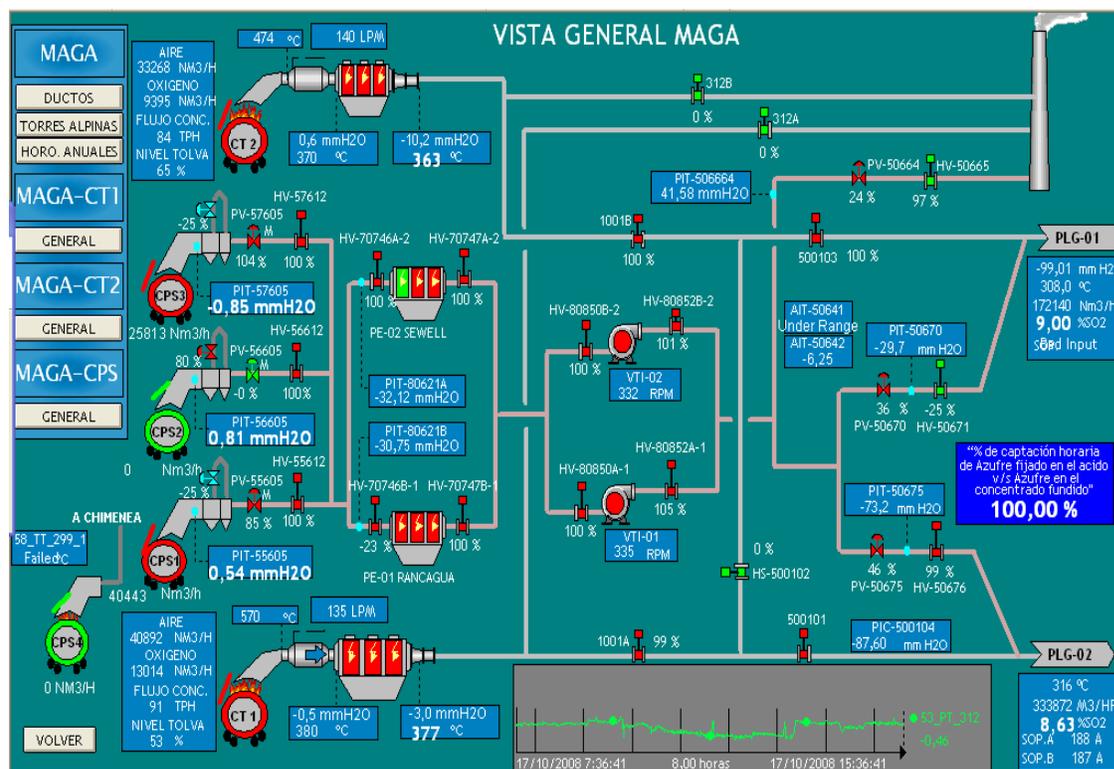


Fig 5.2 Esquema PI, Vista General Manejo de Gases

La siguiente tabla muestra los parámetros ocupados para el funcionamiento de 2 CT's y 2 CPS's, con escape por chimenea.

Tabla 5.3 Variables que se ingresan al modelo

Variables	Valores Ingresados
Concentrado CT2	84 tph
Soplado CT2	36%
Concentrado CT1	91 tph
Soplado CT1	36%
Soplado CPS3	25813 Nm ³ /h
Soplado CPS1	40000 Nm ³ /h
Válvula Mariposa 3	100% abierta
Válvula Mariposa 1	85% abierta
Agua Enfriamiento CEE2	143 lpm
Agua Enfriamiento CEE1	135 lpm
VTI (rpm)	335
Válvula 50670	36%
Válvula 50675	46%

Válvula Chimenea	24%
------------------	-----

En este caso observamos que se abre la válvula hacia chimenea, ya que existe un sobrepresionamiento de los gases de CPS hacia los gases provenientes de CT, los cuales tienen prioridad para las plantas de ácido ya que posee un porcentaje de SO₂ alto. Por datos históricos sabemos que la apertura varía entre 15-30%. No sabemos cual es el flujo de gases que salen por chimenea, ya que los únicos datos de flujos son a las entradas de las plantas. El procedimiento de cálculo, de cómo encontramos el flujo extraído por chimenea detalla en el Anexo V, junto con el cálculo de tiraje a chimenea.

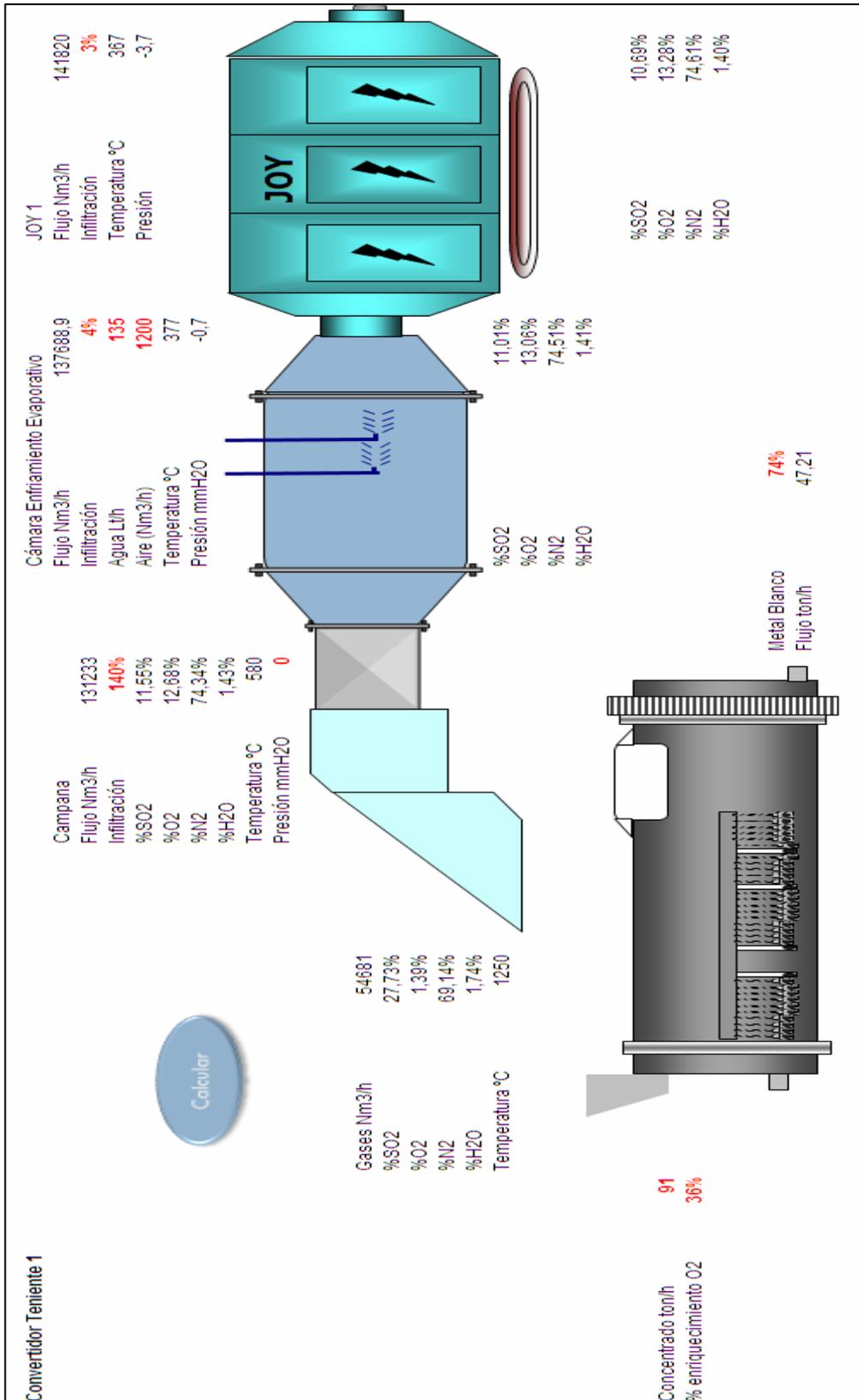
Tabla 5.4 Resultados entregados por Modelo

Variables	Valores Reales	Valores Modelo	%Error
Temperatura Salida CEE2	370	375	1,3
Temperatura Salida CEE1	380	377	0,8
Presión Entrada PEE2	0,6	0,7	16,6
Presión Entrada PEE1	-0,5	-0,7	28,7
Presión Entrada MILJO	-30,75	-91,43	66,4
Presión Entrada PLG1	-36,8	-99,02	62,8
Presión Entrada PLG2	-73,2	-30,22	61,2

Flujo PLG1 Nm ³ /h	172140	172167	0,01
Flujo PLG2 m ³ /h	333872	545837	38,8
Temperatura PLG1	308,0	310	0,6
Temperatura PLG2	316	315	0,3
Presión PLG1	-99,01	-134,24	0,26
Presión PLG2	-87,60	-103,47	15
% SO ₂ PLG1	9,00	9,27	2,9
%SO ₂ PLG2	8,63	9,54	9,5

- Como se explico anteriormente los números de color rojo se ingresan, por lo tanto además de ingresar los datos de los operadores, se ingresan las infiltraciones en cada equipo realizando un tipo de tanteo para aproximarse a la temperatura que aparece en la pantalla de PI, de esta manera se puede apreciar la cantidad de aire que entra en cada equipo y que esta es mucho más de lo que se tiene estimado por diseño. Para el caso de CT1 la infiltración es de un 140% y para el CT2 un 150% en campana.

La validación realizada no es del todo fidedigna ya que hay varios resultados con un porcentaje de error mayor a 5%, por lo cual se necesita datos de terreno o corroborar si los instrumentos de control que se encuentran en el área Manejo de Gases se encuentran calibrados o situados en algún lugar representativo a lo que esta ocurriendo. Se solicito realizar muestreos en terreno, se realizó un procedimiento de lo requerido, pero no se logró hacerlo hasta el día de hoy. El procedimiento se encuentra en el Anexo VIII.



Fig

5.3

Pantalla Excel Convertidor Teniente 1

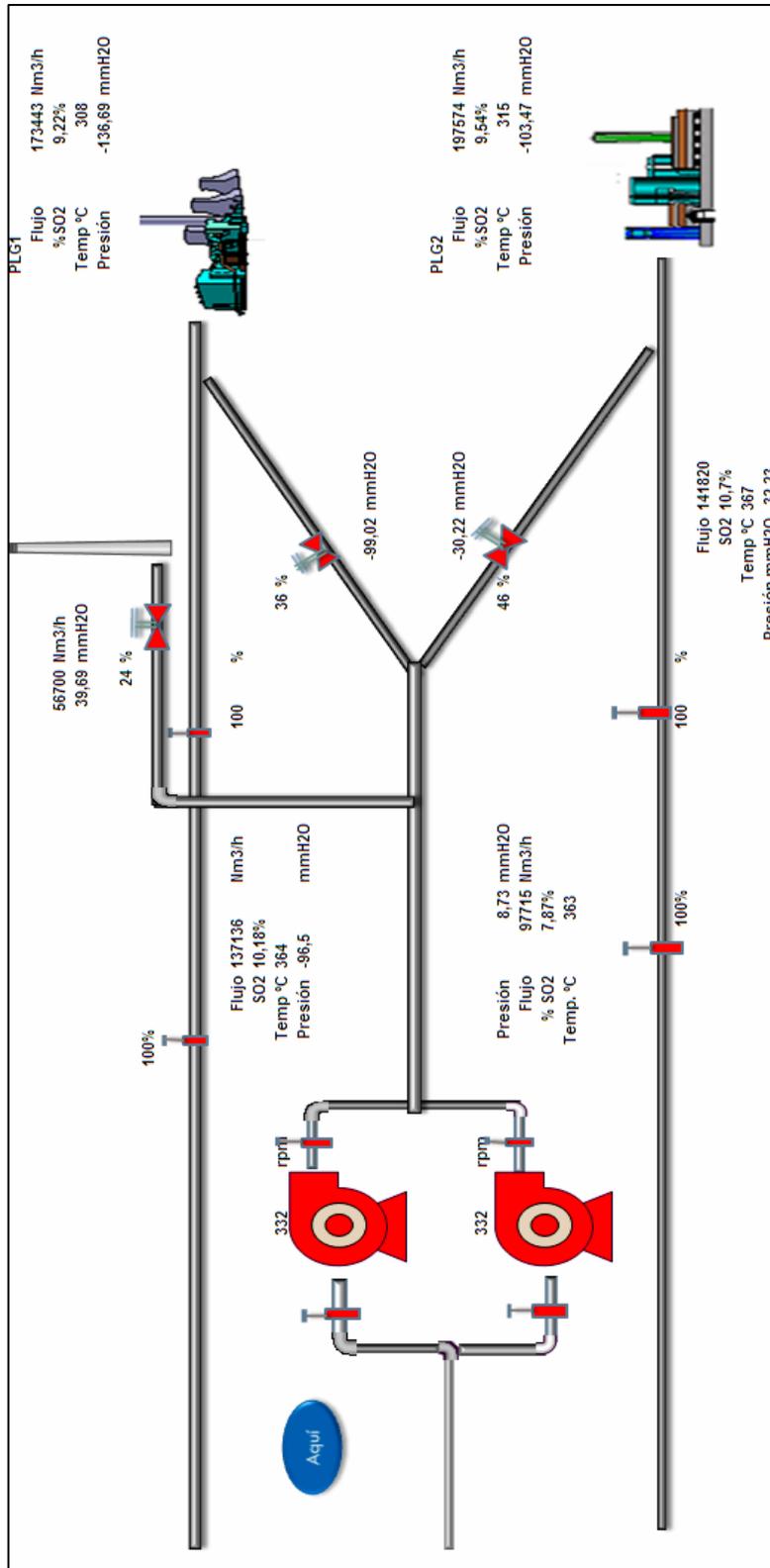


Fig 5.5 Pantalla Excel Gases hacia Plantas

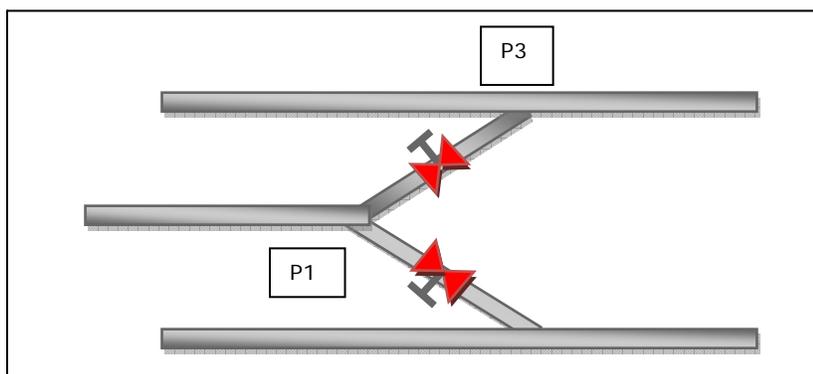
5.2 Optimización de Proceso.

La sección más complicada de operar está en el empalme de los ducto de los CT y CPS, ya que no se tienen datos al respecto, por lo que no se sabe a ciencia cierta como se comporta el sistema, el diagrama de esta sección se ve claramente en la Fig 5.4. donde tenemos los 2 VTI, 2 válvulas mariposas que regulan los gases de CPS a las PLG's y un ducto a chimenea.

Era necesario tener el catálogo de válvulas y de los ventiladores para saber los cambios que se producen ya que es un sistema variable, como no se encontraron estos datos, se realizaron los cálculos basados en la ec. de Bernoulli para lograr el equilibrio del sistema.

La situación más complicada de operar es cuando se encuentran 2 CPS's junto con los 2 CT's, por lo cual la mayoría de las veces se abre a chimenea ya que los equipos se ven sobrepresionados, lo ideal sería es que no se eliminarán gases por chimenea.

Sabemos que los operadores dan prioridad a los gases de CT por sobre los de CPS's, por esta razón la presión en ese punto por parte del ducto CT es el que tomaremos como P_2 para nuestro Bernoulli, de esta misma forma la P_1 se encuentra en la división del ducto AV, como se ve en la Fig. 5.6. En el capítulo 3 se observaron los datos de K, para una válvula mariposa para la cual se realizó una línea de tendencia.



P2

Fig 5.6 Esquema aplicación Bernoulli

Metodología de Operación para Optimización.

- Se capturan todos los gases que salen de VTI y se dividirán según proporcionalidad de área de cada ducto.
- Teniendo la división de flujo que queremos que pase por los ductos y el área de los ductos obtenemos la velocidad (v_2), teniendo la velocidad, calculamos las pérdidas por fricción y por accesorios (k), según la ec. de Bernoulli.

$$\frac{P_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2g} + \left(f \cdot \frac{L}{D} + K \right) \cdot \frac{v_2^2}{2g}$$

- El K que me entrega la ecuación es el acumulado de todos los accesorios que se encuentra en el tramo.
- Contando con el K perteneciente solo al que corresponde a la válvula mariposa, y contando con la curva de tendencia la cual relaciona K con ángulo de apertura de válvula, obtenemos el ángulo ideal que se necesita para nuestras condiciones.
- La ecuación para la línea de tendencia obtenida de datos es la siguiente:

$$K = 0,1362 \exp(0,1162 \cdot 0,9 \cdot (90 - \%)) \quad \text{ec. 5.1}$$

Se analizó la optimización para los distintos casos de rpm de los VTI (operando 2 CPS), en la siguiente tabla se muestra los % de apertura de válvulas mariposas optimizadas.

Tabla 5.5. Aperturas Válvulas Mariposa Optimizadas

rpm VTI	% apertura PLG1	% apertura a PLG2
290	42	85
300	40	65
310	39	55
320	38	48
330	37	45

Podemos concluir que teóricamente de esta manera habría una solución para el problema más crítico que se encuentra en la operación, y que es el principal ya que es el momento en que más gases se deberían atrapar y el sistema no es capaz de hacerlo, por un tema operacional.

Lamentablemente no podemos comprobar o validar al 100% este supuesto teórico ya que no poseemos información en los puntos en conflicto que son la unión de los ductos CT's con los ductos CPS's.

Capítulo 6 Simulador Proceso Manejo de Gases

En este capítulo se dará una breve explicación de cómo opera la simulación realizada para la etapa de Manejo de Gases de la Fundición Caletones, la cual esta basada fundamentalmente en Balances de Masa, Energía y Energía Mecánica presentados anteriormente, los cuales se llevaron a cabo en planillas Excel, las cuales se relacionan para llegar a los resultados.

Aproximadamente tiene unas 20 hojas de cálculos (Balances, Capacidades Caloríficas, Pesos Moleculares, Propiedades Físicas, etc).

6.1 Pantallas de Interacción

Para simplificar esto hay 5 hojas, en las cuales se encuentra esquematizado el proceso de Manejo de Gases, divididos por sectores:

- Manejo de Gases Convertidor Teniente 1
- Manejo de Gases Convertidor Teniente 2
- Convertidor Peirce Smith 1, 2, 3
- Manejo de Gases Convertidor Peirce Smith 1, 2, 3
- Llegada a Plantas de Ácido Sulfúrico.

6.2 Parámetros de Operación Pantallas

Como se mencionó anteriormente tenemos 5 pantallas, en las cuales podemos ingresar y cambiar los parámetros, como lo indica el proceso en las Pantallas de PI DataLink. La primera pantalla es la de Manejo de Gases Convertidor Teniente 1, la cual consta obviamente del Convertidor Teniente, la Campana Refrigerante, Cámara Enfriamiento Evaporativo y Precipitador Electrostático, como muestra la Fig 6.1., para efecto de comodidad se colocaron solamente en una pantalla.

- *Convertidor Teniente 1*: Para este equipo los parámetros para ingresar son las Toneladas de Concentrado, el enriquecimiento de O₂, Temperatura de salida de los gases (1250°C) y la ley de Metal Blanco. El Balance con todo detalle se encuentra en el Anexo III.
- *Campana*: Este equipo el parámetro a ingresar es la infiltración de aire por boca, este se realiza tanteando la infiltración, ya que el dato de temperatura es mostrado en las pantallas de PI.
- *Cámara de Enfriamiento Evaporativo*: Los parámetros para este equipo son el agua y aire Sonic, y el aire de Infiltración, también en este equipo el aire de infiltración se agrega según la temperatura que muestre las pantallas según la correcta medición de la instrumentación instalada en este equipo.
- *Precipitador Electrostático*: En este equipo solo tenemos como parámetro el aire de infiltración que se maneja igualmente que los otros equipos.

Del mismo modo como es evaluado esta etapa, se maneja el área de Convertidor Teniente 2.

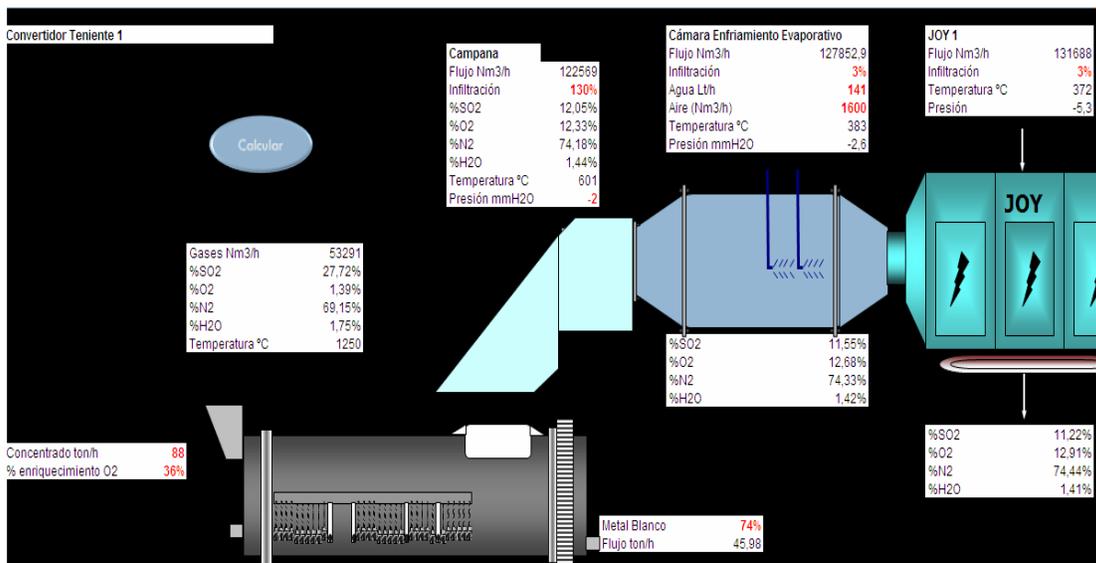


Fig 6.1 Pantalla Convertidor Teniente 1

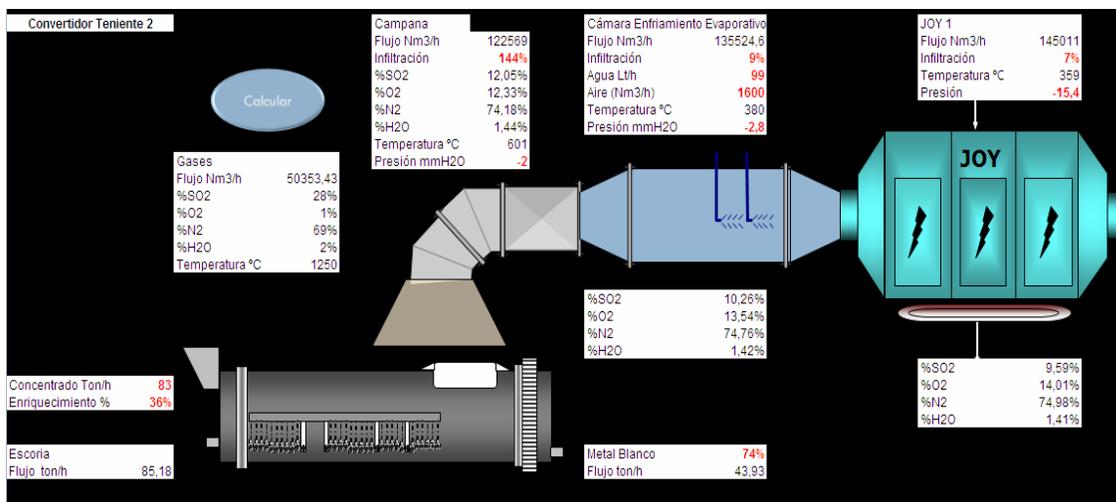


Fig 6.2 Pantalla Convertidor Teniente 2

La siguiente planilla es donde estan esquematizados los Convertidores Peirce Smith 1, 2, 3, con sus respectivas campanas en los cuales el parámetro a ingresar es el aire de soplado el cual varía entre 36.000 Nm³/h y 40.000 Nm³/h y al aire de infiltración. Con esto se obtiene el flujo de gases que salen por boca del convertidor más el aire de infiltración. Se asume la temperatura de salida de los

gases por boca del Convertidor (1250°C). El balance de estos convertidores se explica en más detalles en el Anexo III.

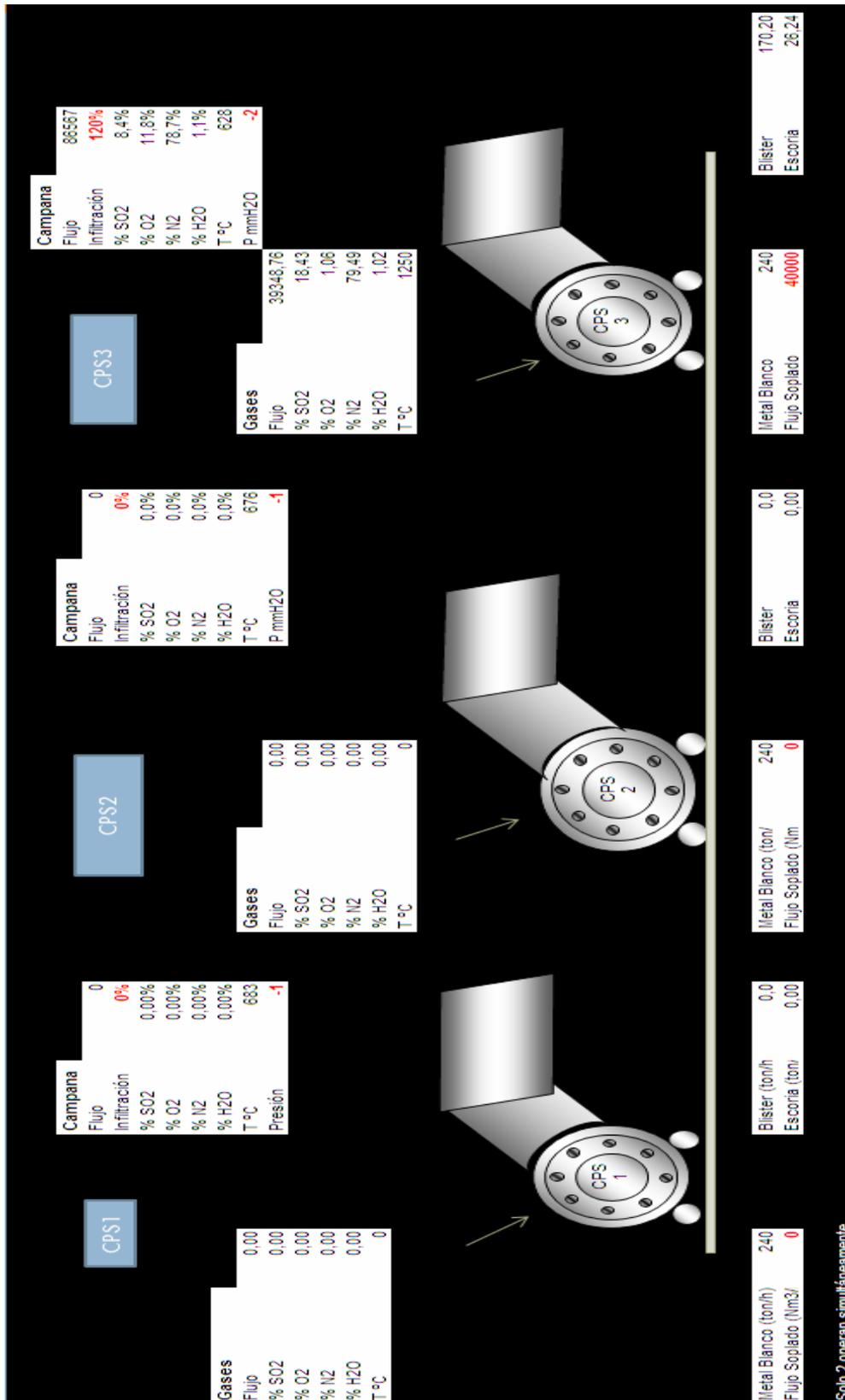


Fig. 6.3 Diagrama Pantalla Convertidor Peirce Smith

En la 4° planilla tenemos en diagrama las Cámaras de Enfriamiento Radiativos, más los dos Precipitadores Electrostáticos MILJO. Como se describió anteriormente a la salida de las Cámaras de Enfriamiento se tienen válvulas mariposas las cuales se mueven debido a las pérdidas de carga que genera el sistema y dependiendo que equipo se encuentre en operación, esta es otra variable de operación la cual se maneja según porcentaje de apertura como se explico en el capítulo de alternativas operacionales. Cualquier cambio realizado en esta Hoja se deben presionar los botones en azul.

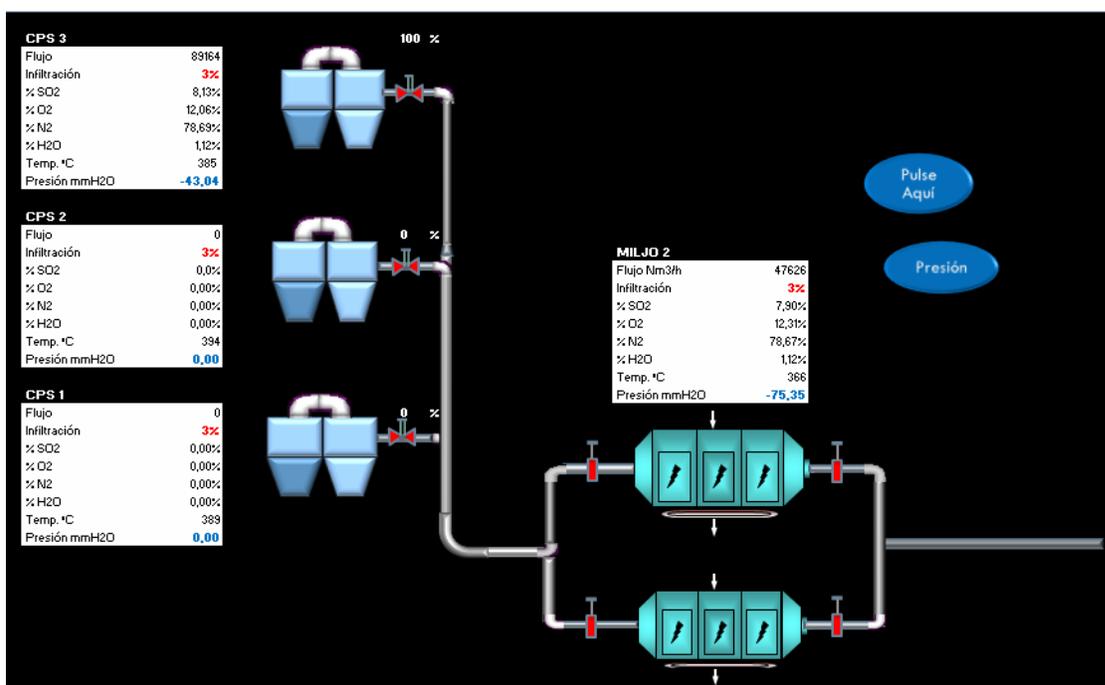


Fig. 6.4 Pantalla Cámara Radiativa y Precipitadores MILJO

Y por último la pantalla que une los gases de CT's y CPS's hasta la PLG 1 y PLG 2, en donde se encuentran los Ventiladores de Tiro Inducido, los cuales el parámetro de operación que se les ingresa son las rpm, otros datos ingresados son las aperturas de válvulas hacia las Plantas.

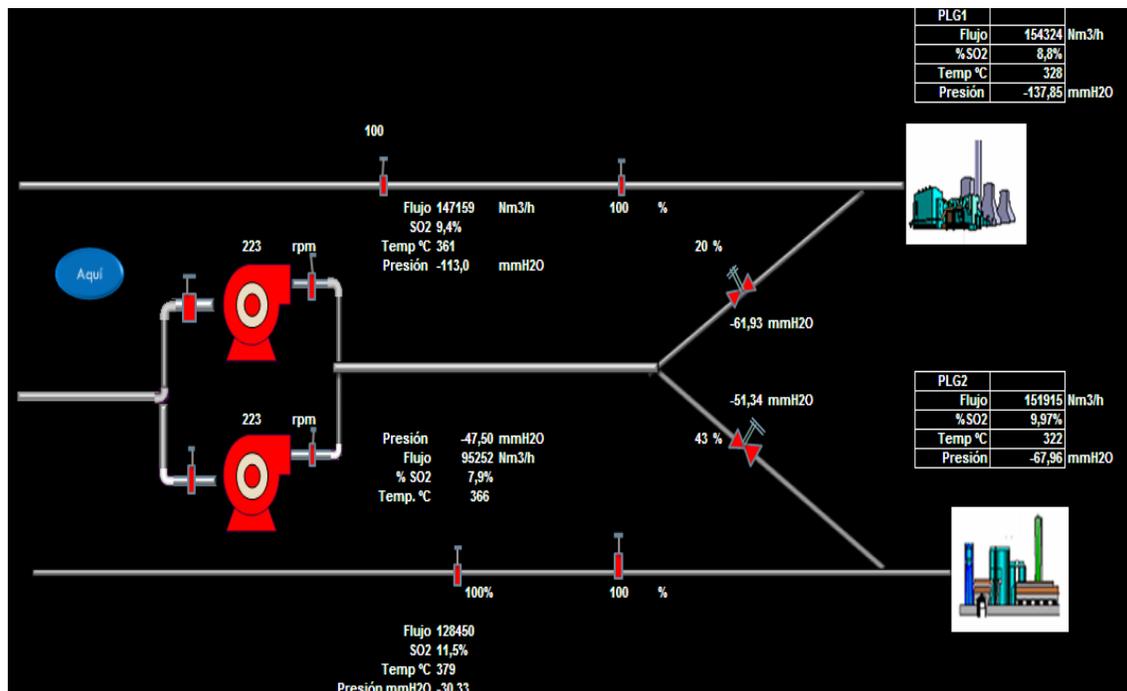


Fig. 6.5 Pantalla VTI y Plantas PLG1 y PLG2

A continuación se presentan las pantallas de la Planilla Excel, donde las celdas en rojo, son los datos que se ingresan.

Código de Color: Debido a que existen en el simulador una gran cantidad de datos, se está en la obligación de aplicar código de colores para que sea más claro su funcionamiento.

Color Rojo: Todas las celdas que tengan sus datos de color rojo significa que son datos que se ingresan, por lo tanto es posible cambiarlas cuando se desee.

Color Azul y Blanco: Todas las celdas de este color es imposible cambiarlas ya que son resultados o están vinculadas con otras.

Color Negro: Todas las celdas con números o letras negras son datos de cálculos.

De esta manera este simulador se presenta de una forma fácil y didáctica de usar por los operarios y jefes de área, ya que además se presenta en una herramienta conocida por todos como es Microsoft Office Excel.

Capítulo 7 Análisis de Simulaciones Manejo de Gases

En este capítulo presentaremos un resumen para diferentes casos realizando una variación de datos más relevantes que entrega el modelo para observar como se comporta éste.

Uno de los objetivos principales de estos modelos es realizarlos para revisar donde se encuentran los puntos críticos y los límites de capacidad de los procesos individuales y cuales son las variables más relevantes que copan estas capacidades y en consecuencia activar los estudios que requieran para levantar estos puntos críticos detectados, de esta manera poder ocupar al máximo las condiciones para las cuales fueron diseñadas las plantas.

Si uno realiza la simple suma de los flujos de gases que entregan los reactores, adicionándole las infiltraciones podemos observar que las plantas poseen la primera restricción ya que si se encuentran 2 CPS y además los 2 CT's se ven sobrepasados por lo que una fracción de los gases deben ser venteados a chimenea debido a las limitaciones de capacidad volumétrica de las plantas de ácido.

$$\text{Flujo Gases} = 2 \text{ CT's} + 2 \text{ CPS's} \quad \text{ec. 7.1}$$

$$\text{Flujo Gases} = 2 \cdot 160.000 + 2 \cdot 90.000 \text{ (Nm}^3\text{/h)}$$

$$\text{Flujo Total} = 500.000$$

$$\text{Capacidad Plantas de Ácido} = 174.000 + 280.000 = 454.000 \text{ Nm}^3.$$

Se aprecia que hay cierta cantidad de flujo que se debe ventear a chimenea, pero hay que considerar que los flujos de los Convertidores Peirce Smith son batch, por lo tanto no son continuos al igual que la concentración de SO₂ en este gas. Por esta razón los 3 Convertidores se alternan en su funcionamiento, este

procedimiento de alternancia de reactores podría ser mucho mejor realizado, si entrara en la conciencia de los operadores de FUCO que los gases que salen de la producción de Cobre Blister, se genera ácido y además la Fundición trabaja en forma limpia.

Adicionalmente se analizó cual era el grado de infiltraciones de aire en el tren de gases de CT y CPS y su impacto en la temperatura.

7.1 Variabilidad de Concentrado en Convertidor Teniente.

Un aspecto que se quería estudiar era el efecto de la variabilidad en el flujo de salida de gases y el %SO₂, según el concentrado que entra a los Convertidores Teniente. El flujo de concentrado utilizado en los CT varía entre 80-100 ton/h, como muestra el siguiente diagrama de tendencia.

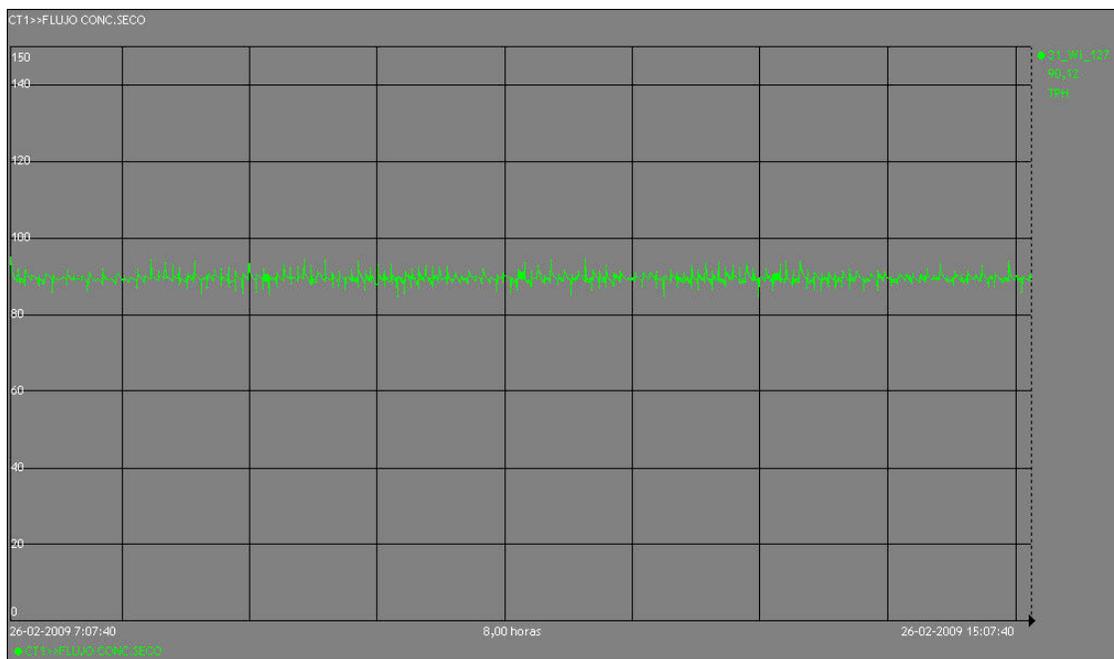


Fig. 7.1 Diagrama de Tendencia del Convertidor Teniente 1 durante 8 horas.

Variando el concentrado se realizó el siguiente gráfico:

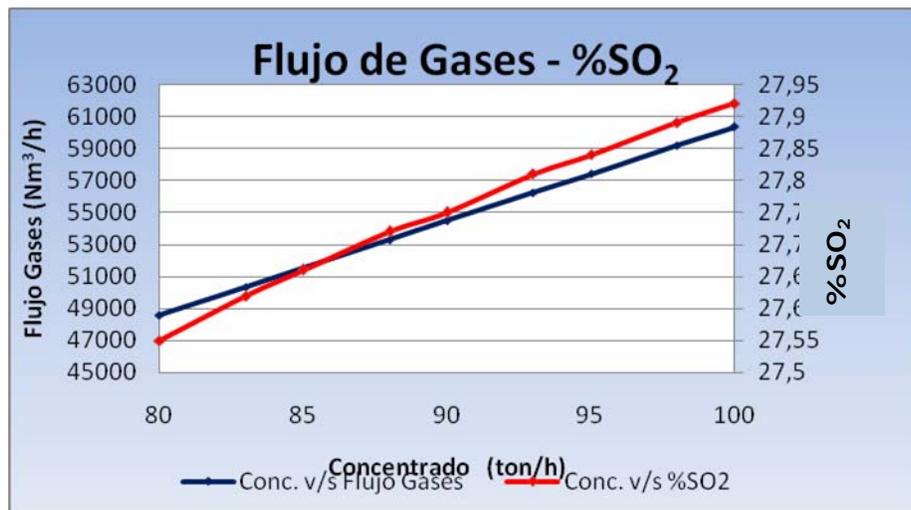


Fig. 7.2 Gráfico Flujo de Gases y %SO₂ variando Concentrado a CT.

Podemos apreciar que el flujo de gases (línea azul) varía desde los aproximadamente 49.000 Nm³/h y los 60.000 Nm³/h y que la concentración de SO₂ no tiene una gran variación se mueve solo a través del 27 a 28%. Estos datos se obtuvieron manteniendo constante el % de enriquecimiento de O₂ (36%). Otra variación importante a saber es la que tiene la infiltración de gases en el proceso, como afecta a la temperatura y como afecta al %SO₂. A continuación se muestra el gráfico que representa esta variación:

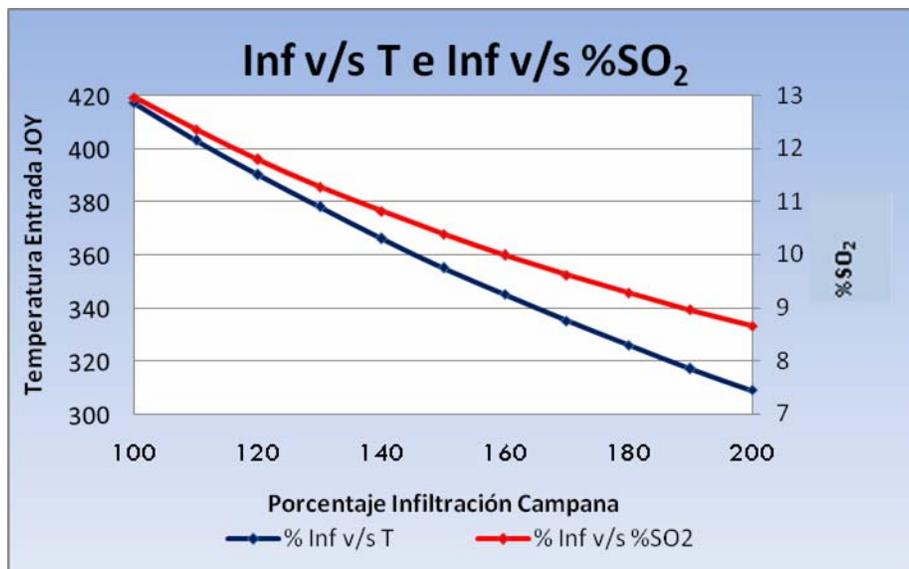


Fig. 7.3 Gráfico Inf v/s T y Inf. V7s %SO₂

La temperatura representada en el gráfico es a la entrada del Precipitador Electrостático JOY, ya que tiene como condición de operación una entrada de gas menor a 400°C, pero esto no quiere decir que haya que aumentar en demasia el flujo de aire ya que diluye el gas, por lo tanto baja su %SO₂, importante en la producción de ácido.

Otro tema importante en el tren de gases es la pérdida de carga que se produce, la mayor implicancia que tiene esta pérdida es en la unión de ductos ya que existe una diferencia de presiones en estas uniones lo cual produce que el gas de uno de los dos ductos le dificulte el paso, por lo tanto hay equipos que se ven sobrepresionados. Es el caso de las uniones de los 3 CPS's y las uniones de los gases de CT's y CPS's antes de las entradas a las Plantas.

Esta dificultad que se produce afecta seriamente a la Fundición la cual se ve saturada de gases tóxicos como es el SO₂. Por lo tanto se realizó un análisis para lograr que los gases en las uniones lleguen con igual pérdidas de carga de esta manera no se impedirán el paso uno al otro.

En el caso de las uniones de los CPS's el que hará la variación de pérdidas de carga será la válvula mariposa que se encuentra a la salida de la cámara de enfriamiento radiativa.

CONCLUSIONES

El modelo fue desarrollado para el Sistema de Manejo de Gases de proceso de la Fundición Caletones para determinar si el tren de gases puede manejar el caudal de gas asociado a la capacidad de fusión de concentrado, donde podemos concluir que se requiere trabajo adicional al ya realizado para refinar las predicciones del modelo. Si este modelo fuera desarrollado completamente, nos entregaría un mejor entendimiento de los impactos actuales y futuros de diversas configuraciones operativas. Se puede transformar en una herramienta para planificación de escenarios futuros y optimización del sistema.

Lo ideal sería incluir a la interfaz del modelo realizado en Excel todas las alternativas operacionales que posee Manejo de Gases, lo cual es complejo pero se llegó a la idea de representar el modelo de una forma dinámica para trabajar, por lo que podemos decir que se cumplió uno de los principales objetivos planteados, el cual era estructurar un modelo representativo del sistema que ayude a entender el comportamiento de los gases, principalmente su fluodinámica.

Sabiendo plenamente como es la fluodinámica del sistema las mejoras en operación serían muy grandes, una mejoría de operación posiblemente reduciría el consumo de energía, como es el caso de los VTI no se tiene conocimiento de cómo es su comportamiento, ya que por lo visto en su diseño está sobredimensionado para el uso que se le da, y otra mejoría sería minimizar las emisiones por chimenea.

Esta optimización debería enfocarse en:

- Reducir Infiltraciones en Campana.
- Eliminar Posibilidades de Recirculación de flujos en el sistema.

- Maximizar el uso de la capacidad de las plantas de ácido existentes.

Como se mencionó en el capítulo de validación la correlación entre las predicciones del modelo y la data de PI, en algunos caso se aproxima en otros es lejana, pero se sabe con los controladores PI algunos no funcionan correctamente, donde se tiene más ignorancia al respecto es en el sector de VTI aguas abajo, donde está todo sellado. Se solicitó implementación de tomas de muestreo, para obtener datos operacionales en terreno, de esta forma se permitiría conocer y entender el comportamiento del proceso antes de llegar a las plantas.

Por lo que nos quedo tema pendiente, ya que no se pueden corroborar los datos de la data PI, este tema el área de Procesos de Limpieza de Gases de la Fundación Caletones es de gran importancia, por el que tiene continuidad después de esta memoria por lo que queda en pie la implementación de accesos de muestreo.

De esta forma quedó materia pendiente:

1. Profundizar aun mas en el tema ya sea como proyecto de titulo o bien como proyecto interno o licitado. Con la realización de estudios fluodinámicos del sistema, mayoritariamente donde es desconocido lo que sucede y también donde se tienen puntos críticos como es el caso de los empalmes de gases CT y CPS; desarrollo de campañas de muestreo en terreno; entre otras iniciativas.
2. Evaluar el sistema de muestreo implementado en el Manejo de Gases del Convertidor Teniente 1 como forma oficial de análisis de gases directo de Boca Convertidor Teniente 1 y posteriormente implementarlo en equipos Convertidor Teniente 2 y Convertidor Pierce Smith .(Validación de Muestreo), ya que se realizaron muestreos a estos equipos pero fue insuficiente, el personal de laboratorio era escaso para todas las necesidades de la Fundación.

3. Complementar el muestreo con la Termodinámica del sistema a fin de generar el modelo de mayor precisión y exactitud que permite lograr una predicción eficiente del comportamiento futuro de Manejo de Gases. Para finalmente ser implementado en los sistemas de monitoreo en línea (PI System) usados en la operación diaria de los equipos de las diferentes etapas de proceso.

BIBLIOGRAFIA

- 1) Codelco-Chile, División el Teniente, “Manual de Operaciones de Manejo de Gases”, p. 3-80, (2004), (GFUN-PTE-M-002).
- 2) Codelco-Chile, División el Teniente, “Manual de Convertidores Teniente”, p. 3-80, (2004), (GFUN-PTE-M-002).
- 3) Codelco-Chile, División el Teniente, “Manual de Operaciones de Convertidor Peirce Smith”, p. 3-80, (2004), (GFUN-PTE-M-002).
- 4) Codelco-Chile, División el Teniente, “Manual de Procesos Plantas de Limpieza de Gases- Zona de Limpieza de Gases, p. 3-60, (Marzo, 2004), (GFUN-PLG-M-001).
- 5) Codelco-Chile, División el Teniente, “Manual de Operaciones de Planta de Tratamiento de Efluente 1y 2”, p. 3-80, (2004), (GFUN-PTE-M-002).
- 6) Estudio Ingeniería de Proyectos “Sistema Captación de Gases Primarios CPS”-SNC LAVALIN Chile. S.A
- 7) Bustamante, René “Fluid Dynamic Study of Smelting Processes Gas Handling and conversion to Acid Plants”. 05 Dic. 2006.
- 8) Gas Cleaning Technologies-“Primary Gas Flow Distribution and System Pressure Loss Analysis new Electrostatic Precipitators”-Octubre 2002.
- 9) UCV, Manual de Proceso. Descripción General Manejo de Gases Fundición. Asistencia Técnica Proyecto Maga CT-CPS, 2003.
- 10) Idelchik LE. “Handbook of Hydraulic Resistance” Coefficients of Local Resistance and of Friction. 1960. P-361
- 11) Hatch-“Informe Evaluación Técnica Independiente Tren de Gases Fundición Caletones”.2005.

- 12) Smith Van Ness. “Capacidades Caloríficas para gases” Tabla C1. 5°ed.
- 13) Kern, Donald. “Procesos de Transferencia de Calor”. Cap.3,4,9,10.
- 14) Bird, R.B. “Fenómenos de Transporte”. Cap.1
- 15). Robert H. Perry, Don W. Green y James O. Maloney, “Manual del Ingeniero Químico”, Sexta Edición, McGraw Hill, Sección 2, 7 y 19, (1999).
- 16). Software HSC Chemistry 5.0, Outokumpu Research, Pori, Finland, Licence Codelco El Teniente, SN: 50163.
- 17) “Ingeniería Térmica Universidad de Cantabria”-Transport Properties. Tabla 2-363, p 2-319.

ABREVIATURAS

CT: Convertidor Teniente

CPS: Convertidor Peirce – Smith

DS: Decreto Supremo

HLE: Horno de Limpieza de Escoria

MAGA: Manejo de Gases emitidos por Convertidores

MSNM: Metro Sobre el Nivel del Mar

PI SYSTEM: Sistema de Información en línea de las Plantas

PLG: Planta de Limpieza de Gases

PPEE: Precipitador Electrostático

PTE: Planta de Tratamiento de Efluente

VTI: Ventilador Tiro Forzado

Rpm:Revoluciones por Minuto

Anexo I Propiedades Físicas

Propiedades Físicas

A.1.1. Viscosidad

La viscosidad del líquido disminuye con el aumento de la temperatura, en cambio en el caso de los gases el incremento de la temperatura provoca un aumento en la viscosidad, por lo tanto las fuerzas de cohesión se reducen con una disminución correspondiente a la resistencia al movimiento, en consecuencia la viscosidad es una propiedad de transporte.

En los gases, el intercambio de momento durante el movimiento de las moléculas constituye la causa principal de la viscosidad. Para un gas el coeficiente de viscosidad está en función de su composición, temperatura y presión. Sin embargo en algunas oportunidades la viscosidad es independiente de la presión.

En la mayor parte de los gases, la viscosidad se calcula por medio de la siguiente de una forma generalizada entregada por IM2 para la determinación de la viscosidad en función de la temperatura:

- Viscosidad de SO₂

$$\text{visc}_{\text{SO}_2} = 1,5 \times 10^{-6} \cdot \frac{\sqrt{T}}{\left(1 + \left(\frac{244,11}{T}\right) \cdot 10^{\left(\frac{244,11}{T}\right)}\right)}$$

- Viscosidad del O₂:

$$\text{visc}_{O_2} = 1,73 \times 10^{-6} \cdot \frac{\sqrt{T}}{\left(1 + \left(\frac{140}{T}\right) \cdot 10^{\left(\frac{-2}{T}\right)}\right)}$$

- Viscosidad del N2

$$\text{visc}_{N_2} = 1,42 \times 10^{-6} \cdot \frac{\sqrt{T}}{\left(1 + \left(\frac{116,4}{T}\right) \cdot 10^{\left(\frac{-2}{T}\right)}\right)}$$

- Viscosidad del H2O

$$\text{visc}_{H_2O} = 2,94 \times 10^{-6} \cdot \frac{\sqrt{T}}{\left(1 + \left(\frac{1545,6}{T}\right) \cdot 10^{\left(\frac{-20138}{T}\right)}\right)}$$

La mezcla de los gases se puede calcular:

$$\mu_{\text{mezcla}} = \frac{1}{\sqrt{8}} \cdot \left(1 + \frac{M_i}{M_j}\right)^{-\frac{1}{2}} \left[1 + \left(\frac{M_i}{M_j}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{M_j}{M_i}\right)^{\frac{1}{2}}\right]^{\frac{1}{2}}$$

Todos los valores de μ y k de estas ecuaciones están dados a baja densidad y a una temperatura determinada.

A.1.2 Densidad

Como se asumió que el gas trabajado es un gas ideal, para obtener su densidad, se realizó el simple cálculo considerando la fórmula $PV=nRT$.

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

Como se necesita saber la densidad de la mezcla de gases, se saca el PM promedio según la composición que tenemos del gas y sus pesos moleculares respectivos.

Sabemos además que existe una relación para el Volumen y los moles asociados al gas.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{y} \quad n = \frac{m}{PM}$$

La ecuación queda:

$$\rho = \frac{R \cdot T}{PM \cdot P}$$

Anexo II Propiedades Físicas Equipos

En este anexo se detallan las características físicas de cada equipo (dimensiones).

A.2.1 Características y Accesorios MAGA CT

Descripción Accesorios involucrados en los cálculos de pérdida de carga.

Campana:

	Unidades	Accesorios	K
Ancho	4 m	Codo 90°	0,9
Alto	7,7 m	Junta Expansión	0,67
Largo	4,4	Total K	1,57

Cámara Enfriamiento Evaporativo:

	Unidades	Accesorios	K
Ancho	6,5m	Expansión	0,04
Alto	5,4 m		
Largo	28,6	Total K	0,04

Ducto Traspaso

	Unidades	Accesorios	K
Ancho	4,9	Expansión	0,10
Alto	5,4 m	Contracción	0,98

Largo	11	Total K	1,08
--------------	----	----------------	------

Precipitador Electrostático

	Unidades	Accesorios	K
Ancho	4,9	Expansión	0,21
Alto	12	Contracción	1,83
Largo	15	Junta Expansión	0,67
		Total K	2,70

Precipitador a Empalme

	Unidades	Accesorios	K
Diámetro	3,3	Contracción	0,79
Largo	33	Codos 90° (3)	2,7
Cantidad	1	Válvula Mariposa	0,048
Cantidad	3	Junta Expansión (3)	2,01
Total K			5,55

Ducto a Planta de Ácido 2

	Unidades	Accesorios	K
Diámetro	3,3	Codo 45° r. corto (2)	0,70
Largo	150	Válvula Mariposa	0,048
Cantidad	1	Válvula Guillotina	0,14
Cantidad	4	Junta Expansión	2,68
Total K			3,56

Ducto a Chimenea

	Unidades (m)	Accesorios	K
Diámetro	3,3	Codo 45° r. corto (3)	1,35
Largo	53,2	Válvula Mariposa	0,048
		Junta Expansión (4)	2,68
		Total K	4,08

Convertidor Teniente 2

Campana

	Unidades	Accesorios	K
Ancho	4	Codo 90°	0,9
Alto	7	Junta Expansión	0,67
Largo	17,6	Total K	1,57

Cámara Enfriamiento Evaporativo

	Unidades	Accesorios	K
Ancho	6,5m	Expansión	0,04
Alto	5,4 m		
Largo	34,6	Total K	0,04

Ducto de Traspaso

	Unidades	Accesorios	K
Ancho	4,9	Expansión	0,10
Alto	5,4 m	Contracción	0,98
Largo	11	Total K	1,08

Precipitador Electrostático

	Unidades	Accesorios	K
Ancho	4,9	Expansión	0,21
Alto	12	Contracción	1,83
Largo	15	Codo 90°	0,9
		Total K	2,93

Ducto Salida Precipitador

	Unidades	Accesorios	K
Diámetro	3,3	Codos 45° (1)	0,35
Largo	50	Junta Expansión (4)	2,01
		Total K	2,36

Ducto a Empalme

	Unidades	Accesorios	K
Diámetro	2,4	Codo 45° r. corto (3)	0,6
Largo	120	Válvula Mariposa	0,048
		Junta Expansión (3)	2,01
		Contracción (3,3-2,4)	1,44
		Total K	4,55

Ducto a PLG 1

	Unidades	Accesorios	K
Diámetro	2,4	Codo 45° r. corto (2)	0,45
Largo	120	Junta Expansión (3)	2,01
		Total K	3,95

A.2.2 Características y Accesorios CPS's

Ducto Miljo y VTI

	Unidades	Accesorios	K
Diámetro	3,3	Codo 45° r. corto (6)	1,05
Largo	38,5	Codo 90° (2)	2,7
		Contracción (2) (3,3-2,5)	1,37
		Expansión (2)	0,18
Diámetro	2,5	Válvula Mariposa (4)	0,048
Ducto (2)	11	Válvula Guillotina (4)	0,68
Ducto (2)	35	Junta Expansión (12)	0,84
		Ducto Bifurcación (2)	1,44
		Unión 45°	
		Total K	4,55

VTI a Chimenea

	Unidades	Accesorios	K
Diámetro	3,3	Codo 45° r. corto (4)	1,4
Largo	69	Válvula Mariposa (1)	0,048
		Válvula Guillotina (4)	0,68
		Junta Expansión (7)	4,69

Anexo II

	Bifurcación (2)	1,42
	Total	8,24

VTI a División Ductos PLG's

	Unidades	Accesorios	K
Diámetro	3,3	Codo 45° r. corto (2)	1,05
Largo	55	Codo 90° (3)	2,7
		Bifurcación	0,048
		Válvula Guillotina (2)	0,68
		Junta Expansión (2)	0,84
		Total	

A PLG 1

	Unidades	Accesorios	K
Diámetro	2,4	Codo 45° r. corto (1)	0,35
Largo	150	Válvula Mariposa (1)	0,048
		Válvula Guillotina (1)	0,67
		Junta Expansión (2)	1,34
		Unión- Bifurcación	

Total

A PLG 2

	Unidades	Accesorios	K
Diámetro	3,3	Codo 45° r. corto (1)	0,35
Largo	150	Válvula Mariposa (1)	0,048
		Válvula Guillotina (1)	0,67
		Junta Expansión (2)	1,34
		Unión- Bifurcación	
		Total	

Ducto Salida Cámara Enfriamiento Radiativo CPS3

	Unidades	Accesorios	K
Diámetro	2,1	Codo 90° r. corto (1)	0,35
Largo	25	Válvula Mariposa (1)	0,048
		Válvula Guillotina (1)	0,67
		Junta Expansión (2)	1,34

	Expansión		
	Total		

Ducto Salida Cámara Enfriamiento Radiativo CPS2

	Unidades	Accesorios	K
Diámetro	2,1	Válvula Guillotina (1)	0,67
Largo	9,2	Junta Expansión (2)	1,34
	Unión T		
	Total		

Ducto Salida Cámara Enfriamiento Radiativo CPS1

	Unidades	Accesorios	K
Diámetro	2,1	Válvula Guillotina (1)	0,67
Largo	9,2	Junta Expansión (2)	1,34
	Unión T		
	Total		

Ducto Alta Velocidad a PEE MILJO

	Unidades	Accesorios	K
Diámetro	2,9	Codo 90° r. corto (1)	0,35
Largo	60	Válvula Mariposa (1)	0,048
		Junta Expansión (3)	1,34
		Total	

- Datos Rojos Variables, cambia según apertura de válvula mariposa.

Anexo III Balance Masa Convertidor Peirce Smith y Convertidor Teniente

A.3.1 Cálculo Balance Masa y Energía Convertidor Pierce Smith

Para el cálculo de balance masa de los convertidores Pierce Smith es similar al realizado a Convertidor Teniente, se diferencian que este proceso, es un proceso batch, ya que se agrega el Metal Blanco mediante ollas y se obtiene como producto final Cobre Blister.

Se tienen los siguientes flujos como lo indica la siguiente fig. i :

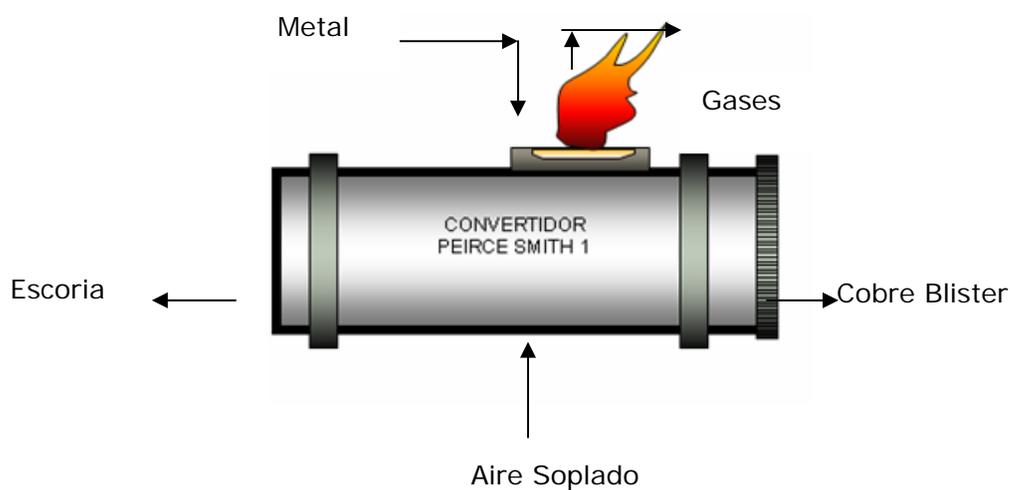


Diagrama CPS

Las corrientes de entrada y salida del proceso son:

Corrientes de entrada:

- Metal Blanco
- Aire con enriquecimiento de Oxígeno
- Carga Fría

Corrientes de Salida:

- Cobre Blister
- Escoria

- Gases

Continuando con el balance de masa del Convertidor Teniente, para una masa de Concentrado que ingresa de 100 ton/h, se tienen la siguiente descripción del proceso:

Metal Blanco (F1):

Ley de Cobre	75%
Carga	50,22 t/h
Cu₂S	47,16 t/h
FeS	2,55 t/h
Fe₃O₄	0,502 t/h

Aire Soplado (F2):

Flujo Aire	40.000 Nm³/h
O₂	20,8 %
N₂	78,2%
H₂O	1%

Cobre Blister (F3):

Cobre	98,7%
Azufre	0,05%
Oxígeno	0,25%
Otros	1,0%

Escoria (F4):

Cu Metálico	10,0%
Cu₂O	30,0%
Fe₃O₄	60,0%

Asumiendo que se agrega una olla con el Metal Blanco producto del Convertidor Teniente, además para el cálculo no se considerarán pérdidas por salpicaduras, ni el ingreso de carga fría ya que es muy variable la composición de esta.

Cálculo de Escoria producida por Convertidor Pierce Smith

Consideraremos que la escoria está compuesta por Fe₃O₄, Cu, Cu₂O y que todo el Hierro que se encuentra presente en el Metal Blanco pasa a la escoria como Magnetita (Fe₃O₄) y esta corresponde a un 60% de la masa total de escoria.

Fe en Metal Blanco es 1,98 ton, por lo tanto:

$$Fe_3O_4 = \text{Masa de Fe en MB} \cdot \frac{PM Fe_3O_4}{3 \cdot PM Fe}$$

$$Fe_3O_4 = 1,98 \cdot 231, \frac{51}{55,85 \cdot 3} = 2,76 \text{ (ton)}$$

La masa total de escoria es:

$$\text{Masa Escoria} = \frac{2,76}{0,60} = 4,6 \text{ t}$$

Teniendo la masa total de escoria, se puede obtener la cantidad de Cu metálico y Cu₂O

$$Cu^0 = 4,6 \cdot 0,10 = 0,46 \text{ t}$$

$$Cu_2O = 4,6 \cdot 0,30 = 1,38 \text{ (ton)}$$

Cálculo Cobre Blister producido por CPS

La corriente de Cobre Blister está compuesta por Cu, S y O.

$$Cu = \text{Masa de Cu en MB} - \text{Masa de Cu en Escoria}$$

$$Cu = 37,66 - 1,67 = 35,99 \text{ (ton)}$$

Como se mencionó anteriormente el Cu presente en el Blister es de 98,7%, por lo tanto se sabe que la masa total de este flujo es:

$$\text{Masa Blister} = \frac{\text{Masa Cu en Blister}}{98,7\%} = 36,46 \text{ (ton)}$$

De tal manera se obtendrá la masa de S y O:

$$S = 36,46 \cdot 0,0005 = 0,02 \text{ (ton)}$$

$$O = 36,46 \cdot 0,25 = 9,11 \text{ (ton)}$$

Cálculo Soplado de Aire enriquecido

Para realizar el cálculo de tiempo de soplado se deben considerar las siguientes ecuaciones:



El azufre restante debe pasar a SO₂ gaseoso y el Fe a magnetita en estado líquido como escoria, por lo tanto tenemos:

$$S = S \text{ en MB} - S \text{ en Cu Blister}$$

$$S = 10,4 - 0,02 = 10,38 \text{ ton}$$

Todo el Hierro pasa a Magnetita y este solo se encuentra en la escoria:

$$Fe = Fe \text{ en Escoria}$$

$$Fe = 1,98 \text{ ton}$$

Como la reacción (1) está en relación estequiométrica 1:1 y la reacción (2) en relación 2:3, asumiendo que no hay exceso de O₂ se tiene:

$$O_2 = \text{masa de S} \cdot \frac{PM \text{ de } O_2}{PM \text{ de S}} = 10,38 \cdot \frac{31,98}{32,06} = 10,35 \text{ ton}$$

$$O_2 = \text{masa de Fe} \cdot \frac{PM \text{ de } O_2 \cdot 2}{PM \text{ de Fe} \cdot 3} = 1,98 \cdot \frac{31,98 \cdot 2}{55,85 \cdot 3} = 0,75 \text{ ton rev}$$

$$O_2 \text{ total} = 10,35 + 0,75 = 11,15 \text{ ton}$$

Haciendo la conversión de ton a Nm³.

$$O_2 = \frac{\frac{11150 \text{ (Kg)}}{31,98 \frac{\text{Kg}}{\text{Kmol}}} \cdot 0,082 \frac{\text{m}^3 \cdot \text{atm}}{\text{kgmol} \cdot \text{K}} \cdot 273 \text{ K}}{1 \text{ atm}} = 7805 \text{ Nm}^3$$

El Oxígeno tiene una eficiencia del 95%:

$$O_2 = \frac{7805}{0,95} = 8216 \text{ Nm}^3$$

El O₂ corresponde al 20,8 % del aire, por lo tanto se tiene una cantidad de aire a ingresar necesaria de 39.499 Nm³.

Teniendo el aire necesario para que ocurran las reacciones y además el flujo de soplado, podremos obtener el tiempo de soplado.

$$\text{Tiempo de Soplado} = \frac{\text{Aire necesario (Nm}^3\text{)}}{\text{Flujo Soplado} \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{h}}\right)}$$

$$\text{Tiempo} = \frac{40.668}{40.000} = 1,02 \text{ h}$$

Cálculo Gases generados por Convertidor Pierce Smith

Los gases como producto de las reacciones de conversión son principalmente SO_2 , O_2 , N_2 , H_2O y polvos arrastrados. Se asume en este cálculo que no arrastra polvos.

$$\text{SO}_2 = \text{masa de S} \cdot \frac{\text{PM de SO}_2}{\text{PM de S}}$$

$$\text{SO}_2 = 10,4 \cdot \frac{64,04}{32,06} = 20,77 \text{ ton}$$

Con la conversión (ton) a (Nm^3) queda:

$$\text{SO}_2 = 7258 \text{ Nm}^3$$

Divido por el tiempo de soplado, nos entrega el flujo de SO_2 :

$$\text{SO}_2 = \frac{7258 \text{ Nm}^3}{1,02 \text{ h}} = 7115,8 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \right)$$

Otro compuesto que sale como gas es el O_2 , que es el exceso de la reacción, como se mencionó anteriormente tiene una eficiencia del 95%, por lo que el O_2 sobrante es $393,92 \text{ Nm}^3$.

El N_2 presente en el gas corresponde al 78,2 % del flujo de soplado:

$$\text{N}_2 = \text{Flujo Soplado} \cdot \% \text{N}_2 \text{ en el Aire}$$

$$\text{N}_2 = 40.000 \cdot 0,792 = 31680 \frac{\text{Nm}^3}{\text{h}}$$

Y por último el agua que se encuentra presente en el flujo de salida de los gases es del 1%, por lo que este corresponde a:

$$\text{H}_2\text{O} = \text{Flujo de Soplado} \cdot \% \text{ Agua en Aire}$$

$$\text{H}_2\text{O} = 40.000 \cdot 0,01 = 400 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \right)$$

Finalmente se tiene la siguiente tabla resumen de la corriente de gases:

Composición Gases salida CPS

Compuesto	Flujo (Nm ³ /h)	%
SO ₂	7115,8	18
O ₂	393,92	1
N ₂	31680	80
H ₂ O	400	1
Total	39.590	100

A.3.2 Cálculo Balance del Azufre en el Convertidor Teniente

Para realizar el balance de Azufre del Convertidor Teniente se deben conocer de antemano los flujos asociados a este reactor, los cuales son:

Flujo 1	Concentrado
Flujo 2	Carga Fría
Flujo 3	Fundentes
Flujo 4	Escoria
Flujo 5	Metal Blanco
Flujo 6	Gases

Tabla N°1: Flujos Asociados al Convertidor Teniente

Esquemáticamente lo podemos ver en la figura:

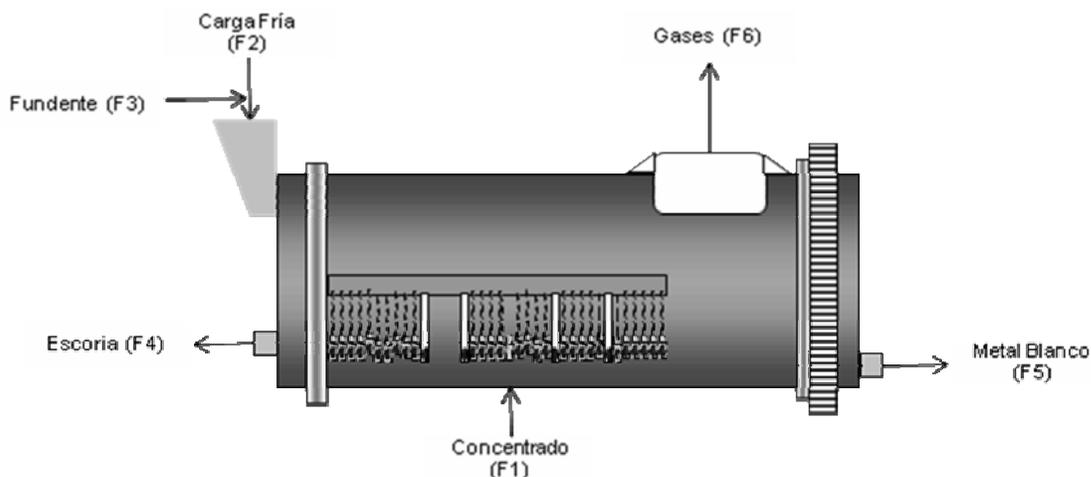


Fig. 1. Esquema de los flujos entrantes y salientes del Convertidor Teniente

Básicamente se tiene que cumplir que:

$$\text{masa Flujo 1} + \text{masa Flujo 2} + \text{masa Flujo 3} = \text{masa Flujo 4} + \text{masa Flujo 5} + \text{masa Flujo 6} \quad (1)$$

Para un día normal de operaciones se tiene que al Convertidor se ingresa 100 ton/h y 25 ton/h de concentrado y carga fría respectivamente. Además se conocen los datos que a continuación se describen:

Para el Flujo 1:

Calcopirita	14.07%
Calcosina	32.24%
Covelina	3.03%
Bornita	0.07%
Enargita	0.54%
Pirita	40.00%
Otros	10.05%

Tabla N°2: Compuestos Mineralógicos del Concentrado

Para el Flujo 2:

% Azufre	6.45%
% Cobre	32.0%
% Hierro	30.0%
%Otros	31.55%

Tabla N°3: Elementos Presentes en la Carga Fría

Otros datos que son medibles desde la base de datos de Codelco son:

Ley de Cobre en la Escoria	8%
Ley de Cobre en MB	75%

Tabla N°4: Datos del Convertidor Teniente

De datos bibliográficos e históricos de la Fundición sabemos que:

- Los minerales que componen la fase del Metal Blanco son principalmente Cu_2S , FeS , Fe_2O_3 .
- Los gases emanados por el convertidor teniente son principalmente SO_2 , O_2 , N_2 y polvos arrastrados.

Para calcular el SO_2 que sale desde el convertidor Teniente hacia la campana debemos saber:

- Cuanto Cu y S se ingresan al CT
- Cuanto Metal Blanco se produce y cual es su composición química

Las suposiciones que se hicieron para realizar el balance de masa son:

- El 1% del metal Blanco es Magnetita.
- La escoria posee alrededor de 2.5% de S.
- El gas proveniente del CT es sólo dióxido de azufre y este no arrastra polvos.
- Todo el Cu que esta presente en la carga fría esta como Cu_2S .

- El 2.5% del azufre pasa a la escoria.

Cálculo de Cu, Fe y S ingresado al CT

De la Tabla N°2 se sabe que los primeros 5 compuestos mineralógicos contienen Cu en distintas proporciones, las cuales son:

Tabla N°5: Porcentaje de Cu, Fe, As y S en los distintos Minerales presentes en el Concentrado

Mineral	F. Química	% Cu	% Fe	% As	%S
Calcopirita	CuFeS ₂	34.63	30.43	0.00	34.94
Calcosina	Cu ₂ S	79.86	0.00	0.00	20.14
Covelina	CuS	66.47	0.00	0.00	33.53
Bornita	Cu ₅ FeS ₄	63.32	19.03	0.00	25.56
Enargita	Cu ₃ AsS ₄	48.41	0.00	19.03	32.56
Pirita	FeS ₂	0.00	46.55	0.00	53.45
Otros		0.00	0.00	0.00	0.00

La Tabla N°5 se confeccionó de la siguiente manera, por ejemplo para el % de Cu en la Calcopirita se tiene que:

$$\% Cu_{Calcopirita} = \frac{PM_{Cu}}{PM_{CuFeS_2}} \times 100\% = \frac{PM_{Cu}}{PM_{Cu} + PM_{Fe} + 2 \cdot PM_S} \times 100\% \quad (2)$$

Reemplazando las propiedades físicas de los elementos en cuestión en la ecuación 2 se obtiene que:

$$\% Cu_{Calcopirita} = \frac{63.55 \left(\frac{g}{mol} \right)}{63.55 \left(\frac{g}{mol} \right) + 55.86 \left(\frac{g}{mol} \right) + 2 \cdot 32.06 \left(\frac{g}{mol} \right)} \times 100\% = \frac{63.55 \left(\frac{g}{mol} \right)}{183.51 \left(\frac{g}{mol} \right)} \times 100\%$$

$$\% Cu_{\text{Calcopirita}} = 34.62\% \quad (3)$$

y de forma análoga para completar la Tabla siguiente.

Ahora para 100 ton/h de concentrado se tiene que:

Tabla N°6: ton/h de los distintos elementos presentes en el concentrado

Mineral	F. Química	Ton/h	ton/h Cu	ton/h Fe	ton/h As	ton/h S
Calcopirita	CuFeS ₂	14.07	4.87	4.28	0.00	4.92
Calcosina	Cu ₂ S	32.24	25.75	0.00	0.00	6.49
Covelina	CuS	3.03	2.01	0.00	0.00	1.02
Bornita	Cu ₅ FeS ₄	0.07	0.04	0.01	0.00	0.02
Enargita	Cu ₃ AsS ₄	0.54	0.26	0.00	0.10	0.18
Pirita	FeS ₂	40.00	0.00	18.62	0.00	21.38
Total		89.95	32.94	22.91	0.10	34.00

La Tabla anterior se puede realizar puesto que se conocen la cantidad de concentrado (100 ton/h), la distribución de los minerales presentes en este (Tabla N°1) y se calculó los porcentajes de los elementos químicos en cada uno de estos minerales (Tabla N°5), por ejemplo para el total de Cobre presente en el concentrado se tiene que:

$$\begin{aligned} \text{ton/h de Cu} = & \text{ton/h de CuFeS}_2 \cdot \%Cu_{\text{CuFeS}_2} + \text{ton/h de Cu}_2\text{S} \cdot \%Cu_{\text{Cu}_2\text{S}} \\ & + \text{ton/h de CuS} \cdot \%Cu_{\text{CuS}} + \text{ton/h de Cu}_5\text{FeS}_4 \cdot \%Cu_{\text{Cu}_5\text{FeS}_4} \\ & + \text{ton/h de Cu}_3\text{AsS}_4 \cdot \%Cu_{\text{Cu}_3\text{AsS}_4} \end{aligned} \quad (4)$$

Reemplazando los valores de la Tabla N°1 y la Tabla N°4 se obtiene:

$$\begin{aligned} \text{ton/h de Cu} = & 14.07\left(\frac{\text{ton}}{\text{h}}\right) \cdot 34.6\% + 32.24\left(\frac{\text{ton}}{\text{h}}\right) \cdot 79.9\% + 3.03\left(\frac{\text{ton}}{\text{h}}\right) \cdot 66.5\% \\ & + 0.07\left(\frac{\text{ton}}{\text{h}}\right) \cdot 63.3\% + 0.54\left(\frac{\text{ton}}{\text{h}}\right) \cdot 48.4\% \end{aligned}$$

Resolviendo la ecuación anterior:

$$\text{ton/h de Cu} = (4.87 + 25.75 + 2.01 + 0.04 + 0.26) \left(\frac{\text{ton}}{\text{h}}\right) \quad (5)$$

$$\text{ton/h de Cu} = 32.94 \left(\frac{\text{ton}}{\text{h}}\right)$$

∴ Las cantidades de cobre y azufre que ingresa al CT por medio del concentrado es de 32.94 y 34 ton/h respectivamente. Por otro lado para saber cuanto Cu y S ingresan por medio del Flujo 2 se confecciona la siguiente tabla:

Tabla N°7: Resumen de los elementos presentes en la carga fría

		%	ton/h
Azufre	S	6.45%	1.61
Cobre	Cu	32.00%	8.00
Hierro	Fe	30%	7.50
Otros		31.55%	7.89
		Ton/h Flujo 2	25.00

La tabla anterior es la multiplicación entre el total de la masa del flujo 2 por los distintos porcentajes de los elementos presentes, es decir para el caso del Cu se tiene que:

$$\text{ton/h de Cu} = \% \text{ Cu}_{\text{Carga Fría}} \cdot \text{ton/h de Carga Fría}$$

$$\text{ton/h de Cu} = 32.00\% \cdot 25\left(\frac{\text{ton}}{\text{h}}\right) = 8.00\left(\frac{\text{ton}}{\text{h}}\right) \quad (6)$$

Finalmente el Cobre y el Azufre que entran al Convertidor Teniente son 40.94 y 36.01 ton/h respectivamente.

Calculo de Metal Blanco Producido en el Convertidor Teniente

Como anteriormente se había dicho en la Tabla N°4 que el Metal Blanco esta compuesto por:

Cu₂S
FeS
Fe₂O₃

y existe atrapamiento de cobre de un 8% en la escoria, entonces el 92% restante del cobre pasa al Metal Blanco y mas específicamente como calcosina, es decir:

$$\text{Cobre en MB} = 40.94 \left(\frac{\text{ton}}{\text{h}} \right) \cdot 92\% = 32.66 \left(\frac{\text{ton}}{\text{h}} \right) \quad (7)$$

Como ya sabemos la cantidad de Cu en el Metal Blanco podemos calcular el total del Metal Blanco, el cual es:

$$\text{Total MB} = \frac{32.66 \left(\frac{\text{ton}}{\text{h}} \right)}{75\%} = 43.54 \left(\frac{\text{ton}}{\text{h}} \right) \quad (8)$$

La calcosina que esta presente en el Metal Blanco la podemos representar por la siguiente ecuación:

$$\frac{\text{ton}}{\text{h}} \text{ Cu}_2\text{S} = \frac{PM \text{ Cu}_2\text{S}}{2 \cdot PM \text{ Cu}} \times \left(\frac{\text{ton}}{\text{h}} \right) \text{ de Cu}_{MB} \quad (9)$$

$$\frac{\text{ton}}{\text{h}} \text{ Cu}_2\text{S} = \frac{159.15 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)}{2 \cdot 63.55 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} \times 32.66 \left(\frac{\text{ton}}{\text{h}} \right) = 40.90 \left(\frac{\text{ton}}{\text{h}} \right)$$

El azufre estequiométrico en la calcosina es:

$$\text{ton/h } S = \frac{PM \ S}{PM \ Cu_2S} \times \left(\text{ton/h}\right) \text{ de } Cu_2S \quad (10)$$

$$\text{ton/h } S = \frac{32 \left(\frac{g}{mol}\right)}{159.15 \left(\frac{g}{mol}\right)} \times 40.90 \left(\text{ton/h}\right) = 9.04 \left(\text{ton/h}\right)$$

Por otro lado el porcentaje de magnetita en el MB es de 1%, entonces la magnetita en el metal blanco es:

$$\left(\frac{\text{ton}}{h}\right) \text{ de } Fe_3O_4 = \left(\frac{\text{ton}}{h}\right) \text{ de } MB \times \% Fe_3O_{4_{MB}} \quad (11)$$

$$\left(\frac{\text{ton}}{h}\right) \text{ de } Fe_3O_4 = 43.54 \left(\frac{\text{ton}}{h}\right) \times 1\% = 0.44 \left(\frac{\text{ton}}{h}\right)$$

Por diferencia entonces podemos conocer la cantidad de FeS en el Metal Blanco

$$\left(\frac{\text{ton}}{h}\right) \text{ de } FeS = \left(\frac{\text{ton}}{h}\right) \text{ de } MB - \left(\frac{\text{ton}}{h}\right) \text{ de } Cu_2S - \left(\frac{\text{ton}}{h}\right) \text{ de } Fe_3O_4 \quad (12)$$

$$\left(\frac{\text{ton}}{h}\right) \text{ de } FeS = (43.54 - 40.90 - 0.44) \left(\frac{\text{ton}}{h}\right) = 2.21 \left(\frac{\text{ton}}{h}\right)$$

En donde el azufre asociado al FeS es:

$$\text{ton/h } S = \frac{PM \ S}{PM \ FeS} \times \left(\text{ton/h}\right) \text{ de } FeS \quad (13)$$

$$\text{ton/h S} = \frac{32 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)}{87.9 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} \times 2.21 \left(\frac{\text{ton}}{\text{h}} \right) = 0.81 \left(\frac{\text{ton}}{\text{h}} \right)$$

El azufre total en el MB es el que esta asociado a Cu_2S y al FeS es decir:

$$\text{ton/h S} = (8.24 - 0.81) \left(\frac{\text{ton}}{\text{h}} \right) = 9.04 \left(\frac{\text{ton}}{\text{h}} \right) \quad (14)$$

El la presente tabla se presenta el resumen del Metal Blanco.

Tabla N°8: Resumen de los elementos presentes en el Metal blanco

Ton/h Metal Blanco	43.54
Ton/h Cu_2S	40.90
Ton/h FeS	2.21
Ton/h Fe_2O_3	0.44
Ton/h Cu	32.66
Ton/h Fe	1.71
Ton/h S	9.04

Calculo de Escoria producida en el Convertidor Teniente

El cobre atrapado en la escoria es de un 8%, entonces las ton/h atrapadas en la escoria es:

$$\text{Cobre en Escoria} = 40.94 \left(\frac{\text{ton}}{\text{h}} \right) \cdot 8\% = 2.83 \left(\frac{\text{ton}}{\text{h}} \right) \quad (15)$$

Por otra parte el azufre también esta presente en la fase escoria, diversos análisis químicos realizados a las escorias producidas por el Convertidor Teniente nos muestran que esta presente en alrededor de un 2.5% del total de esta. Es decir:

$$\text{Azufre en Escoria} = S_{\text{entra}} \left(\frac{\text{ton}}{\text{h}} \right) \cdot \% S_{\text{escoria}} \quad (16)$$

$$\text{Azufre en Escoria} = 34.10 \left(\frac{\text{ton}}{\text{h}} \right) \cdot 2.5\% = 0.85 \left(\frac{\text{ton}}{\text{h}} \right)$$

Calculo de los gases Emanados por el Convertidor Teniente

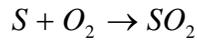
De la ecuación (1) se puede desprender que

$$S_{entra} = S_{sale} \tag{17}$$

$$S_{Concentrab} + S_{Carga Fría} = S_{Metal Blanco} + S_{escoria} + S_{Gases}$$

$$S_{gases} = (36.02 - 10.4) \left(\frac{\text{ton}}{\text{h}} \right) = 25.62 \left(\frac{\text{ton}}{\text{h}} \right)$$

Como en una de las suposiciones se dijo que el gas emanado del CT era en la forma de SO₂ tiene que ocurrir la ecuación:



Luego el SO₂ emanado del CT es:

$$\frac{\text{ton}}{\text{h}} SO_2 = \frac{PM SO_2}{PM S} \times \left(\frac{\text{ton}}{\text{h}} \right) de S_{gases} \tag{18}$$

$$\frac{\text{ton}}{\text{h}} SO_2 = \frac{64.06 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)}{32.06 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} \times 25.62 \left(\frac{\text{ton}}{\text{h}} \right) = 51.19 \left(\frac{\text{ton}}{\text{h}} \right)$$

La siguiente es la tabla resumen de los gases emanados por Boca del Convertidor.

Tabla N°9: Resumen Gases CT

Compuesto	Nm ³ /h	%v/v
SO ₂	16706,8	27,8
O ₂	835,3	1,39
N ₂	41382,9	69,1
H ₂ O	1013,8	1,69

Anexo IV Cálculos Pérdidas de Calor

A.4.1 Capacidad Calorífica del Gas.

$$C_p = a + b \cdot T + c \cdot T^2 + d \cdot T^{-2} \quad (K)$$

$$R=1,978 \text{ (cal/mol K)}$$

Tabla I. Capacidades Caloríficas Compuestos usados

	a	b	c	d	T K
SO ₂	5,699	8,01E-04	0	-1,02E+05	298
O ₂	3,639	5,06E-04	0	-2,27E+04	298
N ₂	3,28	5,93E-04	0	4,00E+03	298
H ₂ O	3,47	1,45E-03	0	1,21E+04	298
H ₂ O (l)	8,712	1,25E-03	0	-1,80E-07	273

Los Datos de Capacidades Caloríficas fuerin extraídas del libro Smith Van Ness.

A.4.2 Conductividad Térmica

Para las pérdidas de calor por convección se necesita un coeficiente de transferencia de calor por convección.

Sabemos que este coeficiente esta en función de Nusselt y Prandtl, para esto se tienen datos bibliograficos de conductividades térmicas, viscosidades, capacidades caloríficas¹⁷.

Tabla II Conductividad Térmica SO₂, O₂ y N₂

k			
T (K)	SO ₂	O ₂	N ₂
250	0,0078	0,0225	0,0222
300	0,0096	0,0267	0,026
400	0,0143	0,0343	0,0324
500	0,02	0,0412	0,0386
600	0,0256	0,048	0,0441

Como tenemos temperaturas más elevadas que 600 K, extrapolamos los datos para eso graficamos estos datos pero sacando el logaritmo de cada uno, donde obtenemos una correlación de cada una, al igual que la siguiente tabla del agua¹⁵:

Tabla Conductividad Térmica Agua

T (K)	k
273	0,0163
278	0,0167
283	0,0171
288	0,0175
293	0,0179
298	0,0183
303	0,0187
313	0,0195
333	0,0212
353	0,0229
373	0,0248
398	0,0273
423	0,0300
473	0,0375
523	0,0495
573	0,072

Correlación de cada una de las variables son las siguientes:

- Para SO₂

$$k = 1,3765 \cdot T - 12,477$$

- Para O₂

$$k = 0,8618 \cdot T - 8,5446$$

- Para N₂

$$k = 0,7815 \cdot T - 8,1148$$

- Para H₂O

$$k = 1,613 \cdot T^2 - 17,42 \cdot T + 42,88$$

Considerando que el régimen que se encuentra en los ductos es turbulento y que además estos gases son extraídos por ventiladores y sopladores, consideramos que las pérdidas es por convección forzada.

De manera análoga a la convección natural, el coeficiente de transferencia de calor para convección forzada, puede ser determinado con la relación:

$$h = \frac{Nu \cdot k}{L}$$

El número de Nusselt para la convección forzada es la siguiente forma:

$$Nu = a \cdot Re^b \cdot Pr^c$$

$$Re = \frac{v \cdot \rho \cdot D}{\mu}$$

$$Pr = \frac{Cp \cdot \mu}{k}$$

Por datos bibliográficos⁶ los valores para a, b, c, son 0,023; 0,8 y 0,33 respectivamente.

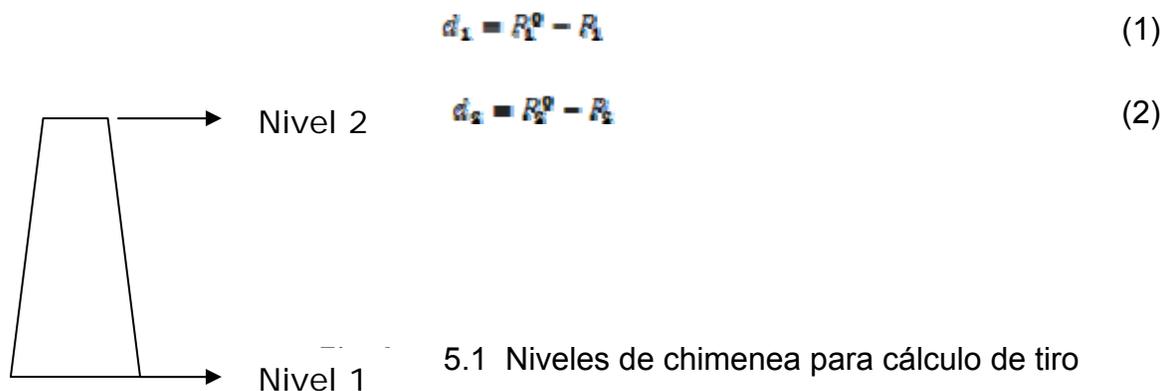
Estos datos varían según el equipo que se este analizando por lo tanto se mueve entre 3 y 10 de W/m² K.

Anexo V Cálculo Teórico Chimenea

Ante la necesidad de requerir operacionalmente la extracción de gases por chimenea, ya sea por trabajos en algún equipo o debido a que se presionen los convertidores, se abre la válvula respectiva, la chimenea tiene 3 ductos conectados a ella, ducto Convertidor Teniente 2, ducto Convertidor Teniente 1 y ductos Convertidores Pierce Smith que vienen de la salida de los ventiladores de tiro inducido (VTI), para que esto se produzca se deben vencer las pérdidas de carga provenientes de cada trayecto.

El tiro natural de la chimenea es la diferencia entre el tiro teórico y las pérdidas de carga que el sistema presenta, en esta se produce el efecto de *empuje de Arquímedes* que sufren los gases calientes rodeados por otros fríos. La chimenea contiene una columna de humos calientes, rodeada de aire a una temperatura ambiente, inferior. El empuje o tiro, se calcula por la diferencia del peso de ambas columnas, de altura igual a la de la chimenea. La forma más sencilla de estimar esta diferencia consiste en considerar las dos columnas de aire a temperaturas uniformes: Para la columna caliente, la temperatura será la de entrada de los humos en la chimenea, menos una cantidad por pérdidas, que puede estimarse en $\sim 0,08 \text{ }^\circ\text{C/m}$.

El tiro teórico en cualquier punto del sistema es la diferencia entre la presión absoluta en el sistema y la presión absoluta de la atmósfera que lo rodea al mismo nivel, y se define convenientemente como que es de signo positivo cuando la presión del sistema es menos que la presión atmosférica.



Además en una columna estática de fluido, la presión decrece con la altura debido al efecto de la gravedad, por lo tanto si h es la altura del fluido, la ecuación queda:

$$P = P_0 - \rho \cdot h \quad (3)$$

En donde P es la presión a la altura h , P_0 es la presión en el plano de referencia arbitrario de altura cero (por ejemplo al pie de la chimenea) y ρ es la densidad del gas. Una relación similar expresa la variación de la presión atmosférica con la altura.

Por lo tanto el tiro estático para una columna vertical de gases calientes rodeada por aire a temperatura ambiente es:

$$\text{Tiro} = \frac{h(m) \cdot (\rho_{\text{aire}} - \rho_{\text{gases}}) \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \cdot 1000 \left(\frac{\text{mm}}{\text{m}}\right)}{1000 \left(\frac{\text{kg agua}}{\text{m}^3 \text{ agua}}\right)} \quad (4)$$

$$\text{Tiro} = h(\rho_{\text{aire}} - \rho_{\text{gases}} \text{ mmCA}) \quad (5)$$

Cálculo Tiro Chimenea

La metodología general de cálculo de tiro de la chimenea, detalla de la siguiente manera:

Teniendo las características de la chimenea es de 191 m de altura, con un diámetro promedio de 12,8 m y un espesor de concreto de 0,28 m.

Se calcula las pérdidas de carga desde boca de convertidores hasta la salida de chimenea y teniendo como condiciones de operación la temperatura al pie de la chimenea.

El tiro teórico queda de la siguiente forma:

$$\text{Tiro} = h(\rho_{\text{aire}} - \rho_{\text{gases}} \text{ mmCA})$$

$$\text{Tiro} = 191 \cdot (1,066 - 0,507) = 106,77 \text{ mmC.A}$$

De la misma forma como se calculó la optimización de las válvulas mariposas de regulación a las plantas, se hará en este caso.

Ya que tenemos como dato el K de pérdida por accesorio que entrega la válvula mariposa que va hacia chimenea, tenemos el tiraje que aplica esta y además todas la pérdidas de carga acumulada por el sistema.

Nos basamos en la ec. de Bernoulli, donde nuestro P_1 será la intersección entre el ducto a chimenea y el ducto hacia plantas, y nuestro P_2 será pie chimenea calculado anteriormente.

Con este calculo obtenemos la velocidad del gas, teniendo en cuenta que el área la conocemos (3,3 m ducto), se obtiene el caudal en m³/h, el cual hay que normalizarlo.

Anexo VI Campaña Muestreo

Debido a la poca información que se tiene de los gases emanados por los Convertidores Peirce Smith, ya que posee condiciones que son variables, se realizaron muestreos de gases, el objetivo del muestreo es conocer la variación de la concentración del SO₂ de los gases desde la boca del convertidor hasta la salida de la cámara de enfriamiento radiativo, los cuales son dirigidos a las Plantas de Ácido (PLG1 y PLG2) y además se realizará mediciones de presión, con esto se obtendrá aproximadamente el comportamiento de los gases con datos extraídos en terreno.

A.6.1 Campaña de Muestreo CPS 2

A.6.1.1 Descripción Actividad.

La idea de esta actividad era tomar las muestras de gases en línea, por lo tanto se tomaron muestras de gases en distintos puntos del área Manejo de Gases entre la Boca del CPS 2 y el ducto de Alta Velocidad, para esto se cuenta con la ayuda del Laboratorio de Metalurgia , el cual cuenta con los equipos para las tomas de muestra y medidas de presión además esto fue posible gracias al área de mantención a los cuales se les encargo la misión de instalar las tomas de muestra.

Los lugares de medición son Boca CPS, Cámara Enfriamiento Radiativo, Ducto salida Cámara Radiativa y Ducto de Alta Velocidad a Precipitadores Electrostáticos MILJO, como estas experiencias se realizaron en línea se dispondrá de 2 personas por punto de muestreo.

A.6.2 Materiales

- Manómetro
- Sonda muestreadora
- Manguera
- Bomba
- 3 Varillas de hierro
- 3 Peras
- 10 Bolsas de muestreo
- Cronómetro
- Orsat
- Reich
- Yodo, almidón
- Casco, lentes, guantes, respirador, tapones de oído y zapatos de seguridad
- Radios
- Planilla, lápiz.

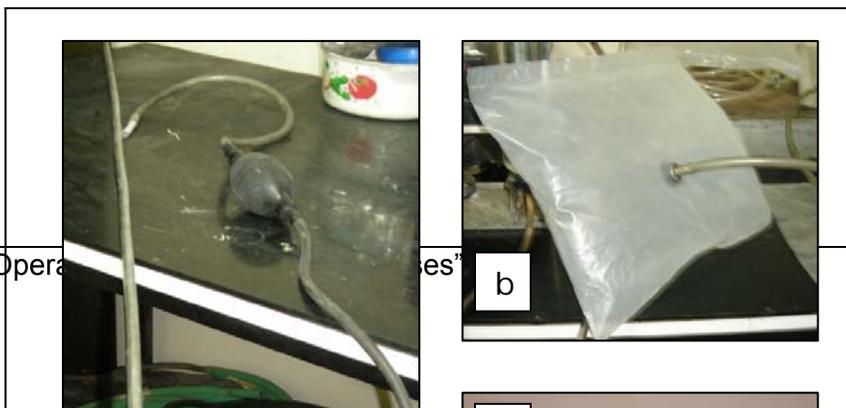


Fig.A.6.1 Fotografía a) varilla de fierro, manguera y pera; b) Bolsa captura de gases; c) Bomba



Fig.A.6.2 Manómetro (pulgadas de agua)

A.6.3 Disposición de lugares de muestreo

- **En Boca CPS:** Lanza de acero se introduce en la boca del convertidor.
- **Cámara Enfriamiento Radiativo:** Toma de Muestra instalada en los paneles de acero fundido.



Fig.A.6.3 Toma Muestra Cámara Enfriamiento Radiativo en Paneles
- **Salida Cámara de Enfriamiento Radiativo:** Se encuentra entre la cámara de enfriamiento y el ducto de alta velocidad, después de la válvula de guillotina.



Fig. A.6.4 Toma Salida Cámara Enfriamiento Radiativo

- **Ducto Alta Velocidad:** Ducto que une los gases de salida de los 3 Convertidores Pierce Smith y se dirige a los Precipitadores Electrostáticos MILJO, en la última experiencia se considerará esta toma.



Fig.A.6.5 Toma muestra a Precipitadores MILJO

A.6.4. Procedimiento

- Antes de salir del Laboratorio a efectuar las mediciones. Deberá comprobar que los equipos y materiales que se emplearán en esta actividad estén en buenas condiciones.
- Coordinar con el operador del CPS₂, hora de soplado del convertidor y avisar donde se trabajará.
- Instalar los equipos en las ubicaciones correspondientes a las mediciones con 2 personas cada punto.
- En el caso de la muestra en boca de CPS la lanza se une a la bomba y esta a una manguera que se conecta a una bolsa la cual captura el gas.
- En el caso de las otras tomas, se une la varilla de fierro a una pera la cual es la que succiona y se conecta a la bolsa de muestreo.

- Cuando el operador avisa comienzo de soplado, se espera 20 min y se introducen las sondas de medición en el lugar habilitado para estos efectos, la bomba de la medición en boca una vez energizada empezará a succionar el gas desde el interior del convertidor, en cambio las otras mediciones donde se encuentran las peras de succión hay que presionarlas hasta llenar la bolsa.
- Realizar proceso de ambientación de sondas y bolsas, donde se captura gas y se bota, este procedimiento se realiza 2 veces.
- La tercera llenada de la bolsa con gas es la que se utilizará para realizar los análisis de gases, se anota la hora del muestreo.
- Una vez tomada la muestra se retira la sonda del interior del convertidor, sellando las bolsas para que no se escape el gas.
- Se repite procedimiento de toma de gases.

A.6.5 Campaña Muestro Teniente N°2

Esta campaña de muestreo también se realizó en línea, en la cual se extrajeron gases desde la Boca de Convertidor Teniente 2, Cámara de Enfriamiento Evaporativo y Salida Precipitador JOY₂.

El gran problema que existe en MAGA son sus altas temperaturas y ambiente corrosivo, por lo que fueron necesarios equipos de alta resistencia para esas condiciones, en este caso se utilizaron lanzas de cuarzo importadas desde Estados Unidos durante el mes de marzo del año 2007 solicitadas desde septiembre del año 2006 para cubrir los requerimientos del estudio realizado, ya que ese accesorio puede soportar por *lapsus* de tiempo suficientemente amplios en contacto directo con los gases y polvos salidos directamente de la Boca del Convertidor Teniente N° 2 para logra una captación de “gases muestra” efectiva.

A.6.6 Espacio Físico de muestreo

Las muestras fueron extraídas del punto de medición nivel del convertidor teniente como muestran Los diagramas y fotografías continuación:

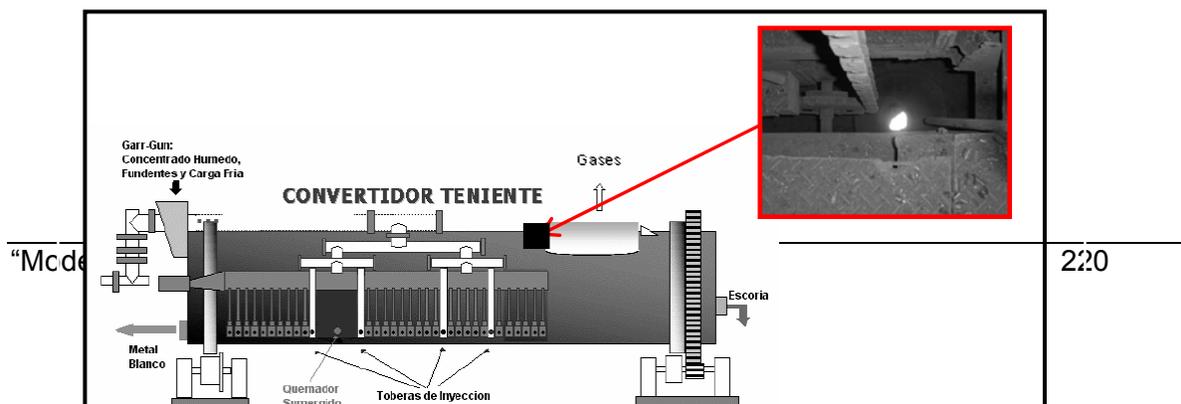
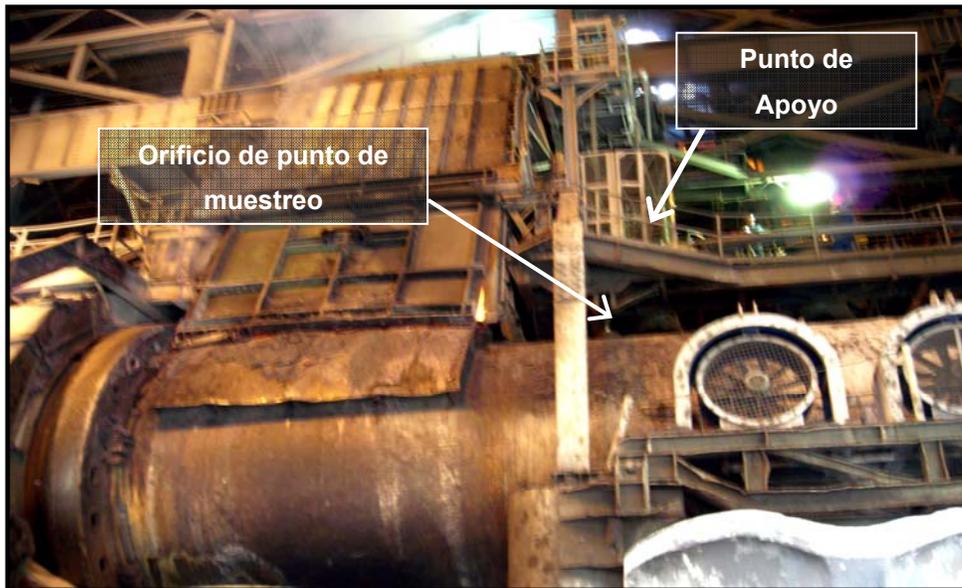


Fig. A.6.6 Diagrama Punto de Muestreo

El punto de muestreo es utilizado diariamente en las mediciones de niveles de capas internas: eje y escoria, realizadas por funcionarios de la Fundición Caletones. Recordemos que la capa Eje del convertidor es la más densa y por tanto se encuentra a mayor profundidad, en ella se encuentra la mayor concentración de cobre. Por otro lado en la fase o capa de Escoria, la concentración de cobre disminuye dramáticamente. La medición de niveles se realiza con una vara metálica la cual es introducida por la abertura mostrada en la Figura a.6, en el punto donde comienza la corrosión de la vara es donde parte la fase Eje ya que en ella se produce la mayor cantidad de reacciones de oxidoreducción. La cercanía del orificio con la boca del Convertidor Teniente hace más representativa la muestra de gases captados.

Cámara Enfriamiento Evaporativo 2.

El muestreo en este lugar fue muy difícil ya que la temperatura que emanan los gases a través de las paredes es muy alta y la lanza no era de gran longitud.

A.6.7 Método Reich

DETERMINACION IODIMETRICA DE SO₂

Cebado de Equipo

Se toma la botella niveladora que se encuentra en el soporte superior derecho del equipo y se abre la válvula de la bureta de 500 cm³, bajando la botella niveladora, el agua se desliza por la bureta hasta que se obtiene el cero (500 cm³) de esta y el nivel del agua de la botella niveladora.

Una vez obtenida la nivelación se cierra la válvula de la bureta y se vuelve a colocar la botella niveladora en el soporte superior derecho.

Precauciones

La válvula de la botella niveladora debe estar siempre abierta.

No deben haber estrangulaciones en las mangueras.

Mantenga el equipo limpio.

Trate el equipo con cuidado.

La lectura del 0 (500 cm³) se efectúa en el menisco inferior del agua.

Preparación de la Solución Analizadora

En un elenmeyer de 250 cm³ se colocan 150 cm³ de agua destilada, se agrega solución yódica y 4 gotas de almidón estable.

NOTA: La concentración y el volumen de la solución yódica a utilizar dependen del porcentaje de **SO₂** presente en el gas analizar (ver anexo 1)

Precauciones

Si el gas a analizar es mayor que 1 % **SO₂** usar solución yódica 0,1 N con un volumen según Tabla VI.1.

II. Si el gas a analizar es menor que 1 % SO_2 usar solución yódica 0,01 N y el volumen según Tabla VI.2.

Conexión de la bolsa

La bolsa se conecta a la manguera de entrada del equipo. La válvula de la bolsa debe estar cerrada.

Sellado del equipo

Se coloca el tapón al elenmeyer que contiene la solución yódica. Cuidar que no tenga filtraciones.

Cero atmosférico

Se abre la válvula de la bureta y el nivel del agua se desplaza hasta igualar la presión, se anotan lo cm^3 que desplaza mediante la lectura del menisco inferior del agua

Absorción de SO_2

Se abre la válvula de la bolsa y se agita constantemente la solución yódica, a medida que el gas es absorbido por la solución yódica, esta va cambiando de color café oscuro a azul, luego a celeste para llegar al punto de viraje el cual es incoloro, momento en el cual se cierra la válvula de la bureta.

El gas debe burbujear en la solución yódica lentamente para llegar al punto de viraje cerrando rápidamente la válvula de la bureta

Lectura

Se toma la botella niveladora que se encuentra en el soporte superior derecho y se enfrenta al nivel del agua de la bureta, se lee el desplazamiento y se anotan los cm^3 desplazados.

Temperatura

Se debe registrar la temperatura del termómetro que se encuentra en la parte superior de la botella niveladora. Cuidar que el termómetro no se encuentre con burbujas de aire en el capilar donde se desplaza el mercurio

Presión

Se debe registrar la presión atmosférica del lugar en mm de Hg.

Cantidad de Solución a Emplear

- Para una Solución de 0,1N

Tabla a.1 Solución a emplear para 0,1 N

%SO₂	Volumen (cm³)
1	3
2	5
3	7
4	9
5	11
6	13
7	15
8	17
9	19
10	21

11	23
12	25
13	27
14	29
15	32

- Para una Solución de 0,01 N

Tabla a.2 Solución a emplear para 0,01 N

%SO₂	Volumen (cm³)
0,1	3
0,2	5
0,3	7
0,4	9
0,5	10

0,6	12
0,7	14
0,8	15
0,9	18
1,0	20

Cálculo del porcentaje de SO₂

El porcentaje de SO₂ en el gas se calcula según la siguiente fórmula:

$$\%SO_2 = \frac{V}{V+z \cdot f} \cdot 100$$

donde:

% SO₂: Porcentaje de SO₂ presente en el gas analizado

V: Volumen de lodo empleado en cm³.

z: Desplazamiento en cm³.

f: Factor de corrección por temperatura y presión*



Fig A.6.7 Equipo Reich

A.6.8 Resultados Campañas de Muestreo

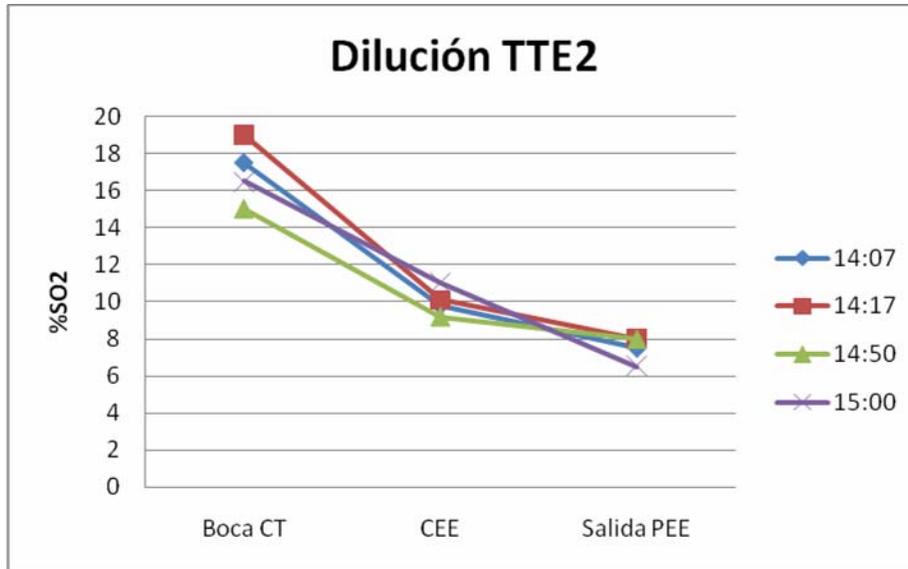
EL siguiente muestreo se realizó en el Convertidor Teniente 2

Fecha: 07/08/2008

Hora: 14:07 a 15:00

Los datos son los siguientes

HORA	14:07	14:17	14:50	15:00	Promedio	Estándar
Boca CT	17,5	19,0	15,0	16,5	17,0	1,68
Salida PEE	7,5	8,0	8,0	6,5	7,5	0,71
Dilución	133,3	137,5	87,5	153,8	128,0	28,44



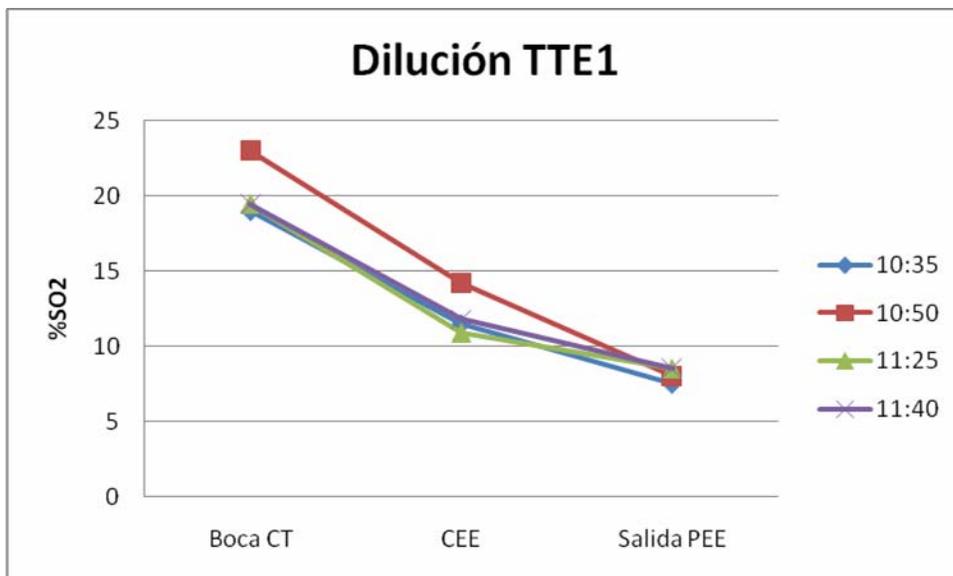
EL siguiente muestreo se realizó en el Convertidor Teniente 1

Fecha: 11/08/2008

Hora: 10:35 a 11:40

Los datos son los siguientes

HORA	10:35	10:50	11:25	11:40	Promedio	Estándar
Boca CT	19	23,0	19,5	19,5	20,3	1,85
Salida PEE	7,5	8,0	8,5	8,5	8,1	0,48
Dilución	153,3	187,5	129,4	129,4	149,9	27,48



EL siguiente muestreo se realizó en el Convertidor Teniente 2

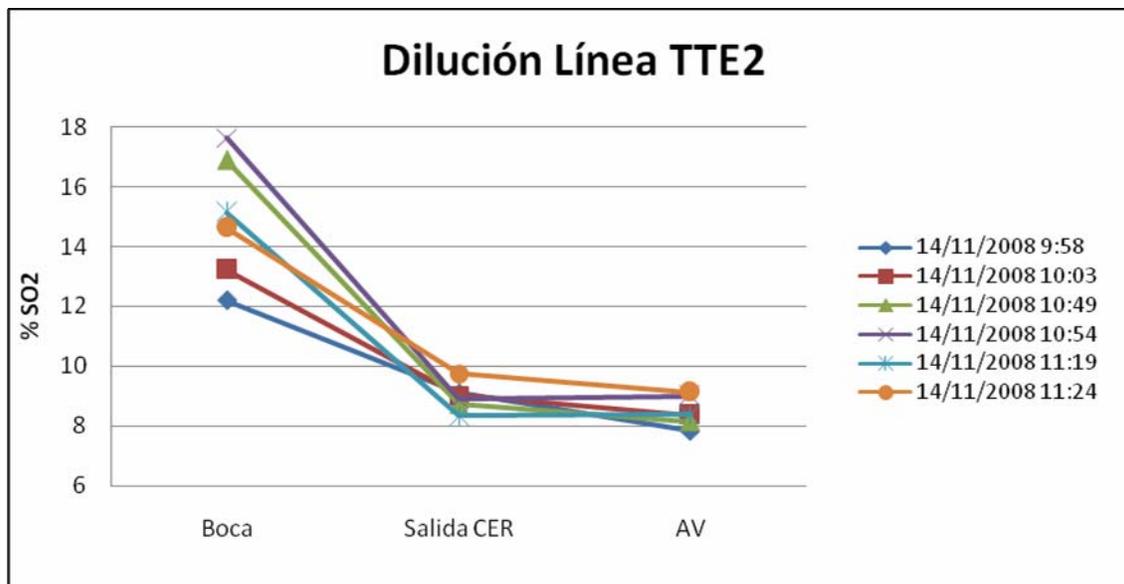
Muestreo.

Fecha: 14/11/2008

Hora: 9:58 a 11:24

Los datos son los siguientes

Hora	9:58	10:03	10:49	10:54	11:19	11:24	Promedio	Desviación
Boca	12,19	13,22	16,88	17,63	15,13	14,63	14,95	2,08
CEE	9,10	9,02	8,73	8,89	8,35	9,74	8,97	0,46
Salida PEE	7,84	8,36	8,14	9,00	8,38	9,14	8,48	0,50
Dilución	55,48	58,13	107,37	95,89	80,55	60,07	76,3	21,88



El porcentaje de Dilución de este tramo es muy bajo, ya que sabemos que es mayor al 120%, por lo que podríamos decir, que la medición en Boca del CT no es real, debido a que este porcentaje rodea el 24% SO₂, por lo tanto existió infiltración en esta medición.

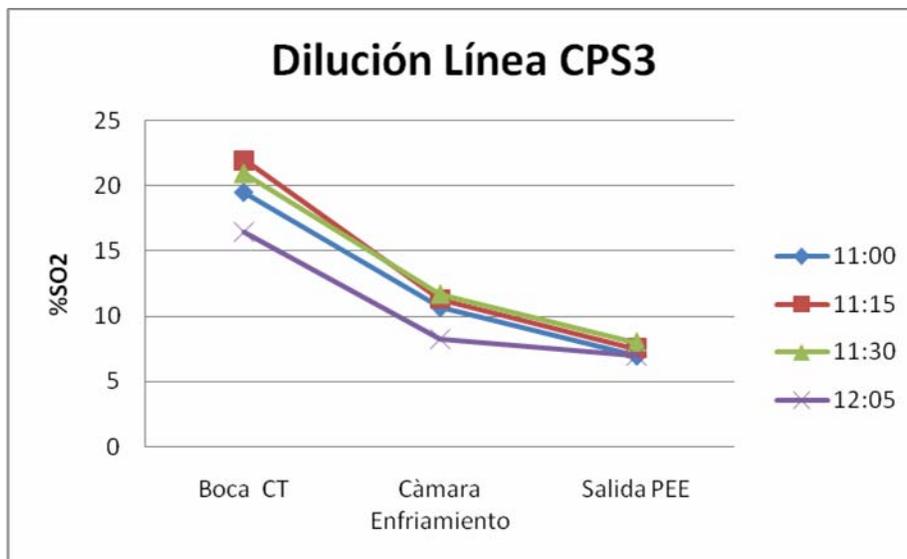
Muestreo CPS3

Fecha: 08/08/2008

Hora: 11:00 a 12:05

Los datos son los siguientes

HORA	11:00	11:15	11:30	12:05	Promedio	Desviación
Boca CT	19,5	22,0	21,0	16,5	19,8	2,40
CEE	10,7	11,3	11,7	8,3	11,2	0,50
Salida PEE	7,0	7,5	8,0	7,0	7,4	0,48
DILUCION	178,6	193,3	162,5	135,7	167,5	24,67



La Dilución Promedio de esta medición es de un 167,5 %.

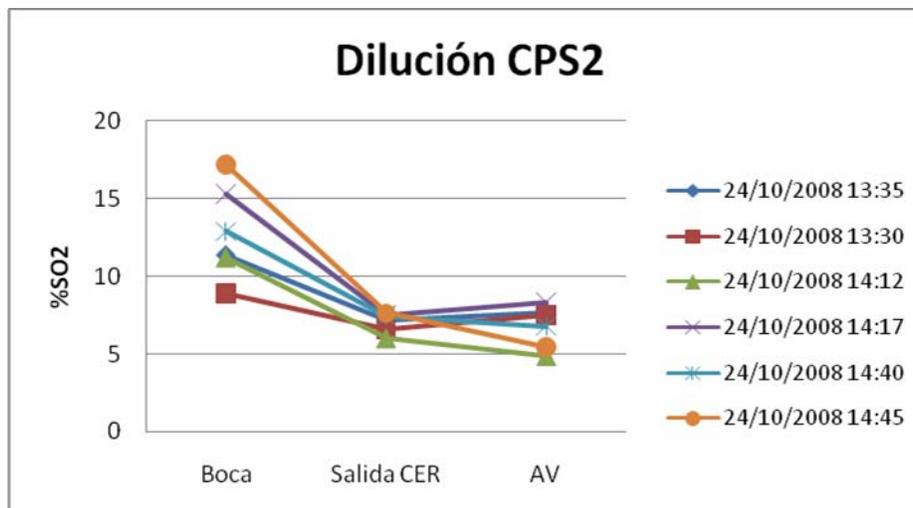
Para el caso del CPS 2, tenemos:

Fecha: 24/10/2008

Hora: 13:35 a 14:45

Los datos son los siguientes

Hora	13:35	13:30	14:12	14:17	14:40	14:45	Promedio	Desviación
Boca	11,35	8,93	11,19	15,27	12,88	17,17	12,80	3,00
Salida CER	7,17	6,58	6,01	7,51	7,42	7,61	7,05	0,63
AV	7,7	7,5	4,87	8,34	6,79	5,41	6,77	1,37



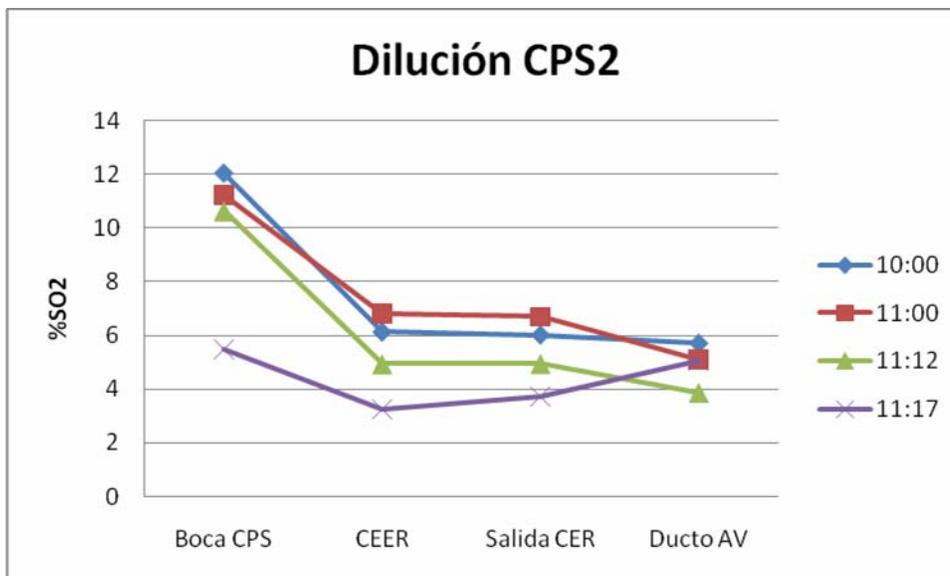
Para el caso del CPS 2, tenemos:

Fecha: 26/09/2008

Hora: 10:00 a 11:17

Los datos son los siguientes

HORA	10:00	11:00	11:12	11:17	Promedio	Desviación
Boca CPS	12,06	11,2	10,6	5,49	9,9	2,97
CEER	6,12	6,8	4,9	3,2	5,3	1,56
Salida CER	6,01	6,7	4,9	3,73	5,3	1,30
Ducto AV	5,7	5,1	3,9	5,05	4,9	0,78
DILUCION	111,6	120,0	176,4	8,7	104,2	69,83



En este muestreo se puede apreciar la disminución de la concentración del SO₂, debido a que se acaba la carrera de soplado del Convertidor, por lo tanto se continuo midiendo al comienzo de la carrera de ese mismo día, como vemos a continuación.

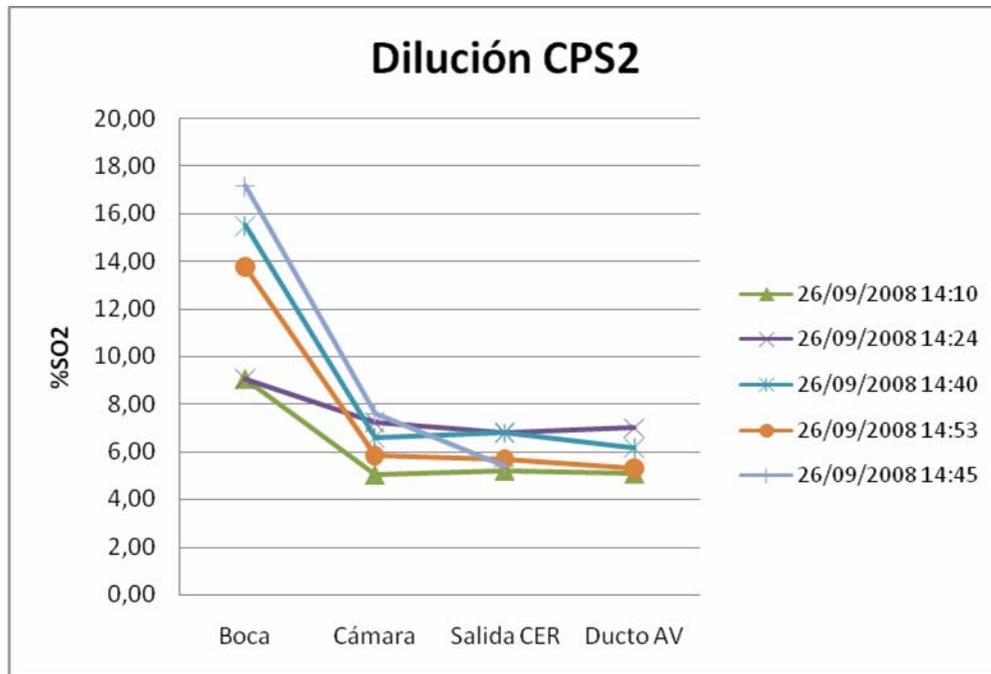
Muestreo CPS2:

Fecha: 26/09/2008

Hora: 14:10 a 15:01

Los datos son los siguientes

HORA	14:10	14:24	14:40	14:53	15:01	PROMEDIO	ESTANDAR
Boca CPS	9,04	15,5	13,8	13,79	12,79	13,0	2,79
CEER	7,2	6,6	5,8	5,8	7,1	6,4	0,66
Salida CER	6,79	6,8	5,7	5,70	6,69	6,2	0,63
Ducto AV	6,99	6,2	5,3	5,30	6,50	5,9	0,81
DILUCION	29,3	151,9	160,2	160,2	96,8	125,4	64,17



Podemos concluir que las campañas de muestreo realizadas dependen mucho del lugar donde se realice esta, las condiciones para poner las cañerías de muestreo fueron dificultosas ya que no se podía romper los paneles en cualquier lugar, así que algunas tomas de muestreos puede que no sean bastante representativas.

Pero en resumen los gases tienen similares comportamientos en su trayecto hacia plantas.

Anexo VII Muestreo Isocinético

PLANTA	MANEJO DE GASES
LUGAR DE MUESTREO	ENTRADA PLG N° 2
REALIZADO POR	R.Orrego, P.Gonzalez,M. Abarca, R. Cantillana
FECHA	23-Jul-08
HORA COMIENZO	12:17:00
HORA TERMINO	13:17:00

Precipitadores Electroestáticos Campos A-B

CONDICIONES DE OPERACION

	(Nm3/H)		
Flujo O2 Soplado	10394		
Flujo Aire Soplado	39212		
Flujo Aire Tob Iny.	999		
Flujo Aire Garr-Gun	5250		
Flujo aire Anular	4201		
FLUJO TOTAL	60056		
	(TMH)	(TMS)	
Carga Húmeda	0,0	0,0	
Carga Seca	81,5	79,8	
Fundente	7,1	*	
Carga Fría	18,1	11,2	
CARGA TOTAL	106,66	91,00	

			Datos PI	% ERROR
TIRAJE EN DUCTO	mm de H2O	-89,80	-0,06	99,93
PRESION BAROMETRICA	mm de Hg	633		
TEMPERATURA ENTRADA PLG N° 2	°C	315,90	312,1	1,20
AREA UTIL DUCTO ENTRADA PLG N° 2	m2	7,07		
VELOCIDAD DEL GAS	m/seg	24,16		
FLUJO GAS HUMEDO	Nm3/h	239913		
FLUJO GAS SECO	Nm3/h	222327	326989	-47,08
HUMEDAD GAS	%	7,33		
		POL FILTRO		
CONC.PART.GAS SECO	grs/Nm3	1,484		
PERD.POLVOS/HR.MUESTREO	TM/h	0,330	7,92	
PERD.(CARGA ALIMENTADA)	%	0,362		

COMPOSICION GASES:

			Datos PI	% ERROR CON RESPECTO AL PI
SO2=	%	7,0	6,79	3,00
CO2=	%	0,0		

O2 =	%	13,0		
N2 =	%	80,0		
CO =	%	0,0		
H2O	%	7,3		
EXCESO DE AIRE	%	160,1		
PLANTA			PLANTA LIMPIEZA DE GASES	
LUGAR DE MUESTREO			ENTRADA PLG N° 2	
FECHA			7-5-07	7-5-07
			10:45	12:40
HORA COMIENZO			AM	PM
			11:45	
HORA TERMINO			AM	1:40 PM

CONDICIONES DE OPERACION

CAMPOS OPERARNDNDO EN PEE		C	A - B - C
CAMPOS OPERARNDNDO EN PEE	N°	1	3
Flujo O2 Soplado	(Nm3/H)	11165	11234
Flujo Aire Soplado	(Nm3/H)	41055	41579
Flujo Aire Tob Iny.	(Nm3/H)	908	909
Flujo Aire Garr-Gun	(Nm3/H)	3995	3998
Flujo aire Anular	(Nm3/H)	4149	4149
FLUJO TOTAL	(Nm3/H)	61271	61869
Carga Húmeda	(TMH)	0,0	0,0
Carga Seca	(TMH)	92,3	92,2
Fundente	(TMH)	7,2	7,2
Carga Fría	(TMH)	13,9	11,6
CARGA TOTAL	(TMH)	113,3	111,0
Carga Húmeda	(TMS)	0,0	0,0
Carga Seca	(TMS)	92,1	92,0
Fundente	(TMS)	7,1	7,2
Carga Fría	(TMS)	13,9	11,6
CARGA TOTAL	(TMS)	113,1	110,8
TIRAJE EN DUCTO	mm de H2O	-117	-116
PRESION BAROMETRICA	mm de Hg	633	633
TEMPERATURA ENTRADA PLG N° 2	°C	322	330
AREA UTIL DUCTO ENTRADA PLG N° 2	m2	7,07	7,07
VELOCIDAD DEL GAS	m/seg	28,99	29,42
FLUJO GAS HUMEDO	Nm3/h	285694	286097
FLUJO GAS SECO	Nm3/h	256775	269019
HUMEDAD GAS	%	10,12	5,97
CONC.PART.GAS SECO	grs/Nm3	0,73771	0,36962
PERD.POLVOS/HR.MUESTREO	TM/h	0,18942	0,09943
PERD.(CARGA ALIMENTADA)	%	0,16747	0,08973
PERD.POLVOS/Día	TM/D	4,55	2,39

COMPOSICION GASES:

Anexo VII

SO2=	%	8,9	8,6
CO2=	%	0,0	0,0
O2 =	%	13,0	13,5
N2 =	%	78,1	77,9
CO =	%	0,0	0,0
H2O	%	10,12	5,97
EXCESO DE AIRE	%	170,40	191,21

Datos PI

TIRAJE EN DUCTO	mm de H2O	-211	-211
TEMPERATURA ENTRADA PLG N° 2	°C	326	326
FLUJO GAS SECO	Nm3/h	302940	300323
SO2=	%	10,22	10,00

CPS OPERANDO

CPS N° 1	%	93,4	100,0
CPS N° 2	%	96,7	0,0
CPS N° 3	%	0,0	100,0

TIEMPO DE OPERACIÓN CPS

SIN CPS	%	0,0	0,0
CON 1 CPS	%	9,84	0,0
CON 2 CPS	%	90,16	100,0
CON 3 CPS	%	0,0	0,0
Total	%	100,0	100,0

Anexo VIII Programa Muestreo Boca Convertidor Pierce Smith Nº2

Objetivo

Debido a la poca información que se tiene de los gases emanados por los Convertidores Pierce Smith, ya que posee condiciones que son variables, se realizará un muestreo de gases en la boca del Convertidor Pierce Smith N°2 durante toda la carrera de soplado. El objetivo del muestreo es conocer la variación de la concentración del SO₂ en los gases de salida del convertidor los cuales son dirigidos a las Plantas de Ácido (PLG1 y PLG2) y la variación de temperatura, con esto se obtendrá una curva que se aproxime al comportamiento de los 3 convertidores, la cual se podrá agregar al modelo operacional de Manejo de Gases.

Descripción Actividad: Se tomarán muestra de gases en la boca del CPS2 durante la carrera de soplado de este, existe gran dificultad para el muestreo de estos gases ya que las temperaturas que se alcanzan en boca son bastante altas, por lo que se le agrega carga fría en 2 ocasiones, en estos casos el tarro se voltea. Debido a esto hay que tener plena coordinación con los operadores de FUCO.

Las altas temperaturas en boca implica tener equipos con alta resistencia, por lo que se utiliza una lanza de acero inoxidable, los gases son extraídos por una bomba la cual descarga los gases en una bolsa, la cual se sella para su análisis, mediante Método Reich.

Materiales

- 3.1 Manómetro
- 3.2 Lanza muestreadora de acero inoxidable (largo: diám:)
- 3.3 Manguera
- 3.4 Bomba EMERSON modelo SA 55JXHTP-4698 CAT, 220 Volt, 2.4 AMP
- 3.5 10 Bolsas de muestreo
- 3.6 Reich
- 3.7 Yodo, almidón

3.8 Casco, lentes, guantes, respirador, tapones de oído y zapatos de seguridad

3.9 Termocupla

3.10 Planilla, lápiz.

Espacio Físico de Muestreo

Las muestras son extraídas al nivel de la boca del Convertidor Pierce Smith como muestran los diagramas y fotografías continuación:

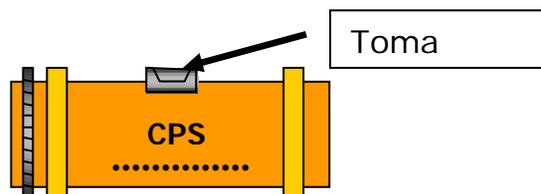


Fig A.8.1 Muestra CPS2

Procedimiento

Toma de muestras de gases

- Antes de salir del Laboratorio a efectuar las mediciones. Deberá comprobar que los equipos y materiales que se emplearán en esta actividad estén en buenas condiciones.
- Coordinar con el operador del CPS2, hora de soplado del convertidor y avisar donde se trabajará.
- Instalar los equipos en las ubicaciones correspondientes.
- En la boca de CPS la lanza se une a la bomba y esta a una manguera que se conecta a una bolsa la cual captura el gas.
- Cuando el operador avisa comienzo de soplado, se introduce la lanza, la bomba de la medición en boca una vez energizada empezará a succionar el gas desde el interior del convertidor.

- Realizar proceso de ambientación de sondas y bolsas, donde se captura gas y se bota, este procedimiento se realiza 2 veces.
- La tercera llenada de la bolsa con gas es la que se utilizará para realizar los análisis de gases, se anota la hora del muestreo.
- Una vez tomada la muestra se retira la sonda del interior del convertidor, sellando las bolsas para que no se escape el gas.
- Se repite procedimiento de toma de gases cada 30 min, teniendo en cuenta la bajada del convertidor, ya que le agregan carga fría.
- Las muestras de gases se analizan por el Método Reich.

Medición de Flujo

Objetivo: Medir flujo que pasa a través de válvula mariposa 56605 (válvula Convertidor Pierce Smith (2), según variación de ángulos de apertura.

Por la necesidad de saber cantidad de flujo que pasa a través de una válvula mariposa según su porcentaje de apertura, se harán mediciones de presiones usando la técnica del Tubo Pitot, con el cuál obtendremos la velocidad del gas. Sabiendo el área del ducto donde se toman las mediciones obtendremos el flujo que pasa a través de él.

Se necesita plena coordinación con los operadores de Manejo de Gases y además de la Fundición.

Manejo de Gases es el encargado de manejar las válvulas que se encuentra en el trayecto de los gases de Fundición hacia las Plantas de Ácido, por lo que ellos serán los encargados del movimiento de la válvula mariposa y además se necesita un flujo constante de gases en el ducto, por lo que la Fundición nos avisará cualquier cambio en el proceso (volteo de tarro para agregar carga fría).

Tubo Pitot

El tubo Pitot es un instrumento utilizado para medir velocidad puntual o local; consiste en dos tubos concéntricos colocados paralelamente al flujo, el tubo interior tiene una apertura frente a la dirección del flujo, el tubo exterior está perforado con pequeños orificios perpendiculares a la dirección de flujo, ambos tubos están conectados cada uno a una rama de un manómetro diferencial donde se mide la diferencia entre la presión estática y la dinámica. Esta diferencia de presiones nos permite evaluar la velocidad del fluido en un punto dado.

Debido a que existe un perfil de velocidades a lo largo del radio del tubo, se deben hacer mediciones en diferentes puntos, para obtener una velocidad promedio.

Las ventajas del tubo pitot son: consume poca energía y es relativamente barato y facilidad de instalación Las Desventajas: precisión baja con gases y líquidos a baja velocidad y no es recomendable para sólidos en suspensión.

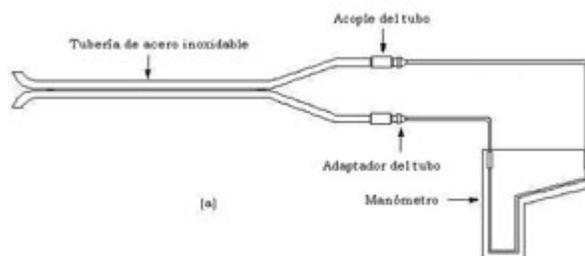


Fig. A.8.2 Diagrama Tubo Pitot

Este método es aplicable para medir la velocidad promedio de una corriente de gas y para cuantificar el caudal de gas.

La figura A.8.2 muestra en forma esquemática como se miden las presiones. Las presiones deben permanecer estables por lo menos 20 segundos antes de registrarlas.

La velocidad del gas se relaciona con la presión de velocidad a través de la ecuación de Bernoulli:

$$V_s = K_p C_p \sqrt{\frac{\overline{\Delta P} T_s}{P_s M_s}} \quad (1)$$

En la cual:

V = Velocidad promedio del gas, m/s.

K = Constante del tubo pitot (34.97).

C = Coeficiente del tubo pitot.

$\overline{\Delta P}$ = Presión de velocidad promedio del gas, mm H₂O.

T = Temperatura promedio del gas, K.

P = Presión absoluta en el ducto, mm Hg.

M = Masa molar del gas, g/mol.

La presión de velocidad promedio del gas se obtiene de la siguiente forma:

$$\overline{\Delta P} = \left(\frac{\sum \sqrt{\Delta P_i}}{n} \right)^2 \quad (2)$$

En la cual:

$\overline{\Delta P}$ = Presión de velocidad promedio del gas en ducto, mm H₂O.

AP = Presiones de velocidad en cada punto de muestreo, mm H₂O.

n = Número de puntos de muestreo.

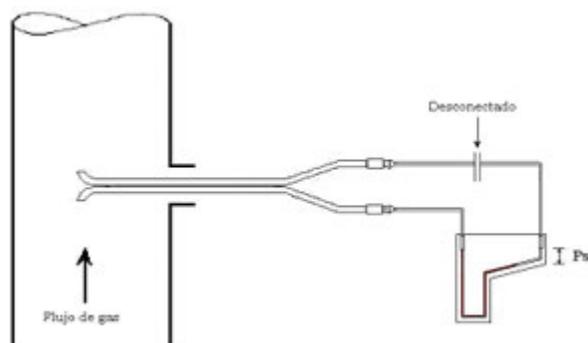


Fig. A.8.3. Medición de las presiones

La presión absoluta del gas en el ducto es igual a:

$$P_s = P_a + \frac{P_e}{13.6} \quad (3)$$

En la cual:

P_s = Presión absoluta en el ducto, mm Hg.

P_a = Presión barométrica, mm Hg.

P_e = Presión estática promedio en ducto, mm H₂O.

El caudal de gases se puede calcular multiplicando la velocidad de los gases por el área transversal del ducto, así:

$$Q_s = 3600 V_s A_s \quad (4)$$

En la cual:

Q_s = Caudal de gases, m³/h.

V_s = Velocidad promedio del gas, m/s.

A_s = Área transversal del ducto, m².

El área transversal del ducto se halla de la siguiente manera:

$$A_3 = \pi \left(\frac{D_3}{2} \right)^2 \quad (5)$$

Sonda Pitot:

El campo de velocidades se obtendrá mediante un tubo de Pitot, que es una combinación de una sonda estática o piezométrica y una sonda dinámica o total.

Aplicando el teorema de Bernoulli entre los puntos 1 y 3 de la figura 1 se obtiene:

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_3}{\gamma} + z_3 + \frac{v_3^2}{2g} \quad (6)$$

En este caso se tendrá que $z_1 = z_3$, $v_3 = 0$ y $P_3/\gamma = h_b$ de donde:

$$h_b = \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = h_a + \frac{v_1^2}{2g} \quad (7)$$

Llamando $H = h_b - h_a$, tendremos que:

$$v_1 = \sqrt{2gH} \quad (8)$$

donde:

- g: aceleración de la gravedad (m/s^2).
- V_1 : velocidad del aire en m/s.

- H: altura del manómetro en m de columna del fluido de trabajo.

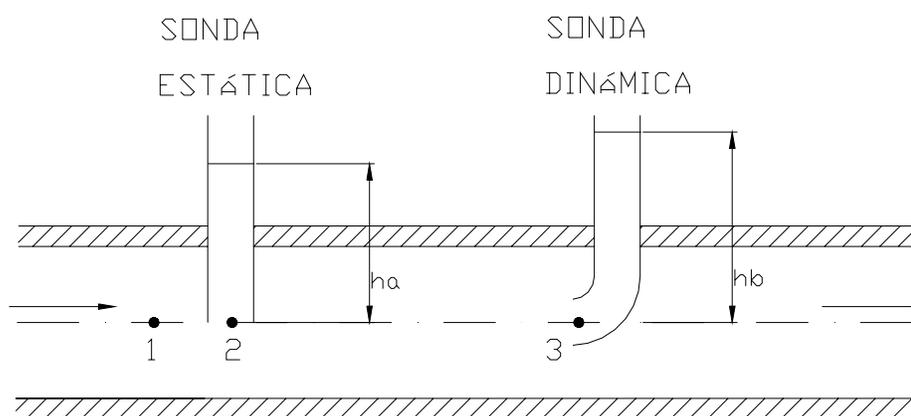


Fig. A.8.4 Fundamento del tubo dePitot

El tubo de Pitot nos trasforma la energía cinética del fluido en energía de presión, pudiéndose medir ésta gracias a la diferencia de nivel en el manómetro.

Espacio Físico de Medición

La toma de muestreo se hará en el ducto de salida de la Cámara de Enfriamiento Radiativo del CPS2, esta se encuentra después de la válvula mariposa 56605.



Fig. A.8.5 Fotografía Tapa Salida Cámara Enfriamiento Radiativa



Fig. A.8.6 Movimiento Válvula Mariposa 56605



Fig A.8.7. Manómetro



Fig. A.8.8. Tubo Pitot

Materiales

- 3.1 Manómetro
- 3.2 Lanza con tubo pitot
- 3.3 Manguera
- 3.4 Casco, lentes, guantes, respirador, tapones de oído y zapatos de seguridad
- 3.5 Termocupla
- 3.6 Planilla, lápiz.

Procedimiento

- Antes de salir del Laboratorio a efectuar las mediciones. Deberá comprobar que los equipos y materiales que se emplearán en esta actividad estén en buenas condiciones.
- Coordinar con el operador del CPS2, hora de soplado del convertidor y avisar donde se trabajará.
- Marcar Varilla distintas medidas de 30 cms. de separación.
- Instalar los equipos en las ubicaciones correspondientes.
- Conectar varilla con mangueras, las cuales se unen con el manómetro, según diagrama anterior.
- Introducir la varilla hasta el tope, esperar que se estabilice presión y anotar la presión dada (pulgadas de agua).
- Repetir procedimiento según marcas hechas anteriormente en varilla.
- Finalmente se obtendrá un perfil de velocidad, se sacará un promedio.
- Luego variar porcentaje de apertura de válvula.

- Repetir procedimiento.

Anexo IX Análisis Mejora

En este anexo veremos las posibles ganancias que existirían en el caso que se resuelvan las deficiencias del sistema de Manejo de Gases, ya sea operacionalmente como también mejorar las instalaciones, sellar ductos, uniones, tapas de esta forma impedir infiltraciones y gases fugitivos.

Según el Tablero de Gestión de la Unidad de Limpieza de Gases, donde se indican las metas mensuales a cumplir por la unidad, podemos observar en números rojo los meses donde no se cumplieron estas metas, entre los meses Enero y Agosto del año 2008, solo 2 meses sobrepasaron la meta. Por lo tanto es prioridad realizar mejoras en esta área.

UNIDAD LIMPIEZA DE GASES 2008									
NEGOCIO		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago
Consumo Unitario Cal viva	10.96	5,34	4,93	7,25	4,48	5,25	4,90	5,71	5,01
Consumo de Agua Industrial (PLG)	1.45	1.49	1.57	1.67	1.77	1.37	1.10	1.02	1.09
Consumo Energía Eléctrica (PLG-PTE)	0.114	0.107	0.107	0.098	0.144	0.115	0.103	0.104	0.101
Cumplimiento Captura Polvo Precipitadores Electroestáticos (rev 2)		255	316	261	164	237	294	346	327
		188	241	273	103	203	151	248	269
Cumplimiento programa producción acido rev 2		100.042	98.081	67.190	85.891	100.210	98.804	102.677	102.960
		97.220	97.518	72.137	40.901	73.717	98.595	107.241	100.390

Teniendo en cuenta la diferencia que existe entre los datos reales y los datos teóricos, podemos ver en la siguiente table aproximadamente sus diferencias.

DILUCION		Diseño	Medicion	Dif.
CT1	Campana CT	100%	149%	45%
	CAEN	3%		
	PPEE	4%		
CT2	Campana CT	100%	128%	14%
	CAEN	8%		
	PPEE	4%		
CPS	Campana	100%	168%	58%
	CAER	3 a 5%		
	PPEE	5%		
% SO 2 PLG2	Según Modelo	9,8%	7,9%	1,9%

Si pudieramos aumentar en 1% la concentración de SO₂, proporcionalmente aumentaríamos la producción de ácido de PLG2 tpd, contando que el precio por contrato actual del ácido es de 80 US\$/ton, obviamente obtendríamos grandes ganancias.

Antecedentes de las ventas de ácido durante el año 2008 alcanzaron un valor de MUS\$176, ante lo cual el incremento en la producción de ácido aporta considerablemente al negocio Divisional.

Observando el gráfico a continuación vemos que toda el área en amarillo es nuestra posibilidad de mejora, y ahí donde hay que enfocarse.

