

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

OPTIMIZACIÓN DE LOS MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR UTILIZADOS PARA LA DOSIFICACIÓN DEL SULFATO DE ALUMINIO FUNDIDO Y PARA EL ENFRIAMIENTO DEL SULFATO DE ALUMINIO SOLIDIFICADO.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Brs: **Mejia M., Javier A.**
Sánchez G., Francis C.
Para optar al Título
De Ingeniero Mecánico

Caracas, 2003

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

OPTIMIZACIÓN DE LOS MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR PARA LA DOSIFICACIÓN DEL SULFATO DE ALUMINIO FUNDIDO Y PARA EL ENFRIAMIENTO DEL SULFATO DE ALUMINIO SOLIDIFICADO.

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Oscar Sánchez

TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Carlos E. Guardia

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por los Brs: **Mejia M., Javier A.**

Sánchez G., Francis C.

Para optar al Título
De Ingeniero Mecánico

Caracas, 2003

Caracas, Diciembre del 2003.

ACTA

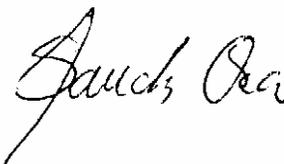
Los abajo firmantes, miembros del jurado designado por el Consejo de la Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los Bachilleres, Mejia M. Javier A.; Sánchez G. Francis C., titulado:

OPTIMIZACIÓN DE LOS MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR UTILIZADOS PARA LA DOSIFICACIÓN DEL SULFATO DE ALUMINIO FUNDIDO Y PARA EL ENFRIAMIENTO DEL SULFATO DE ALUMINIO SOLIDIFICADO

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Mecánico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por los autores, lo declaran APROBADO.


Prof. Franklin Baduy.
Jurado


Prof. Francisco García.
Jurado


Prof. Oscar Sánchez
Tutor Académico

Caracas, 2003

Mejia Medina, Javier A.

Sánchez García, Francis C.

OPTIMIZACIÓN DE LOS MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR UTILIZADOS PARA LA DOSIFICACIÓN DEL SULFATO DE ALUMINIO FUNDIDO Y PARA EL ENFRIAMIENTO DEL SULFATO DE ALUMINIO SOLIDIFICADO.

Tutor Académico: Prof. Oscar Sánchez. Tutor Industrial: Ing. Carlos E. Guardia.

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

2003. 181 páginas.

Palabras Claves: Sulfato de aluminio, Cristalización, Transferencia de calor.

Resumen. En el presente trabajo se plantearon mejoras en los procesos de transferencia de calor que experimenta el sulfato de aluminio sólido en las secciones “Vacío, Mezcla y Cristalización”, y “Enfriamiento” de la línea de producción de la empresa FERRALCA, donde se presentan problemas de cristalización prematura de material, salpicaduras y obstrucción de molinos.

Para ello se realizó un estudio de los problemas existentes mediante inspecciones visuales y evaluaciones con el fin de detectar las posibles causas. Esto permitió determinar que el sistema de chaquetas de vapor, no está diseñado para calentar el sulfato de aluminio fundido; su función es calentar la superficie de los equipos que conforman la sección de “Vacío, Mezcla y Cristalización”. Esto, unido a factores de diseño de los canales de conducción del producto, produce la cristalización prematura del material; en cuanto a la sección de enfriamiento, los ductos de ventilación se encuentran en muy mal estado y el caudal de aire suministrado por los ventiladores, no es suficiente para disminuir la temperatura del sulfato de aluminio hasta los valores requeridos por FERRALCA. Las propuestas aquí desarrolladas, tienen como finalidad disminuir la problemática presente, lo que permitirá reducir el tiempo de paradas de planta no programadas que actualmente afectan la producción.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quisiera agradecer a Dios y a mis Padres por la oportunidad que me han dado en la vida de poder contar con una educación, por el apoyo incondicional que me han brindado en todo momento a lo largo de todas mis facetas estudiantiles, confiando plenamente en mí a la hora de asumir diferentes retos profesionales y brindándome todos los estímulos posibles para conseguir todas las metas que me he trazado a lo largo de mi vida.

También quisiera agradecer a la empresa FERRALCA por haberme permitido el uso de sus instalaciones para poder realizar mi Trabajo Especial de Grado. Igualmente agradecer a mi tutor industrial el Ing. Carlos Guardia y al Ing. Henry Martínez por su valiosa ayuda, sus consejos y el asesoramiento dado a mi persona para realizar satisfactoriamente dicho T.E.G, A la Ing. Patricia Colmenares por su gran disposición y colaboración siempre que necesite de su ayuda.

Igualmente agradecer a todas las personas que siempre me brindaron su ayuda y apoyo a lo largo de la realización del presente trabajo. A mis amigos por siempre darme aliento en los momentos difíciles, a mi querida amiga y compañera de tesis Carolina Sánchez por haberme ayudado a realizar el presente trabajo, a mí querido hermano por su cariño y compañía en todo momento, a los profesores: Ing. Franklin Baduy, Ing. Julio segura, Ing. Cesar Oronel, Ing. Rodolfo Grullón y mi tutor Ing. Oscar Sánchez, que me brindaron su conocimiento, asesoramiento, orientación y valioso tiempo siempre que necesite de su ayuda.

Por ultimo agradecer a todas aquellas personas de la Empresa FERRALCA que desinteresadamente me prestaron su colaboración en cualquier situación que estuviera a su alcance, haciendo que la experiencia laboral realizada en esta empresa fuera muy satisfactoria. Por todo lo dicho anteriormente muchas gracias a todos.

Javier A. Mejia M.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente a Dios y a mis Padres por su guía y apoyo incondicional en todo momento de mi carrera, siendo pilares fundamentales para mi desarrollo integral como futura profesional de la Ingeniería. Los amo, este logro es para mí y para a ustedes. Gracias por su dedicación infinita. Que Dios nos bendiga.

En segunda Instancia, a FERRALCA, por permitir realizar el Trabajo Especial de Grado en las instalaciones de la Empresa, otorgándome un voto de confianza como estudiante de Ingeniería Mecánica e incentivando el contacto industria-Universidad que es tan importante en este nivel de la profesión.

Igualmente quiero agradecer, a todas las Instituciones y personas que me ayudaron y guiaron en el desarrollo de este Trabajo Especial: al Ing. Waldo J. Vivas Gutiérrez, gracias por tu dedicación, apoyo moral y sentimental, por tu compañía, solidaridad, cariño, y enseñanzas: te amo. Mis amigos y compañeros de estudio más cercanos por sus demostraciones de hermandad, compañerismo y lealtad. A mis guías industriales, Ing. Carlos E. Guardia e Ing. Henry Martínez, por sus nutrientes orientaciones profesionales y personales. A la Ing. Patricia Colmenares por su siempre buena disposición a brindar apoyo en cualquier aspecto. A todas aquellas empresas y personas que aportaron desinteresadamente su ayuda profesional en la realización de actividades de apoyo laboral. Al personal de FERRALCA por su receptividad y colaboración prestada durante mi estadía, y un agradecimiento especial al Ingeniero Rafael Rau que me brindo su sabiduría incondicionalmente.

Merecen les agradezca muy especialmente a los profesores: Ing. Franklin Baduy, Ing. Francisco Pimentel, Ing. Pedro Cadenas, Ing. Alberto Fuentes, Ing. Julio Segura, Ing. Cesar Oronel e Ing. Oscar Sánchez por que durante mi estadía en esta Casa de

Estudios, fue de ustedes de quien recibí las orientaciones más acertadas y enseñanzas profesionales impecables.

A todos, gracias por su tiempo, esfuerzo, dedicación y colaboración; me han aportado sus conocimientos y experiencia, logrando que este último gran paso en una etapa en mi vida, se convierta en el inicio más maravilloso de la etapa que sigue, y de esta manera lograr mi sueño mas anhelado: culminar mis estudios en “La Casa que vence las sombras”, la Excelsa “Universidad Central de Venezuela”.

Francis C. Sánchez García

DEDICATORIA

Quisiera dedicar el presente trabajo en primer lugar a mis Padres y mi hermano que siempre han estado a mi lado y me han apoyado a lo largo de toda mi vida, en especial durante mi carrera profesional, a Dios por brindarme todos los recursos necesarios para ir consiguiendo mis distintas metas en la vida, a mis familiares que siempre han creído en mí y me han dado cariño y comprensión siempre que los he necesitado, y a todas aquellas personas que de una u otra forma me han ayudado a conseguir esta gran meta de ser un profesional.

Javier A. Mejia M.

DEDICATORIA

Quiero dedicar este Trabajo Especial de Grado, a todas aquellas personas que me brindaron su colaboración personal y profesional durante la realización de este Trabajo Especial de Grado; pero sobretodo a Dios, a mi Padre y a mi Madre, porque siempre me transmitieron su ánimo y espíritu de lucha hasta en los caminos más estrechos y difíciles de transitar; también quiero dedicar mi esfuerzo a mis profesores universitarios y a todos aquellos que, sin serlo, han contribuido con mi aprendizaje profesional.

Francis C. Sánchez García

ÍNDICE

ÍNDICE GENERAL	No. de Página
RESUMEN.....	I
AGRADECIMIENTOS.....	II
DEDICATORIAS.....	V
ÍNDICE	VII
● ÍNDICE GENERAL.....	VII
● ÍNDICE DE TABLAS.....	X
● ÍNDICE DE FIGURAS	XIII
ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN	1
● MOTIVACIÓN.....	1
● ANTECEDENTES.....	2
● OBJETIVOS.....	3
● ALCANCE.....	4
● LIMITACIONES.....	5
CAPÍTULO 1: DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA	6
1.1 Reseña Histórica.....	6
1.2 Productos.....	7
1.3 Materia Prima.....	10
1.4 Descripción del proceso.....	12
1.4.1 Proceso de producción del sulfato de aluminio sólido.....	13
CAPÍTULO II: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
2.1 Problemática en la sección: “Vacío, Mezcla y Cristalización”.....	16
2.2 Problemática en la sección: “Enfriamiento”.....	23
CAPÍTULO III: PLANIFICACIÓN METODOLÓGICA.....	27
3.1 Planificación Inicial.....	27

3.2 Planificación Definitiva.....	28
CAPÍTULO IV: FUNDAMENTO TEÓRICO.....	34
4.1 Aplicaciones del sulfato de aluminio.....	34
4.2 Propiedades del sulfato de aluminio.....	36
4.3 Proceso de Cristalización.....	37
4.4 Fundamentos asociados al proceso de calentamiento.....	40
4.4.1 Flujo en Canales abiertos.....	42
4.5 Fundamentos asociados al proceso de enfriamiento.....	42
4.5.1 Ventilación Industrial.....	44
4.5.2 Tipo básicos de ventilación.....	44
4.5.3 Ventiladores.....	45
4.5.4 Ductos de ventilación.....	47
4.5.5 Aspectos generales de un sistema de ventilación.....	48
CAPÍTULO V: INSPECCIÓN Y EVALUACIÓN.....	50
5.1 Inspección.....	50
5.1.1 Identificación y descripción de los equipos que conforman los sistemas estudio	50
5.1.2 Condiciones actuales de operación de las secciones “Vacío, mezcla y Cristalización” y “Enfriamiento.....	56
5.1.3 Condiciones originales de diseño de Planta en las secciones estudiadas.....	67
5.2 Evaluación.....	68
5.2.1 Basamento de la problemática existente.....	68
5.2.2 Métodos aplicados por FERRALCA para solucionar temporalmente los problemas existentes.....	68
5.2.3 Evaluación del proceso de calentamiento del sulfato de aluminio fundido.....	69
5.2.3.1 Cálculo del calor suministrado por el vapor al sulfato de aluminio fundido.....	69

5.2.3.2 Cálculo del calor cedido en el proceso de calentamiento.....	76
I) Cálculo de q_{conv}	77
II) Cálculo de q_{rad}	90
III) Cálculo de q_a	91
IV) Cálculo de q_{sf}	91
5.2.3.3 Cálculo de la variación de temperatura en el sulfato de aluminio fundido por efecto del calor cedido.....	92
5.2.4 Evaluación del proceso de enfriamiento del sulfato de aluminio solidificado.....	93
5.2.4.1 Procedimiento para obtener la V y T_{∞}	94
5.2.4.2 Cálculo de la velocidad del aire a la salida de los difusores.....	98
5.2.4.3 Procedimiento para medir T_{sup}	101
5.2.4.4 Cálculo del calor transferido en el proceso de enfriamiento.....	103
CAPÍTULO VI: ANÁLISIS DE RESULTADOS Y PROPUESTAS DE MEJORAS.....	110
6.1 Análisis de resultados: Sistema A	110
6.2 Propuesta de mejoras: Sistema A	114
6.3 Análisis de resultados: Sistema B	120
6.4 Propuestas de mejoras: Sistema B	122
CAPÍTULO VII: FACTIBILIDAD ECONÓMICA	140
CONCLUSIONES	143
RECOMENDACIONES	146
BIBLIOGRAFÍA	148
APÉNDICES	150

INDICE DE TABLAS

Tabla N° 1.1 Especificaciones típicas del sulfato de aluminio.....	9
Tabla N° 1.2 Especificaciones de los productos sólidos de FERRALCA.....	9
Tabla N° 1.3 Especificaciones del Ácido Sulfúrico.....	10
Tabla N° 1.4 Especificaciones del Hidrato de Alúmina.....	10
Tabla N° 1.5. Especificaciones de la Bauxita.....	11
Tabla N° 5.1 Especificaciones de las calderas.....	51
Tabla N° 5.2 Formato de Inspección: sección “Vacío, Mezcla y Cristalización”.....	57,58
Tabla N° 5.3 Condiciones generales del ducto K-10A.....	61
Tabla N° 5.4 Condiciones generales del ducto K-10B.....	62
Tabla N° 5.5 Condiciones generales del ducto K-10C.....	63
Tabla N° 5.6 Condiciones generales del ducto K-10D.....	64
Tabla N° 5.7 Condiciones generales del ducto K-10E.....	65
Tabla N° 5.8 Condiciones generales del ducto K-10F.....	66
Tabla N° 5.9 Valores y datos correspondientes al diseño original de la planta.....	67
Tabla N° 5.10 Formato de medición: propiedades del vapor.....	73
Tabla N° 5.11 Valores promedios de las propiedades del vapor medidas.....	75
Tabla N° 5.12 Calor suministrado por el vapor.....	75

Tabla N° 5.13. Área superficial de las canaletas.....	79
Tabla N° 5.14 Temperatura superficial de los equipos.....	80
Tabla N° 5.15 Flujo de calor por convección perdido por la superficie del equipo.....	82
Tabla N° 5.16.Formato de medición: Caudal másico de sulfato de aluminio fundido....	85
Tabla N° 5.17 Área mojada y área de la placa aparente en cada equipo.....	87
Tabla N° 5.18 Velocidad del aire relativo al sulfato de aluminio fundido.....	87
Tabla N° 5.19 Formato de medición: Temperatura superficial del sulfato de aluminio fundido en los equipos del Sistema “A”.....	89
Tabla N° 5.20 Número de Reynolds del aire.....	89
Tabla N° 5.21 Valores de calor convectado por el sulfato de aluminio fundido.....	90
Tabla N° 5.22 Flujo de calor por radiación cedido por la superficie del equipo.....	90
Tabla N° 5.23 Flujo de calor por radiación cedido por el sulfato de aluminio fundido.....	91
Tabla N° 5.24 Flujo de calor transferido al sulfato de aluminio.....	91
Tabla N° 5.25 Flujo de calor cedido por el sulfato de aluminio fundido.....	91
Tabla N° 5.26 Variación de la temperatura del sulfato de aluminio fundido por efecto del calor cedido.....	92
Tabla N° 5.27 Velocidad y temperatura del aire que circula por los ductos.....	97
Tabla N° 5.28 Velocidad del aire a la salida de los difusores.....	100
Tabla N° 5.29 Temperatura del sulfato de aluminio en las cintas de enfriamiento.....	102

Tabla N° 5.30	Comparación de los flujos de calor del sulfato de aluminio.....	109
Tabla N° 6.1	Temperatura de pared T_{p2}	119
Tabla N° 6.2	Velocidad del aire considerando igual distribución de calor porcentual en las cintas de enfriamiento.....	125
Tabla N° 6.3	Velocidades del aire para la distribución porcentual de calor seleccionada.....	131
Tabla N° 6.4	Velocidad del aire recomendada para cada par de difusores.....	132
Tabla N° 6.5	Velocidad y caudal requerido para cada difusor y para cada ventilado.....	133
Tabla N° 6.6	Velocidad del aire recomendada para cada par de difusores.....	136
Tabla N° 6.7	Velocidad y caudal requerido para cada difusor y para cada ventilador.....	137
Tabla N° 7.1	Costo estimado de las propuestas: sección “Vacío, Mezcla y Cristalización”.....	141
Tabla N° 7.2	Costos aproximados de mantenimiento en la sección: Vacío, Mezcla y Cristalización.....	141
Tabla N° 7.3	T.R.I para las propuestas planteadas.....	141

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1.1.	Diagrama de flujo del proceso de producción del sulfato de aluminio sólido.....	15
Figura N° 2.1	Sistema en estudio A: Sección de “Mezcla, vacío y cristalización”.....	17
Figura N° 2.2	Mezcladora.....	19
Figura N° 2.3	Canaleta N° 1 (C1).....	20
Figura N° 2.4	Canaleta N° 2 (C2) y Embudo.....	20
Figura N° 2.5	Canaleta N° 3 (C3) y Embudo.....	21
Figura N° 2.6.	Vista Frontal de la Canaleta N°3.....	21
Figura N° 2.7	Zonas afectadas en el área de Mezcla y Cristalización.....	22
Figura N° 2.8	Producto cristalizado sobre Rodillos.....	22
Figura N° 2.9.	Sistema en estudio B: Sección de “Enfriamiento”.....	23
Figura N° 2.10	Pretrituradora.....	25
Figura N° 2.11	Cintas de enfriamiento.....	25
Figura N° 2.12	Molinos gruesos A3-A y A3- B.....	26
Figura N° 2.13	Cúpulas tipo gorros chinos.....	26
Figura N° 4.1	Curva de enfriamiento de un metal puro.....	39

Figura N° 5.1	Diagrama de flujo del vapor.....	51
Figura N° 5.2	Generadores de vapor.....	52
Figura N° 5.3	Distribuidor de vapor N° 2.....	52
Figura N° 5.4	Diagrama de flujo del sulfato de aluminio fundido.....	53
Figura N° 5.5	Diagrama de flujo del sulfato de aluminio solidificado.....	54
Figura N° 5.6.	Detalle: brida de salida N° 1 de la mezcladora.....	59
Figura N° 5.7	Sección transversal de la Canaleta N°1 y Canaleta N°2.....	60
Figura N° 5.8	Sección transversal de la Canaleta N°3.....	60
Figura N° 5.9	Sección transversal del embudo.....	61
Figura N° 5.10	Damper obstruido.....	62
Figura N° 5.11	Corrosión y suciedad en ductería.....	63
Figura N° 5.12	Corrosión y orificio en la parte superior de los ductos.....	64
Figura N° 5.13	Orificio en el codo del difusor.....	65
Figura N° 5.14	Formato de inspección de los ductos de ventilación.....	66
Figura N° 5.15	Condensador utilizado para efectuar mediciones de vapor.....	70
Figura N° 5.16.	Diagrama esquemático del Condensador.....	74
Figura N° 5.17.	Esquema indicativo del balance energético: sección “Vacío, Mezcla y Cristalización”.....	77
Figura N° 5.18	Sistema de coordenadas para placas inclinadas.....	78

Figura N° 5.19	Localización de los puntos de medición de temperatura sobre la superficie de las canaletas.....	80
Figura N° 5.20	Analogía del flujo de sulfato de aluminio como placa plana.....	82
Figura N° 5.21	Detalle: “huella” dejada por producto sobre la Canaleta No.1...	86
Figura N° 5.22	Detalle geométrico.....	87
Figura N° 5.23	Diagrama indicativo de la canaleta discretizada: medición de temperatura del sulfato de aluminio fundido.....	88
Figura N° 5.24	Detalle de salida del embudo.....	88
Figura N° 5.25	Esquema indicativo del balance energético: sección “Enfriamiento”:	93
Figura N° 5.26	Equipos que intervienen en el proceso de enfriamiento del sulfato de aluminio solidificado.....	94
Figura N° 5.27	Formato de medición: velocidades del aire.....	96
Figura N° 5.28	Vista axonométrica del difusor. Velocidad en la zona de medición (V_1).....	98
Figura N° 5.29	Vista frontal del difusor. Velocidad a la salida del difusor (V_2)..	98
Figura N° 5.30	Zonas de medición de temperatura del sulfato de aluminio solidificado.....	102
Figura N° 6.1	Puntos de estancamiento en la sección transversal de las Canaletas	111
Figura N° 6.2	Sección transversal actual y tapa agregada.....	115
Figura N° 6.3	Diagrama esquemática indicativo de T_i y T_p	116
Figura N° 6.4	Diagrama del sistema de enfriamiento.....	124

Figura N° 6.5	Distribución porcentual del calor cedido en la cinta de enfriamiento 1.....	127
Figura N° 6.6	Carta psicrométrica: proceso de enfriamiento con humidificación.	134
Figura N° 6.7	Carta psicrométrica: proceso de enfriamiento simple.....	135

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

A = área de la pared, normal al flujo de calor

A_m = Área mojada

e = espesor

g = aceleración de gravedad

Gr = número de Grashof

h = coeficiente de transferencia de calor

H = pérdidas localizadas

k = conductividad térmica del material

L = longitud

m = masa

\dot{m} = flujo másico

\overline{Nu} = número de Nusselt medio

% P/P = porcentaje en peso

P_m = perímetro mojado

Pr = número de Prandtl

P_s = Presión estática

q = flujo de calor

q_a = flujo de calor transferido al sulfato de aluminio

q_{cond} = flujo de calor por conducción

q_{conv} = flujo de calor por convección

q_{rad} = flujo de calor por radiación

r = radio del sector circular

Re = número de Reynolds

R_h = radio Hidráulico

S = perímetro de un sector circular

SATA-P: Sulfato de aluminio Grado 2, materia prima: Bauxita Pijiguaos (sólido)

SALH: Sulfato de Aluminio Grado 1 (sólido)

SALH-L: Sulfato de Aluminio Grado 1(líquido):

SATA: Sulfato de aluminio Grado 2 (sólido)

SATA-L: Sulfato de aluminio Grado 2: (líquido)

T_{entrada} = temperatura de entrada

T_{∞} = temperatura del medio ambiente

T_{alr} = temperatura de los alrededores

T_{ext} = temperatura externa de la superficie

T_{i} = temperatura interna de la superficie

T_{m} = temperatura media

T_{p} = temperaturas de pared,

T_{salida} : temperatura de salida

T_{sup} = temperatura en la superficie

u_{∞} = Velocidad del flujo (relativo al proceso de transferencia de calor por convección)

V = Velocidad del aire

Subíndices:

v = vapor de agua

s = sulfato de aluminio

e = relativo a la correlación utilizada para convección natural en superficies inclinadas

1 = superficie de los equipos

2 = sulfato de aluminio fundido

sf = sulfato de aluminio fundido

ss = sulfato de aluminio solidificado

Símbolos griegos:

ε = emisividad térmica del material

σ = constante de proporcionalidad

ρ = Densidad

θ = Ángulo de inclinación de la placa con respecto al plano vertical

β = Coeficiente de expansión

ν = viscosidad cinemática

α = difusividad térmica

φ = ángulo del sector circular

INTRODUCCIÓN

1. Motivación:

La empresa Ferro Aluminio, C.A. (FERRALCA), ubicada en el área de Empresas Mixtas en Morón, Edo. Carabobo, tiene como objetivo, producir de acuerdo a la demanda existente, sulfatos de aluminio, grado técnico y grado libre de hierro en dos presentaciones: líquido y sólido; la producción de sulfato tiene asociada una serie de procesos en los que finalmente se llevan a cabo las reacciones del ácido sulfúrico con alúmina para obtener el sulfato de aluminio, del óxido férrico con ácido sulfúrico para obtener sulfato férrico, ambos, sulfato de aluminio grado técnico, y del ácido sulfúrico con hidróxido de aluminio para obtener el sulfato grado libre de hierro.

Motivado, por la necesidad de la empresa, de evitar los problemas que se vienen presentando regularmente en las siguientes secciones de la línea de producción: “Vacío, Mezcla y Cristalización” y “Pretrituración, Molido y Cribado” del sulfato de aluminio, FERRALCA, ha requerido de un estudio que derive en propuestas que minimicen o eviten estos problemas, para luego, implementar la solución más idónea de acuerdo a evaluaciones, cálculos y resultados que se obtengan.

Estos inconvenientes, traen consecuencias indeseables para el proceso de producción, como lo son: paradas de planta no programadas, pérdida de producto en el sistema de dosificación y obstrucción en el paso del sulfato ya cristalizado a través de los molinos trituradores de en la siguiente sección en la línea productiva.

De esta forma, se demuestra la importancia de la realización de este proyecto tanto para FERRALCA debido a la incidencia del problema y sus consecuencias sobre el proceso de producción y para nosotros, como estudiantes de Ingeniería Mecánica, ya que refleja nuestra inclinación en el área de procesos y en la solución de problemas técnicos donde se apliquen conocimientos teóricos adquiridos durante nuestra formación universitaria

2. Antecedentes

Los antecedentes, en la revisión bibliográfica y trabajos más relevantes relacionados con el rediseño y/o mejoras de los sistemas de dosificación y enfriamiento, ubicados en las secciones de “Pretrituración, Molido y Cribado” y “Vacío, Mezcla y Cristalización”, respectivamente, fueron los siguientes:

- Análisis térmico de los dispositivos de descarga de los calcinadores en una empresa de alúmina. 2001.
- Mejoramiento del Sistema de Generación de vapor en una empresa tabacalera. 1998
- Desarrollo de un procedimiento de cálculo para diseño térmico y/o evaluación térmica de intercambiadores de calor.
- Diseño y construcción de un intercambiador de calor del tipo Concha y tubo. 1987
- Desarrollo de un modelo matemático para el estudio del fenómeno de transferencia de calor y su implementación. 1987.

Además de estos antecedentes, existe otro dentro de la misma empresa descrito seguidamente: se tiene conocimiento, que hace aproximadamente 8 ó 9 años, algunos técnicos que para aquel entonces laboraban en la planta, implementaron un sistema de

intercambiador de calor cerrado para sustituir las actuales y originales canaletas abiertas por donde fluye el sulfato de aluminio fundido; este sistema no funcionó como se esperaba ya que de forma casi inmediata, se obstruyó el paso del material a través del mismo, ocasionando la desmantelación del intercambiador cerrado y la instalación de las mismas canaletas, presentes hoy día. Sin embargo, no existen datos técnicos de diseño ni de construcción de tal intercambiador dentro de la empresa, por lo que se presenta la duda sobre la adecuación del diseño y de la construcción del intercambiador de calor cerrado.

3. Objetivos

General:

Evaluar los mecanismos de transferencia de calor existentes que se utilizan tanto para dosificar el sulfato de aluminio fundido de sulfato a través de las canaletas, como para enfriar el sulfato de aluminio solidificado, con el fin, de proponer mejoras en el diseño del sistema de conducción y/o en los procesos de transferencia de calor, basadas en los resultados del estudio mencionado.

Específicos:

- Identificar y Conocer las propiedades del sulfato de aluminio sólido y fundido.
- Describir y conocer el proceso de mezcla, vaciado, cristalización y enfriamiento del sulfato de aluminio.
- Inspeccionar y evaluar las fallas y daños presentes en la zona de “Vacío, Mezcla y Cristalización” del sulfato (estadística de fallas).
- Evaluar el proceso de transferencia de calor en el sistema de conducción del sulfato de aluminio fundido (canaletas encamisadas con vapor de agua).

- Proponer las mejoras en el área de diseño y/o procesos relativas al estudio anterior en el área de vacío, mezcla y cristalización, basados en los resultados teóricos y prácticos (inspecciones y evaluaciones previas)
- Inspeccionar y evaluar las fallas y daños presentes en la zona de “Enfriamiento” del sulfato solidificado. (estadística de fallas).
- Estudiar el mecanismo de enfriamiento del sulfato de aluminio en las cintas transportadoras.
- Proponer las mejoras en el área de diseño y/o procesos relativas al estudio anterior en el área de enfriamiento del sulfato, basados en los resultados teóricos y prácticos (inspecciones y evaluaciones previas)
- Estudiar la factibilidad económica de la propuesta seleccionada.

4. Alcances:

1. Estudiar y seguidamente analizar, los sistemas de “dosificación” (Sección de Vacío, Mezcla y Cristalización), y “Enfriamiento” (sección de Pretrituración, Molido y Cribado) del sulfato de aluminio.
2. Realizar las propuestas que impliquen el diseño (o rediseño) de los sistemas “dosificación” y “enfriamiento” y/o, de los mecanismos de transferencia de calor que se utilizan en ellos, con el fin solucionar de la forma más idónea los problemas actuales en esas zonas de la línea de producción del sulfato de aluminio.

5. Limitaciones:

1. No fue posible realizar el estudio de los problemas con todos sus productos debido a la planificación del departamento de producción, ya que durante el tiempo que se desarrolló el Trabajo Especial de Grado, solo se produjo Sulfato de Aluminio Tratamiento de Agua, SATA-P, por lo que solo se obtuvieron resultados para ese producto.
2. La carencia de instrumentación en general, fue motivo de limitaciones y retrasos. No contar con instrumento de medición directa, conllevó a construir y a utilizar instrumentos de medición indirecta lo cual produce errores en los procesos de mediciones.
3. Las mediciones de velocidad del aire no se pudieron realizar a través de los métodos recomendados por las normas de medición, ya que no se pudo contar con un tubo de Pitot, lo que hubiera permitido obtener un menor margen de error en las mediciones realizadas, ante la carencia de este instrumento las mediciones se realizaron con un termo-anemómetro digital.

CAPÍTULO I

DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

1.1 Reseña Histórica:

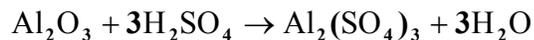
Ferro Aluminio, C.A., FERRALCA, fue fundada en 1972 e inicia operaciones en 1976. Está ubicada geográficamente en la Región Norte Costera del Estado Carabobo, específicamente, en el área de las “Empresas Mixtas de Pequiven, PDVSA” frente a la carretera Nacional Morón-Coro a pocos kilómetros de la empresa Pequiven en el Municipio de Morón, distrito Juan José Mora. El proyecto de la Planta fue ejecutada por la firma COUTINHO CARO & Co. Para la producción de Sulfato de Aluminio, FERRALCA utiliza el proceso patentado por la firma Gerbruder Giuliani de la Republica Federal de Alemania. Hasta el año de 1992, la empresa operó como empresa mixta de Pequiven, filial petroquímica de Petróleos de Venezuela, S.A., actualmente cuenta con capital privado 100% venezolano. La Planta fue diseñada originalmente para producir 30.000 toneladas métricas al año de sulfato de aluminio sólido. En 1986 se amplió su capacidad, agregando la línea de producción de sulfato de aluminio líquido, hasta alcanzar en conjunto una producción de 56.000 toneladas métricas al año. Desde 1996, gracias a las

mejoras operativas y en la productividad del proceso, se puede disponer de una producción total de hasta 90.000 toneladas métricas anual.

Sus actividades están dirigidas a la fabricación y comercialización de productos para el tratamiento de aguas que se utilizan en procesos industriales como: Industrias Papeleras, Azucareras, Efluentes Sanitarios, Pinturas, Siderurgias, Areneras e Hidrológicas. Sus productos abastecen el mercado nacional y a los mercados de Centro y Sur América, tales como: Puerto Rico, Guatemala, El Salvador, República Dominicana, Honduras; Ecuador, Trinidad y Guyana.

1.2 Productos:

En FERRALCA, el sulfato de aluminio se obtiene a partir de la reacción del óxido de aluminio, presente en el hidrato de alúmina o en la bauxita, con ácido sulfúrico. Esta reacción se ilustra de forma simplificada con la ecuación siguiente:



La reacción se ajusta de acuerdo a la estequiometría de la ecuación expresada anteriormente. Con base en lo anterior, a continuación se describen los productos que se elaboran en FERRALCA:

➤ **Sulfato de aluminio Grado 2: SATA:** Es una sal inorgánica. Su uso principal está orientado hacia el tratamiento de aguas para consumo humano y tratamiento de aguas residuales. Este producto está certificado por la National Sanitation Foundation (NSF) bajo el STANDARD 60, lo cual indica que cumple con las exigencias de los productos utilizados en los EEUU en los procesos de potabilización de agua. Se transporta en sacos de polipropileno de 50 o 25 g. o en Big Bag (sacos gigantes) de una tonelada de capacidad. Es soluble en agua y pueden prepararse soluciones hasta de 55 % p/p (porcentaje en peso) u 8.5 % de aluminio expresado como Al_2O_3 .

➤ **Sulfato de aluminio Grado 2: SATA** Es una solución que puede ser utilizada para clarificación de agua para el consumo humano y en aguas residuales. Este producto también posee la certificación de la National Sanitation Foundation (NSF) bajo el STANDARD 60, tal como lo recomienda la American Water Works Association (AWWA) para el Sulfato de Aluminio. Además, a nivel nacional, posee la certificación de Productos Aprobados Hidroven. Puede despacharse en cisternas o recipientes de menor capacidad, especialmente acondicionados con recubrimientos resistentes al ataque de la corrosión química.

➤ **Sulfato de Aluminio Grado 1 Tipo AWWA: SALH:** Es una sal inorgánica de fórmula molecular $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$, utilizada como coagulante/floculante en el tratamiento de aguas residuales y para el consumo humano. En el proceso ácido de la manufactura del papel es utilizado para precipitar la colofonia y mantener un pH especificado. Se transporta en sacos de polipropileno de 50 ó 25 g. o también puede enviarse en Big Bag de 1000 g. Es fácilmente soluble en agua y pueden prepararse soluciones con concentraciones de sulfato sólido hasta de 55%. g.

➤ **Sulfato de Aluminio grado 1-L: SALH-L:** Es una solución de excelente calidad que tiene su uso principal en la manufactura de papel. También se obtienen excelentes resultados cuando se emplea en la clarificación de aguas para el consumo humano y en el tratamiento de efluentes. Puede ser dosificado directamente del tanque donde se tenga almacenado. Es altamente miscible en agua.

➤ **SATA-P:** Es una sal inorgánica elaborada con materia prima nacional: Su uso principal está orientado hacia el tratamiento de agua para consumo humano y tratamiento de aguas residuales de origen industrial y doméstico. El efecto de dos excelentes coagulantes como el hierro y el aluminio, le confieren al producto un alto grado de versatilidad que le permiten aplicarse en una amplia gama de calidades de agua cruda.

	Apariencia	[%Al ₂ O ₃]	[%Fe ₂ O ₃]	[%H ₂ O]	% Insolubles	[%AL ₂ (SO ₄) ₃]	[%Fe ₂ (SO ₄) ₃]	% Total	
SATA-P	Sólido marrón oscuro	No están especificados valores típicos para este producto							
SATA	Sólido marrón oscuro	15,3 Mínimo	0,2 Máximo	42,9	5 Máximo	51,34	0,50	94,74	
SALH	Sólido Blanco	17,1 Mínimo	0,1 Máximo	42	0,1 Máximo	57,38	0,25	99,63	

Tabla N°1.1 Especificaciones típicas del sulfato de aluminio

	Apariencia	[%Al ₂ O ₃]	[%Fe ₂ O ₃]	[%H ₂ O]	% Insolubles	[%AL ₂ (SO ₄) ₃]	[%Fe ₂ (SO ₄) ₃]	% Total
SATA-P	Sólido marrón oscuro	14 Mínimo	3,5 Máximo	41	5 Máximo	46,98	8,76	96,74
SATA	Sólido marrón oscuro	15 Mínimo	1,6 Máximo	41	5,5 Máximo	50,33	4,01	95,34
SALH	Sólido Blanco	17 Mínimo	0,8 Máximo	41	0,5 Máximo	57,04	1,88	99,92

Tabla N° 1.2. Especificaciones de los productos sólidos de FERRALCA

En las especificaciones tabuladas anteriormente, la columna que corresponde a porcentaje total (% Total), es el resultado de la sumatoria de los 3 componentes de las sales: Al₂(SO₄)₃ (Sulfato de Aluminio), Fe₂(SO₄)₃ (Sulfato Férrico) y H₂O (Agua); el porcentaje de materia Insoluble, es el complemento del porcentaje total. Sin embargo, comercialmente suele expresarse estas sales en función de su contenido de agua y de los porcentajes de sus principales óxidos: el Al₂O₃ (óxido de aluminio) y el Fe₂O₃ (óxido férrico), es por ello que estos datos también son reportados como en las hojas técnicas de productos de FERRALCA.

1.3 Materia Prima:

➤ **Ácido Sulfúrico:** El ácido sulfúrico es un ácido muy reactivo con un punto de ebullición alto (330 °C), esta característica permite su empleo en la fabricación de ácidos halogenados, limpieza de metales, etc. Es altamente corrosivo, especialmente a concentraciones por debajo del 80%; es higroscópico. No es explosivo, ni inflamable, pero a altas concentraciones pueden causar incendios con líquidos o sólidos combustibles y en contacto con metales desprende hidrógeno y gases tóxicos. Se almacena en tanques de acero al carbono revestidos de fibra de vidrio. EL suministro de ácido sulfúrico es a través de tuberías desde la Planta de Pequiven en Morón, ubicada a 3 m. de FERRALCA.

Parámetros	Tipo	
	Concentrado	Diluido
Apariencia	Líquido Incoloro o ligeramente	
% H ₂ SO ₄	97,5 mínimo	70 mínimo
ppm Fe	40 máximo.	150 máximo
HNO ₃	< 0,05	180 máximo
Turbiedad (NTU)	< 0,05	180 máximo

Tabla N° 1.3 Especificaciones del Ácido Sulfúrico

➤ **Hidrato de alúmina:** El hidrato de alúmina consta principalmente de óxido de aluminio trihidratado, el cual proviene de un proceso de purificación de la bauxita.

% Al ₂ O ₃	63,5 mínimo
% Fe ₂ O ₃	0,5 máximo
%SiO ₂	2,0 máximo
%TiO ₂	0,5 máximo
% Pérdida al rojo	No Especificado
% Humedad	No Especificado

Tabla N° 1.4 Especificaciones del Hidrato de Alúmina

➤ **Bauxita:** Es uno de los minerales más variables en composición química y apariencia física. En las variaciones de color incluye: blanco, gris, rosa, pardo, amarillo, acanelado, verde y casi negro, y puede ser terrosa, arcillosa, granos finos, etc. La bauxita es una materia prima compuesta principalmente de uno o más minerales de óxido de aluminio hidratado e impurezas de óxido de sílice, titanio, hierro y otros elementos en menores cantidades. Su origen puede ser nacional ó importada.

- **Bauxita Importada:** El producto se denomina Bauxita Grado Químico (CGB) y proveniente de “Linden Mining Enterprise”, Guyana.

- **Bauxita Nacional:** Provista por la empresa Corporación Venezolana de Guayana– Bauxilum. Las especificaciones se encuentran a continuación:

Parámetros (%)	Tipo	
	% Bauxita importada	% Bauxita Nacional
Al ₂ O ₃	59,0 mínimo	49,0 mínimo
Fe ₂ O ₃	1,25 máximo	14,6 máximo
SiO ₂	5,0 máximo	8,5 máximo
TiO ₂	3,2 máximo	1,3 máximo
Pérdida por Ignición	No Especificado	No Especificado
Humedad	5,0	<12

Tabla N° 1.5 Especificaciones de la Bauxita

1.4 Descripción del proceso:

En Ferralca, operan 2 líneas de producción: La Línea de Sulfato Líquido para producir SATA-L y SALH-L, y la Línea de Sulfato Sólido para producir SATA, SALH y SATA-P. Ambas, son independientes y sólo se obtiene un producto a la vez de cada una de ellas de acuerdo a la programación del Departamento de Producción. El problema planteado en el Trabajo de Grado, se presenta en la línea de producción del Sulfato Sólido, para lo cual, seguidamente, se describirá y detallará el mismo, sin embargo las primeras tres fases son comunes para ambas líneas:

1.- Fase de Dilución de ácido sulfúrico: En esta fase el ácido concentrado al 98% p/p (porcentaje en peso) es diluido con agua hasta alcanzar una concentración que oscila entre 74 % a 78 % p/p, concentración requerida en el proceso. El ácido diluido es almacenado y luego bombeado, por cargas, a un tanque montado sobre una báscula donde se ajusta el peso deseado, de allí pasa a un tanque precalentador en el cual se dispone para ser utilizado en la etapa de reacción.

2.- Fase de Suspensión y Reacción: El hidrato de alúmina o la bauxita (dependiendo del tipo de sulfato que se quiera obtener) se conduce, por cargas, desde la tolva de almacenamiento a los recipientes de suspensión (suspensor) a través de tornillos sin fin (elevador de bauxita). Una vez que está en el recipiente, el hidrato o la bauxita son mezclados, mediante un agitador, con la cantidad de agua requerida por la estequiometría de la reacción. El peso del agua y del hidrato es determinado mediante un sistema electrónico de celdas de pesaje, sobre las cuales descansa el suspensor. Una vez culminado el proceso de preparación de la suspensión, ésta es trasegada hasta el reactor, posteriormente se procede a incorporar el ácido a la suspensión y de esta manera se da inicio a la conversión de los reactantes. El proceso de reacción dura aproximadamente 15 minutos. El reactor alcanza una presión entre 490 y 589 kPa (5 y 6 kgf / cm²) y una temperatura entre 160 y 170 °C. Al final se obtiene un producto de aspecto pastoso conocido como sulfato de aluminio fundido, definiendo con este término al producto en su condición de líquido altamente viscoso.

3.- Fase de Expansión: El sulfato de aluminio fundido contenido en el reactor es transferido a un expansor situado en un nivel superior de la planta, para esta conducción se utiliza la presión generada en la fase de reacción. Esta acción, además de liberar presión en el reactor, permite liberar el vapor de agua generado con el aumento de la temperatura durante el proceso de reacción.

Es a partir de esta etapa donde cada línea de producción (Líquido y Sólido) se diferencia, en virtud de que poseen diferentes unidades de operación.

1.4.1 Proceso de producción del sulfato de aluminio sólido:

a) Sección de “Vacío, Mezcla y Cristalización”: una vez que el sulfato de aluminio fundido se encuentra en el expansor de la línea de producción de sulfato de aluminio sólido, éste es transferido mediante un sistema de conducción por vacío hacia un mezclador, donde se le incorpora sulfato en forma sólida con el objeto de iniciar la cristalización. El sulfato es transferido por gravedad desde el mezclador hacia las cintas de cristalización donde el sulfato se endurece como consecuencia de varios factores, entre ellos el más importante es el descenso de la temperatura. Al final de la cinta se encuentra la etapa de trituración, donde el sulfato cristalizado es fracturado por una trituradora en trozos de aproximadamente 6,3 cm (2 ½”). Esto con el objeto de adecuar el producto para la etapa de molienda y de esta manera facilitar la disipación de calor.

b) Sección de “Enfriamiento”: de las pretrituradoras el material es transferido a las cintas de enfriamiento, donde es retirado el exceso de calor por convección forzada mediante el uso de ventiladores que difunden el aire en la superficie del sulfato pretriturado.

c) Sección de “Molido y Tamizado”: de las cintas de enfriamiento el producto es alimentado a un molino primario (grueso), el cual se encarga de granular el producto. Con el objeto de seleccionar los gránulos del tamaño adecuado, esto es: <4.0 mm, el producto se envía a un vibro tamiz. Los granos con el tamaño adecuado pasan a los silos

de producto terminado mientras que los de tamaños superiores son enviados a un molino secundario (finos), donde su tamaño es reducido y luego son transportados nuevamente al vibro tamiz. Las partículas de sulfato se hacen recircular en este sistema hasta que alcanzan el tamaño especificado ($<4,0$ mm.) para ser clasificadas por el vibro tamiz y de esta manera llegar a los silos de producto terminado.

d) Sección de “Ensacado y almacenaje”: De los silos de producto terminado el material es envasado en sacos de 50 kg. Los sacos son colocados en paletas de 30 sacos los cuales pasan al almacén de producto en tránsito para ser certificado y posteriormente ser llevado a almacén de producto terminado.

DIAGRAMA DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE SULFATO DE ALUMINIO SÓLIDO

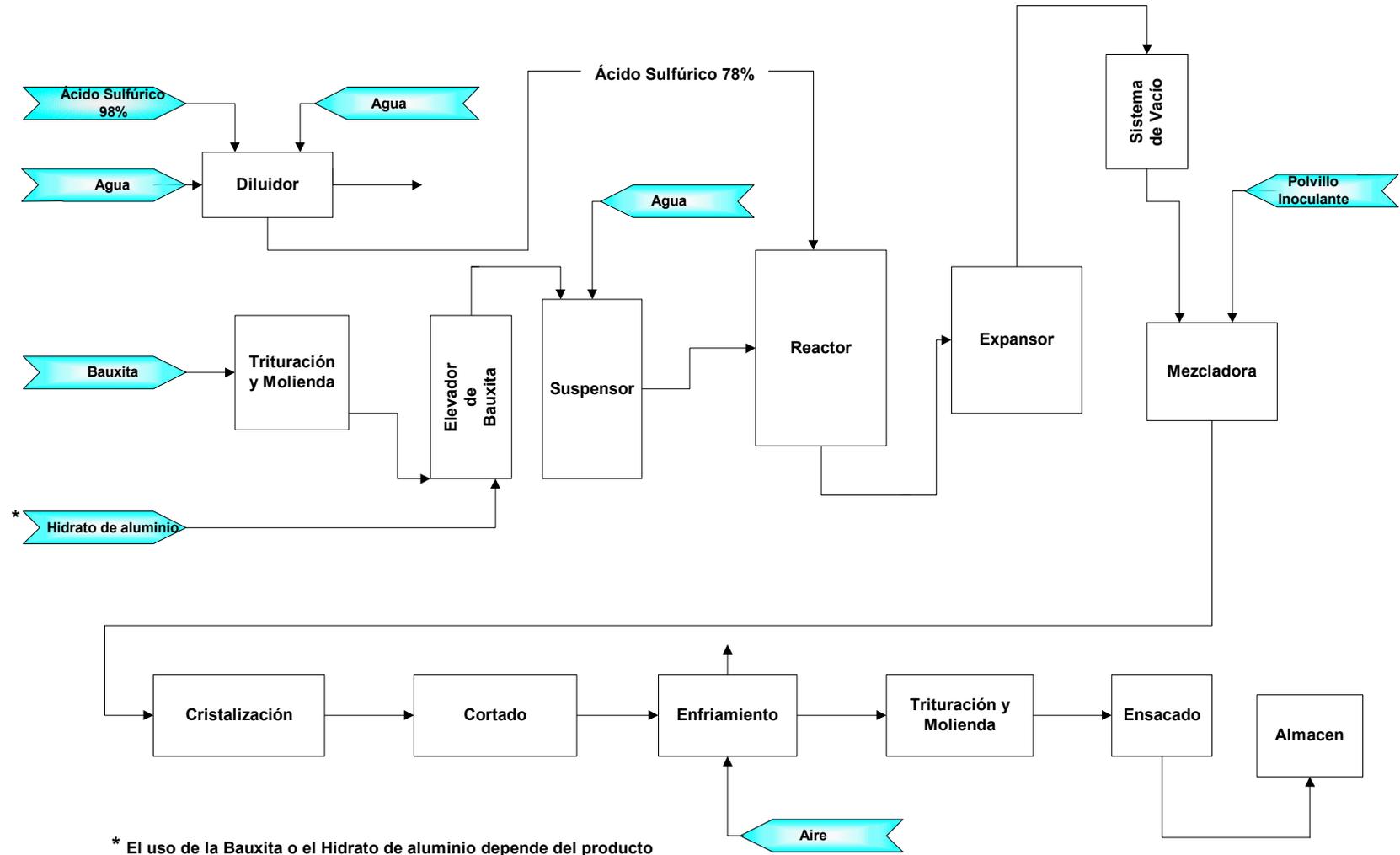


Figura N° 1.1 Diagrama de flujo del proceso de producción del sulfato de aluminio sólido.

CAPÍTULO II

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La empresa FERRALCA está dedicada a la producción de sulfato de aluminio y presenta problemas en dos secciones que forman parte del proceso de producción de dicho material las cuales se describen seguidamente. La primera sección que presenta problemas es la de “Vacío, Mezcla y Cristalización”, y la otra es la sección de “Enfriamiento”. Cada una de estas secciones esta bien definida, lo que permite delimitar fronteras y establecer así sistemas de estudio donde se ubica la problemática. Cada sistema en estudio y su problemática asociada se explica a continuación.

Problemática en la Sección “Vacío, Mezcla y Cristalización”:

Sistema en estudio reunido bajo el volumen de control “A” (figura 2.1): cuya descripción detallada sigue a continuación: en la mezcladora (M-1), se unen el Sulfato de Aluminio fundido proveniente del tanque de vacío (V-1), y el polvillo inoculante (hidrato de alúmina ó bauxita granulado) proveniente del bajante de la tolva (B-6). La entrada del producto a la mezcladora es regulada a través de una válvula de volante (V-722), y la adición del polvillo se realiza manualmente a través de una paleta transversal

en la línea, que regula por gravedad el suministro de polvillo a través del bajante; ambas admisiones son manejadas por el operador de la sección (figura 2.2). El producto que está siendo mezclado, luego de rebosar por exceso la altura de las dos bridas de salida que posee la mezcladora, fluye de forma simultánea por dos canales o canaletas (figuras 2.3 y 2.4) que llevan el producto hasta verterlo sobre las correas transportadoras llamadas cintas de cristalización. La canaleta N° 1 (C1), conduce el producto hasta la cinta N°1: (X-10A), la cual está ubicada en el nivel 3 de la planta; la conducción del mismo hasta la cinta N° 2 (X-10B), ubicada físicamente en el nivel 2, se realiza con la ayuda de tres equipos ó dispositivos: canaleta N° 2 (C2), embudo y canaleta N° 3 (C3) (figuras 2.5 y 2.6) respectivamente, de acuerdo al recorrido que realiza el sulfato de aluminio hasta terminar sobre dicha cinta; las correas transportadoras siguen la misma dirección y sentido de movimiento, sobre ellas se cristaliza el sulfato hasta llegar a las pretrituradoras neumáticas A-3A y A-3B donde es cortado en trozos.

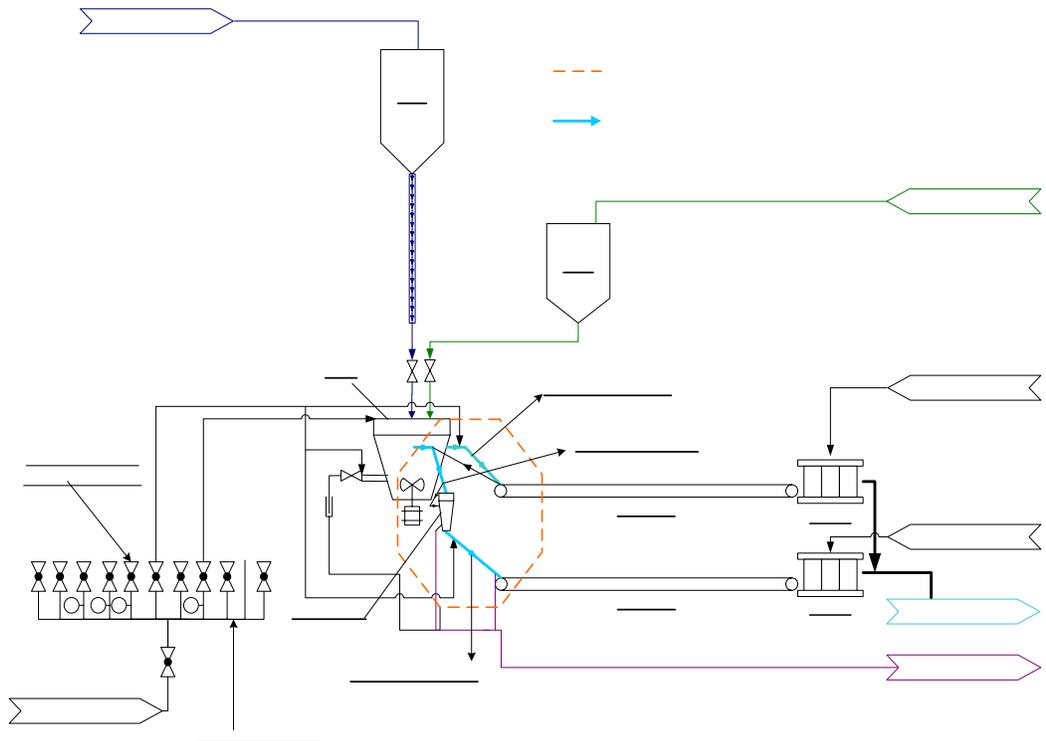


Figura N° 2.1 Sistema en estudio A: sección de “Mezcla, Vacío y Cristalización”

La mezcladora, el embudo y las canaletas son algunos de los equipos que poseen cámaras de calentamiento, y para tal fin, se sirven de la línea de vapor existente en la planta; ésta proviene de la generación de vapor de las calderas SG-1 y SG-2, y, de acuerdo al diseño original de la planta, cada una es capaz de generar vapor suficiente para utilizarse en el proceso de producción del sulfato de aluminio. Es por ello que deben diferenciarse, las líneas que componen al volumen de control, que son la línea de vapor y la línea de sulfato de aluminio fundido tal como se aprecia en el diagrama de la figura 2.1. Este calentamiento fue diseñado con el fin de mantener la temperatura del producto dentro del equipo o a su paso por ellos y poder lograr a través de la transferencia de calor entre el vapor y el producto, una temperatura constante del mismo.

Desde hace unos años, la empresa ha venido presentado problemas en la sección de “Vacío, mezcla y cristalización”, que tienen su origen principalmente, en la cristalización prematura del producto que fluye sobre las canaletas y el embudo, el sulfato de aluminio fundido solidifica en las paredes de los mismos (figuras 2.3, 2.4, 2.5 y 2.6) y deriva en problemas de mantenimiento. Es ya conocido que los reactantes del sulfato de aluminio son: la alúmina, material altamente abrasivo y el ácido sulfúrico, ácido altamente corrosivo; evidentemente, esto presupone del sulfato de aluminio que sea un fluido que ataque los metales, y el agrietamiento en las paredes de los equipos, son prueba de ello. Estas fisuras se convierten además en fugas de vapor. Sumado a ello, existen problemas de salpique y desborde del producto, tanto sobre las canaletas y el embudo como en las cintas de cristalización. Todo lo anterior se traduce en:

- Paradas no programadas en el proceso productivo con el fin de reparar los daños presentes sobre las paredes de los equipos y de limpiar las canaletas, embudo y zonas aledañas (figura 2.7)
- Pérdida de producto por efecto de la salpicadura y desborde.
- Corrosión y atascamiento de los rodillos de la cinta transportadora cercanos a la salida del sulfato de aluminio de las canaletas. (figura 2.8)

- Riesgos en el personal que labora en ésta zona ya que están expuestos a quemaduras por las salpique del magma, el cuál está a una temperatura superior a 150°C.

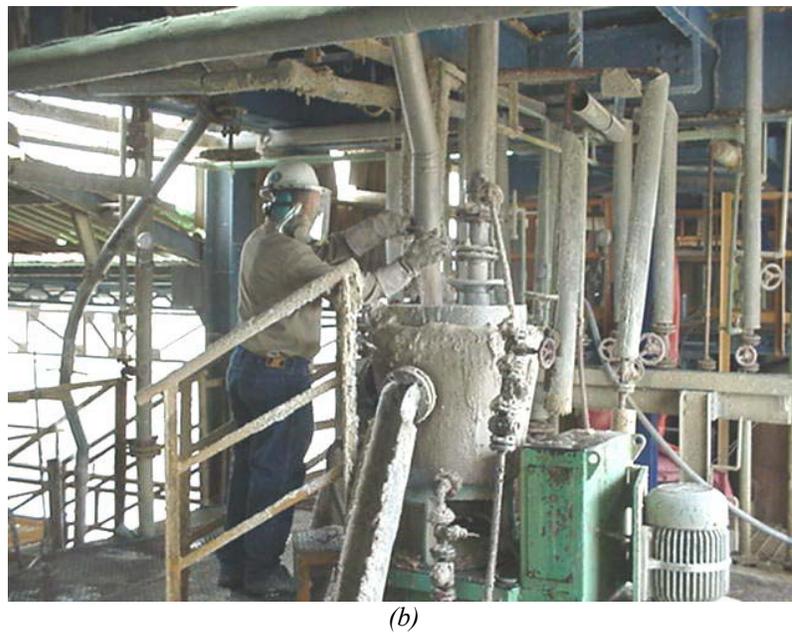
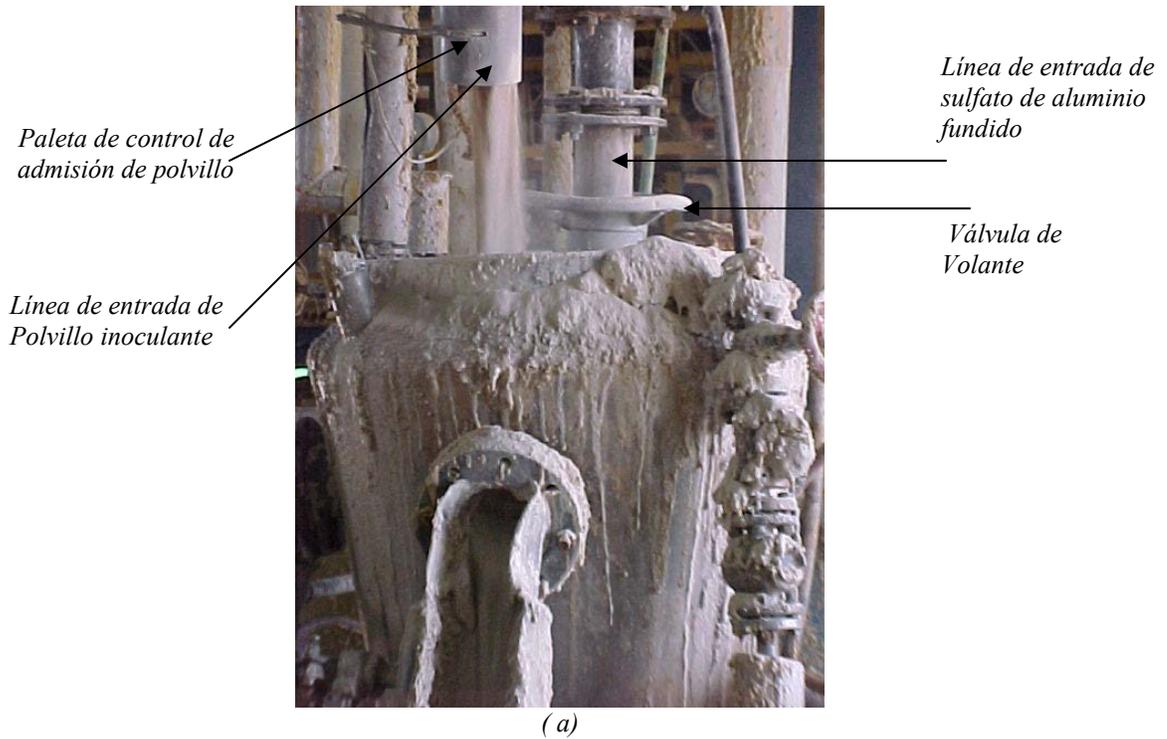


Figura N° 2.2 Mezcladora. (a) Entrada de sulfato y polvillo a la mezcladora. (b) Mezcladora en operación

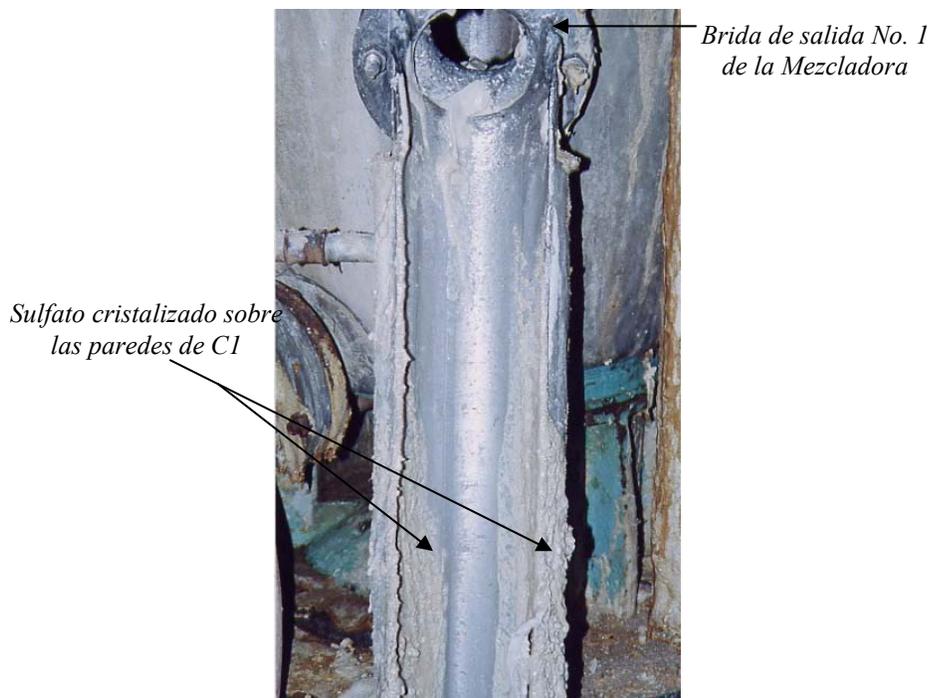


Figura N° 2.3 Canaleta N°1 (C1.)

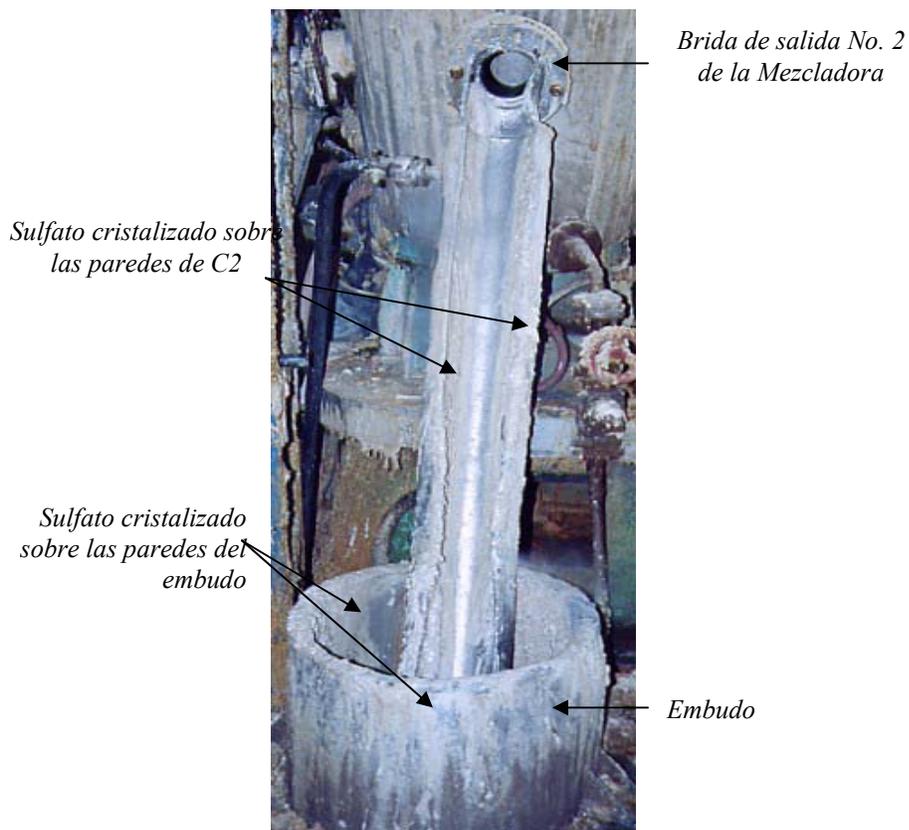


Figura N° 2.4 Canaleta N°2 (C2) y Embudo

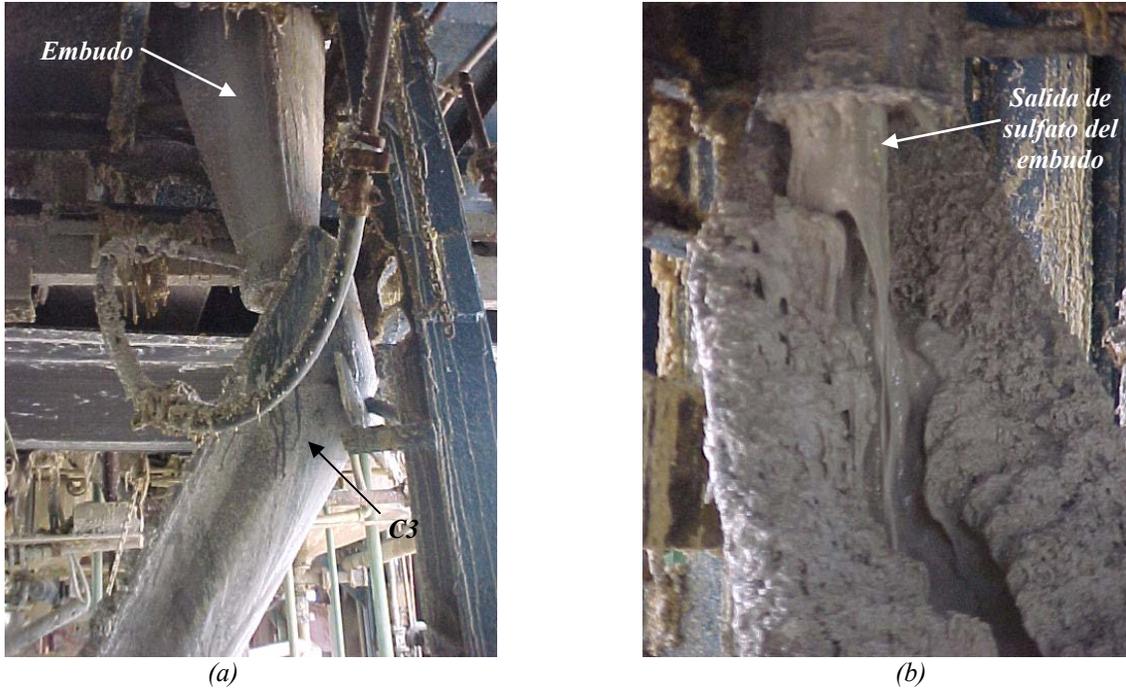


Figura N° 2.5 Canaleta N° 3 (C3) y Embudo. (a) Vista lateral de los dos equipos. (b) Detalle de salida del sulfato del embudo.

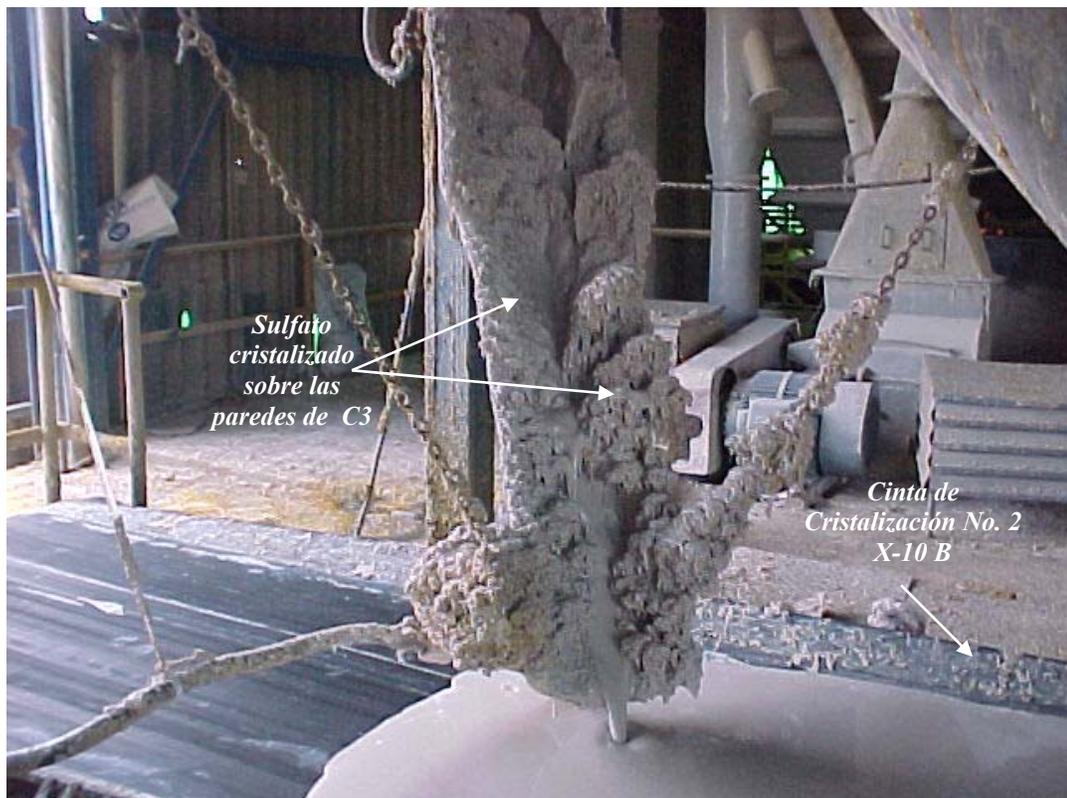


Figura N° 2.6 Vista Frontal de la Canaleta N°3

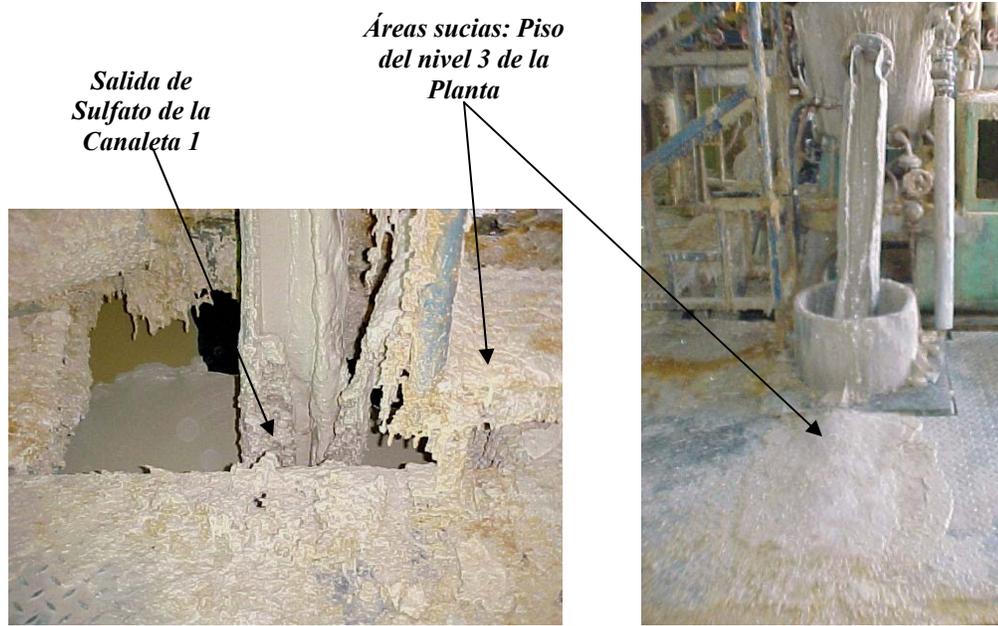


Figura N° 2.7 Zonas Sucias en el área de Mezcla y Cristalización.



Figura N° 2.8 Producto cristalizado sobre rodillos.

Es necesario destacar, que en la línea de sulfato sólido se producen 3 tipos de sulfato: SATA, SALH y SATA-P y en el proceso de producción de cada uno se presentan las situaciones ya descritas. Sin embargo la situación empeora para el caso de la producción de SATA-P; esto último de acuerdo a la información suministrada por los encargados del proceso en FERRALCA.

Problemática en la sección “Enfriamiento”:

Sistema en estudio reunido bajo el volumen de control “B: una vez que se ha solidificado el sulfato sobre las cintas de cristalización es partido en trozos por las pretrituradoras (A3-A y A3-B) que se encuentran al final de cada cinta (figura 2.10) y pasan al sistema de enfriamiento que está formado por tres cintas de enfriamiento y 6 ductos de ventilación (figura 2.9). Los trozos de sulfato provenientes de las dos cintas de cristalización caen en una tolva que los lleva a la cinta de enfriamiento 1 (X-11A), una vez sobre la cinta pasa a través de los difusores superiores de los 6 ductos de ventilación, cada ducto tiene dos difusores en cada nivel. Al llegar al final de la cinta por medio de otra tolva pasa a la cinta de enfriamiento 2 (X-11B) (figura 2.11a), hace el recorrido en sentido contrario pasando por los difusores intermedios de cada ducto, al final de la cinta otra tolva lleva el sulfato a la última cinta de enfriamiento (X-11C) pasando por los difusores inferiores de cada ducto. Por último el sulfato pasa de la cinta de enfriamiento 3 (X-11C) a una cinta inclinada (X-12) que lo lleva a los molinos trituradores gruesos (figura 2.12) donde es granulado y después de un proceso de selección obtiene su tamaño final.

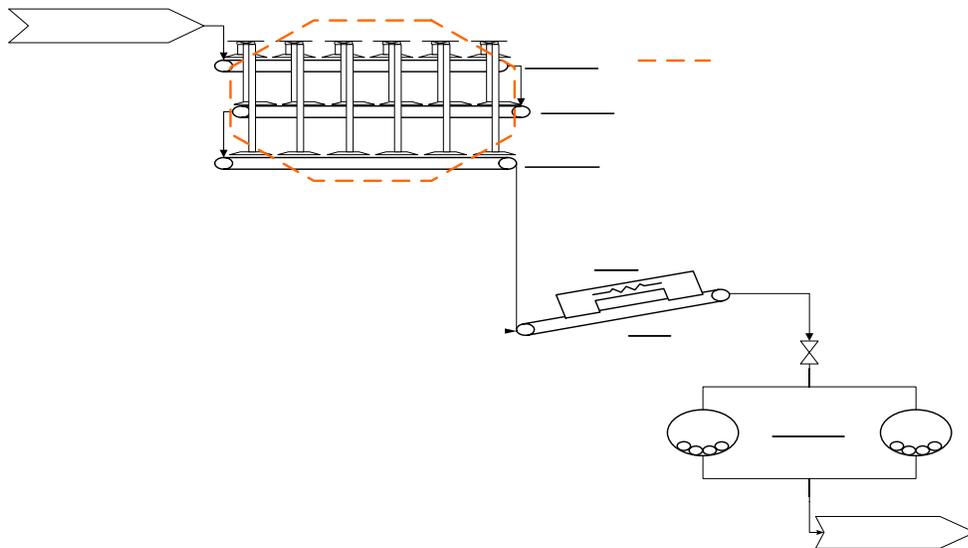


Figura N° 2.9 Sistema en estudio B: Sección de “Enfriamiento”.

Cada sistema de ventilación está compuesto por un ventilador situado en la parte superior del ducto el cual toma aire del medio ambiente a través de unas cúpulas tipo gorros chinos (figura 2.13) y lo hace circular a través de la ducteria, el aire sale por los 6 difusores (2 por cada cinta de enfriamiento) enfriando los trozos de sulfato de aluminio que se encuentran sobre las cintas.

La problemática presente relacionada con el área de enfriamiento es la obstrucción regular de los molinos trituradores gruesos (A3-A y A3-B) y una de las causas es la alta temperatura a la que están llegando los trozos de sulfato a dichos molinos. El sulfato de aluminio tiene en su composición agua de cristalización, el sulfato puede perder agua de cristalización cuando está siendo triturado por las paletas de los molinos dependiendo de la temperatura a la que éste se encuentre y el calor generado por el roce del sulfato con las paletas. La pérdida del agua de cristalización en el sulfato hace que éste se comporte como una goma que se pega en las paletas del molino produciendo la obstrucción del mismo y en ocasiones la ruptura de dichas paletas o martillos. Mientras mayor es la temperatura a la que entra el sulfato a los molinos mayor es la pérdida del agua de cristalización del mismo y por consiguiente es más frecuente que ocurra el problema antes mencionado.

Lo antes indicado ha hecho que FERRALCA requiera que se realicen mejoras en el proceso de enfriamiento que garanticen que los trozos de sulfato de aluminio lleguen a los molinos a la temperatura más baja posible (35 – 40°C), para disminuir las obstrucciones de los molinos trituradores, alargar la vida útil de los martillos del molino y evitar las paradas de planta no programadas.



Figura N° 2.10 Pretritadora



(a)



(b)

Figura N° 2.11 Cintas de enfriamiento. (a) Cinta de enfriamiento X-11B (b) Cinta de enfriamiento X-11C



Figura N° 2.12 Molinos gruesos A3-A y A3-B

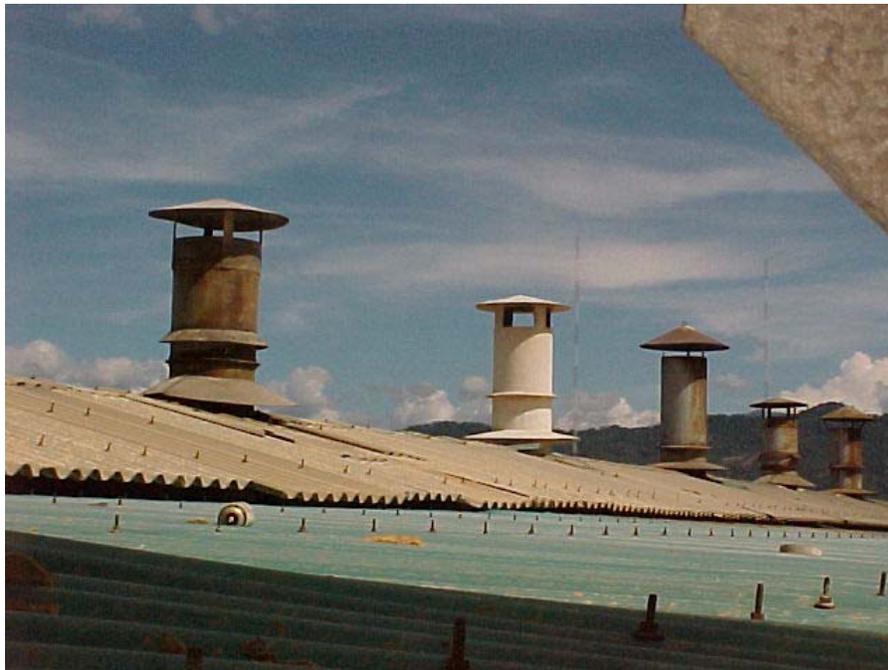


Figura N° 2.13 Cúpulas tipo gorros chinos

CAPÍTULO III

PLANIFICACIÓN METODOLÓGICA

3.1 Planificación Inicial:

Inicialmente, se programaron una serie de actividades con el fin de seguirlas como metodología para realizar el Trabajo Especial de Grado las cuales se presentan a continuación:

1. Revisión bibliográfica de conceptos teóricos de los procesos de transferencia de calor presente en la secciones de “Vacío, Mezcla y Cristalización” y “Enfriamiento”.
2. Identificar las propiedades del sulfato de aluminio.
3. Reconocimiento y descripción del proceso del sulfato de aluminio en la sección de “Vacío, Mezcla y Cristalización”, y del proceso de enfriamiento del mismo.

4. Inspección y determinación de las causas de los problemas que se presentan en la secciones de “Vacío, Mezcla y Cristalización” y “Enfriamiento”, de dosificación del material, en las cintas de cristalización y en las cintas de enfriamiento.
5. Revisión de las soluciones temporales aplicadas por FERRALCA, para minimizar la problemática existente.
6. Efectuar mediciones de las propiedades termodinámicas de los fluidos que intervienen en el intercambio de calor en las canaletas (sulfato de aluminio fundido y vapor de agua), y de las dimensiones de los elementos más importantes que conforman los sistemas en estudio.
7. Presentar soluciones referidas al sistema de conducción actual, del sulfato de aluminio fundido para evitar las salpicaduras y el desbordamiento del material.
8. Rediseñar el mecanismo de intercambio de calor en las canaletas para evitar la cristalización prematura del sulfato de aluminio.
9. Realizar un estudio que permita optimizar el enfriamiento del sistema el sulfato de aluminio que se encuentra en las cintas transportadoras.
10. Analizar y establecer el costo y la factibilidad económica que resulte de los estudios y análisis anteriores.
11. Redacción del informe final.

3.2 **Planificación definitiva:**

“In situ” se acordó, convenientemente, reorganizar éstas actividades, y planificar una nueva forma de trabajo que se adaptara a las condiciones reales de disponibilidad en cuanto a tiempo, producción de la empresa y ubicación geográfica relativa a la planta, sin perder de vista por supuesto, los alcances y objetivos del Trabajo Especial de Grado; seguidamente se presenta la planificación metodológica que en definitiva se aplicó para desarrollar el trabajo.

1. Desarrollar una descripción general de la empresa con el fin de conocer sus productos y proceso productivo:
 - a. Línea de producción de sulfato de aluminio sólido:
 - Sulfato de aluminio Tratamiento de Agua: SATA
 - Sulfato de aluminio libre de hierro: SALH
 - Sulfato de aluminio tratamiento de agua a partir de bauxita nacional: SATA-P
 - b. Línea de producción sulfato de aluminio líquido:
 - Sulfato de aluminio Tratamiento de Agua: SATA-L
 - Sulfato de aluminio libre de hierro: SALH
 - Sulfato de aluminio tratamiento de agua a partir de bauxita nacional: SATA-P
2. Localizar la problemática en el proceso de producción
 - a. Línea de sólido: Describir detalladamente el proceso
 - Conocer las especificaciones de los productos
 - b. Ubicar físicamente en planta las secciones donde ocurren los problemas
3. Delimitar el problema
 - a. Establecer los sistemas de estudio bajo fronteras teóricas (superficies de control).

- Sistema A, relativo al problema en la Sección de “Vacío, Mezcla y Cristalización”.
 - Sistema B, relativo al problema en la sección de “Enfriamiento”.
 - b. Determinar y establecer la incidencia de la problemática en el proceso productivo
 - Recopilar información en planta que fundamente causas y consecuencias de los problemas en estudio.
4. Describir detalladamente los sistemas en estudio: “Sistema A” y “Sistema B”
- a. Conocer y describir los equipos y dispositivos que los conforman
 - b. Identificar las corrientes que intervienen en ellos:
 - Conocer las condiciones ambientales, predominantes.
 - Sistema A: vapor y sulfato de aluminio fundido.
 - Elaborar los diagramas de flujo éstas sustancias
 - Sistema B: aire y sulfato de aluminio solidificado.
 - Elaborar los diagramas de flujo para éstas sustancias.
5. Determinar las condiciones reales de operación en las secciones de Vacío, Mezcla, Cristalización y Enfriamiento del Sulfato de aluminio sólido.
- a. Identificar las condiciones de operación de acuerdo al diseño original de planta.
 - b. Realizar una inspección para detectar las fallas, daños y condiciones de operación de los equipos que conforman los sistemas A y B.
 - c. Comparar las condiciones diseño y las condiciones reales encontradas.
6. Evaluar el mecanismo de calentamiento del Sulfato de aluminio fundido:.
- a. Determinar las condiciones del sistema de calentamiento, realizar los cálculos pertinentes y emitir los resultados; para lo cual se evalúan los siguientes aspectos:
 - Suministro energético del vapor medio de calentamiento en dicho proceso

- Calor perdido en el proceso de calentamiento
 - Variación de la temperatura en el sulfato de aluminio fundido por efecto del calor perdido.
 - b. Identificar los procesos termodinámicos de Transferencia de Calor presentes en el calentamiento del Sulfato de aluminio fundido.
 - c. Determinar las propiedades del vapor
 - Identificar y conocer la línea y servicios del vapor
 - Definir las condiciones del flujo de vapor de acuerdo al diagrama planteado.
 - Reconstruir el condensador para efectuar las mediciones de: Presión, Temperatura, y flujo másico.
 - d. Determinar las propiedades del Sulfato de aluminio fundido.
 - Identificar la línea de Sulfato de aluminio fundido
 - Definir las condiciones de flujo de acuerdo al diagrama planteado y conocer el comportamiento de este fluido no típico.
 - Realizar las mediciones de parámetros necesarios: Temperatura, flujo másico
 - Buscar información bibliográfica respecto a los parámetros que no fueron posibles medir.
 - e. Efectuar las mediciones necesarias para la evaluación del sistema de calentamiento:
 - Mediciones de temperatura en las paredes de los equipos del Sistema A: Canaletas, Embudo
 - Mediciones de velocidad de las cintas de cristalización: (bandas transportadoras)
7. Evaluar el mecanismo de enfriamiento del sulfato de aluminio solidificado
- a. Determinar los procesos de transferencia de calor que intervienen en el enfriamiento del sulfato de aluminio solidificado (conducción, convección, radiación).

- b. Establecer las propiedades que intervienen en el proceso de transferencia de calor que ocurre entre el aire y el sulfato de aluminio solidificado.
 - a. Propiedades que requieren medición: temperatura y velocidad del aire, temperatura del sulfato de aluminio, área de transferencia de calor.
 - b. Propiedades características de los elementos que no fueron medidas: densidad, número de Prandtl y viscosidad del aire, conductividad térmica y calor específico.
 - c. Realizar la medición de las propiedades del aire que circula por los ductos de ventilación (temperatura y velocidad).
 - a. Identificar los instrumentos y métodos de medición.
 - b. Determinar el procedimiento a seguir para realizar la medición.
 - d. Realizar la medición de la temperatura del sulfato de aluminio solidificado.
 - a. Identificar los instrumentos de medición.
 - b. Determinar el procedimiento a seguir para realizar la medición.
 - e. Realizar los cálculos necesarios en la evaluación y emitir los resultados de la misma.
8. Detectar y determinar las causas que originan los problemas estudiados.
- a. Analizar los resultados obtenidos en las evaluaciones de los procesos de transferencia de calor de los sistemas A y B.
 - a. Realizar una “Tormenta de Ideas” de las posibles causas de los problemas que presentan ambos sistemas, para luego ser analizadas y determinar su influencia en la problemática existente.

- b. Identificar las propiedades tanto del aire como del sulfato presentes en la evaluación (temperatura, velocidad, flujo másico, presión, etc.) que puedan variarse para obtener mejoras en los procesos de transferencia de calor.
9. Revisar las soluciones aplicadas por FERRRALCA para la solución temporal de la problemática presente.
 10. Elaborar propuestas que permitan mejoras a la problemática presente en ambos sistemas a partir del análisis de las evaluaciones y tomando en cuenta las soluciones que ha aplicado FERRRALCA.
 11. Realizar un breve estudio de factibilidad económica referente a las soluciones planteadas.

CAPÍTULO IV

FUNDAMENTO TEÓRICO

Para la realización del presente Trabajo de Grado fue necesario conocer y aplicar conceptos y basamentos teóricos relacionados con el proceso de producción y usos del sulfato de aluminio, el manejo del material en forma fundida y el proceso enfriamiento del sulfato de aluminio sólido.

4.1 Aplicaciones del sulfato de aluminio:

Con el objetivo de familiarizarse con el producto, es conveniente un cierto conocimiento relacionado con la terminología utilizada en las aplicaciones más importantes del sulfato de aluminio.

“La mayor aplicación del sulfato de aluminio es el *tratamiento de aguas* ya sea para el consumo humano o para mejorar la calidad de los efluentes industriales o

cloacales, y puede subdividirse en cuatro etapas: clarificación, desinfección, acondicionamiento químico y acondicionamiento organoléptico; se pretende explicar brevemente la etapa de clarificación, la cual consiste en la eliminación de partículas finas. Se subdivide en coagulación, floculación y sedimentación y/o filtración. El sulfato de aluminio actúa como coagulante-floculante.

La Coagulación y Floculación son dos procesos dentro de la etapa de clarificación del agua. Ambos procesos se pueden resumir como una etapa en la cual las partículas se aglutinan en pequeñas masas llamadas flocs tal que su peso específico supere a la del agua y puedan precipitar. La coagulación se refiere al proceso de desestabilización de las partículas suspendidas de modo que se reduzcan las fuerzas de separación entre ellas. La floculación tiene relación con los fenómenos de transporte dentro del líquido para que las partículas hagan contacto.” [a]

“Por otra parte, el sulfato de aluminio también entra en el proceso del encolado en la *fabricación del papel*. Este proceso tiene como funciones:

- 1.-Prevenir el extendimiento de la tinta de escribir sobre el papel.
- 2.-Hacer el papel más resistente a la penetración de la humedad
- 3.-Dar solidez a la hoja y endurecerla
- 4.-Aumentar la retención de fibras. La sustancia repelente al agua que se usa para los fines del encolado es la brea y el sulfato de aluminio tiene como función coagular esta brea y precipitarla sobre las fibras de Celulosa.

También, las sales metálicas, especialmente la de aluminio actúan como *mordiente* en la industria ó tecnología de colorantes; término utilizado para designar una sustancia que tiene la propiedad de fijar las moléculas del colorante a la fibra textil.

Otras de las aplicaciones es su uso en la manufactura de lacas, resinato de aluminio, en telas incombustibles y permeables, clasificación de aceites y grasas,

deodorización y decoloración del petróleo, antiespumante, pesticidas y manufactura de sales de aluminio.” [e]

En los sistemas en estudio, que se describen bajo los volúmenes de control “A” y “B” en el capítulo anterior, coexisten procesos termodinámicos, físicos, químicos y ambientales que requieren de unas bases teóricas asociadas con transferencia de calor, manejo de fluidos y con el conocimiento de otros conceptos desde el punto de vista del material mismo como lo son sus propiedades físicas y químicas más importantes, y el proceso de cristalización de una sustancia.

4.2 Propiedades del sulfato de aluminio:

Las propiedades físicas y químicas del sulfato de aluminio, no se encuentran en literaturas convencionales; sin embargo, se contó con otras fuentes de información como estudios publicados, información electrónica, etc.

En el año de 1998, en un estudio experimental realizado por el Departamento de Ingeniería Química, en la Universidad Técnica del Medio Este, Ankara, Turquía se midieron algunas propiedades importantes del $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ fundido (Sulfato de aluminio hidratado con dieciocho moléculas de agua), arrojando resultados que luego fueron graficados y que se convirtieron en la principal referencia de la identificación y conocimiento de las propiedades más importantes del sulfato de aluminio fundido. En el Anexo A, se presentan algunas de ellas graficadas, producto de éste estudio.

Debido a que la presentación comercial del producto hidratado, contiene por lo general, entre 16 y 18 moléculas de agua, y el producto de FERRALCA contiene 14 moléculas, fue complicado conseguir exactamente las propiedades del $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$; sin embargo, como la naturaleza de los productos es semejante, y, basado en las concentraciones de sus componentes principales: $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, H_2O y $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, fue posible predecir con bastante certeza, algunos valores como: temperatura

de cristalización, densidad, viscosidad, y otros. La tabla B.1 del Anexo B, reporta los valores correspondientes a estas propiedades para el sulfato de aluminio sólido. De la literatura señalada bajo la referencia [7], se obtuvieron algunos valores importantes como: calor específico y estructura cristalina.

4.3 Proceso de Cristalización:

“Los materiales se presentan en cuatro fases: sólida, líquida, gaseosa y de plasma. En el crecimiento de cristales sólo se consideran las tres primeras. En determinadas condiciones externas algunas de las fases de una sustancia pueden encontrarse en estado de equilibrio. Se denomina *estado de equilibrio* al estado alcanzado entre dos o más fases en condiciones externas constantes de temperatura, presión, concentración de los componentes en las fases, etc. Este estado de equilibrio, por otro lado, se perderá si cambiamos la temperatura del sistema de dos fases. Por ejemplo, si se eleva la temperatura del sistema de dos fases en equilibrio: cristal \leftrightarrow solución, el equilibrio se desplaza en la dirección de la flecha que apunta hacia la derecha, lo que corresponde a la disolución del cristal. Por el contrario, si se baja la temperatura, entonces parte de la fase líquida se transforma en sólida. A este último proceso se le llama *cristalización*.

En términos generales, si consideramos las posibles transformaciones entre dos fases, se tienen las siguientes posibilidades:

- Fase gaseosa → Fase líquida ----- Condensación
- Fase líquida → Fase gaseosa ----- Evaporación
- Fase sólida → Fase gaseosa ----- Sublimación
- Fase líquida → Fase sólida ----- Cristalización
- Fase sólida → Fase líquida ----- Fusión o disolución

En el último caso la transición de fase recibe el nombre de fusión o disolución dependiendo de cómo se inició el proceso. Si inicialmente se tiene un cristal fundido y la temperatura de equilibrio corresponde al punto de fusión, a esta transición de fase se le va llamar *fusión*. Si el cristal se encuentra en equilibrio con la fase líquida desde un principio, entonces la transición del cristal de la fase líquida a la sólida se lleva a cabo por *disolución* (para este caso la temperatura de disolución se encuentra por abajo de su punto de fusión).” [b]

“El paso del estado líquido a sólido denominado *solidificación*, puede describirse mediante un proceso de nucleación y posteriormente un crecimiento de los núcleos estables formados. La *nucleación* ocurre cuando se forma una porción sólida minúscula y estable dentro del líquido. El *crecimiento* del núcleo ocurre cuando los átomos del líquido se van uniendo al sólido, creciendo en todas las direcciones hasta que se acabe el líquido. Durante la solidificación, el arreglo atómico cambia de un orden de corto alcance a un orden de largo alcance, es decir a una estructura cristalina: *cristalización*.

La nucleación puede ser *homogénea*, que ocurre cuando el subenfriamiento es lo suficiente como para causar la formación de un núcleo estable en el seno mismo del líquido, ó *heterogénea*, la cual ocurre la mayoría de las veces, ya que las impurezas o las paredes del recipiente que contienen al líquido, proveen una superficie sobre la cual puede formarse el sólido y sólo necesitan agruparse unos cuantos átomos para producir una partícula sólida estable.

Introduciendo partículas extrañas en el líquido, se disponen de núcleos para una nucleación heterogénea. Mediante la *inoculación*, que es la adición controlada de elementos o partículas al líquido, se consigue incrementar la nucleación heterogénea y por lo tanto el número de granos en el líquido

La solidificación ocurre lentamente a la temperatura de equilibrio, hasta el punto de que para que pueda verificarse en un tiempo medible hace falta un cierto grado de subenfriamiento. Este subenfriamiento es un requerimiento energético para poder

establecer la separación entre ambos estados (sólido-líquido). Durante el cambio de fase, ésta energía requerida, se emplea en variar la energía potencial que depende de la distancia interatómica entre las moléculas: en los líquidos hay mayor separación por lo que es mayor la energía potencial que en los sólidos, aunque ambos coexistan como fase en equilibrio. La energía cinética se mantiene porque la temperatura en el equilibrio es constante. Cuando la temperatura del material disminuye lo suficiente por debajo del punto de solidificación, se forman espontáneamente los núcleos estables.” [1]

“En cualquier material, los átomos poseen energía cinética y potencial. La primera, es función de la velocidad y depende solamente de la temperatura. Al crecer esta, aumenta la actividad de los átomos, y por consiguiente, su energía cinética. A medida que disminuye la temperatura del líquido, los átomos pierden libertad de movimiento y se van formando agrupaciones estables y es cuando comienza la solidificación. En la siguiente figura se muestra, la curva de enfriamiento para un metal puro. La presencia del subenfriamiento, explicada anteriormente, corresponde a un enfriamiento real (Curva ABCDE) y el enfriamiento ideal corresponde a la curva ABDE.” [3]

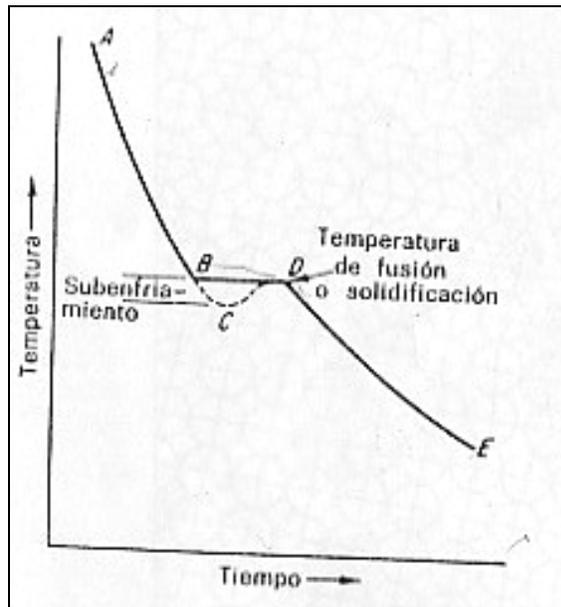


Figura N° 4.1 Curva de enfriamiento de un metal puro

4.4 Fundamento asociado al proceso de calentamiento

En el proceso productivo del sulfato de aluminio sólido, hay etapas de calentamiento del producto fundido. En la mayoría de los casos, este calentamiento se realiza con el fin de mantener la temperatura del producto constante sobre ó dentro de los equipos que posean cámaras de calentamiento ó “chaquetas” que se sirven de la línea de vapor para que se efectúe la transferencia de calor entre las corrientes: vapor – producto fundido.

“La principal aplicación de las ecuaciones del volumen de control (1ra. Ley de la Termodinámica para un Volumen de control), es obtener un modelo analítico para la operación a largo plazo de dispositivos donde interviene un fluido de flujo estable y en régimen permanente, y cuyo estudio merezca conocer sus propiedades a la entrada y salida de los mismos.

Cuando sólo hay una corriente de flujo que entra y una que sale del volumen de control, la Primera Ley se expresa como:

$$q_{v.c.} + \dot{m} \times \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + g \times Z_e \right) = \dot{m} \times \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + g \times Z_s \right) + w_{v.c.};$$

(Ecuación 4.1), donde:

q = Flujo de calor [W]

w = Trabajo realizado sobre el sistema [W]

\dot{m} = flujo másico [kg/s]

V = Velocidad [m/s]

g = aceleración de la gravedad

Z = altura [m]

Subíndices:

e = entrada

s = salida” [16]

➤ **Conducción:** “Es el proceso de propagación de energía en medio sólido, líquido o gaseoso, mediante comunicación molecular directa o entre cuerpos sujetos a una diferencia de temperatura. Al existir un gradiente de temperatura dentro del medio, la segunda ley de la termodinámica establece que la transferencia de calor se lleva a cabo desde la región de mayor temperatura hacia la de menor temperatura, para mis cálculos no se encontró este tipo de transferencia de calor, por la configuración del sistema a generar calor.

En estas circunstancias se dice que el flujo de calor es proporcional a la diferencia de temperaturas entre las superficies, es decir:

$$q_{\text{cond}} = \frac{k \times A}{e} \times (T_i - T_{\text{ext}}) : \text{Ley de Fourier de conducción de calor.}$$

(Ecuación 4.2); donde:

q_{cond} = flujo de calor por conducción [W].

k = Conductividad térmica del material [w/m K].

A = área de la pared, normal al flujo de calor [m²].

e = espesor de la pared [m].

T_i = temperatura interna de la superficie [K].

T_{ext} = temperatura externa de la superficie [K]

➤ **Convección:** Es el proceso de transporte de energía desde una superficie como consecuencia del movimiento de un fluido (líquido o gas). El gradiente de temperatura en el fluido depende de las características y propiedades de éste. Para expresar el efecto global, se utiliza la ley de Newton del enfriamiento

$$q_{\text{conv}} = h \times A \times (T_{\text{sup}} - T_{\infty}) \text{ Ley de Newton de enfriamiento. (Ecuación 4.3); donde:}$$

q_{conv} = flujo de calor transferido por convección [W].

h = Coeficiente de transferencia de calor [W/m² K]

A = Área de la superficie [m²]

T_s = Temperatura superficie [K].

T_{∞} = Temperatura del medio ambiente [K]

Para algunos sistemas puede hacerse un cálculo analítico de “h” cuando el valor no esté tabulado a través de correlaciones empíricas. El fenómeno de transferencia de calor por convección se clasifica como convección forzada y convección libre o natural. En el primer caso el fluido se hace pasar sobre el sistema mediante la acción de algún agente externo, como un ventilador, una bomba o agentes meteorológicos. Por otra parte, el movimiento del fluido resulta en el segundo caso como consecuencia de los gradientes de densidades que éste experimenta, al estar en contacto con una superficie a mayor temperatura y en presencia de un campo gravitacional (o centrífugo).

➤ **Radiación:** Es la propiedad que poseen los cuerpos de emitir o propagar radiación en forma de energía electromagnética en diferentes longitudes de onda consecuencia de su temperatura y características superficiales. Un emisor ideal o cuerpo negro es aquel que permite energía radiante de su superficie a razón proporcional a su temperatura absoluta elevada a la cuarta potencia, es decir:

$$q_{\text{rad}} = \varepsilon \times A \times \sigma \times (T_{\text{sup}}^4 - T_{\text{alr}}^4) \text{ Ecuación de Stefan- Boltzmann. (Ecuación 4.4); donde:}$$

q_{rad} = flujo de calor transferido por radiación [W].

ε = emisividad térmica del material

A = Área cilindro [m²]

σ = constante de proporcionalidad (5,67x10⁻⁸ W/m²xk⁴)

T_s = temperatura en la superficie del material [K]

T_{alr} = temperatura de los alrededores [K].”[8]

4.4.1 Flujo en canales abiertos:

“En conductos ó canales abiertos, de sección transversal constante, se siguen las siguientes relaciones:

$$R_h = \frac{A_m}{P_m} \text{ (Ecuación 4.5); donde}$$

R_h = Radio Hidráulico

P_m = Perímetro mojado

A_m = Área mojada

Los valores de R_h , A_m y P_m son los utilizados en los cálculos de flujo en canales abiertos.” [15]

4.5 Fundamento asociado al Proceso de Enfriamiento:

El proceso de enfriamiento del sulfato de aluminio se da por la transferencia de calor que ocurre entre el aire proveniente de los ventiladores y los trozos de sulfato que se encuentran sobre las cintas de enfriamiento, este tipo de transferencia de calor se conoce como convección forzada.

“La transmisión por convección se da en líquidos y gases. Para el caso que nos interesa, en el aire. Se produce por ser menos denso el aire caliente que el frío y, por lo tanto, más ligero. Por ello, el aire caliente tiende a subir, siendo reemplazado por aire frío en las zonas inferiores.

El mecanismo anterior se denomina convección natural, y es válido para evacuar pequeñas cantidades de calor. Para mejorar el rendimiento se suele utilizar la convección forzada, que consiste en acelerar el movimiento natural del aire por medio de un ventilador. Para que el ventilador no se oponga al mecanismo natural de convección, es importante que impulse el aire caliente de abajo hacia arriba, o el aire frío desde arriba hacia abajo.

La teoría matemática de la convección del calor es compleja, pues el calor transferido en la interfase de contacto entre un sólido y un fluido a temperaturas distintas depende de muchas circunstancias entre las que se destacan:

- Que la superficie de contacto, sea plana o curva, horizontal o vertical
- Que el fluido sea líquido o gas.
- La densidad, viscosidad, calor específico, conductividad térmica, vaporización o condensación del fluido, etc.”[c]

“La ventilación puede definirse como la técnica de sustituir el aire ambiente interior de un recinto, el cual se considera indeseable por falta de temperatura adecuada, pureza o humedad, por otro que aporta una mejora.

Entre las funciones básicas para las máquinas, instalaciones o procesos industriales, la ventilación permite controlar el calor, la transportación neumática de productos, la toxicidad del aire o el riesgo potencial de explosión” [f].

4.5.1 Ventilación Industrial

“La ventilación industrial consiste en la renovación continua y periódica del aire en el interior de locales habitados para mantenerlos en condiciones de salubridad o aptos para determinados procesos. La ventilación puede ser natural o forzada. En la ventilación natural el aire viciado se sustituye con aire puro mediante la apertura de puertas y ventanas, por efectos de la permeabilidad de las paredes o del nivel, por ejemplo en las minas, entre los accesos a las diversas galerías; la ventilación artificial se consigue por medios mecánicos o ventiladores y puede efectuarse introduciendo aire en los locales (ventilación por inyección o impulsión) o aspirando el aire viciado (ventilación por extracción), o bien por un sistema mixto.

4.5.2 Tipos Básicos de ventilación

a) Ventilación Natural: la ventilación natural o por gravedad tiene una aplicación limitada ya que su efectividad depende de los vientos que prevalezcan en el

exterior del edificio y de la temperatura (efecto de chimenea) del interior del mismo. Este tipo de ventilación sólo debe considerarse para lugares donde haya viento predominante confiable y donde el personal, el proceso de manufactura o el producto almacenado puedan tolerar temperaturas y condiciones de humedad superiores o inferiores a los valores de diseño del espacio por períodos prolongados.

b) Ventilación mecánica: los sistemas de ventilación mecánica van desde el tipo más sencillo (que consiste en ventiladores de hélice a través de la pared con ventiladores de extracción del tipo techo y controles manuales) hasta sistemas complejos que tienen ventiladores múltiples de alimentación y extracción, ductos de distribución, difusores y/o rejillas, filtros, aislamiento de ductos y controles automáticos.

En general, se necesita la ventilación mecánica:

- Cuando las fuerzas naturales no son suficientes para suministrar de manera continua las cantidades de ventilación y de extracción de aire previstas en el diseño.
- Cuando hay necesidades de presurizar un área con una cantidad de aire de ventilación (del exterior) sustancialmente mayor que la de extracción o de retorno del espacio.
- Cuando un proceso necesita una cantidad específica de abastecimiento o de extracción de aire.

Casi sin excepción, cualquier sistema de ventilación requiere un ventilador para la circulación del aire. Para ventilación de las salas de trabajo y reuniones, así como de minas, túneles y barcos; para la dilución de humos, aire con alto contenido de polvo, etc., se necesita grandes caudales de aire; pero con frecuencia las presiones son relativamente pequeñas. Por tanto, las máquinas para este tipo de servicio muchas veces se calculan como ventiladores (máquinas hidráulicas) sin tener en cuenta la compresibilidad del gas y por tanto sin tener en cuenta la variación de densidad y volumen específico.”[5]

4.5.3 Ventiladores:

El ventilador es una turbomáquina que absorbe energía mecánica y retribuye energía a un gas, imprimiéndole un incremento de presión tal que el influjo de la compresión puede despreciarse. Los ventiladores pueden clasificarse de la siguiente manera:

a) Según la presión desarrollada:

- Ventiladores de baja presión: Presión total desarrollada inferior a 10 mbar.
- Ventiladores de media presión: Presión total desarrollada superior a 10 e inferior a 30 mbar.
- Ventilador de alta presión: presión total desarrollada superior a 30 e inferior a 100 mbar. (En estos últimos el efecto de la compresibilidad ya es apreciable). Esta clasificación es meramente convencional.

b) Según la dirección del flujo:

Ventiladores Axiales: este tipo de ventiladores, consiste esencialmente de una hélice. La dirección de la corriente de aire es una línea recta, paralela a la flecha del ventilador. Se emplea principalmente para la traslación del aire de un lugar a otro, o hacia el ambiente exterior, o para introducir aire nuevo. Este tipo de ventilador puede manejar grandes volúmenes de aire a presiones estáticas que van de bajas a medias. A su vez, los ventiladores tipo axial se clasifican en:

- Ventiladores de hélice.
- Ventiladores tubo axial.
- Ventiladores con aletas directrices o guías.

Ventiladores Centrífugos: el ventilador de tipo centrífugo consiste en un rotor encerrado en una envolvente de forma espiral. El aire entra a través del ojo del rotor, paralelo a la flecha del ventilador y se descarga por la salida de la envolvente a ángulos rectos de la flecha, es decir, tangencialmente. El ventilador centrífugo puede ser de entrada sencilla o de entrada doble. En un ventilador de entrada doble, el aire entra por ambos lados de la envolvente, succionado por un rotor doble o por dos rotores sencillos montados lado a lado. El ventilador centrífugo se utiliza en la mayoría de las aplicaciones de confort en virtud de su amplio margen de funcionamiento, alto rendimiento y presiones relativamente elevadas. A su vez, los ventiladores centrífugos se clasifican por la forma de los álabes o aletas:

- Ventiladores con álabes curvados hacia delante.
- Ventiladores con álabes curvados hacia atrás.
- Ventiladores con álabes radiales (rectos).

Para ventilar un espacio, un recinto o una máquina, ya sea impulsando aire o bien extrayéndole, es muy corriente tener que conectar el ventilador/extractor por medio de un conducto, una tubería, de mayor o menor longitud y de una u otra forma o sección.

El fluir del aire por tal conducto absorbe energía del ventilador que lo impulsa/extrae debido al roce con las paredes, los cambios de dirección o los obstáculos que se hallan a su paso. La rentabilidad de una instalación exige que se minimice esta parte de energía consumida.

4.5.4 Ductos de ventilación:

“Los ductos de ventilación son equipos que se utilizan para ventilar un espacio o lugar determinado. El proceso de ventilación se produce por ventiladores, por lo general se encuentran acoplados en la parte superior del ducto, que generan corrientes de aire

que circulan a través del ducto hasta llegar al lugar a ventilar. El sistema de ductos de ventilación puede clasificarse:

a) Por su Forma: ductos circulares y rectangulares. Los ductos rectangulares son más versátiles que circulares, ya que se adaptan con mayor facilidad a los posibles obstáculos que pueda presentarse la instalación. Normalmente, y como contrapartida, en los ductos circulares el aire circula a mayor velocidad que en los rectangulares, por lo que sus dimensiones son un poco menores que estos últimos.

b) Por la velocidad del aire: ductos de baja y alta velocidad. Se considera que una instalación con una velocidad del aire inferior a 11 m/s es de baja velocidad, y por encima de este valor de alta velocidad. La mayoría de las instalaciones de uso no industrial se realizan con ductos de baja velocidad, ya que producen un nivel sonoro inferior que los de alta velocidad.

c) Por la presión del aire: ductos de baja, media y alta presión.

- Baja presión: hasta 890 Pa. (90 mm.c.a.).
- Media presión: de 890 hasta 1.765 Pa. (90 a 180 mm.c.a.).
- Alta presión: de 1.765 a 2.950 Pa. (180 a 300 mm.c.a.).”[4]

4.5.4 Aspectos generales de un sistema de ventilación:

“En cualquier sistema de ventilación con circulación mecánica, el ventilador o ventiladores deben tener la capacidad adecuada en cuanto a la cantidad adecuada de aire y una presión estática igual o ligeramente mayor que la resistencia total que se tiene en el sistema de ductos. El tamaño de los ductos se escoge para las velocidades máximas de aire que puede utilizarse sin causar ruidos molestos y sin causar pérdidas excesivas de presión. Los ductos grandes reducen las pérdidas de fricción, pero la inversión y el mayor espacio deben compensar el ahorro de potencia del ventilador.

El flujo de aire en los sistemas de ventilación industrial esta regido por dos principios básicos de la mecánica de fluidos: la conservación de la masa y la conservación de la energía. Se trata de leyes que básicamente establecen que la masa y la energía no desaparece sino que se transforma.”[6]

La carga o presión requerida para el fluido se determina utilizando tanto la ecuación de Bernoulli como la ecuación de Darcy-Weisbach de la mecánica de fluidos.

La ecuación de Bernoulli considera el contenido total de energía mecánica (no térmica) del fluido en cualquier punto del sistema:

$$\frac{P_{s1}}{\rho g} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} - H_{r1-2} = \frac{P_{s2}}{\rho g} + Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} \quad (\text{Ecuación 4.6}); \text{ donde:}$$

V_1, V_2 = Velocidad del fluido en los puntos 1 y 2. [m/s]

ρ = Densidad del fluido. [kg/m³]

P_{s1}, P_{s2} Presiones estáticas en los puntos 1 y 2. [Pa]

H_{r1-2} = Pérdidas entre los puntos 1 y 2.

g = Aceleración de gravedad. [m/s²]

La ecuación de Darcy-Weisbach expresa la pérdida de energía mecánica de un fluido debido al calentamiento por fricción entre dos puntos cualesquiera del sistema.

Las pérdidas de carga en las tuberías o ductos son de dos clases: primarias y secundarias.

Las pérdidas primarias son las pérdidas de superficie en el contacto del fluido con el ducto (capa límite), rozamiento de unas capas de fluido con otras (régimen laminar) o de las partículas de fluido entre si (régimen turbulento). Tiene lugar en flujo uniforme, por tanto principalmente ocurre en los tramos del ducto de sección constante.

Las pérdidas secundarias son las pérdidas de forma, que tienen lugar en las transiciones (estrechamientos o expansiones de la corriente), codos, válvulas y toda clase de accesorios del ducto.

CAPÍTULO V

INSPECCIÓN Y EVALUACIÓN

La inspección y evaluación, tienen como objetivo principal, detectar las posibles causas que ocasionan los problemas ubicados en la sección de “vacío, mezcla y cristalización” y en la sección de “enfriamiento” del sulfato de aluminio, y además evaluar los mecanismos de calentamiento del sulfato de aluminio fundido y enfriamiento del sulfato de aluminio solidificado.

5.1 Inspección

5.1.1 Identificación y descripción de los equipos que conforman los sistemas estudio:

- a.*** Primeramente se deben diferenciar las corrientes ó flujos que se encierran dentro de los volúmenes de control en estudio correspondientes a los sistemas “A” y “B”; seguidamente se muestran y explican brevemente los diagramas de flujo del vapor, del sulfato de aluminio fundido y del sulfato de aluminio solidificado:

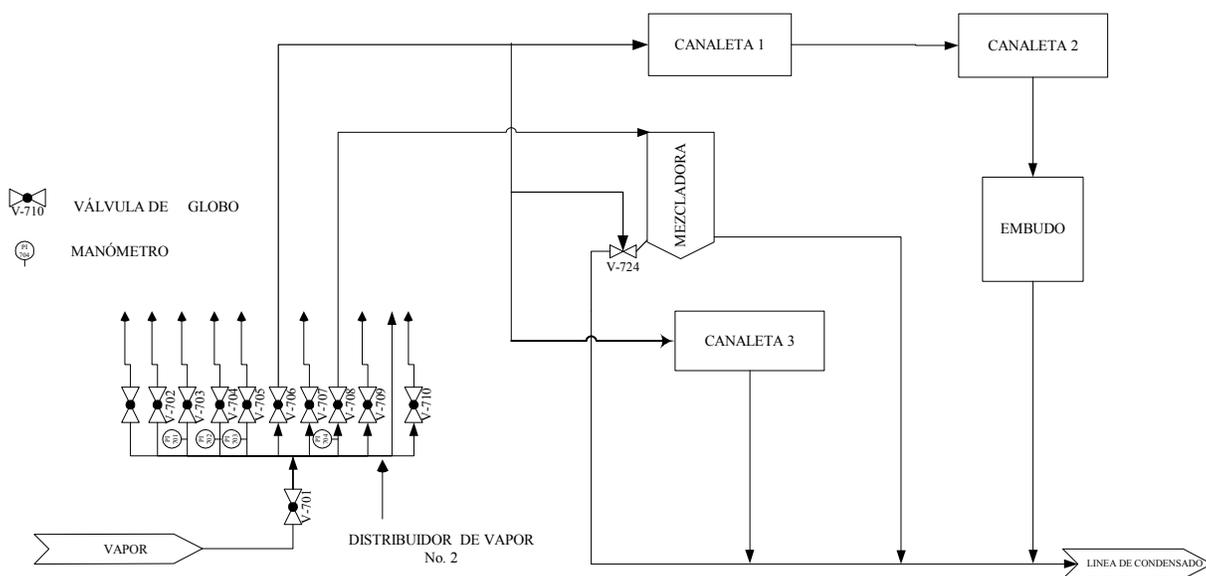


Figura N° 5.1 Diagrama de flujo del vapor

➤ *Línea de vapor*, representada en el diagrama de la figura 5.1. El vapor necesario utilizado en la planta durante el proceso de producción, es generado por 2 calderas, cada una de ellas es capaz de producir el de vapor requerido por el proceso actuando la otra de respaldo; las especificaciones de las calderas se listan a continuación en la tabla 5.1, y las mismas se muestran en las figuras 5.2 y 5.3:

Marca	Continental	Johann Stahl
Código de Planta	SG-1	SG-2
Tipo	Pirotubular	Pirotubular
Año de Fabricación	1990	1974
Fluido de trabajo	Agua	Agua
Presión de trabajo	1135,567 KPa	1101,325 Kpa
Presión de prueba	-	1,3 Mpa
*Temperatura de trabajo	185,48 °C	184,11°C
Capacidad	1565 Kg / h	1000 Kg/h

*Las temperaturas de trabajo se determinaron como:
 $T_{\text{saturación}} @ \text{Presión de trabajo}$ [18]

Tabla No. 5.1 Especificaciones de las Calderas.



(a)

(b)

Figura N° 5.2 Generadores de vapor. (a) Caldera "Continental". (b) Caldera "Johann Stahl"

El vapor proveniente de las calderas llega al distribuidor No. 2 (figura N° 5.3), el cual lo suministra por 11 líneas ó tuberías hacia los equipos que requieren vapor para su funcionamiento y hacia otros usos destinados para el mismo, que son esencialmente, el calentamiento, tanto de estos equipos como de agua de procesos. El flujo es regulado por 10 válvulas de globo.



Figura N° 5.3 Distribuidor de vapor No. 2

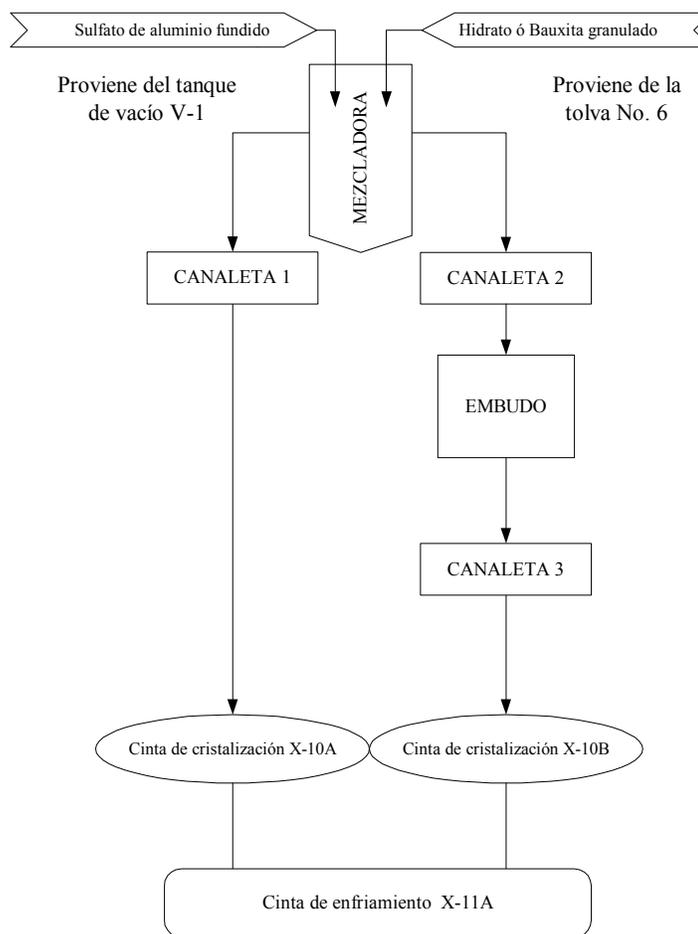


Figura N° 5.4 Diagrama de Flujo del Sulfato de aluminio fundido

➤ *Línea de Sulfato de aluminio fundido.* El sulfato proveniente del tanque de vacío (V1), es vaciado en la mezcladora a través de una tubería, y el flujo es regulado por una válvula de volante, es mezclado con el polvillo inoculante que proviene de la tolva de polvillo (tolva No.6). El producto es manejado por todos los equipos que se muestran en el diagrama de flujo de la figura 5.4, con el fin de que el producto fundido, llegue a las cintas de cristalización y posteriormente a las cintas de enfriamiento donde ya está cristalizado y cortado en trozos.

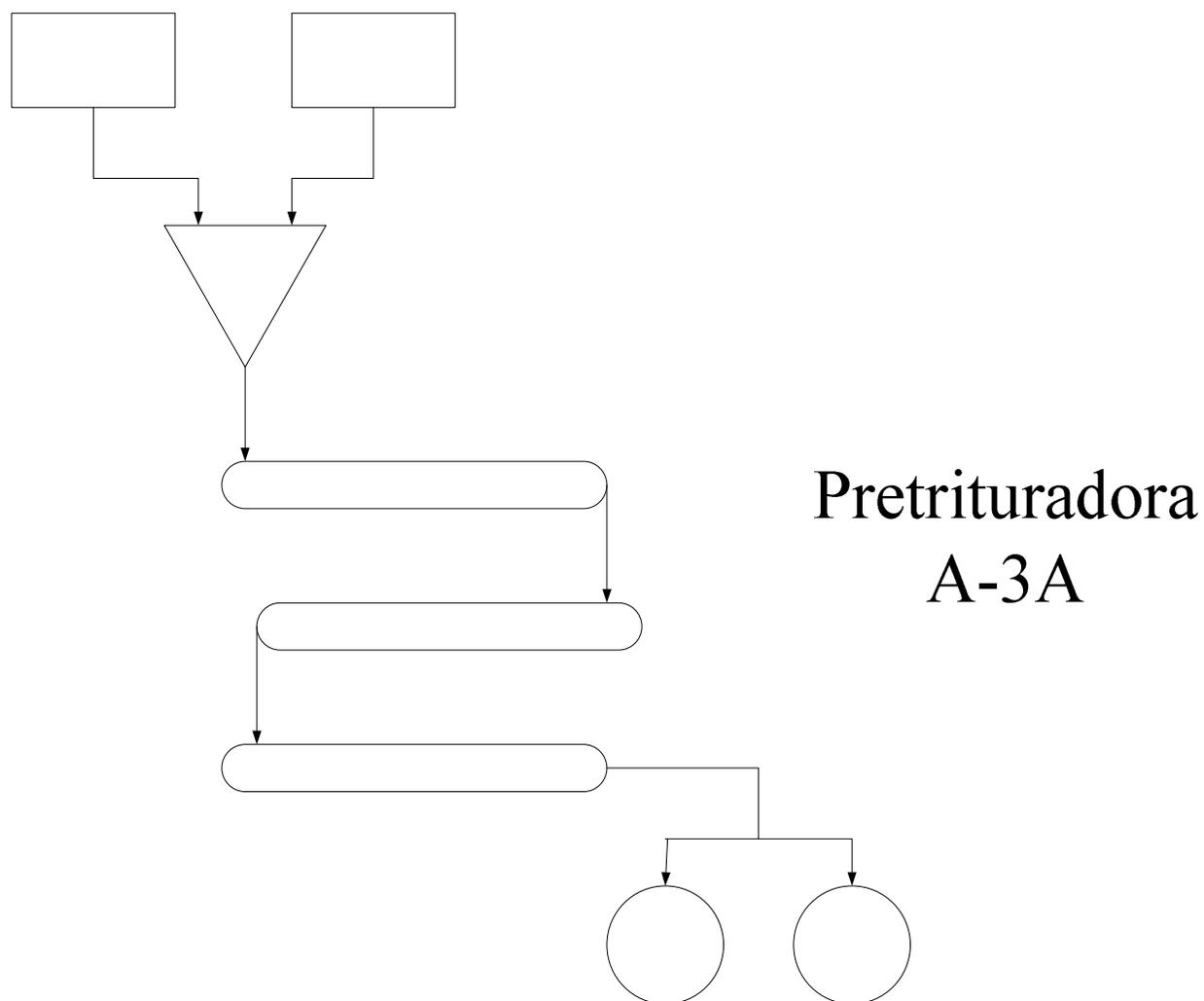


Figura N° 5.5 Diagrama de Flujo del Sulfato de aluminio solidificado

➤ *Línea de Sulfato de aluminio sólido:* El sulfato de aluminio se solidifica en las cintas de cristalización y es partido en trozos de tamaño irregular por las pretrituradoras (A-3A, A-3B) que se encuentran al final de dichas cintas, luego estos trozos caen en una tolva que los lleva a la primera cinta de enfriamiento, de ahí pasa a la segunda y tercera cinta de enfriamiento sucesivamente, hasta llegar finalmente a los molinos gruesos.

- b.** Seguidamente, se debe conocer la función de cada equipo y/o dispositivo dentro del proceso de producción:

➤ **Mezcladora (M1):** es un recipiente provisto de un agitador activado por un motor en el fondo con objeto de mezclar los producto fundidos: SATA, SATA-P ó SALH proveniente del tanque de vacío (V1) con el polvillo inoculante: hidrato o bauxita granulada según corresponda, el cual, se encuentra almacenado en una tolva y llega a la mezcladora por una tubería bajante que es regulado manualmente utilizando una paleta transversal en la tubería. (figura 2.2a)

➤ **Canaleta 1 (C1):** su función es conducir el producto proveniente de la mezcladora, hasta ser vertido en la banda transportadora denominada Cinta de Cristalización No. 1 (X-10A).

➤ **Canaleta 2 (C2):** al igual que C1, su función es conducir el producto que recibe, hasta ser vertido en un Embudo (Embudo de C2).

➤ **Embudo de C2:** su función es direccionar el flujo de producto proveniente de C2 para ser recibido por la Canaleta 3 ubicada en el nivel inferior de la planta.

➤ **Canaleta 3 (C3):** su función es conducir el producto proveniente del embudo, luego es vertido sobre la banda transportadora denominada Cinta de Cristalización No. 2 (X-10B).

Todos los equipos mencionados anteriormente, están provistos de una cámara de calentamiento, la cual se sirve del vapor entrante para calentar la superficie o las paredes de los mismos para recibir posteriormente al sulfato de aluminio fundido que proviene de la mezcladora y de esta forma calentarlo, que, de acuerdo a los datos operacionales de FERRALCA, posee una temperatura promedio de 115°C.

➤ **Cintas de Cristalización (X-10A y X-10B):** son bandas o cintas transportadoras fabricadas de correa térmica, con una longitud aproximada de 50 m. Su función es recibir el sulfato de aluminio fundido proveniente de las canaletas y transportarlo hacia las cintas de enfriamiento mientras se va solidificando.

➤ **Pretritadoras (A3-A y A3-B):** su función es partir en trozos pequeños el sulfato ya solidificado que viene de las cintas de cristalización.

➤ **Cintas de enfriamiento (X-11A, X-11B y X-11C):** son bandas o cintas transportadoras con una longitud aproximada de 50 m. Su función es transportar los trozos de sulfato de aluminio solidificado hasta los molinos gruesos, en el recorrido el sulfato va perdiendo calor por convección y se produce su enfriamiento.

➤ **Ductos de Ventilación (K-10A/B/C/D/E/F):** son conductos rectangulares que permiten el paso del aire proveniente del ventilador que se encuentra acoplado en la parte superior de cada uno, su función es direccionar el flujo de aire hacia las cintas de enfriamiento para que acelere la pérdida de calor del sulfato de aluminio transportado por ellas.

5.1.2 Condiciones actuales de los equipos y líneas de las secciones “Vacío, mezcla y Cristalización” y “Enfriamiento”:

Para conocer y determinar las condiciones actuales en estas secciones, se elaboraron varios formatos de inspección adecuados a los sistemas en estudio y sus componentes, donde se indicaron los resultados y observaciones de las inspecciones visuales; se muestran a continuación:

a) Sección: Vacío, mezcla y cristalización:

	Código de planta	Tensión Nominal [V]	Potencia Nominal [KW]	Velocidad Nominal [RPM]	Camisa de vapor	Material (lado externo)	Esesor [mm]	Material (lado interno)	Esesor [mm]	Manómetro	Termómetro	Trampa de vapor	Presión de trabajo [Kpa]	Capacidad [m3]	Diámetro externo	Diámetro interno	Longitud [m]	Aislante	Inclinación ó pendiente [°]
Línea de SA (magma)	-	NA	NA	NA	SI	E			-	-	-	NC	NA	9 cm		3,6	-	NA	
Válvula de Suministro de SA a la mezcladora	V-722	NA	NA	NA	NO	AI			NA	NA	NA	-	NA	9 cm		NA	NA	NA	
Línea de polvillo inoculante	-	NA	NA	NA	NO	AC			-	-	-	NC	NA	7 cm		3	-	NA	
Dispositivo regulador de polvillo inoculante	V-723	NA	NA	NA	NO	AI			NA	NA	NA	-	NA	7 cm		NA	NA	NA	
Mezcladora	M1	NA	NA	NA	SI	B	3	B	3	-	-	NA	PA	0,15	NA		NA	-	NA
Línea de suministro de vapor a M1	-	NA	NA	NA	NA	AC			NF	-	D	-	NA	1 in		3,5	C	NA	
Válvula para el manejo de vapor a M-1	V-708	NA	NA	NA	NA	AI			NA	NA	NA	-	NA	1 in		NA	NA	NA	
Motor de la Mezcladora	M58	440	14	1760	NA	NA			NA	NA	NA	NA	NA	NA		NA	NA	NA	
Brida de salida 1	-	NA	NA	NA	NO	B			-	-	NA	PA	NA	12 cm	17 cm	NA	-	NA	
Brida de salida 2	-	NA	NA	NA	NO	B			-	-	NA	PA	NA	12 cm	17 cm	NA	-	NA	
Canaleta 1	C1	NA	NA	NA	SI	A	2	B	2	-	-	NA	PA	NA	Ver observaciones		1,56	-	60
Línea de suministro de vapor a C1	-	NA	NA	NA	NA	AC			-	-	D	NC	NA	3/4 in.		2	I	NA	
Válvula para el manejo de vapor a C1	V-706	NA	NA	NA	NA	AC			NA	NA	NA	NC	NA	3/4 in.		NA	NA	NA	
Canaleta 2	C2	NA	NA	NA	SI	A	2	B	2	-	-	NA	PA	NA	Ver observaciones		1,13	-	60

Error! o no

(Continúa en la siguiente página)

Tabla N° 5.2 Inspección de la Sección de Vacío, Mezcla y Cristalización.

	Código de planta	Tensión Nominal [V]	Potencia Nominal [KW]	Velocidad Nominal [RPM]	Camisa de vapor	Material (lado externo)	Esesor [mm]	Material (lado interno)	Esesor [mm]	Manómetro	Termómetro	Trampa de vapor	Presión de trabajo [Kpa]	Capacidad [m ³]	Diámetro externo	Diámetro interno	Longitud [m]	Aislamiento	Inclinación ó pendiente [°]
Línea de suministro de vapor a C2	-	NA	NA	NA	NA	M			-	-	D	NC	NA	3/4 in.		1,1	-	NA	
Embudo	-	NA	NA	NA	SI	A	4	B	4	-	-	NA	PA	NA	50 cm	45 cm	1,25	-	NA
Línea de suministro de vapor al embudo	-	NA	NA	NA	NA	M			-	-	NF	NC	NA	3/4 in.			-	NA	
Canaleta 3	C3	NA	NA	NA	SI	A	6	B	4	-	-	NA	PA	NA	Ver observaciones		2,4	-	50
Línea de suministro de vapor a C3	-	NA	NA	NA	NA	AI			-	-	-	NC	NA	1 in.		2	I	NA	
Válvula para el manejo de vapor a C1	V-706	NA	NA	NA	NA	AI			NA	NA	NA	NC	NA	3/4 in.		NA	NA	NA	
Manifold 2	-	NA	NA	NA	NA	AC			-	-	NA	NC	0,023	5 in.		1,8	I	0	

Nomenclatura de símbolos :

Acero 316L	A
Acero Carpenter 20cb 3	B
Manguera apantallada	M
Acero Inoxidable	AI
Acero al Carbono	AC
Cobre	E
Aislante	-
Carente	-
Completo	C
Incompleto	I
Instrumentación	-
Carente	-
Funciona	F
No Funciona	NF
Deteriorado	D
No conocido	NC
PA	Presión atmosférica
NA	No aplica

Nota: Se utilizaron dimensiones en pulgadas (in) para indicar más fácilmente valores comerciales.

Tabla N° 5.2 Inspección de la Sección de Vacío, Mezcla y Cristalización

Observaciones generales de la Inspección:

- Las canaletas y embudo presentan fugas de vapor.
- Las cintas de cristalización están desviadas, no existen guías para enderezar su trayectoria. Se utilizan vigas ó varas largas pesadas interceptadas en su paso para ayudar a centrar la banda o cinta.
- Las canaletas se encuentran dobladas en algunas secciones de su superficie.
- La brida de salida No. 1 de la mezcladora, posee una lámina de metal que secciona el diámetro de salida.(figura 5.6)



Figura N° 5.6 Detalle: brida de salida No. 1 de la mezcladora

- En el embudo el problema de producto cristalizado se agudiza a la salida del mismo.
- Zonas afectadas por salpique y material cristalizado: alrededores de las zonas de Mezcla (piso, mezcladora, canaletas, techo), y alrededores de la Zona de Cristalización (rodillos y guías de las cintas, techo y piso cercanos al embudo y canaleta 3). Esto puede apreciarse en las Figuras 2.5 hasta la 2.8 en el Capítulo II donde se describe el problema.
- Con los productos SATA y aún más, el SATA-P, los problemas ocasionados son visiblemente mayores que cuando se produce SALH (sólo se observó ligeramente la producción de SATA y SALH durante visitas previas realizadas a la empresa en momentos antes de comenzar el Trabajo Especial de Grado).
- El material desprendido de la limpieza de las canaletas y el embudo es depositado en gran parte sobre las cintas de cristalización.

- Se realiza una limpieza con vapor de los equipos entre cada turno y por lo menos 3 veces se debe parar el proceso durante el turno de producción para despegar material cristalizado sobre los equipos.
- La limpieza de la mezcladora, que se realiza haciendo funcionar la misma con una cierta cantidad de agua, origina que una mezcla de agua y producto se expulse por las bridas de salida,.
- La limpieza de la mezcladora origina salpique ya que se expulsa el desecho a través de las bridas de salida.
- La entrada a la mezcladora e polvillo inoculante ocasiona esparcimiento de las partículas en los alrededores de la sección.
- Las secciones transversales de las canaletas, se indican en las figuras siguientes:

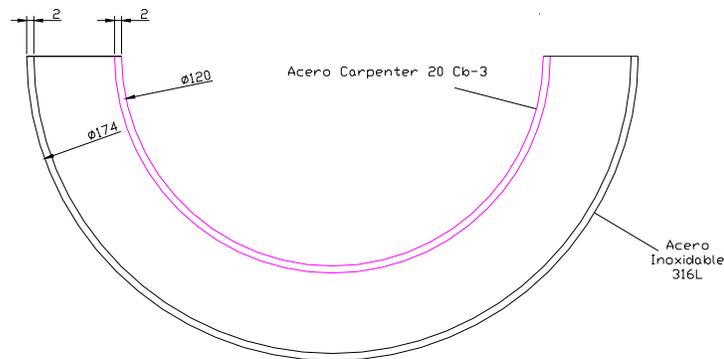


Figura N.º 5.7. Sección transversal de la Canaleta N.º. 1 y Canaleta N.º.2

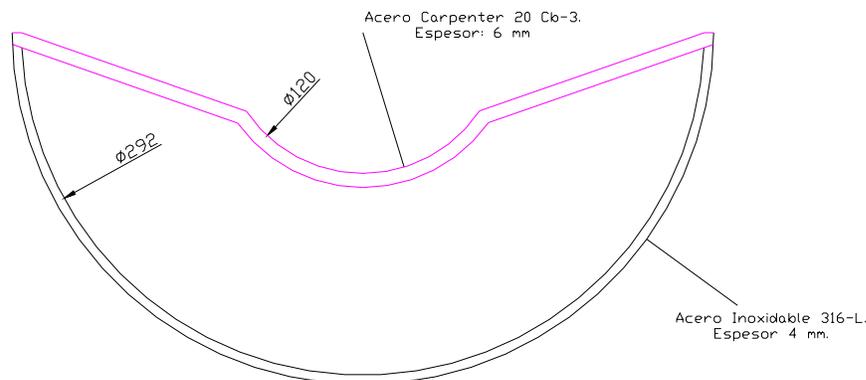


Figura N.º 5.8. Sección transversal de la Canaleta N.º. 3.

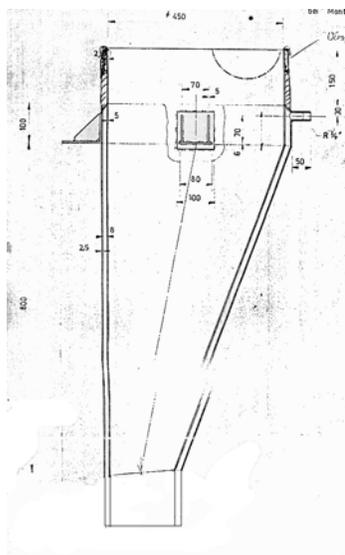


Figura N° 5.9 Sección transversal del embudo.

b) Sección de Enfriamiento:

El sistema de enfriamiento del sulfato de aluminio cuenta con 6 ductos de ventilación, a cada ducto se le realizó una inspección para observar las condiciones en que se encuentran y conocer cuales podrían afectar el proceso de enfriamiento. Se observó deterioro y daños en los ductos los cuales se mencionan a continuación:

Ductos	Difusor	Corrosión	Cantidad de Láminas Deterioradas	Cantidad de Láminas Faltantes	Condición del Damper
K-10A derecho	Superior	General	18	0	
	Intermedio	General	13	0	Obstruido
	Inferior	General	2	0	Obstruido
K-10A izquierdo	Superior	General	15	5	Obstruido
	Intermedio	General	18	1	Obstruido
	Inferior	General	2	0	Obstruido

Tabla N° 5.3 Condiciones generales del ducto K-10A

Observaciones: en el ducto derecho se observó orificios de mediano tamaño en el difusor superior y pequeños en el inferior. Se observaron abolladuras y hundimientos en la parte intermedia de ambos ductos.

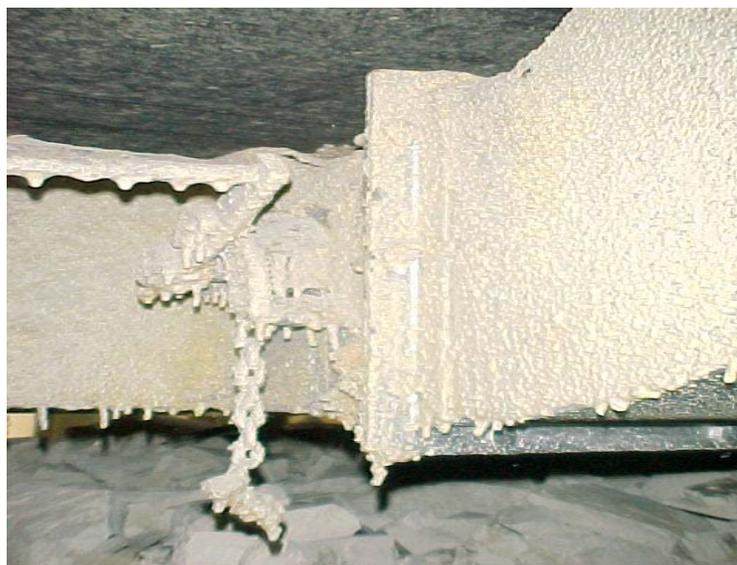


Figura N° 5.10 Damper obstruido

Ductos	Difusor	Corrosión	Cantidad de Láminas Deterioradas	Cantidad de Láminas Faltantes	Condición del Damper
K-10B derecho	Superior	General	13	0	
	Intermedio	General	10	0	Obstruido
	Inferior	General	0	0	Obstruido
K-10B izquierdo	Superior	General	5	0	Obstruido
	Intermedio	General	0	0	Obstruido
	Inferior	General	0	0	Obstruido

Tabla N° 5.4 Condiciones generales del ducto K-10B

Observaciones: el ducto derecho presenta abolladuras en el difusor superior y agrietamientos en el inferior. Ambos ductos presentan abolladuras y hundimientos en la zona intermedia y el ducto izquierdo tiene un hueco de gran tamaño por donde se fuga el aire en la misma zona.

Ductos	Difusor	Corrosión	Cantidad de Láminas Deterioradas	Cantidad de Láminas Faltantes	Condición del Damper
K-10C derecho	Superior	Severa	16	0	
	Intermedio	Severa	6	0	Obstruido
	Inferior	Severa	1	0	Obstruido
K-10C izquierdo	Superior	Severa	1	0	Obstruido
	Intermedio	Severa	0	0	Obstruido
	Inferior	Severa	0	0	Obstruido

Tabla N° 5.5 Condiciones generales del ducto K-10C

Observaciones: en el ducto derecho se observaron orificios pequeños en el difusor inferior y hundimiento en la zona intermedia. En el ducto izquierdo se observaron orificios de mediano tamaño en el difusor inferior y corrosión en el tramo del difusor intermedio.



Figura N° 5.11 Corrosión y suciedad en ducteria.

Ductos	Difusor	Corrosión	Cantidad de Láminas Deterioradas	Cantidad de Láminas Faltantes	Condición del Damper
K-10D derecho	Superior	General	15	0	
	Intermedio	General	6	0	Obstruido
	Inferior	General	1	0	Obstruido
K-10D izquierdo	Superior	General	12	8	Obstruido
	Intermedio	General	13	0	Obstruido
	Inferior	General	2	0	Obstruido

Tabla N° 5.6 Condiciones generales del ducto K-10D

Observaciones: en el ducto derecho se observó corrosión y sucio en las paredes, en la parte superior hay orificios por donde se fuga el aire proveniente de los ventiladores. El ducto izquierdo presenta corrosión severa y suciedad a lo largo de todo el ducto, en la parte superior se observan fugas de aire y corrosión en las paredes internas, también algunas deformaciones y hundimientos en dichas paredes.



Figura N° 5.12 Corrosión y orificio en parte superior de los ductos

Ductos	Difusor	Corrosión	Cantidad de Láminas Deterioradas	Cantidad de Láminas Faltantes	Condición del Damper
K-10E derecho	Superior	General	62	0	Obstruido
	Intermedio	General	2	0	Obstruido
	Inferior	General	23	0	Obstruido
K-10E izquierdo	Superior	Severa	31	5	Obstruido
	Intermedio	Severa	0	0	Obstruido
	Inferior	Severa	9	3	Obstruido

Tabla N° 5.7 Condiciones generales del ducto K-10E

Observaciones: en el ducto derecho se observó corrosión a lo largo de todo el ducto, huecos en el codo del difusor intermedio por donde se fuga el aire (figura 5.4), salpiques de material en el tramo del difusor inferior. El ducto izquierdo presenta corrosión y material solidificado en la parte superior, corrosión y pequeñas fugas de aire en las paredes internas, corrosión severa en los codos de los damper de los tres difusores.



Figura N° 5.13 Orificio en el codo del difusor

Ductos	Difusor	Corrosión	Cantidad de Láminas Deterioradas	Cantidad de Láminas Faltantes	Condición del Damper
K-10F derecho	Superior	General	35	0	Obstruido
	Intermedio	General	3	0	Obstruido
	Inferior	General	9	0	Obstruido
K-10F izquierdo	Superior	General	12	0	Obstruido
	Intermedio	General	0	0	Obstruido
	Inferior	General	21	2	Obstruido

Tabla N° 5.8 Condiciones generales del ducto K-10F

Observaciones: en el ducto derecho el difusor intermedio tiene orificios de mediano tamaño. El ducto izquierdo presenta orificios en la parte superior por donde se fuga el aire y corrosión en la parte inferior.

Toda la información referente a la inspección de los ductos de ventilación que se describió anteriormente además de la que se indico en las tablas se tomo en un formato que se muestra a continuación, en el cual se indican todos los detalles que se observaron en dicha inspección.

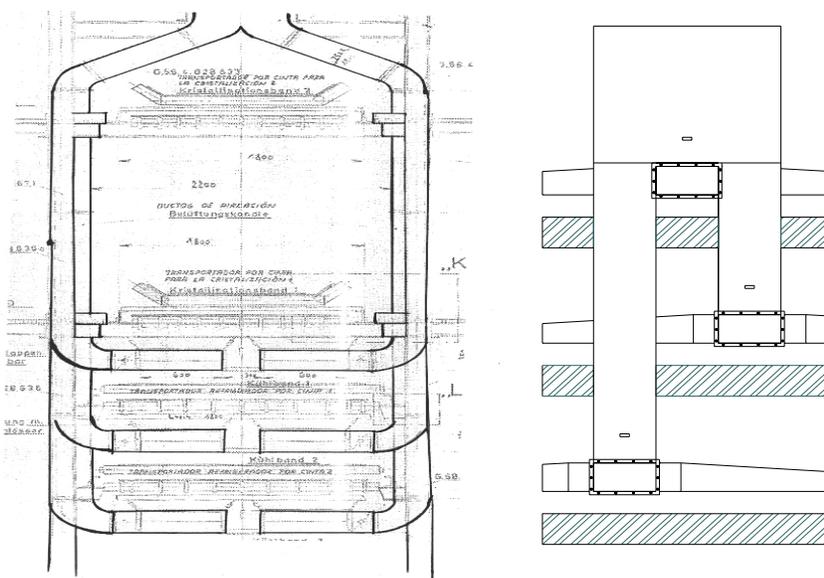


Figura N° 5.14 Formato de inspección de los ductos de ventilación

5.1.3 Condiciones originales de diseño de Planta en las secciones estudiadas:

Caudal manejado de Sulfato de aluminio fundido	7,4 ton/h
Caudal de Polvillo Inoculante	300 Kg/h
Caudal aproximado manejado por canaleta	3,7 ton/h
Caudal de aire manejado por los ventiladores	20000 m ³ /h
Presión de diseño (estática)	3 " H ₂ O
Espesor de material sobre las bandas transportadoras (cintas de cristalización, enfriamiento)	2,5-3 cm.

Tabla N° 5.9 Valores y datos correspondientes al diseño original de planta

Observaciones:

1. Originalmente no existía el Embudo de la Canaleta 2. El flujo se conducía hasta la cinta de cristalización N° 2, a través de una sola canaleta de mayor longitud.
2. El material original de todas las cúpulas tipo gorro chino era acero, pero a una de estas cúpulas se realizó un cambio de material por fibra de vidrio. Este cambio se hizo debido a la alta corrosión que ocurre en las paredes internas de la cúpula, para evitar, por acción del aire que circula por esa zona, la caída de pequeñas partículas de material corroído y suciedad en el motor del ventilador, el cual se encuentra un poco más abajo de esta zona y por razones del diseño original también se encuentra dentro del ducto.

5.2 Evaluación:

Los objetivos de la evaluación son los siguientes:

5.2.1 Basamento de la problemática existente:

FERRALCA no presenta un historial, en sus años en servicio, de las fallas y daños ocasionados por los problemas que se presentan en la sección de “Mezcla, Vacío y Cristalización” (cristalización prematura, salpiques, etc.) y en la sección de “Enfriamiento”. Por este motivo el departamento de mantenimiento de FERRALCA no cuenta con unas estadísticas de fallas que permitan establecer la incidencia de la problemática en su proceso de producción.

5.2.2 Métodos aplicados por FERRALCA para solucionar temporalmente los problemas existentes:

➤ Para hacer la limpieza del material que se cristaliza sobre las canaletas utilizan vapor. El vapor se toma del distribuidor N° 2 a través de una manguera y se hace incidir a alta presión sobre la canaleta despegando todo el material que se ha cristalizado sobre ella.

➤ Otra forma que utilizan para despegar el material cristalizado sobre las canaletas y el embudo es aplicando fuertes golpes con barras de acero a estos equipos, pero esto también produce deformaciones en las zonas donde reciben los golpes.

➤ Después que ha sido despegado el material cristalizado se utiliza agua a través de una manguera para hacer fluir los residuos que queden sobre los equipos.

5.2.3 Evaluación del proceso de calentamiento del sulfato de aluminio fundido

5.2.3.1 Cálculo del calor suministrado por el vapor al sulfato de aluminio

fundido: el cual, se determina utilizando la ecuación 4.1:

$$q_v = \dot{m}_v \times (h_s - h_e) \text{ (Ecuación 5.1); donde:}$$

q_v = flujo de calor suministrado por el vapor [W]

\dot{m}_v = flujo másico del vapor [Kg/s]

h_s = entalpía del vapor calculada en las condiciones de salida del equipo

h_e = entalpía del vapor calculada a las condiciones de entrada al equipo

Debido a la falta de instrumentación en las líneas que conducen el vapor a las canaletas y embudo, los parámetros: flujo másico y temperatura se midieron utilizando un condensador construido por FERRALCA a comienzos del año, utilizado en su momento para el mismo fin: efectuar mediciones de algunas propiedades del vapor en las líneas de suministro. Es importante mencionar que dicho condensador se encontraba desvalijado, y fue reconstruido (figura 5.15) con el fin de utilizarlo en las mediciones requeridas.



Figura N° 5.15 Condensador utilizado para efectuar las mediciones del flujo de vapor

Reconstruido el condensador, se procede a conectarlo a cada uno de los equipos que consumen vapor y que forman parte del sistema en estudio. La conexión del mismo se realiza de forma inmediata, al iniciar o al concluir la producción correspondiente a uno de los turnos de operación, ó en algún período de tiempo que conlleve a paradas de planta programadas o no.

Procedimiento para efectuar mediciones de flujo de vapor:

- 1) Disponer de: Un recipiente recolector de condensado, termómetro de bulbo, cronómetro y formato de registro de datos (Tabla N°5.10)
- 2) Anotar en el formato de registro, previamente al inicio de las mediciones, la información que pueda obtenerse directamente, tal como: masa del recipiente recolector, fecha en la que se realiza la medición y valores referenciales de planta, en caso de que existan.
- 3) Cerciorarse en el sitio de trabajo, de que se está provisto con todos los equipos de seguridad necesarios: guantes de carnaza, lentes y mascarilla antipolvo, además de los elementales casco, botas y ropa de seguridad.
- 4) Verificar previamente a la instalación del condensador, la siguiente configuración en el mismo: válvulas N° 1, N° 2, N° 5 abiertas y las válvulas N° 3 y N° 4 cerradas; para ello se presenta el diagrama de la Figura 5.16 señalando los componentes.
- 5) Cerrar totalmente la válvula que suministra vapor al equipo al que se le efectuará la medición, la cual está ubicada en el Manifold 2.

- 6) Realizar la conexión del condensador al equipo que se le medirá el flujo de vapor: las Uniones 1 y 2 se acoplan con las tomas de salida de vapor de la tubería y la entrada de vapor al equipo respectivamente; ésta debe hacerse con ayuda del mecánico de turno en la planta.
- 7) Conectar la manguera de suministro de agua en la entrada del agua de condensación. Abrir la válvula N°. 4 y la que permite el paso del agua. Dejar llenar hasta completar el volumen del recipiente. Regular con estas dos válvulas el flujo de agua de condensación hasta obtener una circulación más o menos uniforme con el caudal alcanzado.
- 8) Abrir la válvula de suministro de vapor que se cerró en el punto 5.
- 9) Colocar el recipiente recolector bajo la salida de la línea de condensado.
- 10) Abrir la válvula N°. 3 y cerrar la válvula N° 2; en éste momento se deja fluir vapor por el serpentín (alrededor de un minuto y medio o dos) y se obtiene una muestra de condensado producto del drenaje durante este tiempo; además, también deberá confirmarse que la instrumentación del condensador está funcionando correctamente. Luego, la muestra de agua debe ser desechada.
- 11) Cerrar la válvula N° 2 con el fin de que todo el flujo de vapor que le llega al equipo, se dirija hacia el serpentín y colocar el recipiente recolector bajo la salida de la línea de condensado con el termómetro de bulbo e instantáneamente, se inicie el conteo en el cronómetro por aproximadamente un minuto; en el tipo de medición deberán observarse los valores de presión y temperatura de entrada del vapor.

- 12) Una vez obtenida la muestra en el tiempo medido, tomar inmediatamente el valor de la temperatura del condensado. Abrir la válvula N° 2 y cerrar la válvula N° 3. Registrar los valores de temperatura y tiempo.

- 13) Indicar los resultados en el formato de registro de datos.

- 14) Cerrar el paso del agua de condensación y la válvula N° 4 para permitir que se vacíe el recipiente por la salida del agua de condensación.

- 15) Medir la masa de condensado obtenida. Indicar el valor en el formato de anotaciones.

- 16) Finalmente, se obtienen formatos de mediciones para cada equipo, los cuales se resumen con los valores promedios obtenidos en la tabla 5.11.

- 17) promedios obtenidos en la tabla 5.11.

Producto: **SATA-P**
 Equipo: **Canaleta 3**

Fecha	11 de Sept. De 2003	12 de Sept. De 2003	
Turno	3-11 p.m.	7-3 p.m.	
m _R =	0,15 Kg	0,15 Kg	
Caldera en funcionamiento:	Continental	Continental	
Código:	SG-1	SG-1	

Legenda:

m= Masa	N/O= Sin operar, interrupción o parada en la producción.	P= Presión
N/E = Inexistencia de instrumentos.	O= Operando, producción continua.	t= Tiempo
T= Temperatura	m _R = Masa del recipiente recolector de condensado (m _R)	

Número de medición	Condición	Hora	P _{entrada} [Kgf/cm ²]	T _{entrada} [°C]	T _{salida} [°C]	t [s]	m _{condensado} [Kg]	P _{Caldera} [Kgf/cm ²]	Flujo másico de vapor		
									[Kg/s]	[Kg/h]	[lbm/h]
1	O	16:30:00	2,3	140	35	60,53	1,1	3,7	0,0157	56,5009	124,5632
2	O	17:00:00	2,3	135	35	60,47	1,05	3,7	0,0149	53,5803	118,1243
3	O	17:30:00	2,1	135	35	60,57	1	3,7	0,0140	50,5201	111,3777
4	O	18:00:00	2,1	135	36	60,54	1	3,7	0,0140	50,5451	111,4329
5	O	18:30:00	2,3	135	37	59,8	1,05	3,8	0,0151	54,1806	119,4478
6	O	19:00:00	1,7	130	34	60,25	0,85	3,7	0,0116	41,8257	92,2100
7	O	19:30:00	2	135	34	60,41	0,95	3,6	0,0132	47,6742	105,1037
8	O	11:30:00	3,2	145	42	60,41	1,25	3,5	0,0182	65,5521	144,5176
9	O	12:00:00	3,2	145	42	60,47	1,3	3,5	0,0190	68,4637	150,9366
10	O	12:30:00	3,6	150	46	60,32	1,35	3,5	0,0199	71,6180	157,8908
Promedio:	-	16:12:00	2,48000	138,50000	37,60000	60,37700	1,09000	3,64000	0,0156	56,0461	123,5605

Producto:	SATA	Caldera en funcionamiento:	Continental								
Referencia	Operando	19:30:00	2,03890	123,00000	31,00000	60,00000	1,03000	4,07781	0,01717	61,8	136,2457

Producto:	SATA	Caldera en funcionamiento:	Johann Stahl								
Referencia	Operando	16:35:33	2,5311	127,0000	33,0000	60,0000	1,1500	4,1481	0,01917	69	152,11899

Nº 5. 10 Formato de medición; propiedades del vapor.

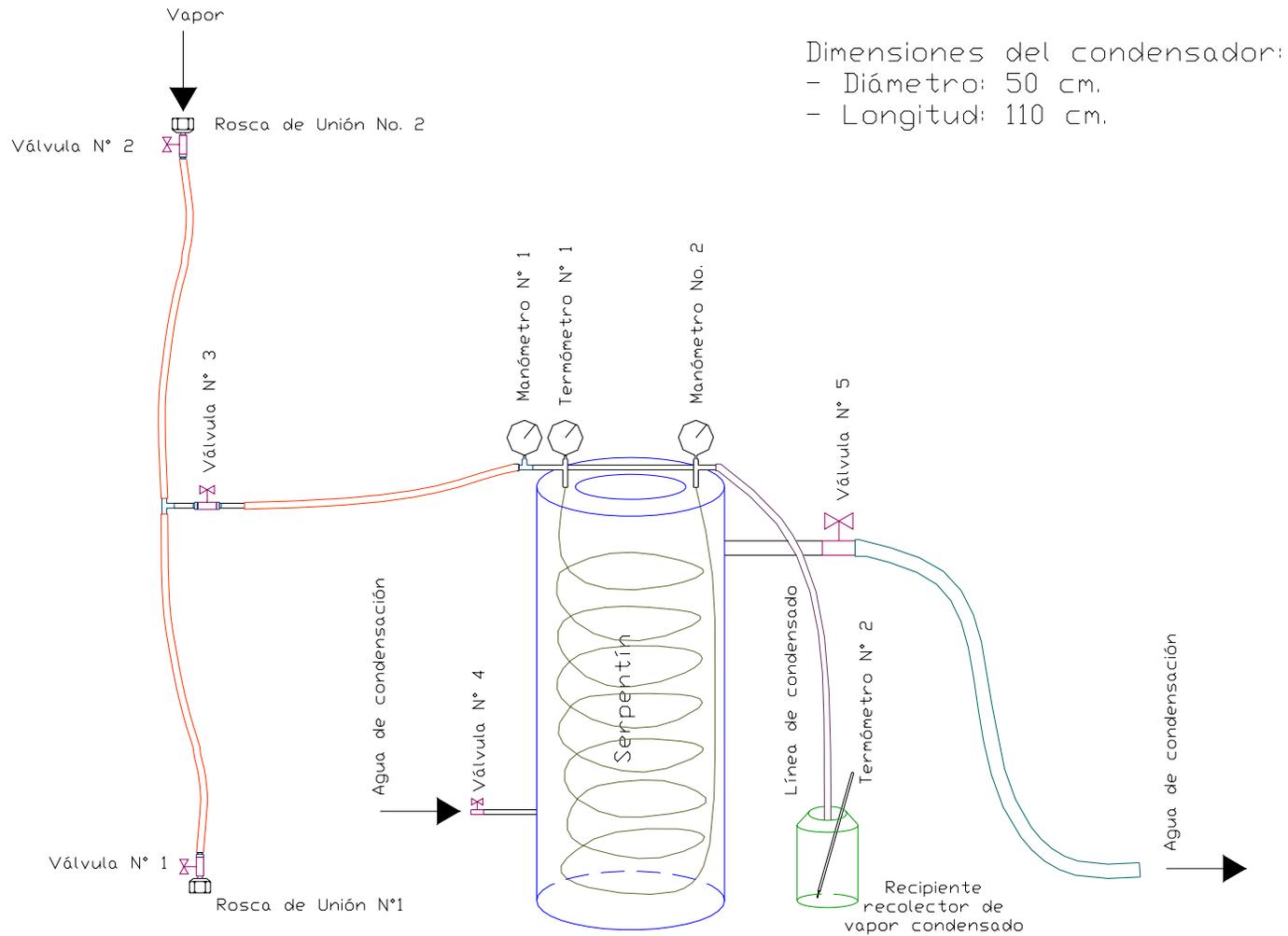


Figura N° 5.16. Diagrama esquemático del Condensador.

		P_{Man} [Kg/cm ²]	P_{abs} [Mpa]	$P_{caldera}$ Absoluta [Mpa]	T [°C]	ΔP [MPa]	Flujo de vapor [Kg/s]	*h [Kj/Kg]	*Cp [Kj/Kg*K]	
SATA-P	SG-1	1	2,200	0,317	0,464	137,500	0,147	0,014	2732,200	2,166
		2	1,822	0,280	0,460	132,220	0,180	0,014	2724,200	2,143
		3	No se tienen medidas							
		3	-	0,248	0,490	127,000	0,241	0,020	2714,700	2,151
		4	No se tienen medidas							
		5	No se tienen medidas							
		6	2,480	0,344	0,458	138,500	0,114	0,016	2731,900	2,187
	6	-	0,200	0,400	123,000	0,200	0,017	2712,400	2,084	
	7	No se tienen medidas								
	SG-2	1	2,575	0,354	0,513	139,500	0,159	0,017	2733,200	2,193
		2	1,400	0,239	0,409	134,666	0,170	0,013	2733,100	2,104
		3	1,600	0,258	0,487	128,333	0,229	0,013	2716,100	2,157
		3	-	0,248	0,407	127,000	0,159	0,020	2714,700	2,151
		4	No se tienen medidas							
5		No se tienen medidas								
6		-	0,248	0,407	127,000	0,159	0,019	2714,700	2,151	
7	No se tienen medidas									

Leyenda

1	Entrada de vapor a la Canaleta 1
2	Entrada de vapor a la Canaleta 2 = Salida de vapor de la canaleta 1
3	Entrada de vapor al Embudo = Salida de vapor de la Canaleta 2
4	Salida de condensado del embudo
5	Entrada de vapor a la válvula
6	Entrada de vapor a la Canaleta 3
7	Salida de condensado de la Canaleta 3

ΔP Es referida a la presión de la caldera en el momento de efectuar la medición en el punto (1-7)

Las celdas sombreadas, corresponden a valores anteriores reportados por la empresa en el mes de marzo del presente año

* Valores obtenidos con el programa WASP, [a]

Tabla N° 5.11 Valores promedios de las mediciones efectuadas de propiedades del vapor

El punto 5 en la tabla 5.11, existe físicamente, pero está fuera de servicio, por lo que, sólo se señala pero no se efectuaron mediciones.

Para los valores anteriormente mostrados en la tabla 5.11, se determinó el calor sensible que el vapor suministra en su paso por la cámara de calentamiento de acuerdo a la ecuación 5.1; los resultados se reportan por equipos y se muestran en la tabla 5.12

	Canaleta No.1	Canaleta No.2	Embudo	Canaleta No.3
SG-1	164,80	158,51	151,30	169,80
SG-2	178,95	178,91	139,37	209,04
Promedio	171,88	168,71	145,33	189,42

Tabla N° 5.12 Calor suministrado por el vapor

5.2.3.2 **Calor perdido en el proceso de calentamiento:** Con el fin de conocer el calor aprovechado para el calentamiento del sulfato de aluminio, se debe plantear el siguiente balance energético entre el calor total que es suministrado por el vapor y el calor parcial que absorbe el sulfato de aluminio fundido; obedeciendo a los esquemas de la figura 5.18:

$$q_v = q_{conv1} + q_{rad1} + q_a \text{ (Ecuación 5.2); donde:}$$

q_v = flujo de calor total suministrado por el vapor (tabla 5.12) [W]

q_{conv1} = flujo de calor por convección perdido por la superficie del equipo [W]

q_{rad1} = flujo de calor por radiación perdido por la superficie del equipo [W]

q_a = flujo de calor transferido al sulfato de aluminio [W]

Con el fin de determinar el calor perdido hacia el medio por el sulfato de aluminio fundido:

$$q_{sf} = q_{rad2} + q_{conv2} \text{ (Ecuación 5.3)}$$

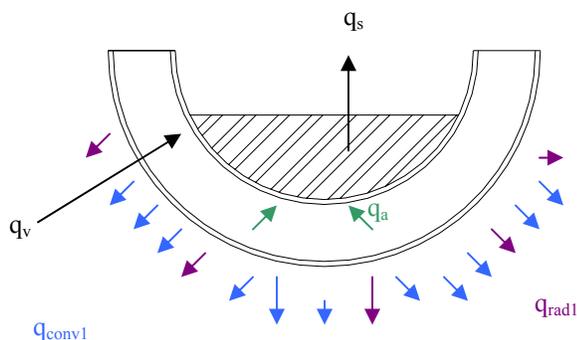
q_{sf} = flujo de calor perdido por el sulfato de aluminio fundido [W]

q_{conv2} = flujo de calor por convección perdido por el sulfato de aluminio fundido [W]

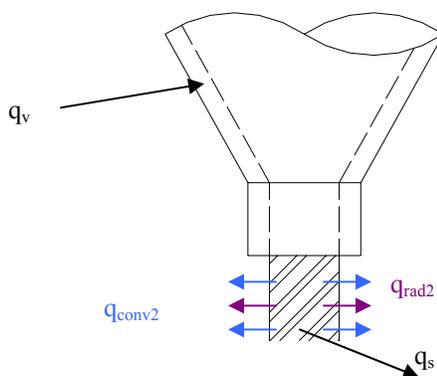
q_{rad2} = flujo de calor por radiación perdido por el sulfato de aluminio fundido [W]

q_a y q_{sf} se calculan en cada equipo.

Luego, el balance energético neto, refleja la relación entre el calor que pierde q_s y el calor que aprovecha del vapor, cuya función q_a :



(a)



(b)

Figura N° 5.17. Esquema indicativo del balance energético. Sección “Vacío, mezcla y cristalización”

(a) En las canaletas (b) en el embudo.

I) Cálculo de q_{conv} :

Para determinar el calor conveccionado de acuerdo a la ecuación 4.3, es necesario conocer los parámetros:

- Coeficiente de transmisión de calor por convección “h”
- Área de transmisión de calor
- Temperatura en la superficie “ T_s ” y
- Temperatura del medio ambiente “ T_∞ ”; todos los datos ambientales utilizados, se tomaron de la tabla D.1 del Apéndice D.

a) *Cálculo de q_{conv} :*

➤ El valor del coeficiente de transmisión de calor por convección para las canaletas, se determinó analíticamente a través de correlaciones empíricas mediante la analogía de “convección natural de superficies inclinadas, con la cara caliente mirando hacia abajo, con flujo de calor aproximadamente constante” [f], cuyo ancho de la superficie será igual al perímetro del equipo

$$\bar{h} = \frac{\bar{Nu}_e \times k}{L} \text{ (Ecuación 5.4); donde:}$$

\bar{Nu}_e = Número de Nusselt medio a lo largo de la Longitud “L” de la placa

k = Coeficiente de conductividad térmica del material [W/m °C]

L = Longitud de la placa [m]

$$\bar{Nu}_e = \left\{ 0,56 \times (Gr_e \times Pr_e \times \cos \theta)^{\frac{1}{4}} \right\}, \text{ (Ecuación 5.5); donde:}$$

θ = Ángulo de inclinación de la placa con respecto al plano vertical

Gr_e = Número de Grashof evaluado a T_e

Pr_e = Número de Prandtl evaluado a T_e

Las condiciones para el uso de ésta correlación son:

➤ $\theta < 88^\circ$, es el ángulo con respecto a la vertical (figura 5.19)

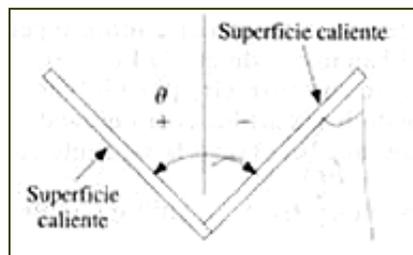


Figura N° 5.18. Sistema de coordenadas para placas inclinadas

➤ $10^5 < Gr_e \times Pr_e \times \cos \theta < 10^{11}$

► Temperatura de referencia T_e : $T_e = \frac{1}{4} \times (3T_s + T_\infty)$ (ecuación 5.6); donde

→ T_s = temperatura de la superficie [°C]

→ T_∞ = temperatura del ambiente [°C]

β = Coeficiente de expansión. Se evalúa a la temperatura T_f = temperatura de película [1/K]

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} \text{ (ecuación 5.7).}$$

| El número de Grashof (Gr_e) \times Pandtl (Pr_e) viene dado por:

$$Gr_e \times Pr_e = \frac{g \times \beta \times (T_s - T_\infty) \times L^3}{\nu^2} \times \frac{\nu}{\alpha} \text{ (Ecuación 5.8); donde}$$

Grashof (Gr_e) = Numero de Grashof a T_e ;

Pandtl (Pr_e) = Número de Prandtl a T_e

g = aceleración de la gravedad = 9,81 [m/s²]

ν = viscosidad cinemática evaluada a T_e

α = difusividad térmica [m²/s]

► El área de transmisión de calor de las canaletas , que es el área superficial de las mismas, se reporta a continuación (tabla 5.13):

	Canaleta No. 1	Canaleta No. 2	Canaleta No. 3
Área superficial [m ²]	0,4192	0,3017	1,1309

Tabla N° 5.13 Área superficial de las canaletas

► El parámetro T_s se obtuvo para cada equipo al efectuar mediciones de temperatura sobre las superficies externas de los mismos. Las mediciones se efectuaron discretizando las canaletas en secciones transversales y puntos longitudinales para ambas superficies: interna y externa (figura 5.19). El instrumento utilizado fue un termómetro de radiación fabricado por “Raytek”, de apreciación $\pm 0,01^\circ\text{C}$ y se utilizó un valor de emisividad de 0,8; este valor de emisividad se tomó de acuerdo a la “Tabla de Emisividades aproximadas” (Apéndice E) suministrada por el fabricante del instrumento.

Todas las temperaturas superficiales en los cálculos de evaluación se tomaron con este instrumento. Estas medidas se efectuaron mientras se encontraba operando la sección de “Vacío, Mezcla y Cristalización”.

También se midieron las temperaturas de pared, “T_p” (figura 5.19 (b)), mientras fluía producto sobre ellas. Para realizar estas mediciones se utilizó un termómetro de bulbo de mercurio, de apreciación ±1°.

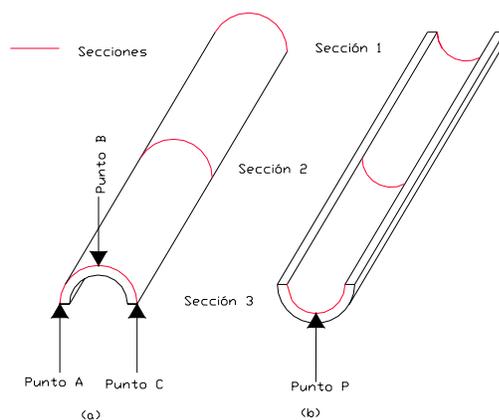


Figura N° 5.19 Localización de los puntos de medición de temperatura sobre la superficie de las canaletas. (a) Superficie externa de la canaleta. (b) Superficie interna de la canaleta

Los resultados de éstas mediciones se reportan en la tabla 5.14:

	Punto N°	Temperatura superficie externa T _s [°C]				Temperatura superficie interna Punto P: T _p [°C]
		1	2	3	Promedio por sección	
Canaleta N° 1-C1 Secciones	A	118,23	126,89	117,56	120,89	113,0
	B	118,76	131,00	118,35	122,70	115,0
	C	113,14	139,78	116,00	122,97	114,0
	Promedio por punto	116,71	132,56	117,30	122,19	114,0
Canaleta N° 2-C2 Secciones	A	117,65	125,00	116,15	119,60	113,0
	B	119,56	130,00	118,78	122,78	115,0
	C	117,78	135,00	118,89	123,89	113,0
	Promedio por punto	118,33	130,00	117,94	122,09	113,7
Canaleta N° 3-C3 Secciones	A	110,22	117,00	111,56	112,93	106,0
	B	114,10	118,78	113,40	115,43	109,0
	C	111,67	117,67	114,67	114,67	105,0
	Promedio por punto	112,00	117,82	113,21	114,34	106,67

Los valores de estas celdas, representan la Temperatura promedio total de la medición.

Tabla N° 5.14 Temperaturas superficiales sobre los equipos.

A continuación se presenta el cálculo tipo para q_{conv1} en la Canaleta No. 1:

Datos	T_s [°C]	T_∞ [°C]	L [m]	Área [m ²]
	122,37	30,00	1,57	0,42

Sustituyendo en las ecuaciones 5.5, 5.6, 5.7 y 5.8:

$$T_e = \frac{3 \times 122,37 + 30}{4} = 99^\circ\text{C} + 273,15 = 372,15\text{K}$$

Las propiedades siguientes se evalúan a T_e

ν	α	θ [°]	Pr	k [W/m ² *K]
2,37E-05	3,41E-05	30,00	0,69	3,19E-02

$$\beta = \frac{1}{\frac{T_p + T_\infty}{2} + 273,15} = 0,00286 \frac{1}{\text{K}}$$

$$Gr_e \times Pr_e = \frac{9,80665\text{m/s}^2 \times 0,002861/\text{K} \times 92,37\text{K} \times 1,57\text{m}^3}{0,000023665\text{m}^2} \times \frac{0,000023665}{0,0000341} = 1,244 \times 10^{10}$$

$$\overline{Nu}_e = \left\{ 0,56 \times (1,244 \times 10^{10} \times \cos 30)^\frac{1}{4} \right\} = 180,42$$

$$\bar{h} = \frac{180,42 \times 0,0319\text{W}/(\text{m} \times \text{K})}{1,57\text{m}} = 3,66\text{W}/(\text{m}^2 \times \text{K})$$

Sustituyendo en la ecuación 4.3:

$$q_{conv1} = \bar{h} \times A \times (T_s - T_\infty) = 3,66\text{W}/(\text{m}^2 \times \text{K}) \times 0,4192\text{m}^2 \times 92,37\text{K} = 141,94\text{W}$$

Las propiedades del aire para éste y todos los cálculos en adelante, se extrajeron de la Tabla A.4, Apéndice A. [9]

La tabla 5.15 muestra los resultados del cálculo de Q_{conv1} para todos los equipos pertenecientes al sistema en estudio.

	Canaleta No. 1	Canaleta No. 2	Canaleta No. 3
h [W/m ² K]	3,67	3,98	2,40
q_{conv1} [W]	141,95	110,51	167,85

Tabla N° 5.15 Flujo de calor por convección perdido por la superficie del equipo

Debido a la geometría excéntrica del embudo, que lo conlleva a mantener un área variable a lo largo de su superficie, realizar alguna analogía térmica por parámetros geométricos resulta complicado frente a otros parámetros de los que pueden obtenerse igualmente resultados importantes, como lo es, la pérdida de calor en el producto que pasa a través de él.

b) Cálculo de q_{conv2} :

➤ Realizando una analogía entre el lugar geométrico que describe el flujo sobre la canaleta y una superficie plana que llamaremos “placa aparente”, el coeficiente “h” se calcula por correlaciones empíricas del “Flujo sobre placas planas” [8]:

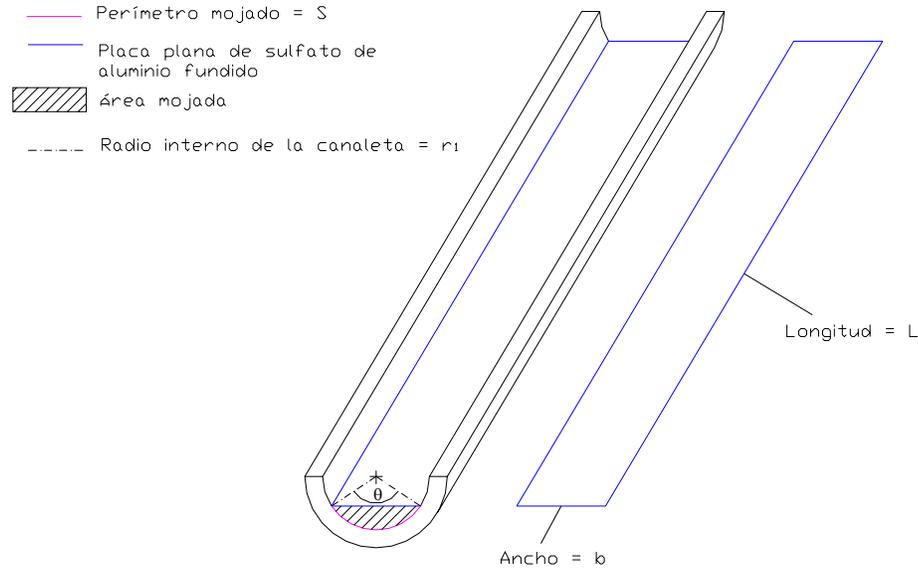


Figura N° 5.20 Analogía del flujo de sulfato de aluminio como placa plana.

El coeficiente de transferencia de calor por convección “h” se determina de acuerdo a la ecuación:

$$\bar{h} = \frac{\bar{Nu}_L \times k}{L} \text{ (Ecuación 5.9); donde:}$$

\bar{Nu}_L = Número de Nusselt medio a lo largo de la longitud “L”.

Para utilizar la correlación adecuada, se debe determinar si el flujo con respecto a la placa (bajo la cual se considera la superficie geométrica del producto fluyendo sobre los equipos) es flujo turbulento ó laminar. Para ello se determina el número de Reynold:

$$Re_L = \frac{u_\infty \times L}{\nu} \text{ (Ecuación 5.10); donde:}$$

u_∞ = Velocidad del flujo relativa a la placa [m/s]

L = longitud de la placa [m]

ν = Viscosidad Cinemática [m²/s] a la temperatura Tf

Aunque la placa sea la que realmente está en movimiento, se considera que está quieta y entonces el aire circundante tendrá la misma velocidad que lleva el fluido ó lo que es lo mismo, la velocidad del aire es la misma que la del fluido considerando a ésta en reposo. A continuación se calculará u_∞ = Velocidad del fluido.

Se conoce, por la ecuación de continuidad que

$$Va_\infty \left[\frac{m}{s} \right] = \frac{\dot{m} \left[\frac{kg}{s} \right] \times \frac{1}{\rho} \left[\frac{m^3}{kg} \right]}{A \left[m^2 \right]} = u_\infty \text{ (Ecuación 5.11); donde:}$$

Va_∞ = Velocidad del aire

\dot{m}_s = flujo másico [Kg/s]

ρ =Densidad [Kg/m³]

A = Área que ocupa el fluido [m²]

➤ Medición del flujo másico del sulfato de aluminio fundido “ \dot{m}_s ”:

Considerando:

- 1) Carencia de instrumentación adecuada para medir caudal másico, por lo cual se improvisaron recolectores de producto fundido hechos de sacos de polipropileno, utilizados para el ensacado del producto final.
- 2) Que el flujo de sulfato de aluminio fundido se reparte igualmente por las 2 bridas de salida de la mezcladora, por lo que se midió el flujo manejado por un solo equipo y el final luego se estimaría como el doble del valor medido.
- 3) La complicada disposición de algunos equipos, por lo que fue posible realizar la medición sólo en la canaleta No. 3.
- 4) Mediciones efectuadas durante las jornadas donde se asegurara la continuidad de la producción ó con las menores interrupciones posibles; se siguió el siguiente procedimiento:

Instrumentos utilizados:

- Cronómetro
- Balanza Electrónica
- Recipiente recolector: El recipiente recolector se construyó con 2 sacos de polipropileno, adecuadamente cortados y cocidos. Se les agregaron agarraderas del mismo material para poder sostenerlos durante la toma de la muestra.

Procedimiento:

- a) Elaborar el formato de medición
- b) Tomar la medida de la masa del recipiente recolector vacío en la balanza electrónica
- c) Interrumpir momentánea el proceso de producción con el fin de situar el recipiente justo a la salida de la Canaleta No. 3 y evitar el riesgo de salpicadura del material.
- d) Colocar el manómetro para iniciar la medición de la muestra

- e) Dar la señal al operador para que retome la continuidad del proceso
- f) Iniciar la toma del tiempo apenas entre al recipiente el sulfato de aluminio fundido
- g) Retirla por medio de las agarraderas luego de unos segundos
- h) Pesarse de forma casi inmediata la muestra en la balanza electrónica
- i) Tomar nota del valor obtenido

A continuación se muestra el formato de medición aplicado y los valores obtenidos:

Producto	SATA-P	Fecha :	07/08/2003	14/08/2003	21/08/2003	11/09/2003
		Turno :	07:00 a 3:00 pm	03:00 a 11:00 pm	07:00 a 3:00 pm	07:00 a 3:00 pm

Número de medición	Hora	m ₁ [Kg]	M _{Total} [Kg]	t [s]	Flujo másico	
					[kg/s] Por cada salida	[Ton/h] Total
1	16:10:00	0,25	17,8	12	1,4625	9,8034
2	17:45:00	0,25	11,2	6,8	1,6103	10,7941
3	10:30:00	0,25	12,75	9,12	1,3706	9,1875
4	11:15:00	0,25	14,75	9,84	1,4736	9,8777
5	13:15:00	0,25	11,1	7,65	1,4183	9,5072
6	10:30:00	0,2	14,5	8,03	1,7808	11,9372
7	12:00:00	0,2	19,7	9,4	2,0745	13,9056
Promedio	-	0,235714286	-	-	1,5987	10,7161

m₁ =	Masa inicial: Colector vacío
M_{Total}	Masa total: Colector + producto

Tabla N° 5.16 Formato de medición: Caudal másico de sulfato de aluminio fundido

De ésta forma conocemos el valor del flujo másico promedio de producto manejado por cada brida de salida: 1, 5986 Kg/s, y el valor total promedio de producción de sulfato de aluminio sólido: 3,1973 Kg/s = 10,7161 ton/h.

➤ La densidad, al igual que todas las otras propiedades para el sulfato de aluminio fundido, se extraen de la tabla B.1 del apéndice B.

➤ Para determinar el área que ocupa el flujo en la sección transversal se realiza la siguiente figura muestra el diagrama esquemático de la “placa” aparente que forma el flujo de sulfato de aluminio fundido a su paso por las canaletas, cuyas dimensiones son

“L” y “b”. El área ocupada por el fluido es el área mojada que se muestra igualmente en la figura 5.20

La longitud de las canaletas se representa con “L”. Para determinar el ancho “b” de ésta placa, se utilizaron relaciones geométricas (Ecuación 5.12) y la Ecuación 4.2

$$S = \varphi \times r_1 \text{ (Ecuación 5.12); donde}$$

S = Perímetro de un sector circular [m]

φ = ángulo del sector circular [rad]

r_1 = radio del sector circular [m]

El Perímetro mojado P_m se obtuvo al efectuar la medición de la longitud de la huella que deja tras su paso, el sulfato de aluminio sobre las canaletas, en la cual, la presencia de material solidificado es mínima. Figura 5.21

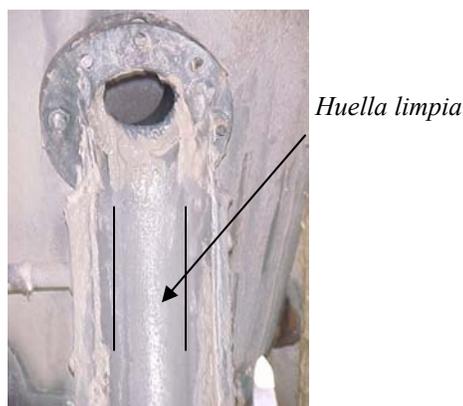


Figura N° 5.21 Detalle: “huella” que deja el producto sobre la Canaleta No.1

El área mojada, de acuerdo al esquema se puede calcular como el área del sector circular de ángulo “ θ ”, menos el área del triángulo (figura 5.22) de lados: “ r_1 ” y “b”; los resultados de los cálculos del área mojada para cada canaleta se reportan en la tabla 5.17

$$\text{sen}\left(\frac{\varphi}{2}\right) = \frac{b}{r_1} \Rightarrow b = 2 \times r_1 \times \text{sen}\left(\frac{\varphi}{2}\right) \text{ (Ecuación 5.14)}$$

$$A_m = \left(\frac{1}{2} \times r_1 \times S \right) - \left(\frac{1}{3} \times b \times h \right) \quad (\text{Ecuación 5.13})$$

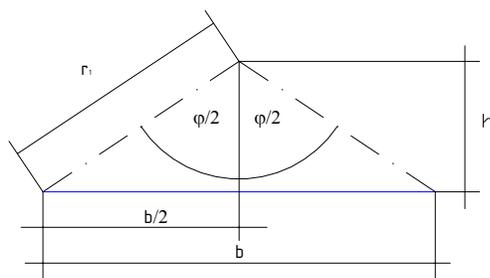


Figura N° 5.22. Detalle del triángulo

En la Tabla 5.17 se reportan los valores del área mojada y el área de la placa aparente entre el sulfato de aluminio fundido y el aire

	Canaleta No. 1	Canaleta No. 2	Canaleta No. 3
Aárea de la placa [m ²]	0,1284	0,0941	0,2049
Área mojada [m ²]	0,0015	0,0015	0,0017

Tabla N° 5.17. Valores del área mojada y área de la placa aparente en cada equipo

Sustituyendo en la ecuación 5.11, para cada equipo:

	Canaleta No. 1	Canaleta No. 2	Canaleta No. 3	Embudo
Va _∞ [m/s]	0,6974	0,6974	0,6153	0,8047

Tabla N° 5.18 Velocidad del aire relativo al sulfato de aluminio fundido.

Continuando con el cálculo del número de Reynolds, la viscosidad cinemática “ν” se evalúa a la temperatura Tf, y para ello se necesita Ts de la placa aparente del sulfato de aluminio.

Procedimiento de medición de Temperatura Superficial Ts del sulfato de aluminio fundido: Para obtener un promedio del valor de la temperatura superficial del sulfato de aluminio fundido (SATA-P) en cada equipo, se discretizaron las canaletas en secciones

transversales y puntos longitudinales. En el embudo se efectuaron mediciones a la salida del mismo. Los puntos de medición sobre las canaletas se muestran a continuación:

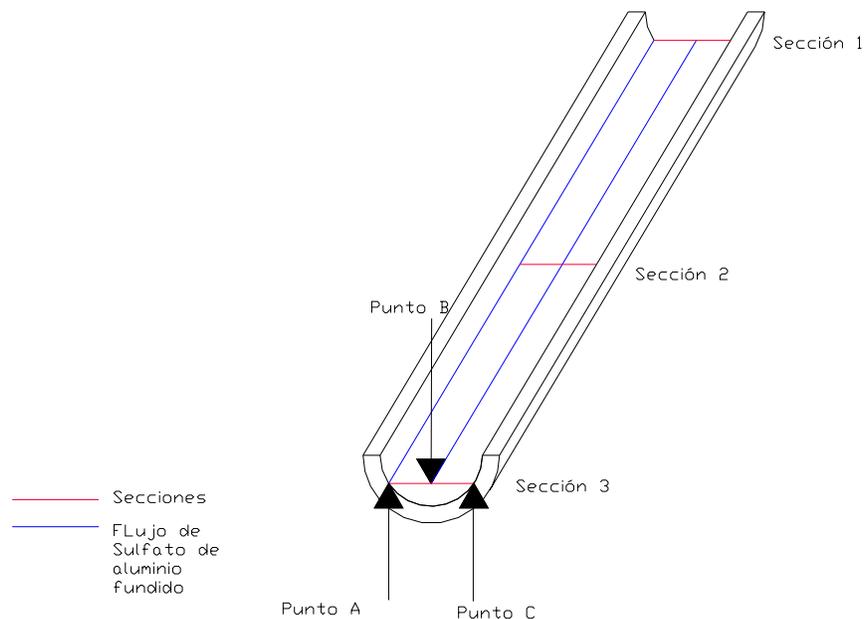


Figura N° 5.23 Diagrama indicativo de la canaleta discretizada: Medición de temperatura del sulfato de aluminio fundido

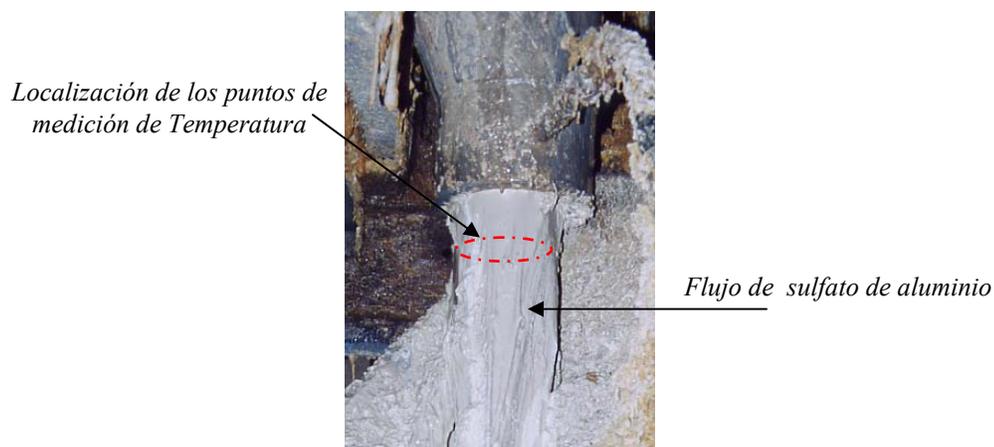


Figura N° 5.24 Detalle de salida del embudo.

Los resultados se indican a continuación en el formato de medición:

		Punto N°	T. del producto Medición No. 2 (Caldera SG-1)				T. del Producto Medición No. 1 (Caldera SG-2)					
			1	2	3	Promedio por sección	1	2	3	Promedio por sección		
Canaleta N° 1-C1	SATA-P	Secciones	A	86,00	87,90	85,00	86,30	85,00	87,00	84,80	85,60	Promedio de la T del producto sobre C1
			B	90,00	91,20	89,00	90,07	85,60	88,60	85,80	86,67	
			C	85,60	88,00	86,50	86,70	85,00	87,00	86,00	86,00	
			Promedio por punto	87,20	89,03	86,83	87,69	85,20	87,53	85,53	86,09	
Canaleta N° 2-C2	SATA-P	Secciones	A	83,20	85,00	83,00	83,73	85,00	88,00	86,00	86,33	Promedio de la T del producto sobre C2
			B	87,60	90,00	88,00	88,53	87,00	89,00	86,00	87,33	
			C	85,50	87,00	85,00	85,83	84,00	85,00	83,00	84,00	
			Promedio por punto	85,43	87,33	85,33	86,03	85,33	87,33	85,00	85,89	
Canaleta N° 3-C3	SATA-P	Secciones	A	86,67	89,50	87,30	87,82	86,00	88,00	87,00	87,00	Promedio de la T del producto sobre C3
			B	88,00	92,23	88,60	89,61	88,70	91,00	88,00	89,23	
			C	88,00	89,00	88,20	88,40	85,00	88,00	86,50	86,50	
			Promedio por punto	87,56	90,24	88,03	88,61	86,57	89,00	87,17	87,58	
Embudo	SATA-P	Salida	91,00	90,00	88,00	89,67						

Los valores de estas celdas, representan la Temperatura promedio total de la medición.

Tabla N° 5.19 Formato de medición: Temperatura superficial del sulfato de aluminio fundido en los equipos del Sistema "A".

De acuerdo a los resultados anteriores, el cálculo del Número de Reynolds, se reporta para cada equipo en la tabla 5.20. Se observa que todos los valores presentan el mismo orden del magnitud, $Re < 10^5$.

	Canaleta No. 1	Canaleta No. 2	Canaleta No. 3	Embudo
Re_L	5,76E+04	4,15E+04	7,80E+04	5,22E+04

Tabla N° 5.20 Número de Reynolds del aire

De aquí se sigue que la correlación a utilizar para calcular el Número de Nusselt local para éste régimen de flujo es:

$$\overline{Nu}_L = 2Nu_{x=L} = 0,664 Re_L^{1/2} Pr^{1/3} \text{ (Ecuación 5.14); cuya restricción}$$

$$Re_L < 5 \times 10^5, Tp = const, \text{ se cumple.}$$

En la tabla siguiente tabla No. 5.21, se muestra el resultado general del cálculo de q_{conv2} , luego de sustituir los valores en las ecuaciones 4.3, 5.9 y 5.14:

	Canaleta No. 1	Canaleta No. 2	Canaleta No. 3	Embudo
Nu_L	141,29	119,87	164,09	135,43
h [W/m ² K]	2,58	3,04	1,96	3,11E-03
q_{conv2} [W]	18,88	16,02	20,87	1,27E-02

Tabla N° 5.21 flujo de calor convectado por el sulfato de aluminio fundido

II) Cálculo de q_{rad} :

a) Cálculo de q_{rad1} :

Para conocer el calor perdido por radiación, y de acuerdo a la ecuación 4.3, es necesario determinar

- La emisividad térmica del material “ε”, obtenido de Tabla A.10. [9].
- Área de radiación (Tabla 5.13)
- Temperatura de la superficie T_s (Tabla 5.19)
- $T_{alr} =$ Ambiente

La tabla 5.22 reporta los valores del calor perdido por radiación q_{rad1} por la superficie de los equipos:

	canaleta No. 1	canaleta No. 2	canaleta No. 3
q_{rad1} [W]	17,7768	36,0950	13,1359

Tabla N° 5.22 Flujo de calor por radiación perdido por la superficie del equipo

b) Cálculo de q_{rad2} :

Siguiendo el mismo procedimiento que para q_{rad1} , se debe conocer, la emisividad térmica del material “ ϵ ”, obtenida análogamente de la literatura convencional, con respecto a otras sustancias d las mismas características y a la misma temperatura.

	Canaleta No. 1	Canaleta No. 2	Canaleta No. 3	Embudo
ϵ	0,40	0,40	0,40	0,40
Talr [°C]	30,00	30,00	30,00	30,00
q_{rad2} [W]	20,03	17,49	39,81	13,74

Tabla N° 5.23 Flujo de calor por radiación cedido por el sulfato de aluminio fundido

III) Cálculo de q_a :

Sustituyendo en la ecuación 5.3, se obtiene el calor aprovechado por el sulfato de aluminio:

	Canaleta No.1	Canaleta No.2	Canaleta No.3
q_a [W]	12,16	22,11	8,21

Tabla N° 5.24 flujo de calor transferido al sulfato de aluminio

IV) Cálculo de q_{sf} :

Sustituyendo en la ecuación 5.4, se obtiene el calor perdido por el sulfato de aluminio;

	Canaleta No.1	Canaleta No.2	Canaleta No.3	Embudo
q_{sf}	38,91	33,51	39,81	13,75

Tabla N° 5.25 Flujo de calor cedido por el sulfato de aluminio fundido

5.2.3.3 Variación de la temperatura en el sulfato de aluminio fundido por efecto del calor perdido

Finalmente, para cuantificar la influencia de q_s en el producto, se comparará con su calor sensible (ecuación 5.15), y el valor de ΔT ó variación de temperatura reflejará la incidencia de ésta pérdida neta en el sulfato fundido.

$$\dot{q}_{sf} \text{ neto} = \dot{m}_{sf} \times C_{p_{sa@T_{msf}}} \times \Delta T \text{ (Ecuación 5.15); donde}$$

$$\dot{q}_{sf} \text{ neto} = q_{sf} - q_a$$

\dot{m}_s = flujo másico del sulfato de aluminio fundido manejado por el equipo (canaletas ó embudo) [Kg/s]

$C_{p_{sa@T_{msf}}}$: C_p = calor específico del sulfato de aluminio fundido [J/Kg. K] (Tabla B.1, apéndice B)

$$T_{msf} = \text{temperatura media del sulfato de aluminio fundido} = (T_p + T_s) / 2$$

T_p temperatura de pared [°C] y T_s = Temperatura de superficie del sulfato;

	Canaleta No. 1	Canaleta No.2	Canaleta No.3	Embudo
ΔT	1,133E-02	4,840E-03	1,340E-02	5,840E-03

Tabla 5.26 Variación de la Temperatura del sulfato de aluminio fundido por efecto del calor perdido

5.2.4 Evaluación del proceso de enfriamiento del sulfato de aluminio solidificado.

Se realizó la evaluación del proceso de transferencia de calor que ocurre en la sección de enfriamiento entre los trozos de sulfato de aluminio y el aire que suministran los difusores, con el fin de determinar cuales propiedades, tanto del sulfato como del aire, pueden variarse para mejorar la transferencia de calor y por consiguiente aumentar el enfriamiento de los trozos de sulfato. La evaluación se realizó mediante un balance de energía, ya que el calor que cede el sulfato al ambiente (energía interna) debe ser equivalente al calor que pierde por convección, radiación y conducción, como se muestra en la siguiente figura:

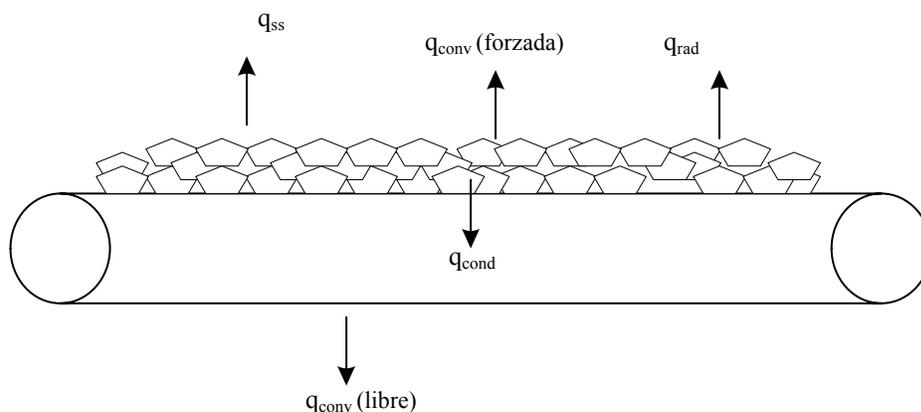


Figura N° 5.25 Esquema indicativo del balance energético: sección “Enfriamiento”.

$$q_{ss} = q_{conv} + q_{rad} + q_{cond} \quad (\text{Ecuación 5.16}) \text{ donde:}$$

q_{ss} = Calor cedido por el sulfato de aluminio. [W]

q_{conv} = Flujo de calor por convección. [W]

q_{rad} = Flujo de calor por radiación. [W]

q_{cond} = Flujo de calor por conducción. [W]

Para poder realizar la evaluación se necesita conocer ciertas propiedades tanto del aire: temperatura, velocidad, densidad, viscosidad, número de Prandtl, como del sulfato: temperatura, calor específico, conductividad térmica, etc., algunas de estas propiedades

se obtuvieron por medición como la velocidad y temperatura del aire, y la temperatura de los trozos de sulfato de aluminio que se encuentran sobre las cintas de enfriamiento. La evaluación se realizó para todos los difusores que forman parte del sistema de ventilación. Los difusores se encuentran por pares sobre las cintas de enfriamiento, es decir, que cada cinta tiene 6 pares de difusores, pero para efectos de cálculos cada par de difusores se tomo como uno solo.

Los equipos que forman parte de la sección de enfriamiento del sulfato de aluminio se muestran en la siguiente figura:

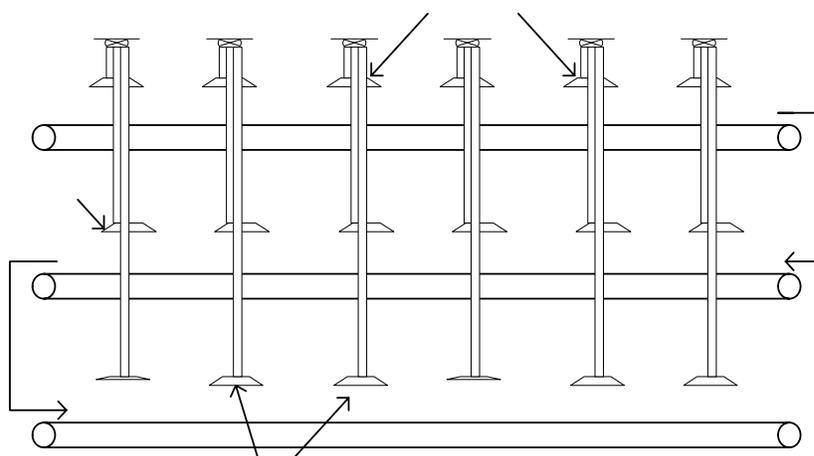


Figura N° 5.26 Equipos que intervienen en el proceso de enfriamiento del sulfato de aluminio solidificado.

Los procedimientos utilizados para obtener los valores de las propiedades que debieron ser medidas se describen a continuación.

5.2.4.1 Procedimiento para obtener los valores de velocidad y temperatura del aire:

Para realizar estas mediciones se utilizo un termo-anemómetro digital el cual permite obtener, además de los valores de velocidad y temperatura del aire, los valores

de humedad relativa y punto de rocío. El procedimiento que se utilizó para obtener los valores de temperatura y velocidad del aire fue el siguiente:

- 1) Seleccionar las zonas del ducto donde se abrieron los orificios a través de los cuales se introdujo el termo-anemómetro para realizar las mediciones. Las zonas seleccionadas fueron la parte inferior de los tramos rectangulares del ducto, la que se encuentra justo antes del codo que sostiene al difusor. Estas zonas fueron seleccionadas debido a su forma rectangular, ya que el termo-anemómetro permite obtener valores más exactos en áreas que presentan esa forma.

Otro aspecto que influyó en la selección fue la poca distancia que hay entre la zona de medición y la salida del difusor, ya que los valores de velocidad del aire que se requieren para la evaluación del proceso de transferencia de calor son los medidos a la salida del difusor. La velocidad del aire a la salida del difusor se calculó a partir de la medida en la sección del ducto aplicando la ecuación de continuidad.

- 2) Limpiar la zona seleccionada y abrir orificios de forma rectangular de 7,5 cm. de ancho x 2,5 cm. de alto. Las medidas de los orificios se determinaron tomando en cuenta las dimensiones físicas del termo-anemómetro (ancho y alto), de forma que al introducir el instrumento abarcara casi en su totalidad todo el orificio.
- 3) El pequeño juego que se dejó entre el orificio y el instrumento se cubrió con laminillas de polipropileno (hechas de los sacos donde se guarda el producto final) para hacer más hermética la zona de medición, evitando así la fuga de aire y por consiguiente garantizando mayor exactitud en la medición tomada. Los orificios se abrieron para los 6 difusores (2 superiores, 2 intermedios y 2 inferiores) de cada uno de los 6 ductos que forman parte del sistema de ventilación.
- 4) Se selecciona un ducto para comenzar la medición y se introduce el termo-anemómetro en uno de sus orificios. El instrumento se introduce lo suficiente

para que la medición se realice en el centro de la sección rectangular, esto porque la mayor cantidad de aire circula por esa zona, y se mantiene dentro del orificio por un tiempo aproximado de cinco segundos. Los valores de temperatura y velocidad se mantienen grabados en la pantalla del termo-anemómetro por un corto tiempo lo que permite retirar el equipo del orificio y visualizar dichos valores.

- 5) Luego en un formato como el que se muestra en la figura 5.26 se indican estos valores y se repite así sucesivamente el procedimiento con los demás orificios del ducto hasta llenar el formato.

Figura N° 5.27 Formato para la medición de velocidades del aire

Las mediciones de temperatura y velocidad se repitieron dos veces para cada difusor y se tomo el promedio de los dos valores para la parte de la evaluación que se describe más adelante. Para el momento en que se realizaron las mediciones el ventilador del ducto k-10A no se encontraba en operación ya que este iba a ser cambiado por uno nuevo, por lo que no se pudo obtener ninguna información referente a la velocidad y

temperatura del aire que circula por este ducto y en consecuencia tampoco se pudo realizar su evaluación del proceso de transferencia de calor.

Los valores de velocidad y temperatura del aire que se obtuvieron en este procedimiento para cada uno de los ductos se presentan en la siguiente tabla:

Ducto	Difusor	V ₁ [m/s]	V ₂ [m/s]	V _{prom} [m/s]	T ₁ [°C]	T ₂ [°C]	T _{prom} [°C]
K-10B derecho	Superior	4	3,5	3,75	32,7	33,8	33,25
	Intermedio	9,7	9,6	9,65	32,7	33,1	32,9
	Inferior	3,4	2,9	3,15	32,7	32,8	32,75
K-10B izquierdo	Superior	6,8	5,9	6,35	33,5	32,8	33,15
	Intermedio	3,3	3	3,15	33,3	33,3	33,3
	Inferior	2,9	2,5	2,7	33,8	33,3	33,55
K-10C derecho	Superior	4,3	4	4,15	31,8	32,1	31,95
	Intermedio	2,4	3,1	2,75	31,4	31,4	31,4
	Inferior	8	8,3	8,15	30,6	31	30,8
K-10C izquierdo	Superior	5,8	5,8	5,8	31,2	32,5	31,85
	Intermedio	3	3,4	3,2	32,5	32,6	32,55
	Inferior	6,8	6,8	6,8	32,6	32,4	32,5
K-10D derecho	Superior	5	4,2	4,6	31,9	32,8	32,35
	Intermedio	4,7	3,9	4,3	31	30,9	30,95
	Inferior	3,8	3,9	3,85	31,2	31	31,1
K-10D izquierdo	Superior	5,3	6	5,65	30,6	30,6	30,6
	Intermedio	2,6	2,6	2,6	32,4	32,6	32,5
	Inferior	6,3	6,2	6,25	31,9	31,6	31,75
K-10E derecho	Superior	4,8	4,9	4,85	31,6	31,7	31,65
	Intermedio	0,9	0,5	0,7	32,2	32,8	32,5
	Inferior	5,1	4,3	4,7	31,8	31,6	31,7
K-10E izquierdo	Superior	4,8	5,8	5,3	30,8	30,5	30,65
	Intermedio	2,1	2,1	2,1	32,6	31,8	32,2
	Inferior	9	9,2	9,1	31,2	31,3	31,25
K-10F derecho	Superior	3,4	3,9	3,65	31	31,5	31,25
	Intermedio	5,8	5,5	5,65	30,8	30,8	30,8
	Inferior	3,2	3,9	3,55	31,1	31,3	31,2
K-10F izquierdo	Superior	4,5	4,5	4,5	31,1	31,1	31,1
	Intermedio	4,9	5	4,95	31,3	30,8	31,05
	Inferior	5,2	5,2	5,2	31,6	31,5	31,55

Tabla N° 5.27 Velocidad y temperatura del aire que circula por los ductos

5.2.4.2 Cálculo de la velocidad del aire a la salida de los difusores.

Como se menciono en el punto anterior la velocidad requerida para poder realizar la evaluación de la transferencia de calor es a la salida de los difusores (figura 5.19), para obtener estos valores se aplico la ecuación de continuidad utilizando las velocidades del aire obtenidas en la zona de medición (figura 5.18).

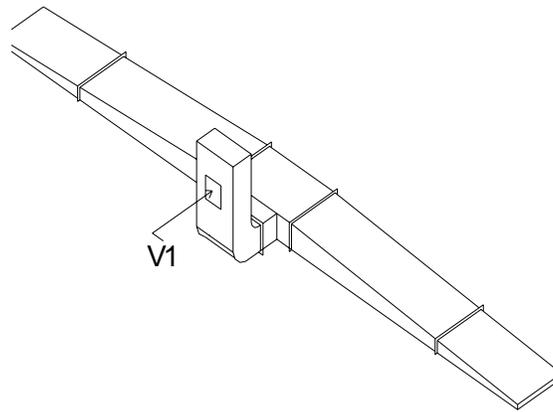


Figura N° 5.28 Vista axonométrica del difusor. Velocidad en la zona de medición (V_1)

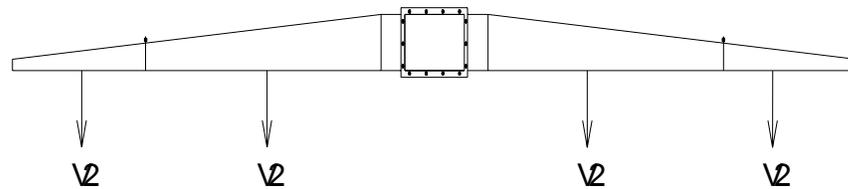


Figura N° 5.29 Vista frontal del difusor. Velocidad a la salida del difusor (V_2)

Como los difusores se encuentran por pares sobre las cintas de enfriamiento se tomo el promedio de las velocidades a la salida de ellos.

Utilizando la ecuación de continuidad tenemos:

$$\rho \times V_1 \times A_1 = \rho \times V_2 \times A_2 \quad (\text{Ecuación 5.16})$$

Despejando V_2 :
$$V_{2\text{ aire}} = \frac{V_{1\text{ aire}} \times A_1}{A_2}$$

Donde:

$V_{1\text{ aire}}$ = Velocidad en la zona de medición. (Promedio de las velocidades de cada lado del ducto).

$V_{2\text{ aire}}$ = Velocidad a la salida del difusor. (Promedio de las velocidades a la salida de los dos difusores).

A_1 = Área de la zona de medición.

A_2 = Área de salida del aire en los difusores.

Se realiza un cálculo tipo para un par de difusores cualquiera. Tomamos los difusores superiores del ducto K-10B.

Velocidad en la zona de medición para cada lado del ducto:

$$V_{1\text{ der}} = 3,75 \text{ m/s} , \quad V_{1\text{ izq}} = 6,35 \text{ m/s}$$

$$V_{1\text{ aire}} = \frac{V_{1\text{ der}} + V_{1\text{ izq}}}{2} \quad V_{1\text{ aire}} = \frac{(3,75 + 6,35) \text{ m/s}}{2} \quad V_{1\text{ aire}} = 5,05 \text{ m/s}$$

$$A_1 = 0,25 \text{ m} \times 0,5 \text{ m}$$

$$A_1 = 0,125 \text{ m}^2$$

La salida del difusor esta formada por 64 láminas y el aire sale por la separación que hay entre cada lámina (5mm), por lo tanto el área efectiva de salida del aire es el área de separación entre cada lámina multiplicado por el número de separaciones que hay en el difusor (62).

$$A_2 = 0,005 \text{ m} \times 0,6 \text{ m} \times 62 \quad A_2 = 0,186 \text{ m}^2$$

Como son dos difusores tenemos:

$$A_1 = 0,125 \text{ m}^2 \times 2$$

$$A_1 = 0,25 \text{ m}^2$$

$$A_2 = 0,186 \text{ m}^2 \times 2$$

$$A_2 = 0,372 \text{ m}^2$$

$$V_{2 \text{ aire}} = \frac{5,05 \text{ m/s} \times 0,25 \text{ m}^2}{0,372 \text{ m}^2}$$

$$V_{2 \text{ aire}} = 3,39 \text{ m/s}$$

Los resultados de los demás cálculos para los otros difusores se presentan en la siguiente tabla:

Ducto	Difusor	$V_{1 \text{ der}}$ [m/s]	$V_{1 \text{ izq}}$ [m/s]	$V_{1 \text{ aire (prom)}}$ [m/s]	$V_{2 \text{ aire}}$ [m/s]
K-10B	Superior	3,75	6,35	5,05	3,39
	Intermedio	9,65	3,15	6,40	4,30
	Inferior	3,15	2,70	2,93	1,97
K-10C	Superior	4,15	5,80	4,98	3,34
	Intermedio	2,75	3,20	2,98	2,00
	Inferior	8,15	6,80	7,48	5,02
K-10D	Superior	4,60	5,65	5,13	3,44
	Intermedio	4,30	2,60	3,45	2,32
	Inferior	3,85	6,25	5,05	3,39
K-10E	Superior	4,85	5,30	5,08	3,41
	Intermedio	0,70	2,10	1,40	0,94
	Inferior	4,70	9,10	6,90	4,64
K-10F	Superior	3,65	4,50	4,08	2,74
	Intermedio	5,65	4,95	5,30	3,56
	Inferior	3,55	5,20	4,38	2,94

Tabla N° 5.28 Velocidad del aire a la salida de los difusores

5.2.4.3 Procedimiento para obtener los valores de temperatura del sulfato de aluminio en las cintas de enfriamiento:

Para realizar estas mediciones se utilizó un pirómetro de radiación marca “Raytek”, de apreciación 0,01 °C. Este instrumento tiene forma parecida a la de una pistola y para medir temperaturas se apunta con ella a una zona en específico donde emite una luz que abarca un rango determinado de dicha zona. El instrumento tiene una pantalla digital que permite observar varias opciones al momento de obtener los valores de temperatura como: temperatura máxima o mínima de la zona medida, temperatura promedio de dicha zona, etc. En el presente trabajo los valores utilizados fueron los de temperatura promedio.

Al momento de realizar la medición el termómetro tiene una opción que permite variar su emisividad dependiendo del material al cual se le quiera medir su temperatura. El procedimiento realizado fue el siguiente:

Seleccionar las zonas de medición. Las mediciones de temperatura se hicieron al sulfato de aluminio solidificado que se desplaza sobre las cintas de enfriamiento, por lo tanto la temperatura se media antes que el sulfato pasara por debajo del par de difusores (zona previa a la ventilación) (figura 5.31), esto se hizo para cada par de difusores superiores, intermedios e inferiores de cada uno de los 6 ductos de ventilación.

Debido a que los datos de temperatura y velocidad del aire que se obtuvieron en el procedimiento anterior eran para cada difusor de manera individual, se decidió tomar la temperatura del sulfato en estas zonas y no solo al principio y al final de cada cinta de enfriamiento, para poder hacer la evaluación de la transferencia de calor en cada difusor por separado y obtener resultados más confiables al final de dicha evaluación.

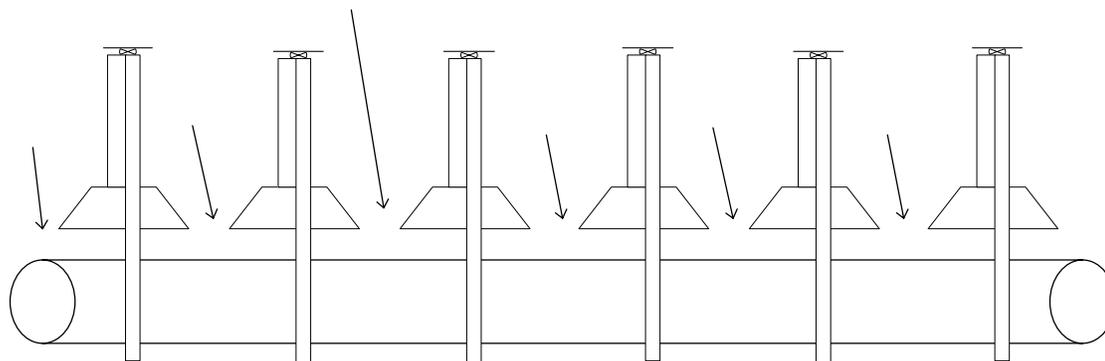


Figura 5.30 Zonas de medición de temperatura del sulfato de aluminio solidificado.

Debido a que las cintas de enfriamiento son bastante anchas se tomaron tres medidas de temperatura en la zona previa a cada difusor, en el centro de la cinta y en ambos extremos. El valor de temperatura del sulfato que se utilizó en la evaluación fue el promedio de estas tres medidas. La emisividad que se utilizó para realizar las mediciones fue de 0,98; ésta de acuerdo a la tabla de emisividades que suministra el fabricante del instrumento para cada material a ser medido, en este caso sulfato de aluminio. Los valores de temperatura que se obtuvieron por el procedimiento anterior se presentan en la tabla siguiente:

Cinta de enfriamiento		Ductos					
		K-10A	K-10B	K-10C	K-10D	K-10E	K-10F
X-11A Difusores superiores	T ₁ [°C]	64	67	70	73	77	81
	T ₂ [°C]	64	67	69	74	77	80
	T ₃ [°C]	65	67	71	72	75	79
	T _{prom.} [°C]	64,333	67	70	73	76,333	80
X-11B Difusores intermedios	T ₁ [°C]	66	63	62	59	58	56
	T ₂ [°C]	69	65	62	60	59	56
	T ₃ [°C]	66	64	63	61	60	58
	T _{prom.} [°C]	67	64	62,333	60	59	56,667
X-11C Difusores inferiores	T ₁ [°C]	46	47	50	52	55	59
	T ₂ [°C]	47	49	52	55	58	59
	T ₃ [°C]	46	48	51	53	56	59
	T _{prom.} [°C]	46,333	48	51	53,333	56,333	59

Tabla N° 5.29 Temperatura del sulfato de aluminio en las cintas de enfriamiento

5.2.4.4 Cálculo del calor transferido en el proceso de enfriamiento.

Para estudiar el proceso de enfriamiento del sulfato de aluminio solidificado es necesario evaluar los procesos de transferencia de calor que intervienen en el mismo. Esta evaluación permite conocer cuales propiedades, tanto del sulfato de aluminio como del aire, pueden variarse para obtener mejoras en el proceso de enfriamiento.

La pérdida de calor del sulfato de aluminio se da por los tres procesos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación, por lo tanto se puede decir que:

$$q_{ss} = q_{conv} + q_{rad} + q_{cond}$$

La evaluación se realizó para cada par de difusores por separado, por lo tanto se seleccionan un par de difusores cualquiera para hacer el cálculo tipo de la evaluación, en este caso tomamos los difusores que se encuentran al inicio de la cinta de enfriamiento 1 (X-11A).

Ducto K-10F: (Difusores Superiores)

Se calcula el calor cedido por el sulfato de aluminio:

$$q_{ss} = \dot{m}_s \times Cp \times (T_e - T_s) \quad \text{donde:}$$

\dot{m}_s = Flujo másico de sulfato de aluminio. [kg/s]

Cp = Calor específico del sulfato de aluminio. [J/kgK]

T_e = Temperatura del sulfato de aluminio antes de pasar por debajo del difusor.
[K]

T_s = Temperatura del sulfato de aluminio después de pasar por debajo del difusor. [K]

$$\dot{m}_s = 3,18 \text{ kg/s} \quad C_p = 1480,4 \text{ J/kgK} \quad T_e = 353,15 \text{ K} \quad T_s = 349,48 \text{ K}$$

Sustituimos en la ecuación:

$$q = 3,18 \text{ kg/s} \times 1480,4 \text{ J/kgK} \times (353,15 - 349,48) \text{ K}$$

$$q_{ss} = 21984,83 \text{ w}$$

Se calcula el calor por convección:

$$q_{\text{conv}} = h \times A \times (T_{\text{sup}} - T_{\infty}) \quad \text{donde:}$$

h = Coeficiente de convección. [W/m²K]

A = Área de transferencia de calor. [m²]

T_{sup} = Temperatura superficial del sulfato. [K]

T_{∞} = Temperatura del aire. [K]

Se calcula h a partir de la siguiente correlación empírica:

$$N_u = \frac{h \times D}{K} = c \times R_e^m \times P_r^{1/3}$$

Despejando h tenemos:

$$h = \frac{c \times R_e^m \times P_r^{1/3} \times k}{D} \quad \text{donde:}$$

c y m = Constantes obtenidas de la tabla 7.3 [9].

R_e = Número de Reynolds.

P_r = Número de Prandtl.

k = Conductividad térmica del aire. [W/mK]

D = Longitud característica [m], obtenida de la tabla 7.3 [9]

Las propiedades para el cálculo de h y Re se evalúan a la temperatura de película (T_f), donde:

$$T_f = \frac{T_{\text{sup}} + T_{\infty}}{2}$$

$$T_{\text{sup}} = \frac{T_e + T_s}{2} \quad T_{\text{sup}} = \frac{(353,15 + 348,48)K}{2} \quad T_{\text{sup}} = 350,815K$$

Sustituimos en T_f :

$$T_f = \frac{(350,815 + 303,15)K}{2} \quad T_f = 326,98K$$

Se buscan las propiedades a T_f en la Tabla A.4:

$$\nu = 18,6 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \quad k = 28,3 \times 10^{-3} \text{ W/mK} \quad Pr = 0,703$$

Se calcula Re :

$$Re = \frac{V \times D}{\nu} \quad \text{donde:}$$

V = Velocidad del aire a la salida de los difusores [m/s]

D = Longitud característica [m]

ν = Viscosidad cinemática [m^2/s]

$$Re = \frac{2,74 \text{ m/s} \times 1,2 \text{ m}}{18,6 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} \quad Re = 176774,19$$

Se calcula h:

$$h = \frac{0,228 \times (176774,19)^{0,731} (0,703)^{1/3} \times 28,3 \cdot 10^{-3} \text{ W/mK}}{1,2 \text{ m}} \quad h = 32,76 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Finalmente calculamos q_{conv} :

$$q_{\text{conv}} = 32,76 \text{ W/m}^2\text{K} \times 8,4 \text{ m}^2 \times (350,815 - 303,15) \text{ K}$$

$$q_{\text{conv}} = 13166,65 \text{ W}$$

Se calcula el calor por radiación:

$$q_{\text{rad}} = \varepsilon \times A \times \sigma \times (T_{\text{sup}}^4 - T_{\text{alr}}^4) \quad \text{donde:}$$

ε = Emisividad térmica del sulfato de aluminio.

σ = Constante de proporcionalidad. [$\text{W/m}^2\text{K}^4$]

T_{alrd} = Temperatura de los alrededores. [K]

$$q_{\text{rad}} = 0,4 \times 8,4 \text{ m}^2 \times 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4 \times ((350,815)^4 - (303,15)^4) \text{ K}$$

$$q_{\text{rad}} = 1250,21 \text{ W}$$

Por último se calcula el calor por conducción. El calor que se conduce a través de la cinta de enfriamiento es igual al calor que se convecta por debajo de dicha cinta, este calor se da por convección libre. Por lo tanto tenemos:

$$q_{\text{rad}} = q_{\text{conv}} = h \times A \times (T_{\text{sup}} - T_{\infty})$$

Se calcula h a partir de la siguiente correlación empírica usada para convección libre:

$$Nu_L = \frac{h \times L}{k} = 0,27 \times Ra_L^{1/4}$$

Despejando h tenemos:

$$h = \frac{(0,27) \times Ra_L^{1/4} \times k}{L} \quad \text{donde:}$$

Ra_L = Número de Rayleigh.

L = Longitud característica. [m]

Las propiedades para el cálculo de h y Ra_L se evalúan a la temperatura de película (T_f), donde:

$$T_f = \frac{T_{\text{sup}} + T_{\infty}}{2} \quad T_f = \frac{(346,15 + 303,15)K}{2} \quad T_f = 324,65 K$$

Se buscan las propiedades a T_f en la Tabla A.4:

$$\nu = 18,37 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \quad k = 28,3 \times 10^{-3} \text{ W/mK} \quad \alpha = 26,15 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Se calcula Ra_L :

$$Ra_L = Gr \times Pr = \frac{g \times \beta \times \Delta T \times L^3}{\nu \times \alpha} \quad \text{donde:}$$

g = Aceleración de gravedad. [m/s^2]

β = Coeficiente de expansión (1/K). [K^{-1}]

ΔT = Diferencia entre la temperatura superficial y la temperatura del aire. [K]

α = Difusividad térmica. [m^2/s]

$$Ra_L = \frac{9,81 \frac{m}{s^2} \times \left(\frac{1}{324,15K}\right) \times (346,15 - 303,15)K \times \left(1,2 \frac{m}{2}\right)}{18,37 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s} \times 26,15 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s}}$$

$$Ra_L = 5,84 \times 10^8$$

Se calcula h (convección libre):

$$h = \frac{0,27 \times \left(5,66 \cdot 10^8\right)^{1/4} \times 28,12 \cdot 10^{-3} \frac{W}{mK}}{\left(1,2 \frac{m}{2}\right)}$$

$$h = 1,97 \frac{W}{m^2K}$$

Por ultimo se calcula q_{conv} :

$$q_{conv} = 1,97 \frac{W}{m^2K} \times 8,4 m^2 \times (346,15 - 303,15)K$$

$$q_{conv} = 710,72 W$$

$$q_{ss} = q_{conv} + q_{rad} + q_{cond}$$

$$17277,17 W \approx 12680,68 W + 1250,21 W + 710,72 W$$

$$17277,17 W \approx 14641,61 W$$

Los resultados de los cálculos hechos a los otros difusores se presentan en la tabla siguiente:

Difusores	Ductos	q_{cedido} [w]	q_{conv} [w]	q_{rad} [w]	q_{cond} [w]
Superiores	K-10F	17277,16	12680,68	1250,21	710,72
	K-10E	15676,55	13785,17	1136,28	650,19
	K-10D	14123,02	12873,49	1036,17	610,39
	K-10C	14123,02	11667,25	943,79	610,39
	K-10B	12569,48	10901,23	858,70	551,55
Intermedios	K-10B	14123,02	12908,74	853,82	512,94
	K-10C	7861,81	6874,63	785,42	456,01
	K-10D	10968,88	7181,53	727,96	456,01
	K-10E	4707,67	3502,86	680,90	418,75
	K-10F	10968,88	8721,81	634,55	382,09
Inferiores	K-10F	12569,48	7534,39	629,85	328,31
	K-10E	14123,02	9376,33	552,64	310,72
	K-10D	10968,88	6597,65	481,86	276,12
	K-10C	14123,02	7645,29	412,79	242,30
	K-10B	7861,81	3350,13	353,67	225,71

Tabla N° 5.30 Comparación de los flujos de calor del sulfato de aluminio

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y PROPUESTAS DE MEJORAS

6.1 Análisis de resultados: Sistema A

Cristalización prematura del sulfato de aluminio fundido: En la búsqueda por dar respuesta al fenómeno de la cristalización que ocurre sobre las canaletas, se encontró que existe una analogía entre el comportamiento de la curva de enfriamiento del sulfato de aluminio fundido (Figura A.1, apéndice A) y la curva de enfriamiento de un metal puro (figura 4.1), para el cual existe una zona de descenso de temperatura, una zona de subenfriamiento, y se muestra la temperatura de solidificación. Es por ello, que, tomando lo anterior como base, se puede decir que la cristalización sobre las canaletas se inicia en la porción de líquido que solidifica y luego se adhiere a las paredes (nucleación), actuando luego estos como puntos que propician la cristalización a los cuales se van adhiriendo los puntos locales más fríos hasta crecer y formar depósitos de material solidificado.

De acuerdo a los resultados de la inspección y la evaluación, pueden determinarse los factores influyentes en el problema de cristalización prematura y salpique del material:

➤ El calor que genera el vapor se pierde casi en su totalidad por efectos la transferencia de calor por convección y radiación con los alrededores, por lo que el calor aprovechado por el sulfato es casi insignificante.

➤ La sección semi circular de los canales, favorece a la aparición de zonas mas frías en los extremos que como se mencionó anteriormente, son las condiciones apropiadas para iniciar la solidificación ó cristalización de sulfato de aluminio fundido en estas zonas, de hecho, se observa que la tendencia del producto, es a crear a partir de estos puntos, semi-conchas de material solidificado para mantenerse alejado de choques térmicos en este caso, el contacto con el aire. (figura 6.1)

Figura N° 6.1 Puntos de enfriamiento en la sección transversal de las Canaletas

➤ Se pudo determinar, que la porción del área transversal de la canaletas que ocupa el fluido, es del 30% en el mayor de los casos, dejando así espacio físico en las paredes, que propicia la adhesión o crecimiento de depósitos de material cristalizado, por lo que puede decirse, que crecen como producto de una nucleación heterogénea.

➤ Las canaletas de conducción del sulfato están expuestas al medio ambiente, esto es desfavorable, ya que se observó como la principal causa del salpique hacia equipos y zonas aledañas.

➤ El caudal másico manejado por los equipos se encuentra por encima de los valores originales de diseño: 11,45 ton/h (tabla 5.20) frente a 7,4 to/h (tabla 5.9): Esto representa una sobrecarga en la producción del 54,73% para lo cual el diseño original del proceso no ha sufrido cambio alguno.

➤ La limpieza de la mezcladora es otro factor determinante entre las causas de la salpicadura; los restos de producto y agua hacia zonas aledañas, caen mayormente sobre el piso y tuberías de vapor, el resto, sigue fluye por los canales.

➤ Se aprecia una variación de presión de gran magnitud de los valores medidos a la salida de la caldera y los medido en las entradas de los equipos (tabla 5.11), ésta diferencia sea posiblemente por problemas de obstrucción de tuberías, por lo que las propiedades del vapor que llega a los equipos se vé afectado.

➤ Carencia de un control riguroso del polvillo inoculante entrante a la mezcladora que origina la aceleración del proceso de cristalización: esta operación se realiza a juicio del operador de la sección de “vacío, mezcla y cristalización”

➤ Deterioro general: fugas de vapor desde los equipos y mal estado en general (canaletas dobladas, desniveladas, etc.)

➤ La carencia de instrumentación se traduce en desconocimiento de las condiciones y propiedades del vapor en las entradas y tuberías de suministro a los equipos.

➤ La lámina de metal de la brida de salida No.1 secciona la salida del fluido y definitivamente esto influye sobre el salpique, aumentando sus posibilidades de ocurrencia; esto es fácilmente comprobable ya que la canaleta No. 1 está siempre más sucia que la Canaleta No.2 y ambas están bajo las mismas condiciones de trabajo.

➤ La temperatura superficial del sulfato de aluminio fundido, se encuentra por debajo de su temperatura de cristalización, por lo tanto, si no se aumenta la temperatura del sulfato, de forma tal que su temperatura superficial (la cual es la mas sensible a

disminuir por no ocupar plenamente el área que contiene al sulfato fundido), supere al valor de la temperatura de cristalización, el riesgo de que el producto solidifique seguirá presente:

De acuerdo a la ecuación de calor sensible:

$$\dot{Q}_{sf} = \dot{m}_{sf} \times C_{p_{sa@T_{msf}}} \times \Delta T \quad (\text{Ecuación 5.15})$$

Sustituyendo en la ecuación anterior, donde es conocido el caudal másico de sulfato de aluminio fundido \dot{m}_{sf} (tabla 5.16), y el calor específico $C_{p_{sa}}$ (tabla B.1, apéndice B), el calor requerido para elevar un 1° al sulfato de aluminio fundido \dot{q}_{sf} , es **2354 W**. El calor suministrado por el vapor en su paso por la cámara de calentamiento de los equipos, en ningún caso llega a 200W aunque llegaron a registrarse valores de hasta 215W en mediciones efectuadas anteriormente en FERRALCA., es decir, casi once veces menos de lo que se requeriría; sin embargo esta trascendente diferencia en el aspecto térmico, es compensada por varios factores que propician la conducción del producto: la caída del material por la canaleta debido a su gran pendiente, la velocidad que posee por provenir de un proceso de mezclado donde está siendo agitado a 1760 rpm, y su corto paso por los equipos, favorecen el manejo del sulfato de aluminio fundido por parte de los equipos, dejando casi completamente apartado el suministro energético por parte del vapor al sulfato de aluminio fundido.

➤ A partir de los resultados de la tabla 5.26, se deduce que el sulfato de aluminio fundido no experimenta un cambio significativo en su temperatura por efecto del calor $q_{sf\text{neto}}$, del cual resulta, que el calor cedido por convección y radiación es mayor que el calor que le cede el vapor q_a . Todo esto conlleva a decir que la diferencia de temperatura que se aprecia entre la temperatura de pared T_p y la temperatura de la superficie del sulfato T_s , que es aproximadamente igual a $115^\circ\text{C} - 89^\circ\text{C} = 26^\circ\text{C}$, provienen de pérdidas energéticas de naturaleza diferente a la térmica (presumiblemente pérdidas por fricción, y otras no cuantificadas)

6.2 **Propuestas de mejoras: Sistema A**

Relativas al área de diseño:

El cierre total o parcial de estos canales es inminente; el salpique obliga la implementación de barreras para evitar al máximo, salpique de producto a los alrededores. El cierre total de los canales, es decir, confinar por completo al sulfato de aluminio fundido en un área llena plenamente, no es del todo deseable por algunas razones:

- 1) Necesidad de observación del proceso después de mezclarse debido a que es el operador, con su apreciación visual, quien maneja las válvulas de polvillo inoculante y de sulfato de aluminio fundido que entran a la mezcladora.
- 2) Antecedentes de trabajos realizados en FERRALCA en donde se confinó el fluido haciéndolo pasar por una tubería cerrada con camisa de vapor; sólo duró instalado pocos días ya que los problemas de atascamiento y acumulación de material se agravaron.
- 3) Desconocimiento de parámetros importantes desde el punto de vista del comportamiento del fluido como coeficiente de fricción, conductividad térmica, calor de fusión.

Es por ello, que se plantea agregar tapas removibles (figura 6.2) sobre los canales con elementos de sujeción que permitan flectar lateralmente las mismas y de esta forma permitir abrir y cerrar la tapa con el fin, primero de visualizar el proceso y por otro lado con miras a facilitar las labores de mantenimiento. Deberán ser construidas con el acero Carpenter 20 cb3, el cual, es la aleación más recomendada en aplicaciones donde exista contacto con ácidos y sales inorgánicas como lo es sulfato de aluminio.

Con respecto a la sección de los canales, esta debe ser tal que garantice el paso más uniforme del flujo con el fin de evitar la aparición de puntos de estancamiento,

(figura 6.1), que derivan en zonas más frías lo cual es indeseable durante el paso del fluido sobre las canaletas. Aunque ocupar el área plena no es recomendable por lo expuesto anteriormente, se debe disminuir el espacio físico libre para evitar el crecimiento y la adhesión de producto. Se recomienda realizar un estudio experimental inicial en algunas secciones geométricas determinadas y variar el área con relación al área que ocupara el fluido sobre ellas; luego de observar el comportamiento del paso del fluido a través de ellas, seleccionar la geometría y el área mojada más adecuada. Se sugiere iniciar el estudio con un área cuadrada ó rectangular (figura 6.2) ya que propiciaría la uniformidad de temperaturas en la superficie. Con el fin de ejemplificar, se toma el área actual para realizar algunos cálculos pertinentes y muestras de detalles importantes.

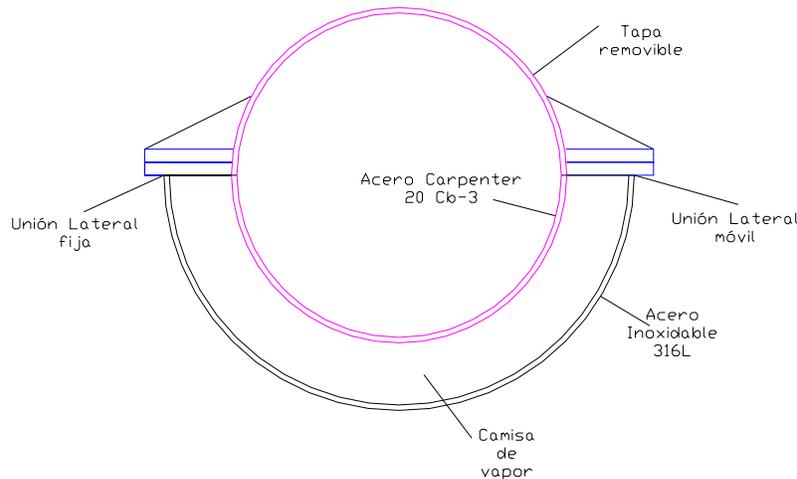


Figura N° 6.2 Sección transversal actual y tapa agregada

Relativas al aspecto térmico:

El requerimiento energético para la conducción del sulfato de aluminio fundido, debiera ser acotado en un rango tal que permita garantizar su temperatura de superficie, (la cual, será siempre la más fría mientras el flujo no ocupe completamente la sección), por lo menos 10% mayor a la temperatura de cristalización. De acuerdo a los valores de la figura A.1 del apéndice A, la temperatura de cristalización es aproximadamente 92 °C, por lo que sería ideal mantener el sulfato a más de 100°C y en definitiva la cristalización no ocurriría. Para ello habría que calentar el sulfato de aluminio, y de acuerdo a los

resultados: la temperatura superficial del producto en promedio, es de 88°C; para aumentar un $\Delta T=12^\circ$, se necesitarían **23540W** para lo que se requiere un flujo de vapor muy elevado. Sin embargo, de acuerdo al análisis realizado, la influencia térmica es casi imperceptible frente a otros fenómenos que ocurren en la conducción del sulfato sobre los canales, se proponen las mejoras, basadas en las condiciones actuales de suministro energético de vapor.

El objetivo de las mejoras desde el punto de vista térmico, es crear en el interior del canal, una atmósfera caliente, la cual, se lograría con la implementación de las tapas para aislar al sulfato de aluminio fundido del choque térmico con el aire y un sistema termo aislante en la superficie de ambas secciones (canal y tapa) para estimular un aumento de temperatura en el interior del canal, y así evitar las pérdidas de calor calculadas anteriormente desde la canaleta y desde el sulfato de aluminio.

Si todo el calor generado por el vapor, se direcciona hacia la pared interna del canal la temperatura de pared T_p , aumenta; para efectos de cálculo, y de mostrar los resultados que se lograrían se tomaron las dimensiones actuales: (figura 6.2)

Cálculo de T_{p2} :

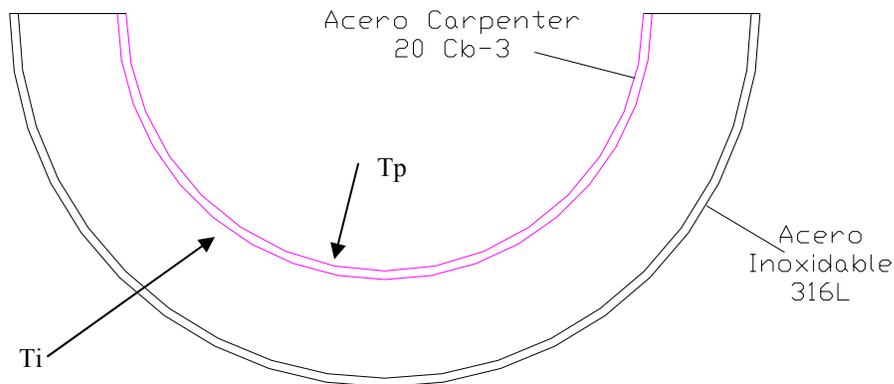


Figura N° 6.3 Diagrama indicativo de temperatura interna T_i y temperatura de pared T_p

Utilizando las siguientes ecuaciones 4.2 y 4.3, se determina la temperatura de pared T_{p2} :

$$q_k = -k \times \frac{A(T_i - T_{p2})}{e}; \text{ Donde:}$$

q_k = Calor que se conduce = Calor suministrado por el vapor = q_v [W]

k = Conductividad térmica del acero Carpenter 20Cb3 (Tabla C.1, Apéndice C) [W/m °K]

T_i = temperatura interna en las paredes de la canaleta [K]

T_{p2} = Nueva temperatura de pared alcanzada [K]

e = espesor de la lámina [m]

A = Área de la placa análoga a la sección interna de la canaleta [m²]

Cálculo de T_i :

$$q_v = h \times A \times (T_\infty - T_i); \text{ Donde:}$$

h = Coeficiente de transferencia de calor por convección [W/m²K]

A = Área de transferencia de calor [m²]

T_∞ = Temperatura del vapor. [K]

Cálculo de h :

Utilizando la siguiente correlación aplicable en el caso de “Convección forzada: Corriente en un tubo” [8]

$$Nu_D = 0,023 \times Re_D^{4/5} \times Pr^n \text{ (Ecuación 6.2);}$$

Restricciones: $0,6 \leq Pr \leq 100; 1,25 \times 10^5 \geq Re_D \geq 2500; n = 0,3$ para enfriamiento

$$Re_D = \frac{\rho \times u_m \times D_h}{\mu} \text{ (Ecuación 6.3); donde}$$

$$u_m = \frac{\dot{m}}{\rho \times A_c} \text{ [m/s]}$$

$$Dh = \frac{4 \times A_c}{P_m} \text{ (Ecuación 6.4); Donde}$$

A_c = Área de la sección transversal de la corriente [m^2]

P_m = Perímetro mojado [m]

Sustituyendo en las ecuaciones anteriores y realizando el cálculo tipo para un equipo (Canaleta No. 1):

$$Dh = \frac{4 \times 5,69 \times 10^{-3} m^2}{0,55m} = 0,041m ;$$

$$u_m = \frac{0,01587 \frac{Kg}{s}}{0,5542 \frac{Kg}{m^3} \times 5,59 \times 10^{-3} m^2} = 5,03 \frac{m}{s} ;$$

$$Re_D = \frac{0,5542 \frac{Kg}{m^3} \times 5,03 \frac{m}{s} \times 0,041m}{1,3 \times 10^{-5} \frac{Kg}{m \times s}} = 8783,87$$

$$Nu_D = 0,023 \times 8783,87^{4/5} \times 1,04^{0,3} = 33,25$$

$$h = \frac{33,25 \times 0,0261 \frac{W}{m \cdot K}}{0,041m} = 18,46 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$Ti = \frac{18,46 \frac{W}{m^2 \cdot K} \times 5,69 \times 10^{-3} m^2 \times 403K - 171,85W}{8,46 \frac{W}{m^2 \cdot K} \times 5,69 \times 10^{-3} m^2} = 401,56K - 273,15 = 128,41^\circ C$$

$$Tp2 = 401,56K - \frac{171,85W \times 0,002m}{22 \frac{W}{m \cdot K} \times 5,69 \times 10^{-3} m^2} = 401,55K = 128,4^\circ C$$

Los resultados de la temperatura de pared alcanzada T_{p2} para cada equipo, se muestran en la tabla 6.1. Igualmente se reportan los valores de T_p originales medidos y extraídos de la tabla 5.14

	Canaleta No.1	Canaleta No.2	Embudo	Canaleta No.3
T_p	114	113,67	-	107
T_i [°C]	128,41	119,21	125,67	118,48
T_{p2} [°C]	128,40	119,21	125,66	118,46

Tabla N° 6.1 Temperatura de pared " T_{p2} ".

Se observa efectivamente, el aumento de temperatura de pared de T_p hasta T_{p2} , lo que implica directamente que q_a (calor aprovechado por el sulfato), aumenta y además, este aumento favorecerá en la creación de la atmósfera caliente que se plantea.

Resulta predecible esperar el mismo resultado (un aumento de temperatura en la pared y por ende del aire que rodea la superficie interna) al aislar la tapa y de esta forma, evitar las pérdidas de calor del sulfato de aluminio fundido; es por ello que la tapa flexible, también debe aislarse.

En cuanto al sistema termo aislante a utilizar se recomienda una pintura resistente a altas temperaturas. El aislante utilizado en FERRALCA actualmente es lana mineral; las tuberías de vapor desde el distribuidor No. 2 se encuentran aisladas con este producto y recubiertas con una lámina metálica, sin embargo, durante la inspección visual se observó deterioro del aislante a pesar de su reciente instalación. Es por ello, que debido a que estará trabajando bajo un ambiente agresivo, no se recomienda para esta aplicación. Además, su vida útil es mínimo de 8 años y máximo de 10 años, frente a la de la lana mineral que deberá estar siendo revisada anualmente y con riesgos a ser cambiadas con frecuencia; esto debido a lo observado en la inspección.

Relativas a mantenimiento:

Desde el punto de vista de mantenimiento, el efecto de las propuestas que tienden a disminuir la problemática existente, están dirigidas primeramente a la disminución de tiempo de paradas de planta por atastamiento de equipos, exceso de material acumulado y evitar al máximo el salpique hacia zonas aledañas.

Se propone:

➤ Alargar la tubería bajante de polvillo de inoculación. La tubería bajante no llega directamente a la mezcladora, esto hace que el viento arrastre estas partículas, ensuciando los alrededores. Se recomienda agregar una sección en el término de la misma con el fin de alargar su longitud y que su llegada sea directamente dentro de la mezcladora.

➤ Construir tapas removibles para las bridas de salida de la mezcladora de acero Carpenter 20Cb con el fin de colocarlas de forma manual, al hacer las labores de limpieza de la misma.

➤ Construir las canaletas nuevas debido al deterioro y fugas de vapor que presentan.; se deben conservar los materiales de construcción originales, sin embargo, se recomienda realizar los estudios de cambios geométricos de sección y luego de seleccionar la más adecuada experimentalmente, elaborar el diseño pertinente para fabricar las mismas.

6.3 Análisis de los resultados: Sistema B.

La evaluación del proceso de enfriamiento del sulfato de aluminio solidificado se realizó mediante un balance de energía entre el calor cedido por el sulfato de aluminio por energía interna y el calor que cede por convección, radiación y conducción. De los resultados obtenidos en dicha evaluación se puede indicar lo siguiente:

1. La diferencia entre el calor cedido por el sulfato y el que cede como transferencia total de calor (convección + radiación + conducción) se debe a las correlaciones empíricas utilizadas en los cálculos, ya que su aplicación es razonable sobre cierto rango de condiciones. En el caso específico del proceso de enfriamiento las correlaciones utilizadas requieren de ciertas consideraciones y una cantidad de condiciones, las cuales producen la desigualdad entre los valores. Otro aspecto que causa esta diferencia son los errores que se generan en las mediciones de las distintas propiedades que intervienen en el proceso.
2. La cantidad de calor que va cediendo el sulfato de aluminio por radiación y por conducción disminuye progresivamente a medida que el sulfato se va enfriando (disminuye su temperatura), esto ocurre porque en ambos procesos de transferencia la única propiedad que varía significativamente es la temperatura superficial, (para la radiación la temperatura superficial del sulfato de aluminio y para la conducción la temperatura superficial de la cinta de enfriamiento); como esta temperatura es directamente proporcional al calor por radiación y al calor por conducción (convección libre), al disminuir la temperatura disminuyen los calores.
3. En el caso del calor por convección (convección forzada) que se da entre el aire que circula por los difusores y el sulfato de aluminio solidificado no se observa esta disminución progresiva a pesar de que en este proceso de transferencia el calor también es directamente proporcional a la temperatura superficial del sulfato. Esto se debe a que el calor por convección forzada también depende de otra propiedad muy importante como lo es la velocidad del aire, y en este estudio en particular se puede observar que esta propiedad tiene un rango de variación considerable (de 1 a 5 m/s) entre los distintos difusores que se encuentran sobre las tres cintas de enfriamiento.

4. Cuando los trozos de sulfato de aluminio pasan de una cinta de enfriamiento a la siguiente hay un incremento en la temperatura superficial, esto se debe a que los trozos cambian de posición entre si al caer en la nueva cinta, en este cambio los trozos que antes se encontraban en contacto con el aire y por consiguiente más fríos se mezclan con otros que estaban debajo de ellos a una mayor temperatura, lo que ocasiona el aumento de temperatura.
5. Las variaciones de velocidad del aire medidas en los difusores se debe al deterioro y a los daños que presentan los ductos de ventilación; como: obstrucciones internas, huecos en las paredes, hundimientos y abolladuras, orificios en los difusores, obstrucción del damper, etc.
6. La mayor cantidad de calor que cede el sulfato de aluminio es por convección forzada, el calor que cede por radiación y conducción es menor. Por lo tanto al mejorar el proceso de transferencia por convección forzada se incrementa la cantidad de calor que cede el sulfato de aluminio cuando pasa por debajo de cada par de difusores, y a su vez hace que el sulfato tenga una menor temperatura al salir de las cintas de enfriamiento.
7. Para mejorar la transferencia de calor por convección forzada las propiedades que pueden variarse son la velocidad y la temperatura del aire. Al aumentar la velocidad o disminuir la temperatura en el aire que circula por los difusores se obtienen los resultados deseados.

6.4 Propuestas de mejoras: Sistema B.

El sulfato de aluminio sale actualmente de las cintas de enfriamiento a una temperatura aproximada de 45 °C y lo deseable es que sea a una temperatura entre 35 a 40 °C. Para conseguir esa disminución de temperatura en el sulfato se debe aumentar la velocidad o disminuir la temperatura del aire que circula por los difusores de los ductos

de ventilación. Por este motivo se debe evaluar cuanto hay que variar estas propiedades del aire para después poder proponer las mejoras que permitan dichas variaciones. A continuación se estudian por separado las variaciones para cada propiedad:

a) Aumento de la velocidad del aire:

Para disminuir la temperatura del sulfato hay que sustraerle mayor cantidad de calor durante el proceso de enfriamiento y una forma de conseguir esto es aumentando la velocidad del aire.

Si se conoce la cantidad de calor total que debe ceder el sulfato de aluminio durante todo el proceso de enfriamiento para disminuir su temperatura hasta 40 ° C o un poco menos, se puede calcular cuanto de ese calor lo cede por convección forzada en cada par de difusores, y por consiguiente cual es la velocidad del aire necesaria para sustraer esa cantidad de calor. Lo recomendable esa velocidad sea la misma en todos los difusores, por este motivo se plantea una distribución porcentual del calor total entre las cintas y los difusores que intervienen en el proceso de enfriamiento, que permita obtener la velocidad requerida. El procedimiento para conseguir los valores de velocidad del aire fue el siguiente:

Nota: Es importante recordar que los difusores se encuentran por pares sobre las cintas de enfriamiento, es decir, que cada cinta tiene 6 pares de difusores y para efectos de cálculo cada par se tomo como un solo difusor.

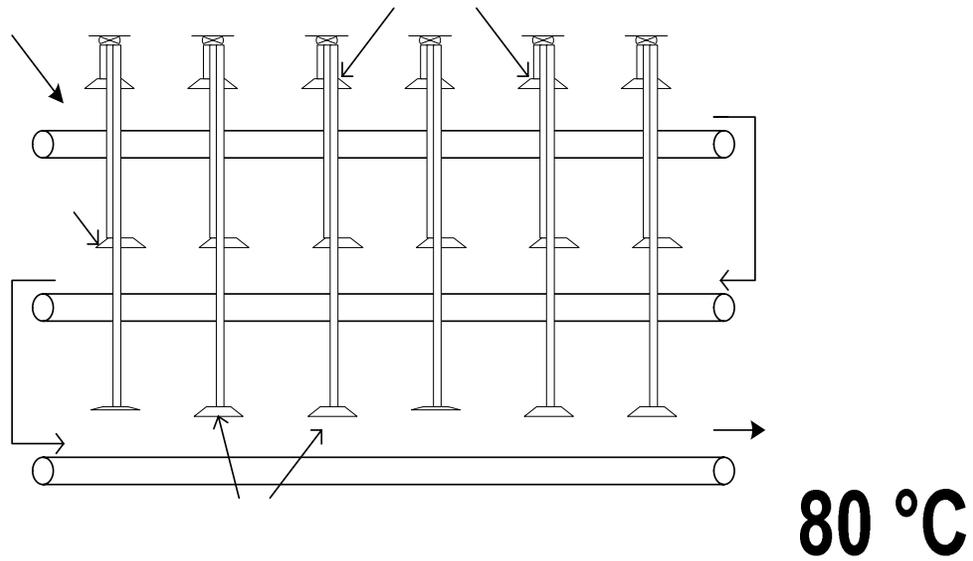


Figura N° 6.4 Diagrama del sistema de enfriamiento donde se indica la temperatura de salida deseada

K-10

Se establece la temperatura de salida del sulfato en la última cinta de enfriamiento en 40 ° C, y se calcula el calor total que debe ceder el sulfato en su paso por las tres cintas de enfriamiento para salir a esa temperatura. Se debe considerar el aumento de temperatura que ocurre cuando los trozos de sulfato cambian de cinta, el cual es aproximadamente de 5 ° C en cada cambio de cinta. Se procede a calcular el calor total:

$$q_{ssT} = \dot{m} \times Cp \times \Delta T$$

$$q_{ssT} = 3,18 \frac{kg}{s} \times 1480 \frac{J}{kgK} \times (50K)$$

$$q_{ssT} = 235383,6W$$

DIFUSORES
INTERMEDIOS

Se plantea un balance de energía para el proceso de enfriamiento y se calcula la velocidad del aire necesaria en cada par de difusores para poder obtener una cantidad de calor cedido por el sulfato de 235383,6 W en todo el proceso de enfriamiento.

Se distribuye el calor total que cede el sulfato (235383,6 W) en forma porcentual entre las tres cintas de enfriamiento. La cantidad de calor que se fija para cada cinta se

hace con el fin de obtener valores de velocidad del aire que se encuentren dentro del rango recomendado para ductos de ventilación. El valor máximo de velocidad recomendado para los ductos de ventilación es de 2200 ft/min (11,176 m/s), el cual se obtiene del apéndice (f).

En primer lugar se estableció una cantidad de calor cedido por el sulfato igual para las tres cintas, es decir, que en cada cinta el sulfato de aluminio ceda el 33,3% del calor total, pero las velocidades del aire para esa distribución de calor resultaron muy altas para algunos difusores, superando el límite recomendado que se menciono anteriormente, los valores obtenidos con esta distribución se muestran en la siguiente tabla:

Difusores	Ductos	T _e [°C]	T _s [°C]	q _{cedido} [W]	h [W/m ² K]	V _{aire} [m/s]
Superiores	K-10F	80	77,22	13087,33	27,21	2,13
	K-10E	77,22	74,44	13087,33	29,26	2,34
	K-10D	74,44	71,66	13087,33	31,50	2,59
	K-10C	71,66	68,88	13087,33	33,93	2,85
	K-10B	68,88	66,1	13087,33	36,91	3,19
	K-10A	66,1	63,32	13087,33	40,15	3,57
Intermedios	K-10A	68,32	65,54	13087,33	37,65	3,28
	K-10B	65,54	62,76	13087,33	41,00	3,67
	K-10C	62,76	59,98	13087,33	45,15	4,18
	K-10D	59,98	57,2	13087,33	49,87	4,78
	K-10E	57,2	54,42	13087,33	55,76	5,55
	K-10F	54,42	51,64	13087,33	63,07	6,55
Inferiores	K-10F	56,64	53,86	13087,33	57,50	5,78
	K-10E	53,86	51,08	13087,33	65,10	6,83
	K-10D	51,08	48,3	13087,33	74,93	8,26
	K-10C	48,3	45,52	13087,33	87,98	10,25
	K-10B	45,52	42,74	13087,33	106,01	13,19
	K-10A	42,74	39,96	13087,33	133,02	17,93

Tabla N° 6.2 Velocidad del aire considerando igual distribución porcentual de calor en las tres cintas de enfriamiento.

En los resultados de la tabla anterior se observa que se logró disminuir la temperatura del sulfato de aluminio hasta aprox. 40 °C con esa distribución de calor, pero con variaciones de velocidad muy grandes (15 m/s). Además en los dos últimos difusores se debe trabajar con velocidades de aire muy altas, por lo tanto esa distribución de temperatura no es aplicable para mejorar el enfriamiento.

Se plantearon distintas distribuciones porcentuales de cantidad de calor cedido entre las cintas de enfriamiento a través del método de ensayo y error, donde se iba variando la cantidad de calor que debe ceder el sulfato de aluminio en cada cinta hasta obtener valores de velocidad aceptables entre todos los difusores. Se fijó una distribución que permitió obtener pequeñas variaciones entre las velocidades de todos los difusores, esta distribución fue la siguiente: 50 % del calor total es cedido en la primera cinta de enfriamiento, 31,25 % en la segunda y el 18,75 % restante en la tercera.

Cinta de enfriamiento 1 (X-11A):

$$q_1 = 117691,8 \text{ W} \quad (50 \% \text{ del } q_{ssT})$$

$$\Delta T_1 = 25^\circ \text{C} \quad (50 \% \text{ del } \Delta T_T)$$

Cinta de enfriamiento 2 (X-11B):

$$q_2 = 73557,325 \text{ W} \quad (31,25 \% \text{ del } q_{ssT})$$

$$\Delta T_2 = 15,625^\circ \text{C} \quad (31,25 \% \text{ del } \Delta T_T)$$

Cinta de enfriamiento 3 (X-11C):

$$q_3 = 44134,425 \text{ W} \quad (18,75 \% \text{ del } q_{ssT})$$

$$\Delta T_3 = 9,327^\circ \text{C} \quad (18,75 \% \text{ del } \Delta T_T)$$

Donde:

q_1, q_2 y q_3 = Calor cedido por el sulfato en cada cinta de enfriamiento respectivamente.

ΔT_1 , ΔT_2 y ΔT_3 = Diferencia entre la temperatura de entrada y salida en cada cinta para obtener la cantidad de calor cedido deseada.

El calor que cede el sulfato en la cinta de enfriamiento 1 se distribuye entre los 6 pares de difusores que se encuentran a lo largo de ella, lo mismo se hace para las otras dos cintas de enfriamiento. Esta distribución también se realizó por método de ensayo y error. Para cada cinta la distribución resultó: 58,33 % del calor que es cedido en toda la cinta lo hace entre los tres primeros pares de difusores y el 41,67 % restante entre los otros tres pares. En la figura 6.4 se muestra como quedó la distribución porcentual de la cantidad de calor cedido en la cinta de enfriamiento 1, como se mencionó anteriormente el procedimiento fue igual para las otras dos cintas.

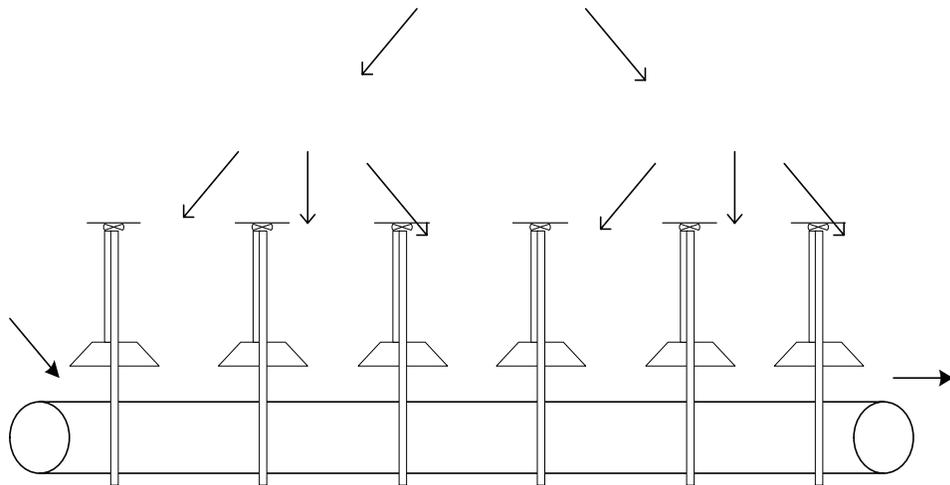


Figura N° 6.5 Distribución porcentual del calor cedido en la cinta de enfriamiento 1.

Para calcular la velocidad que debe tener el aire a la salida de cada par de difusores, que permita sustraer el calor que se fijó por la distribución porcentual anterior, se seleccionan un par de difusores cualesquiera y se realiza un cálculo tipo. En este caso tomamos los difusores superiores del ducto K-10F. La velocidad del aire esta

relacionada con el coeficiente convectivo (h) y este a su vez con el calor transferido por convección forzada. Conociendo que:

$$q_{ss} = q_{con} + q_{rad} + q_{cond}$$

Despejando q_{conv} Tenemos:

$$q_{conv} = q_{ss} - q_{rad} - q_{cond}$$

Para la cinta de enfriamiento 1 se tiene que $q_1 = 117691,8 W$ y el calor que sustrae el aire en el primer par de difusores $q = 22879,29 W$

Ducto K-10F Difusores superiores:

$$q_{ss} = 22879,29 W$$

El ΔT para esta cantidad de calor cedido es $4,86^\circ C$, ($T_e = 80^\circ C$ y $T_s = 75,14^\circ C$).

Esta última temperatura será la de entrada del sulfato en el siguiente par de difusores y así sucesivamente.

Se calcula el q_{rad} :

$$q_{rad} = \varepsilon \times A \times \sigma \times (T_{sup}^4 - T_{alrd}^4)$$

$$q_{rad} = 0,4 \times 8,4 m^2 \times 5,67.10^{-8} J/m^2 K^4 \times [(350,72 K)^4 - (303,15 K)^4]$$

$$q_{rad} = 1230,6 W$$

Se calcula q_{cond} (igual al q_{conv} por debajo de la cinta de enfriamiento):

$$q_{cond} = q_{conv} = h \times A \times (T_{sup} - T_{\infty})$$

Se calcula h (convección libre) por la siguiente correlación empírica:

$$Nu_L = \frac{h \times L}{k} = 0,27 \times Ra_L^{1/4}$$

Despejando h tenemos:

$$h = \frac{0,27 \times Ra_L^{1/4} \times k}{L}$$

Las propiedades para el cálculo de h y Ra_L se evalúan a la temperatura de película (T_f), donde:

$$T_f = \frac{T_{sup} + T_{\infty}}{2} \quad T_f = \frac{(346,15 - 303,15)}{2} \quad T_f = 324,65K$$

Se buscan las propiedades a T_f en la Tabla A.4:

$$\nu = 18,37 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \quad k = 28,12 \text{ W/mK} \quad \alpha = 26,15 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Se calcula Ra_L :

$$Ra_L = Gr \times Pr = \frac{g \times \beta \times \Delta T \times L^3}{\nu \times \alpha}$$

$$Ra_L = \frac{9,81 \text{ m/s}^2 \times (1/324,15K) \times (346,15 - 303,15)K \times (1,2 \text{ m}/2)^3}{18,37 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \times 26,15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}}$$

$$Ra_L = 5,84 \cdot 10^8$$

Se calcula h (convección libre):

$$h = \frac{0,27 \times 5,66 \cdot 10^8 \times 28,12 \cdot 10^{-3} \text{ W/mK}}{1,2 \text{ m}/2}$$

$$h = 1,97 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Por último se calcula q_{conv} (convección libre):

$$q_{conv} = 1,97 \text{ W/m}^2\text{K} \times 8,4 \text{ m}^2 \times (346,15 - 303,15)K$$

$$q_{conv} = 710,72 \text{ W}$$

Se calcula q_{conv} (convección forzada):

$$q_{conv} = 22879,29 W - 1230,6 W - 710,72 W$$

$$q_{conv} = 20937,97 W$$

También se tiene que:

$$q_{conv} = h \times A \times (T_{sup} - T_{\infty}) = 20937,97 W$$

Se despeja h (convección forzada):

$$h = \frac{20937,97 W}{A \times (T_{sup} - T_{\infty})} \quad h = \frac{20937,97 W}{(8,4 m^2) \times (350,72 - 303,15) K} \quad h = 52,4 \text{ W/m}^2 K$$

Se calcula Re:

$$Nu = \frac{h \times D}{k} = c \times Re^m \times Pr^{1/3}$$

$$Re = \sqrt[m]{\frac{h \times D}{k \times c \times Pr^{1/3}}} \quad Re = {}^{0,731}\sqrt{\frac{(52,4 \text{ W/m}^2 K) \times (1,2 m)}{(28,29 \times 10^{-3} \text{ W/m K}) \times (0,228) \times (0,703)^{1/3}}}$$

$$Re = 336106,26$$

Finalmente calculamos la velocidad del aire:

$$Re = \frac{V \times D}{\nu}$$

$$V = \frac{Re \times \nu}{D} \quad V = \frac{(336106,26) \times (18,6 \times 10^{-6} \text{ m}^2/s)}{1,2 m} \quad V = 5,21 \text{ m/s}$$

Los resultados de los cálculos para los demás difusores se presentan en la tabla siguiente:

Difusores	Ductos	T_e [°C]	T_s [°C]	q_{cedido} [W]	h [W/m ² K]	V_{aire} [m/s]
Superiores	K-10F	80	75,14	22879,29	52,40	5,21
	K-10E	75,14	70,28	22879,29	58,97	6,09
	K-10D	70,28	65,42	22879,29	67,13	7,24
	K-10C	65,42	61,95	16335,62	52,75	5,18
	K-10B	61,95	58,48	16335,62	59,43	6,08
	K-10A	58,48	55,01	16335,62	67,57	7,22
Intermedios	K-10A	60,01	56,97	14311,32	54,93	5,45
	K-10B	56,97	53,93	14311,32	61,88	6,39
	K-10C	53,93	50,89	14311,32	71,01	7,69
	K-10D	50,89	48,72	10215,65	56,14	5,56
	K-10E	48,72	46,55	10215,65	63,67	6,59
	K-10F	46,55	44,38	10215,65	73,30	7,97
Inferiores	K-10F	49,38	47,57	8520,89	50,30	4,78
	K-10E	47,57	45,76	8520,89	56,21	5,55
	K-10D	45,76	43,95	8520,89	63,70	6,58
	K-10C	43,95	42,66	6072,90	49,85	4,69
	K-10B	42,66	41,37	6072,90	55,68	5,45
	K-10A	41,37	40,08	6072,90	63,08	6,46

Tabla N° 6.3 Velocidades del aire para la distribución porcentual de calor seleccionada

En los resultados presentados en la tabla anterior se observa que se logró disminuir la temperatura del sulfato de aluminio hasta aprox. 40 °C con la distribución porcentual de calor seleccionada, se obtuvo variaciones de velocidad pequeñas y todas las velocidades están dentro de los límites recomendados. Sin embargo como se mencionó anteriormente se desea que todos los difusores manejen la misma velocidad de aire, para obtener dicha velocidad se realizó un último proceso de iteración, donde se iba variando la temperatura a la salida de cada difusor hasta que las velocidades convergieron a un mismo valor.

Este proceso de iteración fue realizado con mayor facilidad y rapidez gracias al pequeño rango de variación de velocidad que se obtuvo con la distribución de calor seleccionada. Los resultados de esa iteración se indican en la siguiente tabla:

Difusores	Ductos	T _e [°C]	T _s [°C]	q _{cedido} [W]	h [W/m ² K]	V _{aire} [m/s]
Superiores	K-10F	80	74,35	26598,35	62,26	6,59
	K-10E	74,35	69,2	24244,51	64,26	6,85
	K-10D	69,2	64,6	21655,29	65,01	6,92
	K-10C	64,6	60,6	18830,69	63,73	6,71
	K-10B	60,6	57	16947,62	65,04	6,87
	K-10A	57	53,8	15064,55	65,36	6,89
Intermedios	K-10A	58,8	55,5	15535,32	63,17	6,59
	K-10B	55,5	52,5	14123,02	64,88	6,81
	K-10C	52,5	49,85	12475,33	65,01	6,81
	K-10D	49,85	47,5	11063,03	65,12	6,81
	K-10E	47,5	45,4	9886,11	66,08	6,93
	K-10F	45,4	43,55	8709,19	66,12	6,92
Inferiores	K-10F	48,55	46,35	10356,88	65,96	6,92
	K-10E	46,35	44,45	8944,58	64,35	6,67
	K-10D	44,45	42,75	8003,04	65,31	6,79
	K-10C	42,75	41,25	7061,51	65,39	6,79
	K-10B	41,25	39,93	6214,13	65,14	6,75
	K-10A	39,93	38,76	5507,98	65,61	6,80

Tabla N° 6.4 Velocidad del aire recomendada para cada par de difusores

Finalmente se observa que la velocidad del aire debe ser aproximadamente de 7 m/s (velocidad por par de difusores) para poder disminuir la temperatura del sulfato de aluminio de 80 °C a aprox. 40 °C durante todo el proceso de enfriamiento, incluso con esa velocidad se puede alcanzar una temperatura un poco menor de 40 °C.

A continuación se presentan los caudales de aire que deben tener cada par de difusores, el caudal que debe suministrar cada ventilador y el caudal que suministran actualmente los ventiladores:

Ductos	Difusores	V _{aire} [m/s]	Q [m ³ /s]	Q _T [m ³ /s]	Q _{sum} [m ³ /s]
K-10A	Superiores	6,89	2,56	7,55	5,56
	Intermedios	6,59	2,45		
	Inferiores	6,80	2,53		
K-10B	Superiores	6,87	2,56	7,60	5,56
	Intermedios	6,81	2,53		
	Inferiores	6,75	2,51		
K-10C	Superiores	6,71	2,50	7,56	5,56
	Intermedios	6,81	2,53		
	Inferiores	6,79	2,53		
K-10D	Superiores	6,92	2,58	7,63	5,56
	Intermedios	6,81	2,53		
	Inferiores	6,79	2,53		
K-10E	Superiores	6,85	2,55	7,61	5,56
	Intermedios	6,93	2,58		
	Inferiores	6,67	2,48		
K-10F	Superiores	6,59	2,45	7,60	5,56
	Intermedios	6,92	2,57		
	Inferiores	6,92	2,57		

Tabla N° 6.5 Velocidad y caudal requerido para cada difusor y para cada ventilador.

Nota: El Q_T requerido es el caudal que debe suministrar el ventilador de cada ducto para obtener la disminución en la temperatura del sulfato deseada. El Q_{sum} es el caudal que suministran actualmente los ventiladores de cada ducto.

b) Disminución de la temperatura del aire

La otra forma de mejorar el proceso de enfriamiento del sulfato de aluminio es disminuyendo la temperatura del aire que circula por los ductos de ventilación, ya que esto permite incrementar la cantidad de calor que cede el sulfato de aluminio por convección forzada.

Desde el punto de vista psicrométrico el aire se puede enfriar de la siguiente manera: un enfriamiento con humidificación o un enfriamiento simple, en ambos procesos se disminuye la temperatura de bulbo seco del aire. Debido a las condiciones

climáticas de la zona geográfica donde se encuentra ubicada FERRALCA (Morón) el enfriamiento del aire por alguno de estos procesos no es el más adecuado ya que la humedad relativa de dicha zona es muy alta (85 %) y esto va a originar que el aire disminuya muy poco su temperatura. Sin embargo se plantean estos procesos para evaluar su aporte en el enfriamiento del sulfato de aluminio.

➤ Enfriamiento con humidificación: en este proceso se disminuye la temperatura de bulbo seco del aire mientras aumenta su humedad relativa a una temperatura de bulbo húmedo constante como se muestra en la siguiente figura:

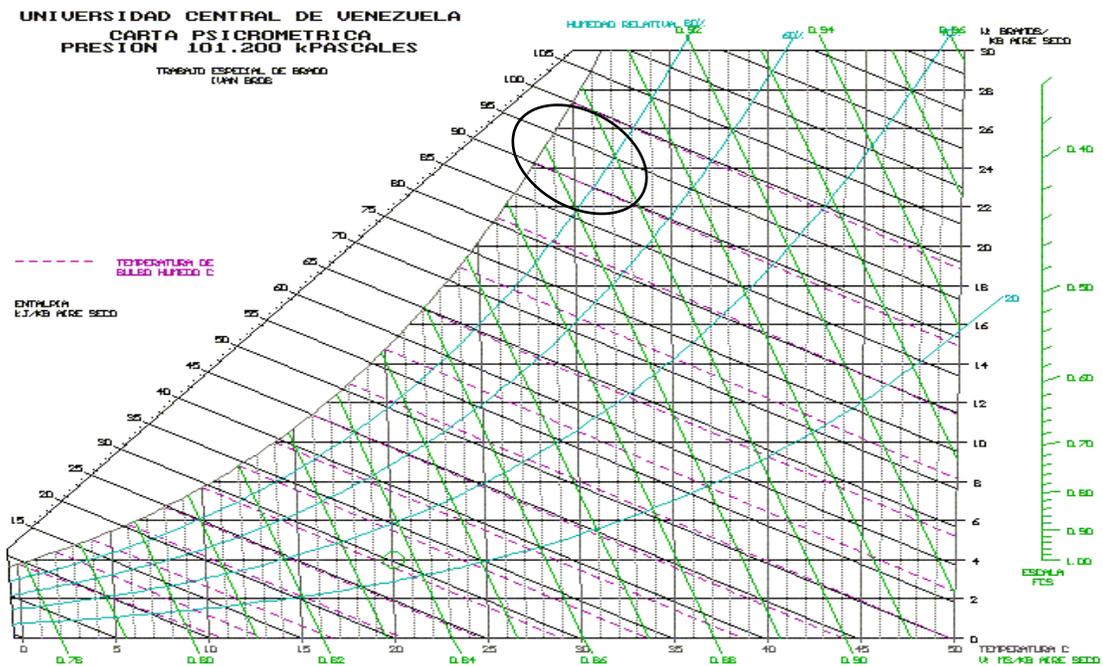


Figura N° 6.6 Carta psicrométrica. Proceso de enfriamiento con humidificación

Como se observa en la carta psicrométrica la disminución de temperatura para el aire es muy pequeña y apenas se logra disminuir unos 2,5 °C la temperatura (de 30 a 27,5 °C.)

➤ Enfriamiento simple: en este proceso se disminuye la temperatura de bulbo seco del aire manteniendo constante su humedad específica como se muestra en la siguiente figura:

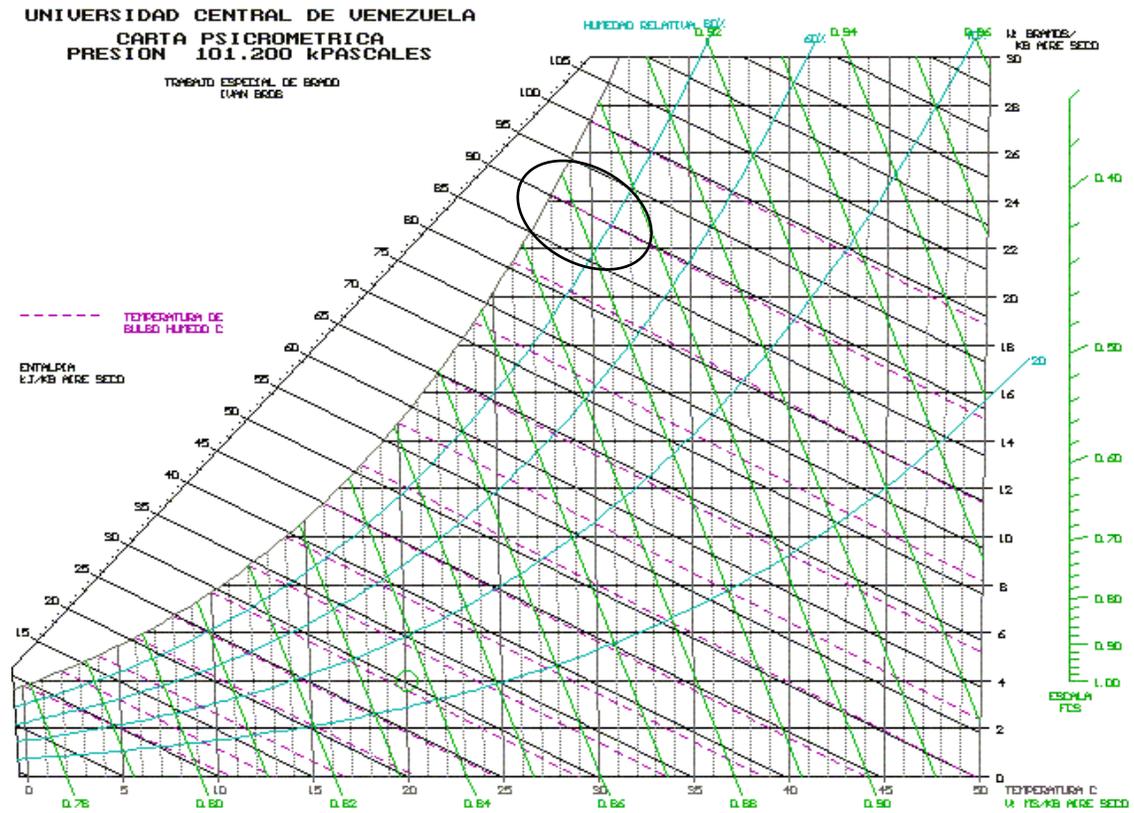


Figura N° 6.7 Carta psicrométrica. Proceso de enfriamiento simple

En este proceso la disminución de temperatura también es pequeña, sin embargo es mayor a la obtenida por enfriamiento con humidificación, la temperatura se puede llevar de 30 a 27 °C.

Para obtener mayor cantidad de calor cedido en el sulfato se hacen los cálculos con la menor temperatura que se pudo obtener de los dos procesos anteriores, en este caso 27 °C. Para este caso de disminución de temperatura se plantean las mismas condiciones que se aplicaron en el caso del aumento de velocidad del aire, lo único que va a variar es la temperatura del aire a la salida de los difusores que ahora va a ser 27 °C y no 30 °C como en el caso anterior. Se plantea el mismo balance energético y se calcula la velocidad del aire requerida para disminuir la temperatura del sulfato de aluminio hasta 40 °C, pero con la nueva temperatura del aire a la salida de los difusores. Se

realizan los mismos procedimientos de distribución de temperatura por ensayo y error, y de iteración para calcular la velocidad final del aire.

Los resultados de estos cálculos se presentan en las siguientes tablas:

Difusores	Ductos	T _e [°C]	T _s [°C]	q _{cedido} [W]	h [W/m ² K]	V _{aire} [m/s]
Superiores	K-10F	80	74,5	25892,20	56,77	5,79
	K-10E	74,5	69,5	23538,36	57,77	5,90
	K-10D	69,5	65	21184,52	58,17	5,93
	K-10C	65	61	18830,69	57,67	5,84
	K-10B	61	57,4	16947,62	58,13	5,88
	K-10A	57,4	54,2	15064,55	57,60	5,78
Intermedios	K-10A	59,2	55,8	16006,08	58,03	5,85
	K-10B	55,8	52,7	14593,78	59,17	5,99
	K-10C	52,7	50	12710,71	57,66	5,76
	K-10D	50	47,55	11533,80	58,41	5,85
	K-10E	47,55	45,35	10356,88	58,77	5,88
	K-10F	45,35	43,4	9179,96	58,33	5,81
Inferiores	K-10F	48,4	46,15	10592,26	58,17	5,80
	K-10E	46,15	44,15	9415,34	57,73	5,73
	K-10D	44,15	42,35	8473,81	58,17	5,78
	K-10C	42,35	40,75	7532,28	57,87	5,72
	K-10B	40,75	39,3	6826,12	58,68	5,82
	K-10A	39,3	38	6119,97	59,04	5,86

Tabla N° 6.6 Velocidad del aire recomendada para cada par de difusores

Se observa que la velocidad del aire a la salida de los difusores necesaria para enfriar el sulfato de aluminio de 80 a aprox. 40 °C es de 6 m/s aproximadamente, la cual es menor a la velocidad obtenida en el caso anterior (7 m/s), eso quiere decir que a pesar de obtener una pequeña disminución de temperatura en el aire por el enfriamiento simple, se puede obtener la temperatura de salida deseada en el sulfato con un menor caudal de aire. Los caudales requeridos para cada ducto se muestran a continuación:

Ducto	Difusor	V _{aire} [m/s]	Q [m ³ /s]	Q _T [m ³ /s]	Q _{sum} [m ³ /s]
K-10A	Superior	5,78	2,15	6,51	5,56
	Intermedio	5,85	2,18		
	Inferior	5,86	2,18		
K-10B	Superior	5,88	2,19	6,58	5,56
	Intermedio	5,99	2,23		
	Inferior	5,82	2,17		
K-10C	Superior	5,84	2,17	6,44	5,56
	Intermedio	5,76	2,14		
	Inferior	5,72	2,13		
K-10D	Superior	5,93	2,21	6,53	5,56
	Intermedio	5,85	2,17		
	Inferior	5,78	2,15		
K-10E	Superior	5,90	2,20	6,51	5,56
	Intermedio	5,88	2,19		
	Inferior	5,73	2,13		
K-10F	Superior	5,79	2,16	6,47	5,56
	Intermedio	5,81	2,16		
	Inferior	5,80	2,16		

Tabla N° 6.7 Velocidad y caudal requerido para cada difusor y para cada ventilador

Nota: El Q_T requerido es el caudal que debe suministrar el ventilador de cada ducto para obtener la disminución en la temperatura del sulfato deseada. El Q_{sum} es el caudal que suministran actualmente los ventiladores de cada ducto.

Como se observa en la tabla anterior el caudal que necesitan los ventiladores para enfriar el sulfato de aluminio es mayor al que pueden suministrar actualmente, lo que indica que a parte de enfriar el aire también se debe aumentar el caudal de los ventiladores. De los dos estudios anteriores (aumento de velocidad y disminución de la temperatura del aire) y de las inspecciones y evaluación realizada al proceso de enfriamiento del sulfato surgen las siguientes propuestas:

1. Realizar reparaciones generales a todos los ductos que forman parte del sistema de ventilación con el fin de corregir las obstrucciones internas, huecos en paredes, orificios en los difusores, abolladuras y hundimientos,

corrosión y suciedad severa, daños en los motores de los ventiladores y obstrucción de los damper, para que los ventiladores suministren el mismo caudal a todos los difusores, y la velocidad del aire a la salida de estos sea la misma.

2. Aumentar el caudal de aire que suministran los ventiladores de 20000 m³/h a 29000 m³/h (si solo se quiere aumentar la velocidad del aire) para poder obtener la temperatura de salida deseada en el sulfato de aluminio (35-40 °C).
3. Para mantener los ventiladores que se encuentran actualmente en servicio se deben variar sus rpm para determinar si son capaces de suministrar el caudal requerido, de no ser así se deben cambiar por ventiladores que puedan suministrar los 29000 m³/h. Las nuevas rpm de los ventiladores se calculan aplicando semejanza:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad \text{donde:}$$

Q_1 = Caudal que suministran los ventiladores. [m³/h]

Q_2 = Caudal que deben suministrar los ventiladores. [m³/h]

N_1 = rpm actuales de los ventiladores.

N_2 = rpm que deben tener los ventiladores para suministrar el caudal requerido.

Despejando N_2 tenemos:

$$N_2 = \frac{N_1 \times Q_2}{Q_1} \qquad N_2 = \frac{1750 \text{ rpm} \times 29000 \text{ m}^3/\text{h}}{20000 \text{ m}^3/\text{h}}$$

$$N_2 \approx 2550 \text{ rpm}$$

4. Realizar un breve estudio para la instalación de una cámara de humidificación que permita disminuir la temperatura del aire mediante un enfriamiento simple. En este estudio se determinaran las dimensiones y características generales que debe tener dicha cámara. Esta propuesta por si sola no es suficiente para disminuir la temperatura del sulfato de aluminio hasta 35-40 °C, además hay que aumentar el caudal que suministran los ventiladores de 20000 m³/h a 25000 m³/h.

5. Si se decide tomar la propuesta de la cámara de humidificación manteniendo los ventiladores que se encuentran actualmente en servicio, se deben variar sus rpm para determinar si son capaces de suministrar el caudal requerido, de no ser así se deben cambiar por ventiladores que puedan suministrar los 25000 m³/h. Las nuevas rpm de los ventiladores se calculan aplicando semejanza:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Despejando N_2 tenemos:

$$N_2 = \frac{N_1 \times Q_2}{Q_1} \qquad N_2 = \frac{1750 \text{ rpm} \times 25000 \text{ m}^3/\text{h}}{20000 \text{ m}^3/\text{h}}$$

$$N_2 \approx 2200 \text{ rpm}$$

CAPÍTULO VII

FACTIBILIDAD ECONÓMICA

Para el caso de inversiones pequeñas, el Método Pay-back ó Tasa de retorno de inversión (T.R.I.), puede ser utilizado para investigar la factibilidad de proyectos o propuestas. En este caso, se plantará una breve factibilidad económica para estimar los costos que implicaría la implementación de las propuestas planteadas en la sección “Vacío, Mezcla y Cristalización”.

El período ó Tasa de retorno de la inversión, está definido como el número de años de los ahorros de los gastos de mantenimiento requeridos para igualar la inversión inicial. Los períodos aceptables para recibir la utilidad por el método Pay-back, oscilan entre 0 y 5 años.

T.R.I = Tasa de retorno de inversión =

(Gastos de la solución o mejora / Gastos en mantenimiento de la empresa) (ecuación 6.1)

➤ **Gastos de las propuestas:** (tabla 7.1)

	* Pintura termo aislante	Lana mineral
Precio del aislante + Recubrimiento [Bs.]	2.108.800,00	480.000,00
Precio del las canaletas + tapas(mano de obra) [Bs.]	950.000,00	
Precio Acero Carpenter [Bs.]	650.000,00	
Precio Acero 316L [Bs.]	340.000,00	
Precio estructuras de confinamiento [Bs.]	250.000,00	
Precio tapas de bridas [Bs]		
Total [Bs.]	4.298.800,00	2.670.000,00

* Estos precios están calculados en base al cambio : 1US\$ = 1600Bs.

Basados en la fabricación de canaletas de las mismas dimensiones y sección transversal instaladas actualmente

Tabla N° 7.1 Costo de las propuestas

➤ **Gastos en mantenimiento de la empresa:** (tabla 7.2)

→ **Consumo de vapor por paradas diarias:**

- 2 paradas de planta de aproximadamente 10min+15% de uso del vapor durante paradas cortas

$$20 \text{ min} \times 6000 \frac{\text{Bs}}{\text{h}} \times \frac{1\text{h}}{60 \text{ min}} = 2000\text{Bs} + 300\text{Bs}(\text{tratamiento químico}) = 2300\text{Bs.}$$

	Diario	Anual
Kg de vapor consumido [Bs]	2300	621000
Cambio de cintas rodillo [Bs]		2500000
Costos en mantenimiento anual [Bs.]	3121000	

Tabla N° 7.2 Costos aproximados de mantenimiento en la sección: Vacío, Mezcla y Cristalización

➤ **Cálculo de la T.R.I :**

	Pintura termo aislante	Lana mineral
T.R.I. [años]	1,38	0,86
Días laborales	371,89	230,98

Tabla N° 7.3 T.R.I para las propuestas planteadas

Como lo indica el cálculo de la T. R. I, ambas soluciones son factibles y por la cercanía en el tiempo que se recupera la inversión y por las ventajas que presenta la pintura termo aislante, se recomienda la Propuesta que incluya ésta.

Con el fin de cuantificar las pérdidas en Bs. que originan estas paradas de planta realizaron los siguientes cálculos:

- Tiempo promedio de paradas de planta no programadas utilizado en la limpieza de canaletas por día: 15 minutos:

Si, el volumen de producción es de 3,18 Kg/s (mediciones efectuadas de caudal, tabla 5.16) , entonces, en minutos se producen:

$$3,18 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} = 190,8 \frac{\text{Kg}}{\text{min}} ;$$

Si el precio del Kg. del sulfato de aluminio para la venta es de 110 Bs., entonces el dinero que se deja de percibir anualmente por concepto de paradas de planta no programadas es:

$$15 \text{ minutos} \times 190,8 \frac{\text{Kg}}{\text{min}} = 2.862 \text{Kg} \times 110 \frac{\text{Bs}}{\text{Kg}} = 314.820 \frac{\text{Bs}}{\text{día}} \times \frac{270 \text{ días}}{\text{año}} = 85.001.400 \frac{\text{Bs.}}{\text{año}} .$$

CONCLUSIONES

- La información referente a las propiedades y características del sulfato de aluminio, no es de fácil acceso en literaturas convencionales ni a nivel comercial; por ello, algunas de ellas se obtuvieron indirectamente por aproximaciones y analogías realizadas con otros materiales de características similares.
- Se pudo conocer de forma general, todo el proceso de producción del sulfato de aluminio sólido, específicamente en las secciones de “Vacío, Mezcla y Cristalización” y “Enfriamiento”, cuyas características más resaltantes es que todos los procesos que allí ocurren están expuestos al ambiente y que la calidad de la mezcla final (sulfato de aluminio fundido y polvillo inoculante), depende mayormente de la pericia del operador de las secciones.
- FERRALCA, no cuenta con registros de fallas y daños relativas a la problemática, en las secciones de “Vacío, Mezcla y Cristalización” y “Enfriamiento”, por lo cual no pudo determinarse de manera exacta su incidencia en el proceso de producción; además, esto refleja que la existencia de los problemas se ha convertido en situaciones regulares capaces de manejar como parte del proceso de producción.
- Los resultados de la inspección visual permitieron: conocer las corrientes de flujos que intervienen en la sección “Vacío, Mezcla y Cristalización”, especificar los equipos que conforman dichas corrientes y detectar las causas observables que originan el salpique de material, atribuibles a dos situaciones: el hecho de que las canaletas se encuentran abiertas y el hecho de la mezcladora expulsa residuos al practicarse la limpieza.

- La evaluación realizada al proceso de transferencia de calor en el sistema de conducción del sulfato de aluminio fundido, permitió determinar que el sistema de calentamiento, no está diseñado para calentar el producto que fluye sobre los equipos, sino, para calentar la superficie de estos, por lo que se invalida la hipótesis de FERRALCA, que el vapor presente en las canaletas y embudo, es para calentar el sulfato de aluminio fundido.

- La evaluación también refleja como resultado que el calor suministrado por el vapor se pierde casi en su totalidad, por lo que hay presencia de choques térmicos entre el sulfato de aluminio con las canaletas y con el aire.

- El factor predominante en la conducción del sulfato de aluminio fundido es la aceleración que adquiere por efecto de la pendiente sobre la que fluye; sumado a esto, la velocidad con la que proviene de la mezcladora por estar siendo agitado, implica un paso aun más rápido por el canal.

- La cristalización prematura que ocurre en las canaletas, es propiciado por la aparición de puntos fríos a los extremos en el área húmeda que forma el sulfato de aluminio fundido con la sección del canal, los cuales, se solidifican, creando pequeños depósitos de producto solidificado; la geometría del canal influye en la aparición de dichos puntos por lo que se propone experimentar con diferentes formas que mantengan todos los puntos superficiales a la misma temperatura.

- Las mejoras propuestas se concibieron bajo las premisas de: establecer alrededor del sulfato de aluminio fundido una atmósfera caliente para disminuir los choques térmicos, lo cual se consigue con la implementación de un sistema termo aislante en la superficie de los mismos, y, disminuir el salpique del producto a los alrededores, lo cual se consigue esencialmente, agregando una tapa removible al diseño original de la canaleta y tapas removibles en las bridas de salida de la mezcladora.

- La sobreproducción de sulfato de aluminio esta afectando negativamente al sistema de enfriamiento, ya que al haber más cantidad de material sobre las cintas de enfriamiento, mayor será el calor que se le debe sustraer para disminuir su temperatura.

- La disminución de la temperatura del aire a través del enfriamiento con humidificación y el enfriamiento simple no permite obtener mejores resultados en el proceso de enfriamiento del sulfato de aluminio debido a la alta humedad de la zona donde esta ubicada FERRALCA.

- El caudal que suministran actualmente los ventiladores de los ductos de ventilación que se encuentran en la sección de enfriamiento no es suficiente para disminuir la temperatura del sulfato de aluminio hasta los valores deseados (35-40 °C).

- La propuesta más viable para su realización, referente al proceso de enfriamiento, es la de aumentar el caudal de los ventiladores (ya sea variando sus rpm o cambiando los ventiladores), ya que instalar la cámara de humidificación también implica que se deba aumentar el caudal de los ventiladores.

- De acuerdo al breve estudio de factibilidad económica realizado, las propuestas que se plantearon con costos estimados, resultan económicamente factibles en el tiempo; se recomienda la implementación de la propuesta que implica el sistema de pintura aislante ya que la diferencia de la Tasa de Retorno de Inversión, no es tan distante y conlleva a beneficios en el área de Mantenimiento.

RECOMENDACIONES

- Realizar un estudio profundo del sulfato de aluminio que produce FERRALCA (SATA, SATA-P y SALH) que permita la recopilación de información referente a sus propiedades y características principales mas importantes (tanto en fase sólida como en su forma fundida), para en trabajos futuros tener acceso a dicha información de manera más sencilla.
- Realizar pruebas en canaletas con geometrías variadas para determinar y estudiar la ocurrencia del fenómeno de cristalización en dichas geometrías. Se recomienda comenzar con la geometría cuadrada o rectangular. (explicado en el análisis de resultados).
- Establecer una forma o método de control más eficiente de entrada de polvillo inoculante a la mezcladora y procurar alargar la tubería bajante de entrada con el fin de minimizar el polvillo que se esparce por efecto de arrastre del viento a los alrededores.
- Las caídas de presión tan elevadas en las líneas de suministro den vapor que van desde las calderas hasta el distribuidor N° 2 (figura 5.3) indican que hay obstrucciones de gran magnitud en estas tuberías, por lo que se recomienda revisar las mismas con el fin de evitar caídas de presión tan elevadas.
- Realizar un seguimiento del comportamiento de la pintura termo-aislante con el fin implementar el sistema progresivamente en todas las aplicaciones que se requieran en FERRALCA; esto debido a su poca mantenibilidad y disminución en costos fijos por compra de aislante convencional.

- Eliminar la placa que secciona el área de salida de la brida de salida No. 1 de la mezcladora. Esto ocasiona una salida brusca innecesaria que favorece el salpique de producto desde ese punto.

- Realizar un estudio más detallado del funcionamiento y los problemas que presentan los molinos gruesos, con el fin de detectar y corregir las otras posibles causas que están ocasionando la obstrucción de los mismos.

- Poner en funcionamiento el ventilador del ducto K-10A que se encuentra en la sección de enfriamiento fuera de servicio.

- Una vez que se seleccione y se ponga en práctica la propuesta más adecuada para mejorar el proceso de enfriamiento del sulfato de aluminio, se recomienda elaborar un plan de mantenimiento para los ductos de ventilación que permita evitar en ocasiones futuras el mal estado en que se encuentran actualmente.

BIBLIOGRAFÍA

1. Askeland, Donald R. **Ciencia e Ingeniería de los Materiales**, Tercera edición, Internacional Thomson Editores, S.A.
2. Avallone, Eugene A.; Baumeister III, Theodore. (1995) **Manual del Ingeniero Mecánico**, Novena edición. Mc Graw Hill. México.
3. Avner, Sydney (1975), **Introducción a la Metalurgia Física**, Mc. Graw Hill, Mexico.
4. Cengel, Yunus A. (1997), **Termodinámica**, segunda edición, tomo II, Editorial Mc. Graw Hill.
5. Committee on industrial ventilation, **Manual of Industrial Ventilation**, Michigan, USA
6. Grim, Nils R. /y/ Rosales, Robert C. (1996) **Manual de Diseño de Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado**, Mc Graw-Hill, Madrid.
7. Hodgman, Charles /y/ Weas, Robert. (1958). **Handbook of Chemical and Physics**, Chemical Rubber Publishing, Cleveland, U.S.A.
8. Holman, J.P. (1998), **Transferencia de Calor**. Primera edición en español. Mc Graw Hill. Pablo de Assas Martínez de Morentín, Teresa de J. Leo Mena, Isabel Pérez Grande. Madrid, España.
9. Incropera, Frank P. (1996) **Fundamentos de Transferencia de Calor**, 4ª Edición, Editorial John Wiley & Sons, Estados Unidos.

10. Kern, Donald. (1965) **Procesos de Transferencia de Calor**, 1ra. Edición en español. Compañía editorial Continental.
11. **Norma venezolana de productos químicos para uso industrial**. Covenin 13-001 Sulfato de aluminio utilizado en el tratamiento de potabilizador de aguas. Requerimientos y métodos de ensayo.
12. Peckner, Donald. (1979). **Handbook of Stainless Steel**. Editorial Mc Graw Hill. USA.
13. Clifford A. Hampel /y/ Gessner G. Hawley. (1982). **Diccionario de Química**. Editorial Grijalbo. Barcelona.
14. Reed-Hill Robert E. **Physical Metallurgy Principles**, by D Van Nostrand Company, Inc, USA.
15. Streeter, Victor; Wylie, Benjamín (1999), **Mecánica de Fluidos**, Novena edición. Mc Graw Hill.
16. Van Waylen, Gordon. (1972) **Fundamentos de Termodinámica**. Editorial Limusa. México.
17. Verhoeven, John D. **Fundamentals of Physical Metallurgy** by Jhon Wiley & sons, Inc.USA.
18. Software de Termodinámica: **“WASP: Water and Steam Properties”**. Version 1.21, Abril 1995, Katmar Software. Sur África

Documentos html:

- a. <http://cabierta.uchile.cl/revista/15/articulos/pdf/edu4.pdf>
- b. <http://www.canalsocial.net/enciclopedia/>
- c. <http://www.arrakis.es/lansac/convec.pdf>
- d. <http://www.cinvestav.mx/publicaciones/avayper/julago02/Misho.pdf>
- e. <http://www.ferralca.com.ve>
- f. <http://www.vendepot.com>

APÉNDICES

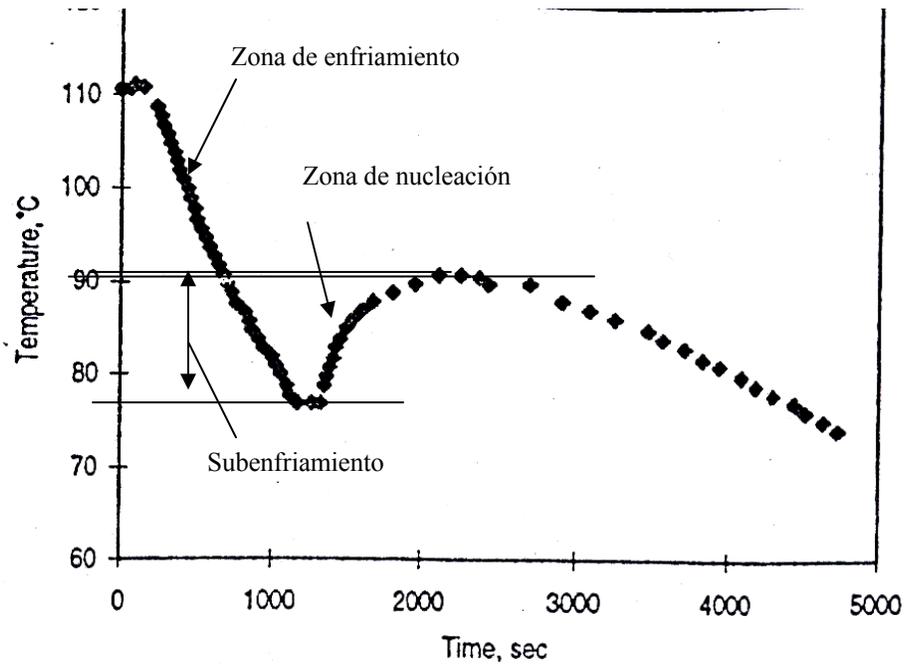


Figura A.1. Curva de enfriamiento del sulfato de aluminio fundido o magmático al 50,25% de $AL_2(SO_4)_3$

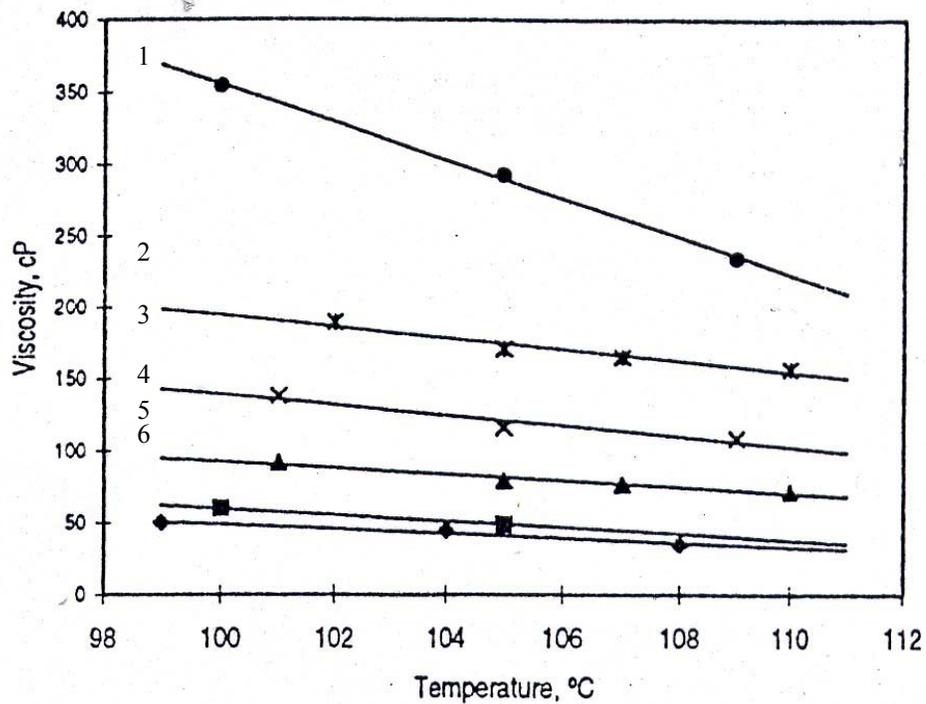


Figura A.2: Variación de la viscosidad de las soluciones de sulfato de aluminio con la temperatura y Composición: % $AL_2(SO_4)_3$ 1: 55,25 %, 2: 53,17 %, 3: 51,57 4: 50,51%, 5: 49,73%, 6: 47,85%

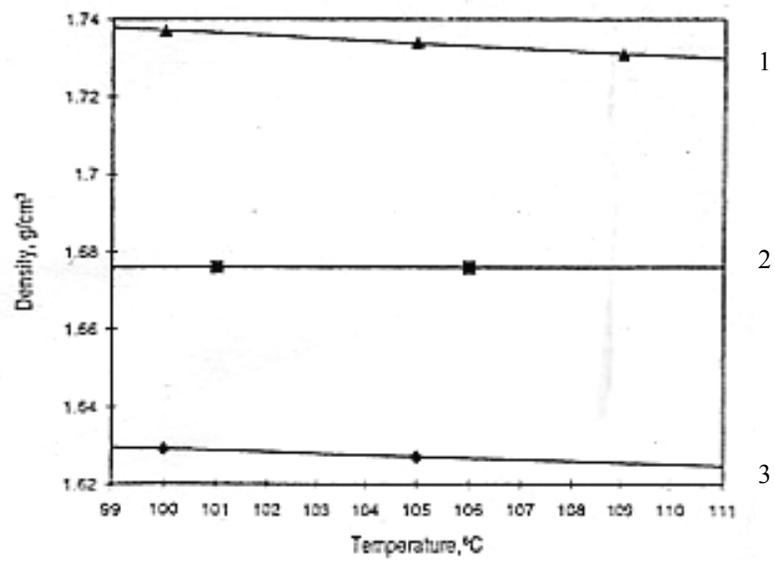


Figura A.3 Variación de la densidad del sulfato de aluminio fundido con la temperatura y la composición.
 Composición: % $Al_2(SO_4)_3$: 1. 55,25. 2. 52,49% 3. 49,73%

Peso Molecular [kg/mol]	252,21
% AL ₂ O ₃	14
% Fe ₂ O ₃	3,5
[% AL ₂ (SO ₄) ₃]	46,98
[% Fe ₂ (SO ₄) ₃]	8,76
Viscosidad [m ² /s]	6,02*10 ⁻⁵
Densidad [kg/m ³]	1520
Temperatura de cristalización [°C]	86,5
Calor específico [J/kgK]	1480,4
Emisividad térmica	0,4

Tabla B.1 Propiedades del sulfato de aluminio (SATA-P)

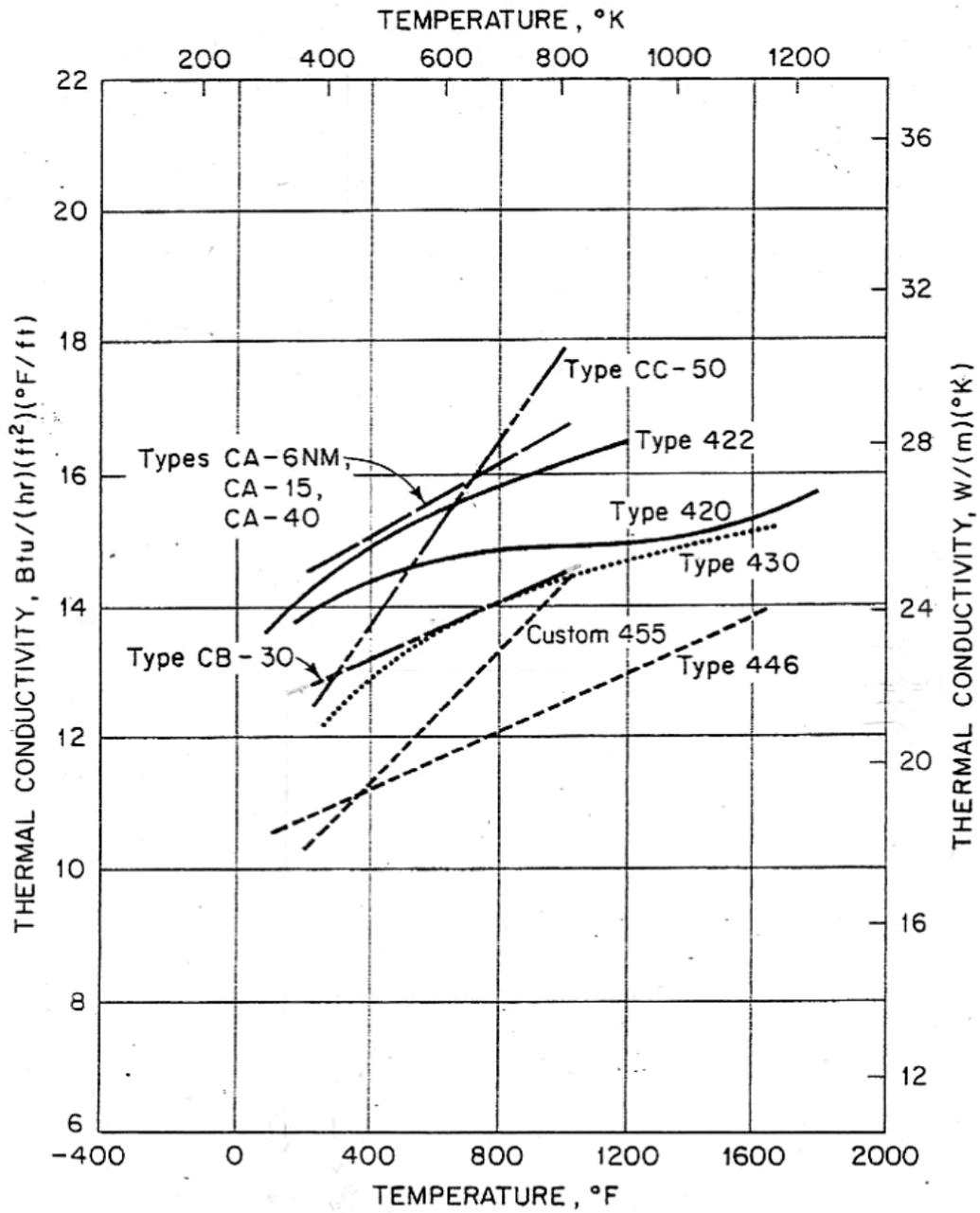


Tabla C.1 Conductividad térmica del acero Carpenter 20Cb-30

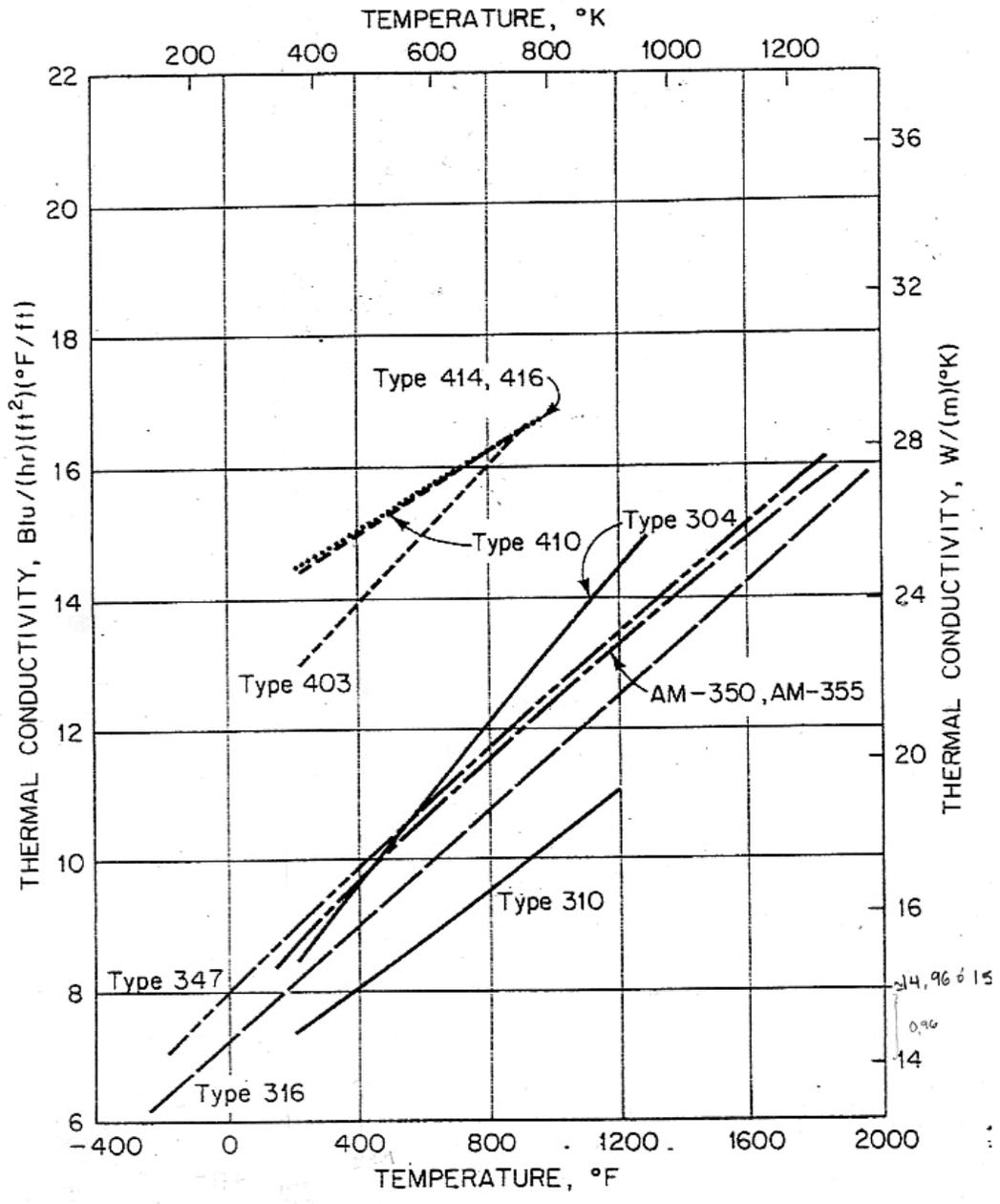


Tabla C.2 Conductividad térmica del acero AISI 316L

Table of Approximate Emissivities

Aluminum	Aluminium	Aluminium	Alumínio	Aluminio	アルミニウム	铝*	0.03-0.30
Asbestos	Asbest	Amiante	Asbesto	Asbesto	アスベスト	石棉	0.95
Asphalt	Asphalt	Asphalte	Asfalto	Asfalto	アスファルト	沥青	0.95
Basalt	Basalt	Basalte	Basalto	Basalto	玄武岩	玄武岩	0.70
Brass*	Messing*	Laiton*	Lalón*	Lalão*	真鍮	黄铜*	0.50
Brick	Ziegel	Brique	Ladrillo	Tijolo	れんが	砖	0.90
Carbon	Kohlenstoff	Carbone	Carbóno	Carbóno	炭素	碳	0.85
Ceramic	Keramik	Céramique	Cerámica	Cerámica	陶器	陶瓷	0.95
Concrete	Beton	Béton	Hormigón	Concreto	コンクリート	混凝土	0.95
Copper*	Kupfer*	Cuivre*	Cobre*	Cobrer*	銅	铜*	0.95
Dirt	Schmutz	Saleté	Polvo	Poeira	土	油泥	0.94
Frozen Food,	Gefroren Lebensmittel,	Surgelée Nourriture,	Congelado Alimento,	Congelados Alimentos,	食料(冷凍)	冷冻食品	0.97
Hot Food,	Heiß Lebensmittel,	Chaude Nourriture,	Caliente Alimento,	Quentes Alimentos,	食料(暖かい)	热食品	0.96
Glass (plate)	Glas (Platte)	Verre (plaque)	Vidrio (placa)	Vidro (prato)	ガラス(プレート)	玻璃板	0.94
Ice	Eis	Glace	Hielo	Gelo	氷	冰	0.98
Iron*	Eisen*	Fer*	Hierro*	Gelo	鉄	铁*	0.70
Lead*	Blei*	Piomb*	Plomo*	Chumbo*	鉛	铅*	0.50
Limestone	Kalkstein	Calcaire	Piedra caliza	Pedra calcári	石灰岩	石灰石	0.98
Oil	Öl	Huile	Aceite	Óleo	油	油	0.97
Paint	Farbe	Peinture	Pintura	Tinta	塗料	油漆	0.93
Paper	Papier	Papier	Pape	Papel	紙	纸	0.95
Plastic**	Kunststoff**	Plastique**	Plástico**	Plástico**	プラスチック	塑料**	0.95
Rubber	Gummi	Caoutchouc	Caucho	Borracha	ゴム	橡胶	0.95
Sand	Sand	Sable	Arena	Areia	砂	砂土	0.90
Skin	Haut	Peau	Piel	Pele	皮	皮肤	0.98
Snow	Schnee	Neige	Nieve	Neve	雪	雪	0.90
Steel*	Stahl*	Acier*	Acero*	Aço*	鋼鉄	钢*	0.80
Textiles	Textilien	Textiles	Textiles	Tecidos	繊維	织品	0.94
Water	Wasser	Eau	Agua	Água	水	水	0.95-0.99
Wood***	Holz***	Bois***	Madera***	Madeira***	木材	木***	0.94

* oxidized; oxidiert; oxydé; oxidado; oxidado

** opaque, over 20 mils; lichtundurchlässig, über 50 µm; opaque, plus de 20 mils; opaco, más de 20 mils; opaco, acima de 20 mils

***natural; natürlich; naturel; natural; natural

(57507-1, Rev. A)

Apéndice E. Tabla de Emisividades aproximadas. Suministrada por el fabricante del Termómetro de Radiación "Raytek".

VELOCIDADES MAXIMAS RECOMENDADAS

Sistemas de baja velocidad (pie/min.)

APLICACIÓN	VELOCIDAD DUCTO PRINCIPAL
Apartamentos, Cuartos de hotel y de hospital.	1000
Oficinas particulares, Bibliotecas.	1200
Cafeterías.	1800
Oficinas públicas, Restaurantes, Bancos	1500
Residencias.	800 – 1200
Escuelas, teatros, auditorios, edificios públicos.	1100 – 1600
Edificios Industriales.	1300 – 2200

Apéndice F. Tabla de velocidades máximas recomendadas para ductos de ventilación.