

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**“PROYECTO DE LIMPIEZA QUÍMICA DE CALDERA RECUPERADORA DE
CELULOSA ARAUCO CONSTITUCIÓN”**

Memoria para optar al Título de:

INGENIERO MECÁNICO

ALUMNO: DANILO ENRIQUE CIFUENTES PALACIOS

PROFESOR GUÍA: YUNESKY MASIP MACIA

2017

Agradecimientos.

En primera instancia agradecer a mis padres por el apoyo incondicional durante todos los años de la carrera, gracias a ellos por brindarme las herramientas para superar este desafío. A mis abuelos y madrina por siempre estar conmigo. A mis amigos por siempre brindarme un oído y aconsejarme en los momentos difíciles y mi polola por estar conmigo en los últimos años de mi carrera, finalmente y no menos importante a mi familia en general.

Resumen.

En la siguiente memoria se estudia la factibilidad técnica y económica de llevar a cabo la limpieza química de una caldera, para esto se contó con los datos técnicos de esta, como también las generalidades propias de la limpieza química. Se realizó el cálculo y selección de los elementos necesarios para llevar a cabo esta faena, tales como bombas, tuberías, entre otros elementos hidráulicos. Finalmente se terminó con una evaluación económica donde se determinó la rentabilidad del proyecto.

Tan importante como es la selección de los equipos adecuados lo es también determinar los productos químicos necesarios para llevar a cabo la tarea. Para esto se realizaron inspecciones de la caldera ubicada en la Celulosa Constitución Arauco, mediante las cuales se obtuvieron muestras de las tuberías de la caldera que posteriormente se enviaron a análisis de laboratorio. Con los resultados obtenidos se pudieron encontrar los productos químicos necesarios para llevar a cabo la limpieza.

Para entender mejor este trabajo se realizó un resumen de los elementos que componen todo el sistema de la limpieza química. Comenzando por definir una caldera, su función y sus componentes, las generalidades de la limpieza química, sus etapas y consideraciones. Concluyendo el resumen con la corrosión, ya que dentro del proceso de mantenimiento que se llevara a cabo se trabaja con ácido lo que es altamente corrosivo, y puede ser un peligro para el personal como para los equipos.

Al finalizar de la tarea se determinó y calculó que la limpieza química que, a pesar del nombre, es un proceso netamente mecánico, que comprende muy poco del elemento químico. Los productos químicos necesarios para llevar a cabo este trabajo están únicamente relacionados con las incrustaciones que se encuentran en la caldera. De esta forma se concluyó que el procedimiento de mantenimiento de limpieza es un proceso con fuertes elementos mecánicos.

Contenido

Capítulo 1 Introducción y Objetivos.....	1
1 Introducción.....	1
1.1 Objetivos	7
1.2.1 Objetivo general.....	7
1.2.2 Objetivos específicos	7
Capítulo 2 Marco teórico	8
2.1 Calderas.....	8
2.1.2 Clasificación de las calderas.....	9
2.1.3 Calderos acuotubulares	14
2.1.4 Descripción del caldero acuotubular	15
2.1.5 Agua de alimentación de la caldera.....	18
2.1.6 Presiones en la caldera	19
2.1.7 Elementos de una caldera acuotubular.....	20
2.1.7.1 Quemadores	21
2.1.7.2 Sobre calentadores.....	22
2.1.7.2 Economizador	23
2.1.7.4 Fogón	25
2.1.8 Eficiencia.	25
2.2 Lavado químico	26
2.2.1 Consideraciones generales	27
2.2.2 Terminología	28
2.2.3 Procesos más comunes de limpieza química.....	29
2.2.3.1 Decapado y pasivación de acero inoxidable.....	29

2.2.3.2 Desincrustación.....	31
2.2.3.3 Desengrasado	31
2.2.3.4 Decapado	31
2.2.3.5 Pasivación del acero al carbono.....	32
2.2.3.6 Fosfatizado de acero al carbón.....	32
2.2.3.7 Descarbonización	32
2.2.4 Etapas para una limpieza química de calderas.....	33
2.2.4.1 Etapa alcalina	33
2.2.4.2 Enjuagues.....	33
2.2.4.3 Etapa ácida.....	33
2.2.4.4 Etapa secuestrante.....	34
2.2.4.5 Etapa de neutralizado y pasivado.....	34
2.2.5 Importancia de la limpieza química.....	34
2.2.6 Aplicaciones de la limpieza química.	35
2.3 Corrosión.....	36
2.3.1 Introducción.	36
2.3.2 Mecanismo de la corrosión	36
2.3.3 Inhibidores de corrosión.....	37
2.3.4 Prueba del inhibidor	38
2.3.5 Pérdida de peso por corrosión.....	39
2.3.6 Apreciación de pérdida de peso.....	39
2.3.6.1 Cupón de corrosión.	40
Capítulo 3 Anteproyecto.....	41
3.1 Requerimientos el cliente.....	41

3.2 Solución Propuesta.....	42
3.3 Planificación en terreno.....	43
3.4 Equipos, herramientas e insumos a utilizar.....	43
3.4.1 Equipos y maquinaria.	43
3.4.2 Herramientas e insumos.	44
3.5 Movilización De Equipos.	46
3.6 Layout de instalación.	48
3.7 Instalación de Faena.....	50
3.8 Programa de trabajo.	50
3.9 Procedimiento de trabajo.	51
3.9.1 Etapa alcalina.	51
3.9.2 Enjuague etapa alcalina.....	52
3.9.3 Etapa ácida.....	53
3.9.4 Etapa secuestrante.....	55
3.9.5 Etapa neutralizado y pasivado.....	56
3.10 Seguridad.....	57
3.11 Evaluación económica.	58
3.11.1 Personal.....	58
3.11.2 Maquinaria e Insumos de Menfis.	60
3.11.3 Productos Químicos.....	62
3.11.4 Equipamiento instalación de faenas.	63
3.11.5 Transporte equipos y personal.....	63
3.11.6 Otros.....	64
3.11.7 Costo total y utilidad de la obra.....	65

3.12 Condiciones comerciales	66
Capítulo 4 Inspección de caldera	67
4.1 Información obtenida de la caldera	68
4.2 Limpieza.....	69
4.3 Estanque de disolución.....	69
4.4 Quemadores.....	69
4.5 Aberturas de los quemadores.....	69
4.6 Tubos del colector.....	70
4.7 Alimentación de agua.....	71
4.8 Sobrecalentadores.....	72
4.8.1 Sobrecalentador secundario I y II	72
4.8.2 Sobrecalentador primerio I y II.....	72
4.9 Colectores.....	73
4.9.2 Colector superior (Domo vapor).....	73
4.9.3 Colector inferior (domo agua)	74
4.10 Economizador I y II.....	76
4.11 Depósitos e incrustaciones.....	76
4.11.1 Densidad de incrustaciones en las muestras.....	77
4.11.2 Tipos de depósitos en las muestras analizadas.....	78
4.11.3 Resultados obtenidos de los análisis.....	78
4.11.4 Análisis de tubos de piso, pantalla y resultados.....	79
Capítulo 5 Ingeniería.....	82
5.1 Velocidad del agua.....	83
5.2 Cálculos y consideraciones.....	83

5.2.1 Pérdidas de carga del sistema.....	84
5.2.1.1 Pérdidas de carga en tramo A-E.....	84
5.2.1.2 Pérdidas de carga en tramo B-E.....	95
5.2.1.3 Pérdidas de carga en tramo C-E.	100
5.2.1.4 pérdidas de carga en tramo F-G.....	105
5.2.2 Cálculo de bombas.	110
5.2.2.1 Bomba tramo A-E.	110
5.2.2.2 Bomba tramo B-E.	114
5.2.2.3 Bomba tramo C-E.....	114
5.2.2.4 Bomba tramo F-G.....	117
5.2.3 Mangueras para manejo de ácido.....	119
5.2.4 Reductor y juntas de expansión.....	120
5.2.5 Camión con cisterna criogénica y vaporizador.....	120
5.3 Cálculo de concentración de productos químicos.....	121
5.3.1 Fases y disoluciones.....	121
5.3.1.1 Disoluciones.	122
5.3.1.2 Disolución de productos líquidos.	122
5.3.1.3 Disolución de productos sólidos.	123
5.3.1.4 Disolución de productos químicos líquidos “hidratados”.....	124
5.3.2 Productos químicos.	125
5.3.2.1 Productos químicos etapa alcalina.	126
5.3.2.2 Productos químicos etapa ácida.....	127
4.3.2.3 Productos químicos en etapa secuestrante.....	131
5.3.2.4 Productos químicos etapa neutralizado y pasivado.....	131

5.3.2.4.1 Carbonato de Sodio 0,5%.....	131
5.3.2.4.2 nitrógeno.....	131
5.4 Resultados.....	131
Conclusión.....	133
Glosario.....	135
Bibliografía.....	138
Anexos.....	139

Capítulo 1 Introducción y Objetivos.

1 Introducción.

Esta memoria se realiza en base al proceso de mantenimiento de limpieza de calderas, procedimiento que no está dentro de los servicios de la empresa en la que se desarrolla este proyecto; por lo tanto, se busca innovar y expandir el negocio hacia nuevos rumbos abriendo puertas a otras oportunidades.

Para comprender un poco de que trata este procedimiento, se debe entender el porqué de realizarlo. Es importante mencionar que, en una caldera, se generan incrustaciones y depósitos contaminantes mermando su eficiencia y disminuyendo su producción, dejando de realizar su función de forma adecuada. Los problemas antes mencionados se deben a una deficiencia en la transferencia de calor, el desgaste por corrosión y otros procesos que afectan al material, pudiendo producir incluso accidentes y pérdidas humanas, ya que la temperatura y la presión aumenta llegando a niveles peligrosos. Debido a lo anterior la caldera cuenta con tratamientos de agua, para dejar este fluido lo más puro posible para su uso, pero, aun así, con el uso constante y el desgaste se hace imposible no realizarle mantenimiento a la caldera. Un caso claro de no purificar el agua, es el ensuciamiento del lado agua de las tuberías, puesto que, al generarse vapor, quedan en el agua todas las sales que esta puede contener, que se depositan como incrustaciones en los sectores más calientes. Por esta razón es de vital importancia realizar un correcto mantenimiento de la caldera.

Las primeras calderas datan de antes de la Revolución Industrial. Dentro de ellas podemos encontrar que estas se utilizaban para diversas funciones domésticas como medios para teñir ropa y producir vapor para limpieza. Hasta que en el año 1669 el físico e inventor Dionisio Papin creo el primer generador de vapor más conocido como "marmita". Lamentablemente esta tenía el problema de que los gases calientes estaban en contacto solamente con la base (lugar donde se produce la combustión) y en consecuencia se desaprovechaba el calor del combustible, porque se usaba vapor húmedo reduciendo la eficiencia térmica. Como consecuencia no funcionaba por un

tiempo prolongado. Años más tarde, el ingeniero mecánico e inventor escocés James Watt observó que se podría utilizar el vapor como una fuerza económica capaz de reemplazar la fuerza animal y manual y debido a este descubrimiento se empezó a desarrollar la fabricación de calderas. Estas a diferencias de las Papin, se les introdujo tubos para aumentar la superficie de calefacción, es decir para que el calor producido por el combustible subiera por las tuberías aumentando el alcance de la energía térmica producida. Inicialmente la caldera fue empleada como máquina para accionar bombas de agua, de cilindros verticales.

Tanto fue el impacto del descubrimiento de la caldera, que hizo que esta fuese una de las principales fuerzas impulsoras de la Revolución Industrial. Esto se debe a que aceleró portentosamente el desarrollo económico de muchos de los principales países de la Europa Occidental y de los Estados Unidos. Solo en el período entre 1890 y 1930 la máquina de vapor dejó lugar a los motores de combustión interna, especialmente los impulsados por hidrocarburos derivados del petróleo. Su principal importancia dentro de la Revolución Industrial fue que llegó a implantarse en todas las industrias y a utilizarse en el transporte, dejando obsoleto a otros medios como el animal de tiro, el molino e incluso la propia fuerza del hombre.

Es tan variada la gama de calderas que existieron y que existen que podemos encontrarlas para diferentes tipos de aplicación y en distintas configuraciones. Dentro de los tipos se han construido para tracción, utilizadas en locomotoras para trenes, tanto para carga como de pasajeros. Existe una caldera multi-tubular preparada para quemar carbón o lignito. Los gases de combustión caliente; pasan por los tubos cediendo su calor al agua que los rodea. Se han creado también para la generación de energía la cual aprovecha la energía térmica del vapor para convertirla en energía eléctrica.

Una caldera se podría definir **como un generador de vapor o como la combinación de equipos para producir o recuperar calor junto con aparatos para transferir este calor disponible a un fluido**. Este vapor se genera a través de una transferencia

de calor a volumen constante, en el cual el fluido que se encontraba originalmente en estado líquido se calienta, ocurriendo un cambio de fase en un proceso conocido como ebullición. Se aprovecha la energía liberada por este cambio para posteriormente convertirla en otro tipo de energía si esta es una caldera de potencia o para el fin al cual este destinado la caldera.

Si por el interior de los tubos circulan gases o fuego, se les clasifica en calderas pirotubulares (de tubos de fuego) y si por el interior pasa un fluido como agua y vapor se les clasifica en calderas acuatubulares (de tubos de agua). Esta es la gran clasificación de las calderas que será detallada en su debido momento en este trabajo.

La caldera presenta diversos problemas como se mencionó anteriormente, la consecuencia de esto se puede ver al momento en que se ha utilizado la caldera por un tiempo, se empieza a generar transferencia térmica deficiente y se ve afectada la producción. La operación intermitente y a potencias variables también sugiere un problema, ya que facilita el ensuciamiento de los tubos. Por esta razón debe prestarse el mayor cuidado para prevenir el oxígeno y corrosión ácida a través de todo el circuito vapor-agua durante los períodos en los cuales la caldera se encuentre detenida para realizar el mantenimiento. Es por esto que cuando estas máquinas están asociadas a la generación de energía requieren de un proceso de monitoreo constante de los tratamientos de aguas, con el propósito de evitar incrustaciones, como es el caso de la magnetita, esto implica una considerable disminución en la vida útil del equipo.

Existe una tendencia de depositarse el hollín, cenizas y humedad en el espacio entre el refractario del fogón y las superficies exteriores de la cámara de combustión, estas condiciones de depósito no se observan directamente por lo que se debe llevar a cabo inspecciones.

Debido a todos los problemas que afectan a estas máquinas es que se tuvo que optar por limpiarlas químicamente, por esta razón, desde hace unos 40 años las grandes calderas industriales se han diseñado y construidas para realizar una limpieza

química, por dicha razón a la fecha se ha acumulado suficiente experiencia en esta técnica. La limpieza química de caldera siempre es una operación delicada, cada etapa debe ser cuidadosamente preparada y ejecutada por personal experto.

La limpieza química es un proceso industrial de mantenimiento, en el cual se hace circular un ácido fuerte a través de bombas por las tuberías de la máquina, como también se puede realizar por inmersión en una solución limpiadora con el fin de eliminar el óxido y los residuos orgánicos e inorgánicos.

Existen dos tipos de limpieza de caldera, las pre-operacionales que consisten en remover las incrustaciones en el lado agua con el fin de remover aceite, grasa y otras capas protectoras que quedan sobre las superficies internas al finalizar la fabricación, finalmente tenemos las operacionales que se realizan cada cierta cantidad de años durante las paradas de mantenimiento con el fin de eliminar los depósitos de óxido e incrustaciones.

Existen varios tipos de maquinaria a la cual se le puede realizar una limpieza química, como, calderas de biomasa, de radiación, de recuperación, de centrales de carbón, las que son usadas en centrales termo solares, calderas usadas en plantas de cogeneración y de generación de vapor por intercambio térmico

Realizar este procedimiento de mantenimiento es importante ya que se eliminan todos los residuos que se acumulan en la operación de plantas industriales. Además de eliminar todo este tipo de suciedad, protege la superficie, ya que al finalizar las labores de limpieza los tubos de caldera quedan con una película protectora, que retarda la formación de incrustaciones durante un tiempo.

Es de vital importancia realizar una inspección en la caldera, por lo general cada dos años, para determinar la condición de ésta. El mejor diagnóstico que se puede obtener del estado de una caldera se obtiene mediante el análisis de muestras de tubos, este se realiza mediante un laboratorio móvil y un instrumento llamado espectrofotómetro. Mediante éste método se puede conocer la densidad de las incrustaciones y su

composición, además permite estudiar el comportamiento general de la máquina y así tomar las acciones correctivas necesarias en el caso de ser requeridas. Al mismo tiempo determinar el procedimiento que será necesario para llevar a cabo la labor de limpieza, como también los productos químicos requeridos para limpiar las superficies metálicas. Los productos químicos son escogidos basados únicamente en el tipo de incrustación de los tubos de caldera, un caso particular de esto es cuando se hace presente óxido de cobre y hierro en las tuberías. Para remover este tipo de óxido se requiere una solución de ácido clorhídrico entre otros productos químicos.

Dentro de las ventajas de llevar a cabo este proceso podemos encontrar que se ven reducidos los costos de mantenimiento al llevar a cabo una limpieza. En el caso de no realizarla, se debería reemplazar todos los tubos que componen la caldera ya que aumenta la temperatura de los tubos pudiendo producir grietas lo que no es rentable. El mantenimiento de limpieza química ayuda a mejorar la eficiencia térmica, llevando la temperatura de los tubos a valores normales de funcionamiento, en consecuencia, aumentando los niveles de producción. Prolonga la vida de los equipos reduciendo la corrosión en los tubos. Evita la formación de averías en sistemas importantes, ya que las incrustaciones pueden ser arrastradas por los fluidos y dañar equipos de carácter vital para la caldera y además ayuda a proteger el medio ambiente descontaminando los equipos antes de desecharlos.

En resumen, para lograr una mayor eficiencia y reducir los costos, se debe llevar a cabo una limpieza química, ya que es el único procedimiento de mantenimiento, que se puede realizar en una caldera sin afectar su integridad y correcto funcionamiento, además de que gracias a esta labor se pueden prevenir accidentes y salvar vidas.

Dejando los conceptos básicos claros, se determinó que quien lleva a cabo el proyecto de limpieza química de la caldera recuperadora de la Celulosa Arauco Constitución, es la empresa Menfis, que busca expandir su negocio incorporando el procedimiento de limpieza química a sus servicios habituales.

Menfis es la fusión de las experiencias que Task-force y ELETE SA han alcanzado con el correr de los años. La empresa fue fundada en diciembre del año 2012, con profesionales altamente capacitados en el área hidráulica, neumática y química con conocimiento y certificación en la ejecución de pruebas hidráulicas, limpiezas químicas, limpiezas y calibración de ductos y cañerías, Flushing y Micro-filtrado de equipos de sistemas hidráulicos, sanitización de líneas de agua potable y neutralización de estanques de ácido sulfúrico y derivados del petróleo. Con trabajos realizados de Micro-filtrado en Puerto Patache, Flushing en minera Escondida, entre otras.

Con valores fundamentales dentro de la organización, siempre manteniendo una línea de liderazgo en donde la suma de las capacidades individuales está por debajo del grupo de personas que conforman el equipo de trabajo, por lo tanto, las acciones de la unidad de trabajo están por sobre los intereses particulares. Cuenta con alianzas estratégicas con el “Grupo Solarca” empresa española que exige los más altos niveles de calidad y exigencia, ya que Menfis está a favor del crecimiento continuo de la empresa y de los individuos que la componen.

1.1 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Desarrollar el proyecto de lavado químico de la caldera de Arauco Constitución a través de la empresa contratista Menfis y verificar la rentabilidad de este.

1.2.2 Objetivos específicos

- Determinar las condiciones de mantenimiento para esclarecer los requerimientos del lavado químico.
- Calcular y seleccionar la maquinaria auxiliar (Moto bombas centrífugas, mangueras especiales para ácido, tipos de válvulas, vaporizadores entre otros)
- Desarrollar del lavado químico.
- Evaluar económicamente el proyecto y determinar la rentabilidad de este.

Capítulo 2 Marco teórico

2.1 Calderas.

Se considera fundamental dentro de este trabajo entender que es una caldera, sus componentes y cuál es la función de cada uno de ellos, de esta forma se logra una mayor comprensión del funcionamiento de éstas y la importancia de realizar una limpieza química. Tomando esto en consideración se define una caldera como un dispositivo cuya función principal y más básica es calentar agua. La caldera se encarga de absorber el calor proveniente de las áreas del economizador, el fogón, el sobre calentador, entre otros equipos, cuyo esquema está representado en la figura 1. Por lo tanto, se podría decir que el objetivo de una caldera es realizar con la máxima eficiencia posible la transferencia de calor, para así generar energía.

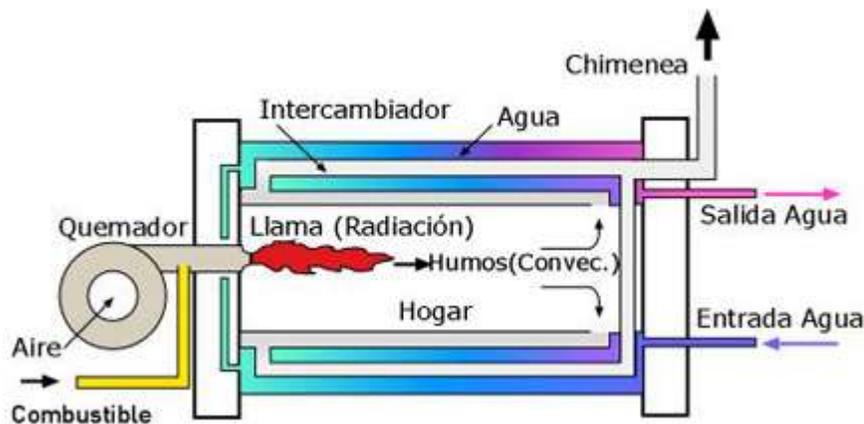


Figura 1. Esquema funcionamiento caldera. Fuente:
<http://es.slideshare.net/maguitedgar/generadores-de-calor-1>

En términos técnicos una caldera es un intercambiador de calor, transforma la energía química del combustible en energía calorífica, además intercambia este calor con un fluido (generalmente agua). Se produce la combustión que es la liberación del calor del combustible y la captación del calor liberado por el fluido. Este calor recibido de la caldera viene dado por los mecanismos básicos de transferencia de calor, la conducción es el calor que pasa de una parte a la otra de la pared del hogar o de los

tubos, por radiación, produce un intercambio de calor de la llama a las paredes del hogar y por último convección a través de un fluido.

Dentro de los tipos podemos encontrar que estas pueden ser eléctricas, a gasóleo o combustible diésel, gas natural, gas butano, entre otros. Las calderas pequeñas, exclusivamente para agua caliente sanitaria, se suelen conocer como calentadores, para emplear en la ducha, el fregadero de la cocina y otros elementos de uso cotidiano.

2.1.2 Clasificación de las calderas

Según el doctor Adúrate Bareyr (R. Adúrate, profesor de calderas, PUCV.) Ya que la norma chilena no habla sobre la clasificación de calderas nos enfocaremos en las normas UNE 9.002 y 9.003 que presentan los diversos criterios de clasificación para las calderas de vapor y las calderas de agua sobrecalentada, respectivamente. En dichas normas, dependiendo de la disposición de fluidos se clasifican las calderas mencionadas en:

1. Calderas de tubos de Fuego (pirotubulares)
2. Calderas de tubos de agua (acuotubulares)

Esta división, sobre todo en el área de calderas acuotubulares, debe ser ampliada para ser más comprensible ya que existe una amplia variedad de este tipo y se pueden clasificar en función de innumerables parámetros. A continuación, se indican de forma resumida diferentes formas de clasificación en función de las distintas variables que las caracterizan.

1. Según la circulación de fluidos

- a. **Calderas de circulación natural (figura 2):** Este tipo de caldera solo emplea los “fenómenos naturales” de circulación y evita la utilización de bombas de alta presión.

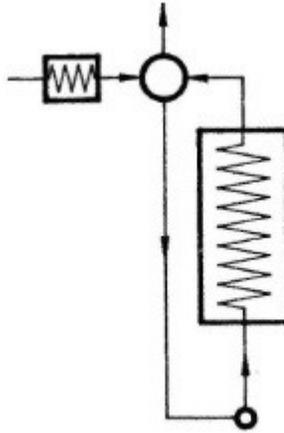


Figura 2. Caldera de circulación natural. Fuente: Apuntes de caldera Prof. Ramón Adúrate PUCV

- b. **Calderas de circulación forzada (figura 3):** La circulación se obtiene por una bomba que impulsa el fluido por una serie de tubos situados en paralelo.

Una desventaja de este tipo reside en su reducida capacidad de acumulación; el peso de agua contenido en la caldera es solamente del 5 al 10 por ciento del caudal horario máximo, comparado con el 20 al 30 por ciento para una caldera de circulación natural.

Las cargas bajas en este tipo de calderas son muy peligrosas ya que como el caudal que circula es pequeño, el agua se vaporiza en su totalidad y puede llegar a pasar al estado de vapor sobrecalentado produciendo grandes peligros para las personas.

El empleo de este tipo de calderas es poco recomendable para presiones bajas, dada la gran variación de densidad del fluido.

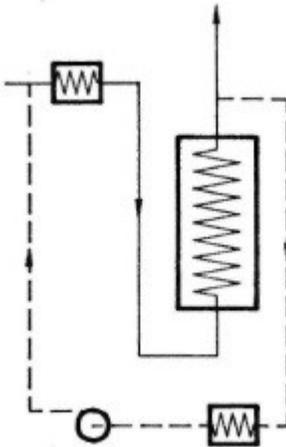


Figura 3. Caldera de circulación forzada. Fuente: Apuntes de caldera Prof. Ramón Adúrate PUCV

- c. **Calderas de circulación asistida (figura 4):** Es una caldera de circulación natural en la que se han intercalado una o varias bombas de circulación en los tubos de bajada.

La igualdad de las velocidades en los tubos, que tienen distintos trazados, se obtiene por medio de diafragmas colocados en la entrada de cada tubo o grupos de tubos. Este tipo de caldera permite arranques más rápidos, ya que la circulación es establecida artificialmente. Se emplea para presiones comprendidas entre 14 MPa y 19 MPa.

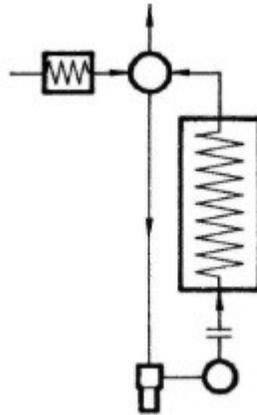


Figura 4. Caldera de circulación asistida. Fuente: Apuntes de caldera Prof. Ramón Adúñate PUCV

- d. **Calderas de circulación combinada (figura 5):** Esta caldera es una combinación de la circulación forzada y de la circulación controlada. En principio, la bomba de circulación trabaja para cargas inferiores al 60-70 por ciento de la plena carga. Para las otras cargas, la caldera trabaja con circulación forzada clásica con la bomba de alimentación. La bomba de circulación permite así soportar cargas notablemente bajas.

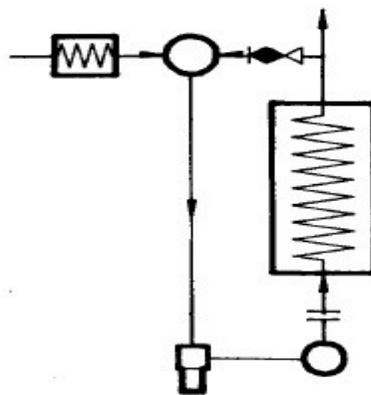


Figura 5. Caldera de circulación combinada. Fuente: Apuntes de caldera Prof. Ramón Adúñate PUCV

2. Según la transmisión de calor

- a. Calderas de convección
- b. Calderas de radiación
- c. Calderas de radiación y convección

3. Según el combustible utilizado

- a. Calderas de carbón (parrilla mecánica, carbón pulverizado y lecho fluidificado)
- b. Calderas de combustibles líquidos
- c. Calderas de combustibles gaseosos
- d. Calderas para combustibles especiales (licor negro, bagazo, desperdicios de maderas, combustibles vegetales, etc.)
- e. Calderas de recuperación de calor de gases (con o sin postcombustión)

4. Según el tiro

- a. Calderas de hogar presurizado
- b. Calderas de hogar equilibrado

5. Según el sistema de soporte

- a. Calderas apoyadas
- b. Calderas suspendidas

6. Según el lugar de montaje

- a. Calderas montadas en taller
- b. Calderas montadas en campo

7. Según su implantación

- a. Calderas terrestres
- b. Calderas marinas

8. Según su ubicación

- a. Calderas a la intemperie
- b. Calderas protegidas contra intemperie

9. Según su operación

- a. Calderas automáticas
- b. Calderas semiautomáticas (automáticas de encendido manual)

- c. Calderas de operación manual

10. Según la presión de trabajo

- a. Calderas sub-críticas
 - i. De baja presión: menor 1,96 MPa
 - ii. De media presión: entre 1,96 y 6,27 MPa
 - iii. De alta presión: mayor 6,27 MPa
- b. Calderas supercríticas

11. Según el medio de transporte del calor

- a. Calderas de vapor
- b. Calderas de agua caliente
- c. Calderas de agua sobrecalentada

2.1.3 Calderos acuotubulares

La caldera en la que se realizara el lavado químico es una caldera de este tipo por lo que se enfocará exclusivamente en esta clase dejando de lado las pirotubulares ya que no son relevantes para esta memoria.

Cuando se requiere trabajar con altas presiones, con un rendimiento mayor a las calderas pirotubulares y un alto caudal de vapor, es cuando se habla de calderas acuotubulares, Según sea el tamaño de la caldera estas pueden estar compuestas por dos colectores a los que llegan todos los tubos y de uno o dos quemadores. (figura 6).

Estas calderas por su configuración y diseño, nos permiten alcanzar presiones altas, que de otro modo sería muy difícil conseguir por la legislación vigente sobre diseño de caldera. Pueden alcanzar los 4,41 MPa.

El funcionamiento de una caldera acuotubular parte por el fogón en donde mediante un quemador se genera una llama, en este lugar se genera el calor que se transmite mediante radiación hacia los tubos de agua. El calor es aprovechado para generar vapor, este es llevado a través de los tubos hacia el colector o domo donde se separa

el agua del vapor, desde ahí es enviado al sobrecalentador, aquí se eleva la temperatura del vapor saturado. Finalmente pasa por el economizador, donde se aprovecha la temperatura de los gases de residuo.

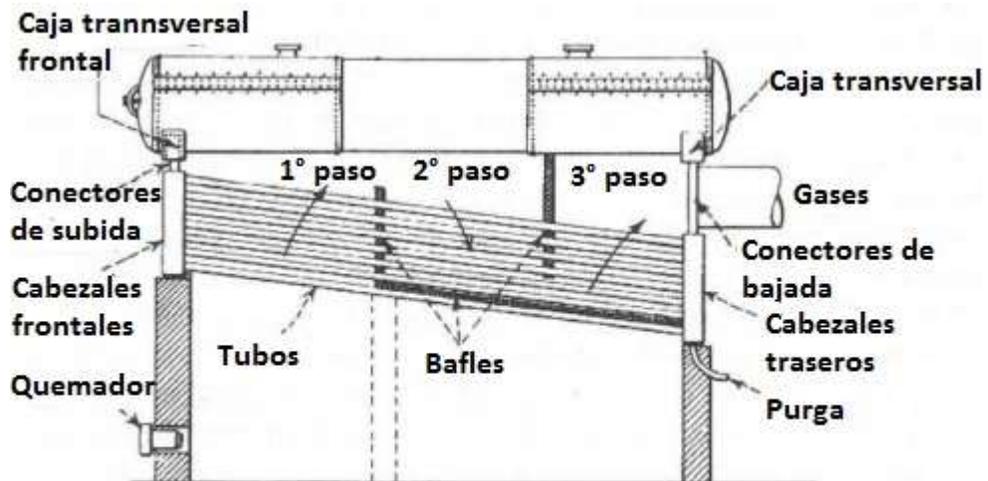


Figura 6. Calderas de tubos de aguas rectos. Fuente: Manual de calderas Industriales.

El costo inicial de una caldera acuotubular es más alto que el de un pirotubulares, sin embargo, esto se compensa con una mayor eficiencia. Esto se debe a la adición de equipos cuyo principal objetivo es la recuperación de calor, lo que permite un retorno de los costos mucho más rápido.

2.1.4 Descripción del caldero acuotubular

En este tipo de caldera se puede utilizar gas, carbón o diésel. Según manual de calderas Capítulo 3 (Anthony Lawrence Kohan. (2000). Calderas De Tubos De Agua. En Manual De Calderas. New York: McGraw-Hill), la circulación es excelente debido a que el agua y vapor suben verticalmente por el interior de los tubos. Los tubos denominados de circulación envían el agua de la caldera al colector inferior. Los tubos verticales absorben el calor irradiado y al mismo tiempo protegen el revestimiento refractario (Ver Anexo 1: Plano de fabricación de caldera acuotubular).

Se les llama paredes de agua a los tubos que se unen para formar el recinto del fogón, este posee una abertura para los quemadores y salidas de gases de combustión. Se produce convección libre, es decir, la circulación del agua es natural, debido a una diferencia de densidad producto del cambio de temperatura. Se separa el agua del vapor en el colector, donde en este mismo lugar se acumula el agua en ebullición.

Dentro de las ventajas que podemos encontrar dentro de una caldera acuatubular, está la rapidez para producir vapor ya que al poseer un menor volumen de agua con respecto a la generación de vapor puede ser puesta en marcha rápidamente, otra ventaja es la ausencia de bombas de agua reduciendo los costos. Si se añaden bombas de circulación se pueden obtener mayores caudales de vapor y una mayor presión. Según Manual de calderas industriales si se cuenta también con una bomba de recirculación, para mover rápidamente el agua en los tubos evaporadores, y un colector para separar el vapor se tiene el tipo Lamont (figura 7).

Por el interior de los tubos pasa agua o vapor de tal manera de que los gases calientes suban y debido a los tubos inferiores que se encuentran inclinados aumenta la superficie de calefacción y se fomenta el ingreso de agua fría por la parte inferior, esto último ocurre al salir el vapor a mayor temperatura por la parte más alta de la caldera. Estas calderas se utilizan mayormente para obtener un mayor rendimiento, ya que los esfuerzos en los tubos están en tracción.

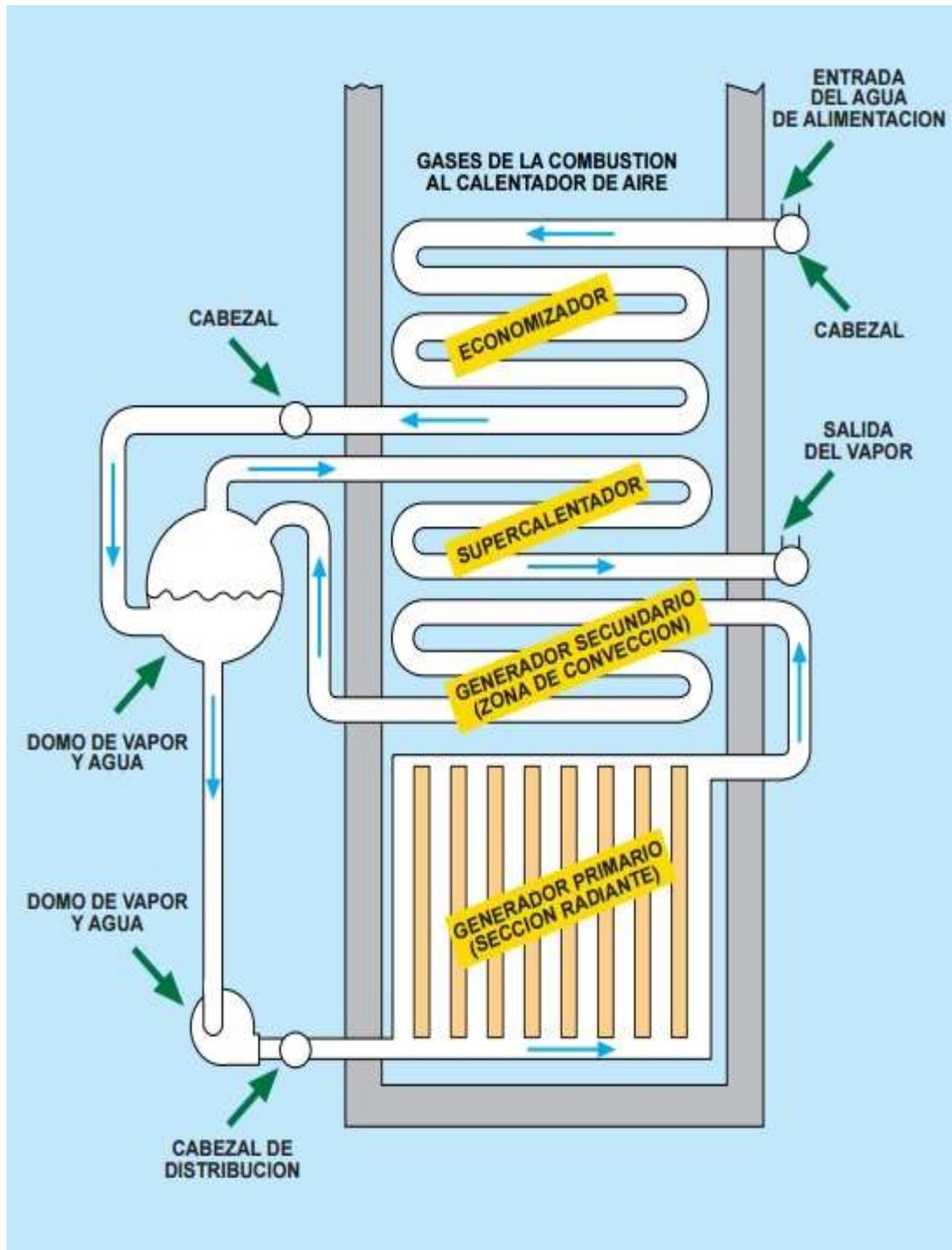


Figura 7. Caldera tipo lamont. Fuente: Achs.

2.1.5 Agua de alimentación de la caldera.

En general el agua con la que se alimenta la caldera viene de ríos, pozos o lagos y esta debe ser filtrada para despojarla de todos los minerales que pueda poseer. Una vez finalizado el filtrado de agua esta debe poseer un pH igual o superior a 7, siendo lo recomendado un pH superior a 10,5 y menor a 12.

Según la achs el agua que alimenta la caldera debe tener las siguientes consideraciones:

- Debe ser clara, con la turbidez inferior a 10 ppm. Si la turbidez es superior a este valor, debe ser sometida a filtración.
- Debe estar totalmente exenta de dureza no carbónica.
- La dureza total no debe exceder de 35 ppm.
- Debe estar exenta de aceites.
- Debe estar prácticamente exenta de oxígeno.
- Debe tener un bajo contenido de sílice.

El agua se puede diferenciar entre agua dura y blanda, siendo la primera rica en minerales como calcio y magnesio, y la segunda contiene una concentración mucho menor de estos minerales. El agua dura se produce generalmente debido a la presencia de minerales en el depósito de agua, siendo estos ríos, lagos, pozos subterráneos entre otros. Los minerales dentro del agua pueden producir muchos efectos dañinos dentro de la caldera, un ejemplo de esto es el barro que se acumula en el fondo de la caldera formando una sustancia fangosa que aumenta la temperatura produciendo un sobrecalentamiento de las planchas inferiores, esto se corrige haciendo purgas de fondo de caldera al final de cada turno. Otros minerales como el calcio pueden formar incrustaciones produciendo un aumento de temperatura en los tubos de caldera pudiendo producir explosiones.

Según la norma chilena NCH 286:

- Toda caldera de vapor deberá estar equipada con una o más cañerías de desagüe, comunicadas con el punto más bajo de esta y destinados a las purgas y extracciones sistemáticas de lodos.
- La descarga de las cañerías de purga solo podrá vaciarse al alcantarillado público o particular a través de un estanque de retención.
- Las líneas de extracción de fondos deberán estar provistas de dos válvulas: una de corte rápido y la otra de compuerta, cuando corresponda, ubicada entre la caldera y el estanque de retención. Estas válvulas deberán estar siempre cerradas y operativas.

El agua de la caldera se almacena en un tanque de relleno, de esta forma siempre existe un volumen de agua disponible para demandas mayores de agua. El nivel de agua se mantiene mediante una válvula flotadora. Para alimentar la caldera se hace uso de una bomba de alta presión ya que el agua de alimentación se encuentra a una presión inferior al agua de la caldera, por esta razón la bomba eleva la presión ligeramente por encima de la presión de operación.

2.1.6 Presiones en la caldera

La temperatura y la presión a las cuales opera una caldera tienen una relación definida, según se muestra en la siguiente tabla 1

TEMPERATURA		PRESIÓN MANOMÉTRICA	
°F	°C	MPa	Psi
212	100	0,1	14,5
300	142	0,361	52,35
400	232	2,797	405,77
500	260	4,69	680,22
600	316	10,556	1531,01

Tabla 1. Punto de ebullición del agua de distintas temperaturas. Fuente: Universidad Nacional De Callao.

A presión atmosférica normal, el agua hierve a 100°C (212°F); a presiones más altas se incrementa el punto de ebullición, alcanzando un máximo de 374°C (705°F) a una presión de 22,064 MPa (3200 PSI). Arriba de esta temperatura el agua no puede existir como un líquido.

2.1.7 Elementos de una caldera acuotubular

El decreto supremo número 10 del ministerio de salud de Chile, habla sobre los elementos que posee la caldera y la legislación vigente sobre ellos. Dentro de una caldera se puede encontrar diversos elementos pertenecientes a la superficie de calefacción, como se muestra en la figura 8. Esto comprende tubos de pantalla, fogón, economizadores, sobrecalentadores y calentadores de aire, incluye también un equipo de combustión de carbón, diesel o gas natural, sistema de tiro, un cenicero, al igual que un bucle de circulación de agua.

La legislación vigente de calderas dicta que se deben tener puertas de inspección con el fin de inspeccionar o reparar la caldera, tiene que haber de dos tipos, de hombre y de registro, se hace la distinción debido al tamaño de estas, siendo la segunda de un menor tamaño por el cual solo puede entrar un brazo. Las puertas de inspección deben tener cerrojos autobloqueantes para que estas no se abran por la presión. Además posee puertas de explosión que se pueden encontrar generalmente en la caja de humos, estas se abren únicamente en el caso de que se produzca un exceso de presión en la cámara de combustión y es necesario que posea deflectores para dirigir las explosiones o gases hacia la parte superior de la caldera.

La caldera cuenta además con diversas válvulas de seguridad que funcionan mediante un resorte que está calculado mediante la compresión, para trabajar en un rango de presión dictado por el fabricante de caldera, estas protegen hacia dos medidas una bajo la presión de trabajo y la presión máxima del colector. Cada 4 meses el servicio de salud de Chile realiza una inspección de válvulas de seguridad. También existen sistemas de purga para evitar la acumulación de residuos contaminantes. En el caso de calderas de poder, poseen cenicero, que se encuentra bajo el emparrillado

con la función de acumular las cenizas, entre otros componentes que serán detallados más adelante.

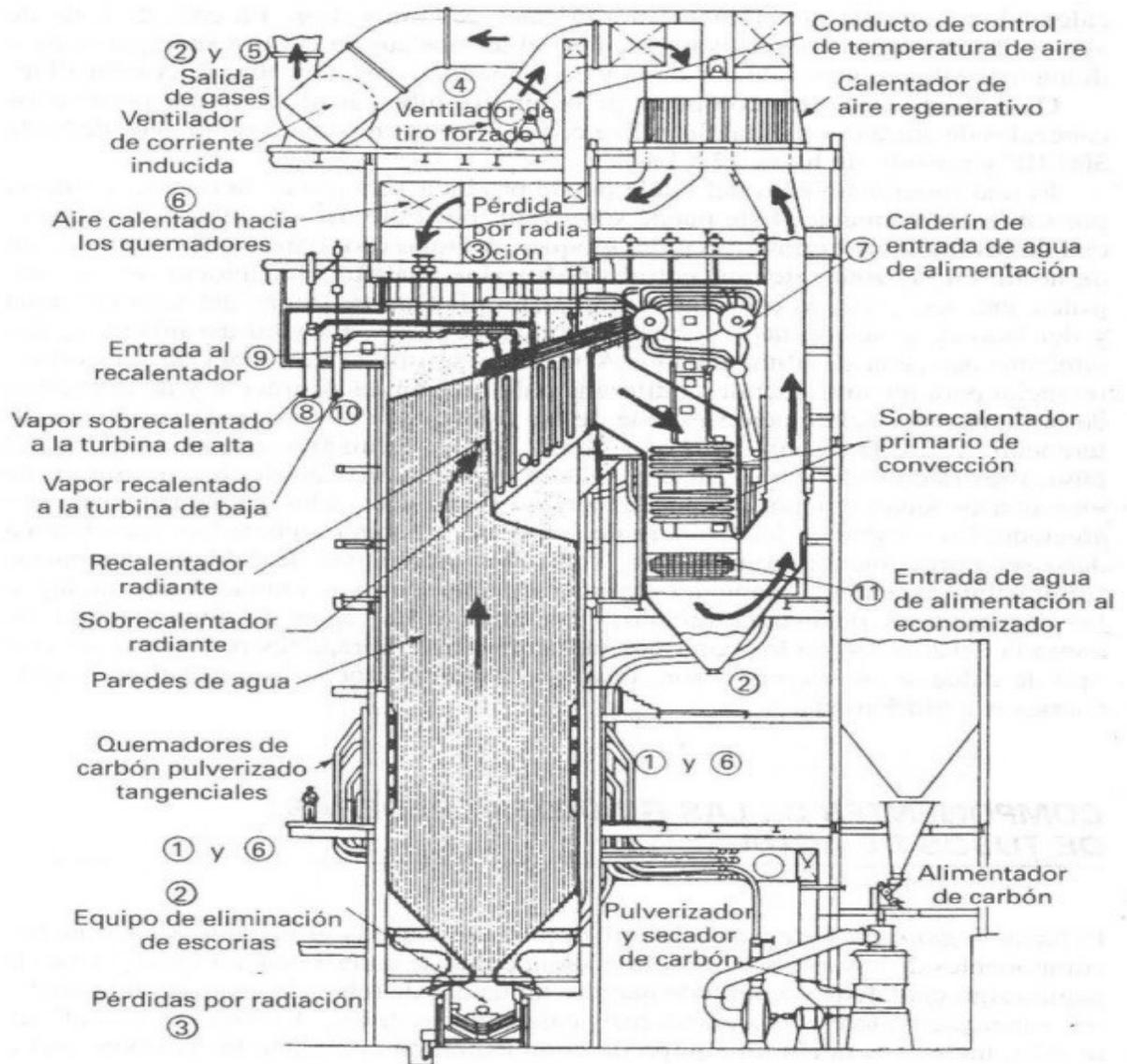


Figura 8. Componentes caldera acuotubular. Fuente: Manual De Calderas Industriales.

2.1.7.1 Quemadores

Un quemador es un dispositivo para quemar combustible y producir calor mediante una llama, estos generalmente son de tipo sopladores, es decir tienen una turbina para aire. Normalmente se cuenta con un visor para poder inspeccionar la llama, ya

que esta no puede estar desviada, y estar en contacto con los refractarios, normalmente este visor es electrónico, puede dar más petróleo o más aire según requiera.

Generalmente en los quemadores de diésel, se cuenta con filtros y bombas, de tal forma que haya dos de cada uno, de manera que siempre exista un bypass ya que, si hay algún problema de alimentación del quemador, la alimentación se realice mediante la bomba auxiliar.



Figura 9. Quemador y hogar. Fuente: Deforsa SA.

2.1.7.2 Sobre calentadores

El sobrecalentador es un equipo de la caldera que tiene por objetivo aumentar la temperatura del vapor saturado. Los tubos del sobrecalentador se encuentran conectados mediante un cabezal de entrada y salida, estos están conectados en serie para elevar la temperatura por pasos.

Los sobrecalentadores se pueden clasificar en dos tipos básicos (figura 10):

- Sobrecalentador de radiación: Se produce un aumento de la temperatura del vapor saturado, mediante radiación de calor del fogón.
- Sobrecalentador de convección: A diferencia del anterior, estos se sitúan en una posición más alejada del hogar de manera que reciban el calor mediante convección de los gases calientes.

La cantidad de vapor producido en la caldera tiene un papel fundamental en el tipo de sobrecalentador, ya que un bajo porcentaje de producción de vapor favorece el tipo radiación debido a que el calor absorbido por las paredes del fogón es menor con relación a la cantidad de vapor generado. En el caso del tipo convectivo, una producción mayor de vapor aumenta la temperatura de salida del sobrecalentador

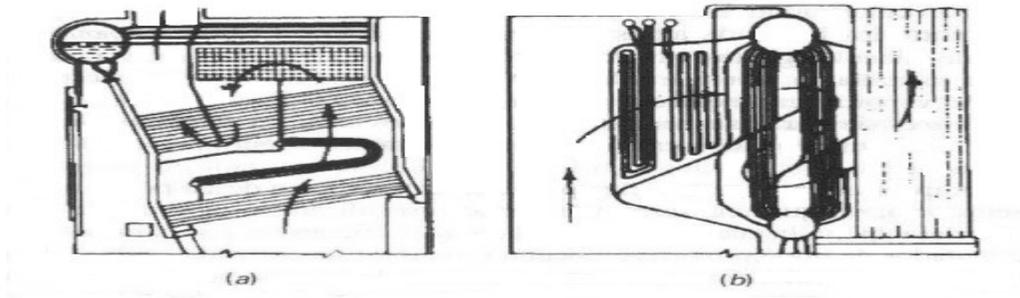


Figura 10. Las designaciones del sobrecalentador incluyen: convectivo, radiante. Fuente: Manual de calderas industriales.

2.1.7.2 Economizador

El economizador es un intercambiador de calor y se encuentra en el punto final de los gases antes de la salida por la chimenea, este recibe agua de alimentación fría y la calienta a un punto cercano al de ebullición antes de conducirla al domo, así el agua perdida por la generación de vapor, es reemplazada con agua con características de temperatura que facilitan su evaporación, resultando así un menor consumo de combustible.

Sirve como captadores, específicamente para quitar calor de los gases de combustión, después de que los gases abandonen las secciones de generación y sobrecalentamiento de la caldera, es decir el objetivo del economizador es aprovechar el calor de los gases de residuo. La clasificación general es:

1. De tubo horizontal o vertical, de acuerdo con la dirección del flujo de los gases respecto a los tubos del haz.
2. De flujo paralelo o contraflujo, con relación a la dirección relativa del gas y del flujo de agua.
3. Vaporizador o no vaporizador, de acuerdo al rendimiento térmico.
4. Retorno curvado o tubos de tipo continuo
5. Tipo de tubo plano o superficie extendida, de acuerdo a los detalles de diseño y la forma de la superficie calefactora.

En teoría la superficie calefactora del economizador puede añadirse a una caldera en la parte en que la temperatura de salida este próxima a la temperatura del aire (figura 11). Pero se necesitaría una superficie de transferencia térmica anormalmente grande. Además, cada combustible quemado tiene su temperatura de punto de rocío que puede producir acumulación de humedad sobre el economizador y corroer la superficie en un período corto de tiempo. La cantidad de superficie calefactora que podría utilizarse en el economizador está limitada por la temperatura final del gas en la salida. Si la temperatura del gas se enfría por debajo del punto de rocío, puede tener lugar la condensación. El azufre en los humos se combina con la humedad para producir ácido sulfuroso o ácido trioxosulfúrico, que es extremadamente corrosivo para todos los aceros de construcción en contacto con los gases entre el economizador y la chimenea.

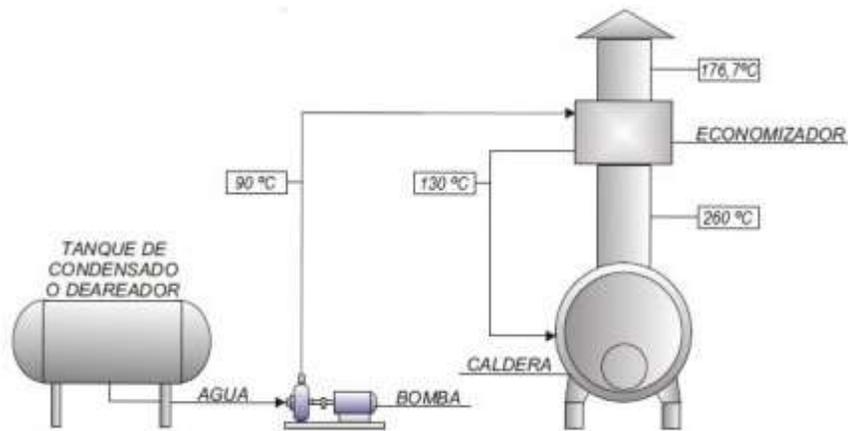


Figura 11. Posición del economizador entre la caldera y la chimenea. Fuente:
<http://www.sermate.es/calderas.html>

2.1.7.4 Fogón

El fogón es el espacio donde se realiza la combustión de la caldera, está compuesta por una pared externa de acero y por ladrillo refractario en el interior del fogón. La transmisión de calor es mediante radiación, es decir no se requiere de un medio intermedio para la transferencia térmica.

2.1.8 Eficiencia.

El objetivo de una caldera además de generar vapor es realizar este proceso con la mayor eficiencia posible, para obtener un mejor aprovechamiento de la transferencia de calor, siendo esta el calor liberado por el fogón que es absorbido por los fluidos en los elementos que la componen.

Las incrustaciones y otros contaminantes como aceites, afectan directamente en la superficie de la transferencia térmica. Las incrustaciones al tener un coeficiente de transferencia térmica menor al del acero, tienen el mismo efecto que un refractario por lo que aumenta la temperatura de los tubos, lo que hace primordial someter el agua a tratamiento químico para minimizar los efectos indeseables.

Según Greenpyme (Greenpyme. (2008). Eficiencia En Caleras. 2016, de ICC) si en el lado fuego los tubos se encuentran sucios, por cada 22°C de incremento en la temperatura de salida de los gases de combustión, implica una pérdida cercana de eficiencia de un 1%. En el lado agua si se llegara a dar una incrustación de 2,5 mm, se tendría una pérdida de combustible de 15%, esto se traduce que a medida que aumenta la densidad de incrustaciones disminuye la superficie de calefacción ya que las incrustaciones funcionan como un aislante, esto quiere decir que se requiere un aumento del consumo de combustible de la caldera reduciendo su eficiencia.

2.2 Lavado químico

El lavado o limpieza química consiste en la eliminación de todo ensuciamiento, deposito, incrustación que altere el buen funcionamiento del equipo. La limpieza se puede realizar de dos formas, en circuitos cerrados mediante la circulación de un fluido limpiador, como el caso de la eliminación de óxido, haciendo circular un ácido; o mediante la inmersión en un baño, especialmente para piezas pequeñas.

Se considera como un procedimiento de mantención industrial, bajo estándares de velocidad definidos y un control de temperatura riguroso. Al ser un proceso delicado se requiere de personal especializado, ya que se pueden ocasionar daños irreparables al sistema con el uso de productos químicos inadecuados

A grandes rasgos la limpieza química parte con una inspección realizado por personal certificado, con el fin de determinar los materiales de construcción y el grado de suciedad en forma cuantitativa y cualitativa (depósitos de suciedad de grasas, aceites o depósitos productos de la corrosión), seguido por el método a utilizar, esto se refiere a la selección de los productos químicos necesarios para limpiar el tipo de depósito encontrado, se seleccionan los equipos y finalmente se lleva a cabo la limpieza.

2.2.1 Consideraciones generales

Una operación de limpieza química no tiene un manual único. La literatura solo brinda ciertos estándares de operación, como temperatura, velocidad de flujos y productos químicos a utilizar para cada contaminante. Los factores importantes en la selección de un método de limpieza se pueden encontrar en Fundamentos de Manufactura Moderna y serán nombrados a continuación:

1. El contaminante que se va a remover
2. El grado de limpieza requerido
3. Los depósitos e incrustaciones que se van a limpiar
4. El propósito de la limpieza
5. Factores ambientales y de seguridad
6. El tamaño y la geometría
7. Los requerimientos de producción y de costos

Es común que en un equipo por donde circula un fluido se alojen contaminantes en las superficies, estos varían dependiendo del origen y composición del fluido circulante. Dentro de los contaminantes se pueden encontrar grasas y aceites, partículas sólidas, películas o capas de óxido y herrumbre. Para seleccionar el mejor método para llevar a cabo la limpieza, lo más importante es determinar el tipo de contaminantes, no se puede utilizar soda caustica para eliminar el cobre de una tubería, como tampoco un ácido para eliminar aceites.

Un factor a tener en cuenta es el grado de limpieza, este se refiere a la cantidad de contaminante que queda después de una limpieza. Hay que ser muy meticuloso ya que las superficies deben quedar lo suficientemente limpias para evitar la adhesión de contaminantes u oxido luego de la limpieza, para esto es común dejar una película protectora en la superficie para evitar la corrosión en un futuro próximo. El grado de limpieza se puede medir de forma cualitativa de dos formas.

- Método de frotado: en el cual se toma una muestra y se frota con una tela blanca limpia, si después el paño queda con manchas, esto quiere decir que aún existen contaminantes.
- Prueba de disolución de agua: consiste en verter agua sobre una muestra, y se observa la cantidad de gotas formadas, si queda una superficie continua de agua quiere decir que la muestra se encuentra sin la presencia de grasas; en el caso de que se presenten gotas en la superficie, implica que hay residuos de grasas en la superficie.

Como lo dice el libro Fundamentos de Manufactura Moderna, otra forma de medir, pero esta vez de forma cuantitativa sería la aplicación de la muestra de varias soluciones de diferentes tensiones de superficie, el nivel de tensión de superficie en la cual ocurren las gotas es una medida de limpieza

2.2.2 Terminología

Para entender un poco mejor este trabajo se distinguen las distintas operaciones de limpieza a continuación:

- **Pre-operacionales:** Una limpieza pre-operacional se realiza antes de poner en marcha una caldera por primera vez, para eliminar todo tipo de suciedad proveniente de la fabricación de la caldera. En trabajos de montaje de tuberías, equipos de acero y acero inoxidable es necesario efectuar una limpieza de arrastre de suciedad, óxidos, calaminas, así como restos de soldaduras. Los casos más significativos es el de decapado y pasivado, es decir la preparación de líneas y equipos previa a su entrada en servicio o funcionamiento.
- **Mantenimiento:** Una limpieza química de mantenimiento se realiza durante la parada de planta para eliminar todos los residuos producto del uso constante del equipo. Un caso de esto es la descarbonatación de un circuito de refrigeración. La eficacia de una limpieza química frente a otros procedimientos alternativos

se fundamenta en ventajas derivadas de la reducción del tiempo, la simplicidad del proceso y el amplio alcance.

- **Flushing:** Movimiento de agua en un único sentido, destinado a arrastrar suciedad y depósitos no adheridos
- **Flushing de líneas de aceite:** Mediante la circulación de un aceite de características al que posteriormente trabajara en el circuito hidráulico, se efectúa un arrastre de todos los elementos sólidos que potencialmente pueden contaminarlo; estas impurezas quedan atrapadas en el sistema de filtraje.
- **Hervido alcalino:** Normalmente la primera etapa destinada a remover los depósitos de origen orgánico mediante soluciones alcalinas en base a detergentes industriales.

2.2.3 Procesos más comunes de limpieza química.

2.2.3.1 Decapado y pasivación de acero inoxidable

La pasivación se aplica a piezas o equipos de acero inoxidable para evitar que el metal sufra corrosión y eliminar contaminantes como óxido de hierro. Para esto se genera una película protectora mediante la utilización de un contaminante como el manganeso. Este proceso se puede aplicar a toda pieza o equipo fabricado de acero inoxidable.

Por otro lado, el decapado es un tratamiento superficial que se aplica mediante el ataque químico de un ácido, con el fin de eliminar todo óxido presente en la pieza o equipo, para esto se debe conocer el tipo de óxido, con este dato se puede seleccionar el ácido correspondiente para eliminarlo. Pero utilizar un ácido es dañino, para evitar esto se utiliza un inhibidor de corrosión que limita el ataque del ácido, reduciendo el daño al metal base

Debido a que se puede catalogar este procedimiento como “nuevo” no existe norma chilena para esto, por lo que en este caso se hará referencia a la norma ASTM A380 (Standard Practice for Cleaning, Decaling, and Passivation of Stainless Steel Parts,

and System) que da una serie de soluciones para limpieza química y tratamiento de ácido. Las más comunes son aquellas que contienen ácido nítrico con una concentración de alrededor del 20%, que son muy buenas para remover manchas y partículas de hierro. Sin embargo, para eliminar la coloración y los óxidos de soldadura se sugiere una solución de ácido nítrico al 10% con 2% de ácido fluorhídrico. La adición de este 2% es esencial, ya que, sin él, el acero inoxidable no se corroe y no se pueden eliminar las zonas con bajo contenido de cromo. El tratamiento se realiza generalmente por inmersión o por lavado del equipo con la solución ácida apropiada. Cuando el equipo no se puede tratar por inmersión. Se pueden utilizar pastas que se aplican con pincel o rodillo y se lavan con agua una vez que hayan actuado. Dado estos tipos de tratamientos incrementan la rugosidad de la superficie, se debe controlar cuidadosamente el proceso. Obviamente estos procesos cambian la apariencia superficial pero generalmente no de una manera inaceptable.

Las incrustaciones de hierro, las coloraciones de soldaduras, la capa reducida en cromo que se encuentra bajo los óxidos, las capas superficiales alteradas por tratamiento mecánico y de pulido y las incrustaciones de sulfuro; se pueden eliminar mediante un tratamiento de ácido. Estos procesos remueven de manera controlada las áreas afectadas, resultando una superficie perfectamente limpia y libre de defectos. La película protectora se forma después de la exposición al aire, agua aireada o ácido nítrico. Los procesos más habituales son:

- Inmersión: es el sistema más habitual para garantizar un decapado intenso en el 100% de la superficie.
- Aspersión: para piezas que por tamaño no pueden ser realizadas por el sistema anterior.
- Manual: para decapar solo zonas determinadas.

2.2.3.2 Desincrustación.

Tiene por objetivo retirar todo tipo de depósito e incrustación adherida generalmente a cualquier superficie en donde se produzca transferencia térmica. Las incrustaciones generalmente se pueden encontrar de distintos elementos como, sílice, óxido (hierro, cobre, entre otros), carbonatos.

Generalmente se utiliza una mezcla de ácidos de HCL (ácido clorhídrico) y H₂SO₄ (ácido sulfúrico) en baja concentración, más adelante en esta memoria se explicará la concentración del ácido. Si la capa de incrustación se hace más gruesa es necesaria la utilización inclusive de ácido nítrico.

2.2.3.3 Desengrasado

Consiste en retirar grasas y/o aceites de la superficie. Estos compuestos son generalmente aplicados en la fabricación, construcción o montaje de los equipos. Los métodos de limpieza son muy diversos, y dependen del diseño del equipo, el tipo y cantidad de grasa. En la limpieza se pueden utilizar alcalinos, detergentes, solventes y medios mecánicos en forma independiente o combinada a presiones y temperaturas desde el ambiente hasta valores elevados como sucede en los hervidos alcalinos a calderas.

2.2.3.4 Decapado

Se refiere al proceso por el cual se retiran productos de corrosión del metal base. Estos ensuciantes pueden originarse en la misma fabricación del metal, como el óxido de laminación o bien derivados de su operación o falta de ella, también al contacto con el oxígeno y la humedad. Se aplica a tanques, tuberías, intercambiadores de calor, calderas y en general a cualquier elemento fabricado a acero al carbono. Se puede aplicar por inmersión, por rociado, con estopa o brocha.

2.2.3.5 Pasivación del acero al carbono

El hierro en estado puro es muy difícil de encontrar, salvo en las minas, esto es debido a su inestabilidad química. Es por ello que normalmente se encuentra asociado con oxígeno, para formar óxidos. Cuando se desoxida el acero al carbono naturalmente se inicia un proceso de re-oxidación y por consecuencia de corrosión. Para evitar esto, es necesario realizar una pasivación y así eliminar la capacidad del hierro de unirse al oxígeno, se aplica en general a cualquier elemento fabricado con este material.

A grandes rasgos se refiere a la formación de una película relativamente inerte, sobre la superficie de un material, que lo enmascara en contra de la acción de agentes externos. En muchos casos la formación de esta película pasivante es espontánea cuando el metal entra en contacto con el agente externo.

En el caso del acero inoxidable, existen primordialmente dos tipos de pasivado de acuerdo con el contenido del ácido principal utilizado en la concentración química estos son el pasivado nítrico y pasivado cítrico. El proceso de pasivación utilizando el ácido cítrico es considerado ecológicamente un poco más sano, aunque actualmente el uso del ácido nítrico como agente es aún más popular.

2.2.3.6 Fosfatizado de acero al carbón

A diferencia de la pasivación, el proceso de fosfatización consiste en cubrir al acero químicamente de una mezcla de compuestos que impiden el contacto del hierro con el oxígeno. Este método se aplica posterior a un proceso de desoxidación y generalmente previo a la aplicación de algún barniz o pintura para superficies externas, ya que provoca un anclaje ideal entre el metal y dichos recubrimientos. Se utiliza también para superficies internas de manera pre-operacional.

2.2.3.7 Descarbonización

Los equipos de combustión o bien aquellos que utilizan fluidos para intercambio de calor como el aceite, a lo largo de su operación generan capas carbonizadas muy

adherentes al metal que requieren retirarse, pues de no hacerlo pueden obstruir boquillas, inyectores o bien impedir la transferencia de calor. En este proceso de limpieza, la formulación química de las soluciones juega un papel determinante. Se aplica a cualquier equipo que por su temperatura degrade aceite o combustible.

2.2.4 Etapas para una limpieza química de calderas

2.2.4.1 Etapa alcalina

El hervido alcalino tiene por objeto eliminar los residuos de tipo orgánico, tales como grasa, polvo, residuos aceitosos, esto se consigue mediante la circulación de una solución alcalina y detergente, y un hervido inicial acompañado de purgas. Al mismo tiempo, este efecto ablanda y preparan las superficies para la remoción de los contaminantes inorgánicos.

2.2.4.2 Enjuagues

Se realiza un enjuague después de cada operación para eliminar cualquier sustancia que quede depositada en las tuberías de la caldera, para esto se ingresa agua desde un estanque a través de las bombas de circulación del sistema auxiliar preparado para las tareas a realizar, de esta manera se prepara la caldera para las siguientes etapas de limpieza.

2.2.4.3 Etapa ácida.

La necesidad de un lavado ácido depende de la presión de trabajo, estado de conservación de las superficies metálicas, criterios recomendados por los fabricantes, análisis de tubo, inspecciones de caldera.

En general, las calderas que operan sobre 900 psi (62 bar), son sometidas a un lavado ácido, mientras que las calderas que operan bajo dicha presión se recomienda el lavado ácido cuando se ha detectado que las superficies metálicas o tubos han sufrido algún ataque corrosivo.

Especial atención debe prestarse a la presencia del óxido de laminación de los tubos, que, de no eliminarse antes de la puesta en operación de la caldera, experimentará su desprendimiento en forma de escamas llegando a dañar las paletas de las turbinas.

2.2.4.4 Etapa secuestrante.

En esta etapa se inunda la caldera con un ácido débil, el cual tiene por objeto capturar los iones férricos que quedan libres tras el lavado con ácido de la etapa anterior. Estos iones férricos son capturados y son eliminados al momento del vaciado de la caldera, impidiendo su deposición como hidróxidos sobre los tubos.

2.2.4.5 Etapa de neutralizado y pasivado.

Durante esta etapa se utilizan soluciones químicas para llevar el pH de las tuberías a valores normales, para su posterior operación, además de brindar una película que sirve como protección contra la corrosión en un futuro próximo, así se podrá operar la caldera de forma normal y con seguridad de que por un tiempo esta no presentará problemas que mermen su eficiencia.

2.2.5 Importancia de la limpieza química.

Como toda operación de mantenimiento esta tiene sus ventajas correspondientes, por lo que se dedicara a esta sección a indagar un poco más en cuales son los beneficios de realizar una limpieza química en una caldera:

- **Prolonga la vida de los equipos:** Las incrustaciones que se adhieren a las tuberías generan un importante incremento de la corrosión en los puntos de adherencia, picando las tuberías y en el caso de las de fino grosor de pared originan fugas. La limpieza química elimina estas incrustaciones.
- **Mejora el rendimiento de los equipos:** el coeficiente de transferencia de calor del acero es entre 15 y 400 veces superior al coeficiente de las

incrustaciones que se depositan durante el funcionamiento normal de una caldera disminuyendo su rendimiento en lo referente a intercambio de calor. La pérdida de carga en una tubería es inversamente proporcional al cubo del diámetro de la tubería. Por ello, disminuciones en el diámetro de las tuberías debido a depósitos de incrustaciones disminuyen el caudal y aumentan las pérdidas de carga, mermando el rendimiento de los equipos.

- **Prevención de averías:** En determinadas instalaciones, las incrustaciones pueden ser arrastradas hasta equipos muy sensibles, ocasionando averías.
- **Protección del medio ambiente:** Durante el desmantelamiento de instalaciones industriales, las tuberías pueden estar contaminadas con productos químicos y para su eventual eliminación es necesario una descontaminación previa.
- **Correcta puesta en marcha:** Al concluir el montaje de instalaciones industriales en los circuitos aparecen contaminantes como restos de tierra, arena, manchas de grasa, piezas oxidadas, que es de absoluta importancia eliminarlas para garantizar el funcionamiento de la instalación según sus especificaciones

2.2.6 Aplicaciones de la limpieza química.

Al llevar a cabo un proceso de limpieza se utilizan una combinación de métodos para lograr el grado de limpieza deseado o requerido. Cada equipo tiene condiciones particulares y por lo tanto requieren diferentes procesos de limpieza debido al grado de ensuciamiento y al diseño del equipo. Algunos de estos procesos sirven para retirar las impurezas de los equipos, eliminar el óxido de hierro, limpiar los contaminantes, evitar la corrosión, eliminar sales insolubles, carbonatos, silicatos, sulfatos y retirar grasas y aceites. Los procesos de limpieza se pueden aplicar en diferentes tipos de materiales como tuberías, estanques, piezas de acero inoxidable, intercambiadores de calor, calderas, evaporadores, entre otros equipos.

2.3 Corrosión.

2.3.1 Introducción.

Debido a que la limpieza química cuenta con una etapa ácida en la que se deben emplear químicos tales como ácido sulfúrico, ácido clorhídrico, ácido fosfórico, se debe tener en cuenta el impacto que pueden tener estos dentro los componentes de la caldera y las consecuencias de utilizarlos sin los aditivos correspondientes, inhibidores de corrosión, ya que estos disminuyen al máximo el ataque corrosivo que sufren los metales al entrar en contacto con soluciones químicas ácidas.

Si bien es cierto los inhibidores no suprimen el ataque corrosivo del metal, lo pueden disminuir a tal punto que su efecto es absolutamente despreciable, lo que para efectos prácticos puede dejarse de considerar. No obstante, como es lógico, la aplicación de los inhibidores y su efectividad debe ser demostrada antes de iniciar una limpieza con productos químicos y se debe trabajar con ellos bajo los estándares básicos de un inhibidor, es decir este no debe trabajar a más de 80°C o pierde su condición de inhibidor.

2.3.2 Mecanismo de la corrosión

Para llevar a cabo el proceso de limpieza se debe considerar el factor de corrosión que es importante ya que se trabajara con ácidos altamente corrosivos, para analizar este tema se puede recurrir al ejemplo típico del mecanismo de corrosión al sumergir un pedazo de Hierro (Fe) en Ácido Clorhídrico (HCL) produciéndose la disolución del Fe y generación de gas Hidrógeno (H₂) como se ilustra a continuación (figura 12):

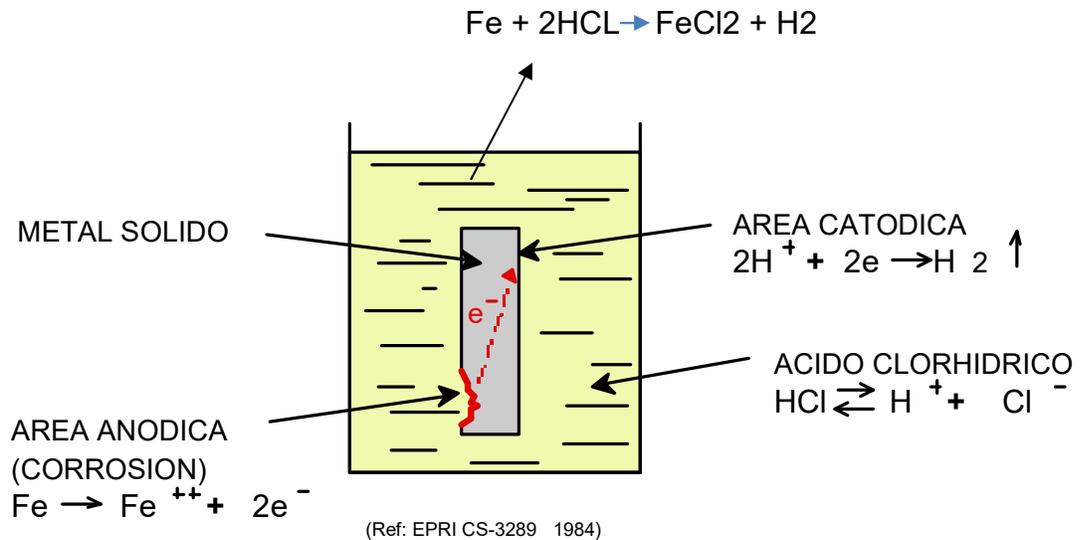


Figura 12 corrosión de hierro en ácido clorhídrico. Fuente: Menfis SpA.

El proceso se desarrolla como sigue:

- El metal se disuelve en el ánodo, por una reacción de oxidación
- Hay un flujo de electrones (corriente eléctrica) entre el ánodo y el cátodo
- Se forma Hidrógeno en el cátodo, por una reacción de reducción

Áreas anódicas están siempre presentes en el Hierro o Acero debido a que el material deja de ser homogéneo porque en el proceso de fabricación, permanecen en su estructura defectos tales como: cavidades, inclusiones, sulfatos, silicatos u otros contaminantes no metálicos.

2.3.3 Inhibidores de corrosión.

Un inhibidor de corrosión es un compuesto químico, comúnmente de origen orgánico, que al agregarlo en pequeñas concentraciones protege o disminuye la reacción de un metal en contacto con una solución química. La composición de los inhibidores es generalmente no revelada por los fabricantes, y guardadas bajo el amparo de una patente registrada, dándose a conocer sólo por una designación propia.

En la medida que las soluciones químicas aplicadas en terreno pueden ser diferentes, los inhibidores deben ser seleccionados en concordancia con la solución química, para que resulten efectivos en su misión de proteger el material del ataque corrosivo, que se produciría si no se le emplea.

El mecanismo de la acción protectora del inhibidor no está en la actualidad bien definido, existiendo varias teorías al respecto; sin embargo, para efectos prácticos, es aceptable pensar que se forma una muy fina película absorbida sobre la superficie del metal, de tal manera que la solución química ataca disolviendo los óxidos, incrustaciones y otros contaminantes que se desea remover, pero no ataca al metal base. Más detalle sobre inhibidores de corrosión se puede encontrar en la norma ASTM G170 (Standard Guide for Evaluating and Qualifying Oilfield and Refinery Corrosion Inhibitors in the Laboratory).

2.3.4 Prueba del inhibidor

Antes de inyectar una solución química al equipo que se desea limpiar, no sólo es necesario asegurar que se ha agregado el inhibidor correspondiente, sino que es necesario probar la efectividad del mismo. Para ello existen varios métodos, algunos de orden práctico que pueden realizarse en terreno dando una aceptable confianza, y otros métodos de laboratorio más exactos.

En la práctica el método más usado y suficientemente confiable es el denominado “prueba del clavo” (nail test), consiste en sumergir un clavo limpio (sin grasa) en un vaso con la solución ácida que se va a inyectar y observar la formación de micro burbujas, que no son otra cosa que la generación de Hidrógeno (figura 13). La efectividad del inhibidor se aprecia cuando la generación de burbujas es pequeña y cesa después de un tiempo, por esto se requiere cierta experiencia en los ensayos que permita comparaciones.

Si se hace el mismo ensayo con la solución química, pero “sin inhibidor”, se observará que el clavo se vuelve blanquecino debido a la gran cantidad de micro burbujas que se generan en toda su superficie.

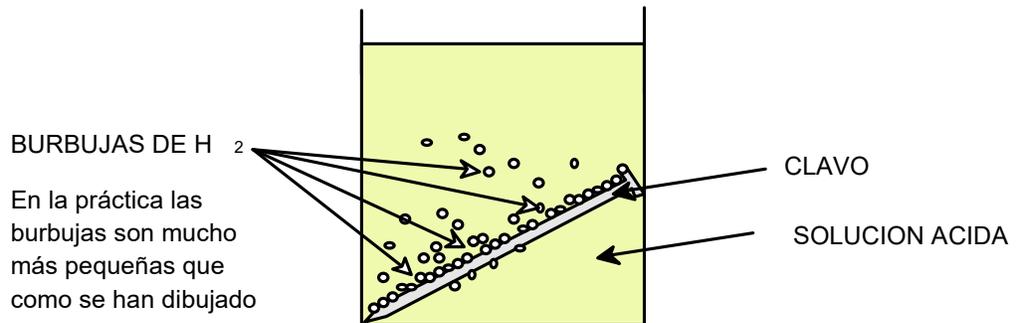


Figura 13. Prueba del clavo. Fuente: Menfis SpA.

2.3.5 Pérdida de peso por corrosión.

Como se indicó en 2.3.3. Los inhibidores no suprimen el ataque corrosivo del metal, pero lo pueden disminuir; entonces cabe preguntarse: qué valor es aceptable y cómo medirlo en terreno. Valores aceptados internacionalmente 10 gr/m² /24 horas, medidos durante el tiempo del proceso de limpieza, no en 24 horas.

2.3.6 Apreciación de pérdida de peso.

No es fácil apreciar qué significa una pérdida de peso por corrosión de 10 gr/m² si no se relaciona, por ejemplo, con la disminución de espesor de una plancha de acero. Para dimensionar valores de corrosión en términos de pérdida de espesor de una plancha de acero es útil usar el siguiente análisis:

Una plancha de acero de 10 dm x 10 dm x 0,01 dm tiene un volumen de 1 dm³ por lo tanto pesa aproximadamente 7,8 kg (figura 14).

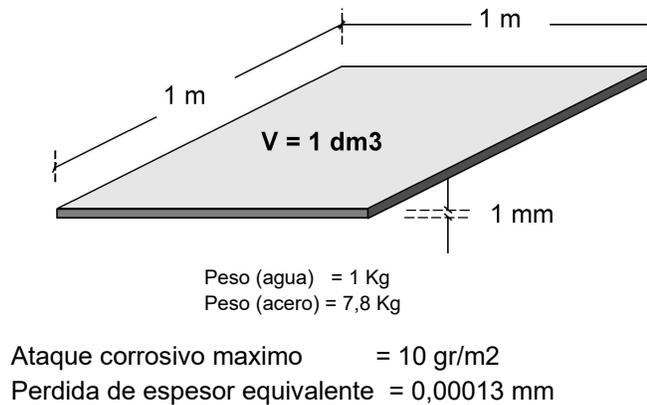


Figura 14 Plancha de acero. Fuente: Menfis SpA.

Si el peso de la plancha disminuye en 10 gr, es equivalente a quitar una lámina de 0,00013 mm de espesor, por lo que se puede establecer que la selección del producto químico con el inhibidor adecuado, no debe ser motivo de preocupación por el ataque corrosivo insignificante que se puede producir.

2.3.6.1 Cupón de corrosión.

Un cupón de corrosión es una placa metálica que se introduce en el área expuesta a corrosión. La evaluación de la corrosión se mide con respecto al peso del cupón antes y después de ser expuesto a la corrosión y en función del tiempo de exposición al ambiente agresivo. Pueden tener la dimensión que muestra la figura 15, generando una superficie total de 0,022 m² (suma de todas las caras). Si la pérdida de peso del cupón medido en una limpieza fuera de 0,001 gr, la corrosión estaría en el orden de 0,045 gr/m², muy por debajo del valor aceptado de 10 g/m² que se indica anteriormente.

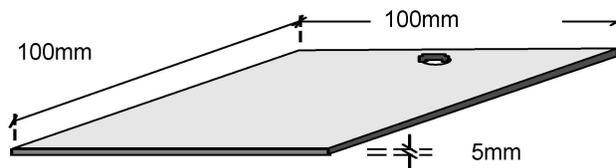


Figura 15 Cupón de corrosión. Fuente: Menfis SpA.

Capítulo 3 Anteproyecto.

Menfis Spa fue contactada por Celulosa Arauco para presentar una oferta técnico-comercial para la ejecución de una limpieza química de la caldera recuperadora Babcock Atlantic, ubicada en Constitución.

Desde el punto de vista operacional, una caldera se debe someter a limpieza química, cuando los valores de concentración de partículas, para una caldera de estas características con una presión de trabajo sobre los 7 MPa exceden los 500 gr/m².

Se realizó un estudio del proyecto presente, basados en la información obtenida vía teléfono y mail, planos, así como, especificaciones propias para este tipo de trabajos. Previo al desarrollo del proyecto se deben tener los requerimientos del cliente, así como, considerar las variables presentes en la realización de los trabajos. Para esto se abarcan todos los temas de planificación tales como, visitas a terreno para esclarecer metodologías de desarrollo, equipos que van a estar presentes en las tareas, logística general, responsabilidades.

Finalmente se procedió a evaluar económicamente el proyecto, tomando en consideración todas las variables que son necesarias para llevar a cabo los trabajos, tales como, personal necesario para realizar la limpieza, cantidad de días que duraran los trabajos, costo de los equipos, personal de instalación, entre otros.

3.1 Requerimientos el cliente.

Celulosa Arauco, planta Constitución, requiere se realice una limpieza química operacional de la caldera recuperadora durante la parada de planta, considerado dentro del mantenimiento predictivo de la empresa. Dado que por ruta de mantenimiento se debe comenzar a bombear la solución química a partir de los economizadores, es que se ha contactado a la empresa Menfis Spa, para realizar esta tarea en específico.

Dentro de lo conversado por teléfono y vía mail, se obtuvo que la caldera presenta un volumen operacional de 186,5 m³ y una concentración de contaminantes superior a 500 gr/m² lo que se considera alta para este tipo de caleras. Aclarada las diferencias entre los distintos tipos de limpieza química, y con esto apuntando a los reales requerimientos del cliente es que se presenta en este estudio la ejecución de una limpieza química operacional para una caldera babcock.

3.2 Solución Propuesta.

VGB recomienda lavados en términos generales sin ser sometidos a mayor análisis, cuando las incrustaciones presentes superan los 500 gr/m². Del análisis de muestras de tubos se determinará la necesidad de ejecutar un lavado alcalino, uno o más lavados ácidos o un lavado especial para remover un contaminante en específico.

En base al estudio de pre-ingeniería se toma como solución, la realización de la limpieza química operacional. Esta comienza por la instalación de los equipos en los espacios disponibles. El programa de trabajo considera, comenzar a bombear las soluciones químicas por los economizadores ya que debido a la hermeticidad de estos no deben quedar partículas de oxígeno alojadas en el equipo, luego a los sobrecalentadores, siguiendo por los tubos de pantalla.

Los criterios de aceptación para este tipo de trabajos son los siguientes:

- La limpieza química se desarrollará en etapas secuenciales de desengrase, decapado, secuestrado y neutralizado-pasivado con los necesarios enjuagues y etapas intermedias aplicables.
- Los residuos líquidos deben ser tratados y destinados al sitio final de acuerdo al trato llegado con el cliente.
- El vaciado de las soluciones ácidas y sus correspondientes enjuagues, debe realizarse bajo atmósfera de gas inerte.
- La efectividad de la etapa alcalina se controla mediante inspección visual en el colector de vapor. El criterio aplicable es que se debe encontrar libre de grasas,

aceite, pintura u otros depósitos orgánicos y en general, libre de materias extrañas.

- La efectividad de la etapa ácida requiere frecuentemente cortar trozos de tubos u otra inspección equivalente. El criterio que se aplica es que los depósitos remanentes no deben exceder los 20 gr/m².
- La pérdida total de peso de los cupones de corrosión, debido al ataque ácido. No debe exceder los 10 gr/m².

3.3 Planificación en terreno.

La planificación en terreno se utiliza como actividad base de todas las que siguen, la idea conceptual de esta, consiste en que un ingeniero o supervisor de Memphis, coordine con la empresa mandante una visita previa a planta para ver los espacios físicos disponibles para la instalación del equipo, geografía del terreno y verificar el tipo de conexión a utilizar en los by-pases.

Además, será útil para definir en conjunto detalles operativos y así permitir que efectivamente se cumplan los requerimientos del proceso, definir en qué operaciones se necesitara apoyo de la empresa mandante, ya sea, apoyo logístico, insumos hidráulicos, combustible, entre otros.

3.4 Equipos, herramientas e insumos a utilizar.

Para llevar a cabo la limpieza química de la caldera recuperadora de Celulosa Arauco se deben considerar elementos, como maquinaria, herramientas, insumos, que van a estar presentes durante todo el desarrollo de la faena. Para esto se realiza un desglose identificando todos los elementos y que herramientas o insumos deben utilizarse para cada equipo.

3.4.1 Equipos y maquinaria.

La visita esclareció los equipos que se deben utilizar en la faena. Todos los cálculos de los equipos que van a ser utilizados se encuentran en la sección 4.2 perteneciente

a la parte de ingeniería que involucra al proyecto. Dicho esto, los equipos a utilizar en la faena son los siguientes:

- Bombas centrifugas:
 - Bomba VOGT serie Ne620 para mover agua a 80°C, perteneciente a la empresa Menfis.
 - Bomba VOGT serie N626 para mover ácido clorhídrico a 40°C, esta debe arrendarse.
 - Bomba VOGT serie N631 para mover la mezcla de productos químicos perteneciente a la empresa Menfis.
- Estanques:
 - Estanque auxiliar para almacenar soluciones químicas con un volumen de 40 m³.
 - Estanque de agua con capacidad de 2040 m³.a 80°C
 - Estanque de agua con capacidad de 1500 m³ con agua a 10°C
 - Estanque con 1100 m³ de nitrógeno líquido. (El nitrógeno se utiliza para el decapado del ácido)
- Mezclador de sustancias químicas.
- Válvulas Saunders especiales para el manejo de ácidos.
- Mangueras especiales para ácido (se seleccionan mediante la temperatura de trabajo).
- Manómetro – vacuómetro para vaciado de caldera con atmósfera inerte para medir presiones entre 0 y 7 bar.
- Uniones especiales para el manejo de soluciones químicas.

3.4.2 Herramientas e insumos.

Además de los equipos necesarios para llevar a cabo la faena, se consideran también, los productos químicos seleccionados mediante los resultados de la inspección de la caldera que se puede encontrar en el capítulo 4, cuyo cálculo de concentración se

encuentra en la sección 4.3.2 correspondiente al capítulo de ingeniería, insumos de bombas, EPP y las herramientas necesarias para el correcto desarrollo del trabajo:

- Productos químicos.
 - 2835 Kg de Soda Caustica.
 - 1417 Kg de Trifosfato de sodio.
 - 1417 Kg de Metasilicato de Sodio.
 - 373 lt de Inhibidor de corrosión Rodine B213.
 - 60 lt de Antiespumante.
 - 42500 Kg de Ácido Clorhídrico.
 - 220 Kg de Thiourea.
 - 934 Kg de Bifloruro de Amonio.
 - 788 Kg de Ácido Cítrico.
 - 933 Kg Carbonato de Sodio.
- Cañerías de acero al carbono cedula 80 con diámetro nominal de 6 pulg. y de 8 pulg. proporcionado por la empresa mandante.
- Adaptadores de tuberías.
- Insumos de bombas
 - Mangueras.
 - Fittings.
 - Coplas.
 - Grilletes.
 - Generador eléctrico 380 (V)
 - Cables (380)
 - Conexión Legrand.
- Elementos de protección personal.
 - Botas de seguridad.
 - Pijama térmico.
 - Barbiquejo.
 - Arnés para casco.

- Casco.
 - Bloqueador solar.
 - Guante cabritilla sin forro.
 - Guante nitrilo verde.
 - Guante PVC rojo.
 - Lente UVEX.
 - Mascara de 2 vías.
 - Tapones auditivos.
 - Buzo TYVEK.
 - Tenida PVC.
 - Protector facial para casco.
- Herramientas

3.5 Movilización De Equipos.

Se ha estimado que la movilización se haga una vez que los aspectos logísticos estén resueltos, así como que los suministros y equipos necesarios estén disponible al momento del inicio de la actividad. Los equipos serán movilizados desde el taller ubicado en la región de Antofagasta (figura 16), hasta la planta (figura 17).



Figura 16. Taller de Menfis Spa. Fuente: propia



Figura 17. Ubicación Celulosa Arauco Planta Constitución. Fuente: Google Maps.

Se debe notar que las bombas deben ser traídas desde la ciudad de Antofagasta al igual que los productos químicos y que por esto depende de la velocidad de estos elementos para el inicio de los trabajos. Es evidente que la movilización de los equipos será en forma secuencial con el fin de tener los recursos en terreno y que puedan ser paulatinamente almacenados donde correspondan.

Se estima que se necesitara mover los equipos desde Antofagasta hasta el lugar de trabajo mediante un camión. En el estudio se considera que el transporte del personal se realizará en forma paralela mediante el arriendo de una camioneta, además, el personal se alojará en la ciudad de constitución y la alimentación por cargo de Menfis en dependencias de casino de la planta. Celulosa Arauco pondrá a disposición de Menfis un camión pluma.

3.6 Layout de instalación.

Antes de comenzar con la instalación, se debe conocer la distribución de estas en el complejo, por ende, es de vital importancia entender de qué manera va conectado el sistema en todo su detalle, así se puede estimar las pérdidas de carga del sistema y los caudales para facilitar el cálculo de los equipos a emplear. En la siguiente página se encontrará el layout completo de la instalación, donde se detalla en qué posición va cada elemento de la limpieza, y la localización de las válvulas, bombas, estanque de agua, ácido y nitrógeno.

En la figura 18 se puede apreciar que las bombas de succión sacan agua y ácido de los estanques hacia las bombas conectadas en paralelo, luego estas, se conectan directamente hacia el economizador que es por donde se inicia la limpieza siguiendo hacia el domo y posteriormente hacia los tubos de pared de la caldera, en donde comienza la recirculación del fluido.

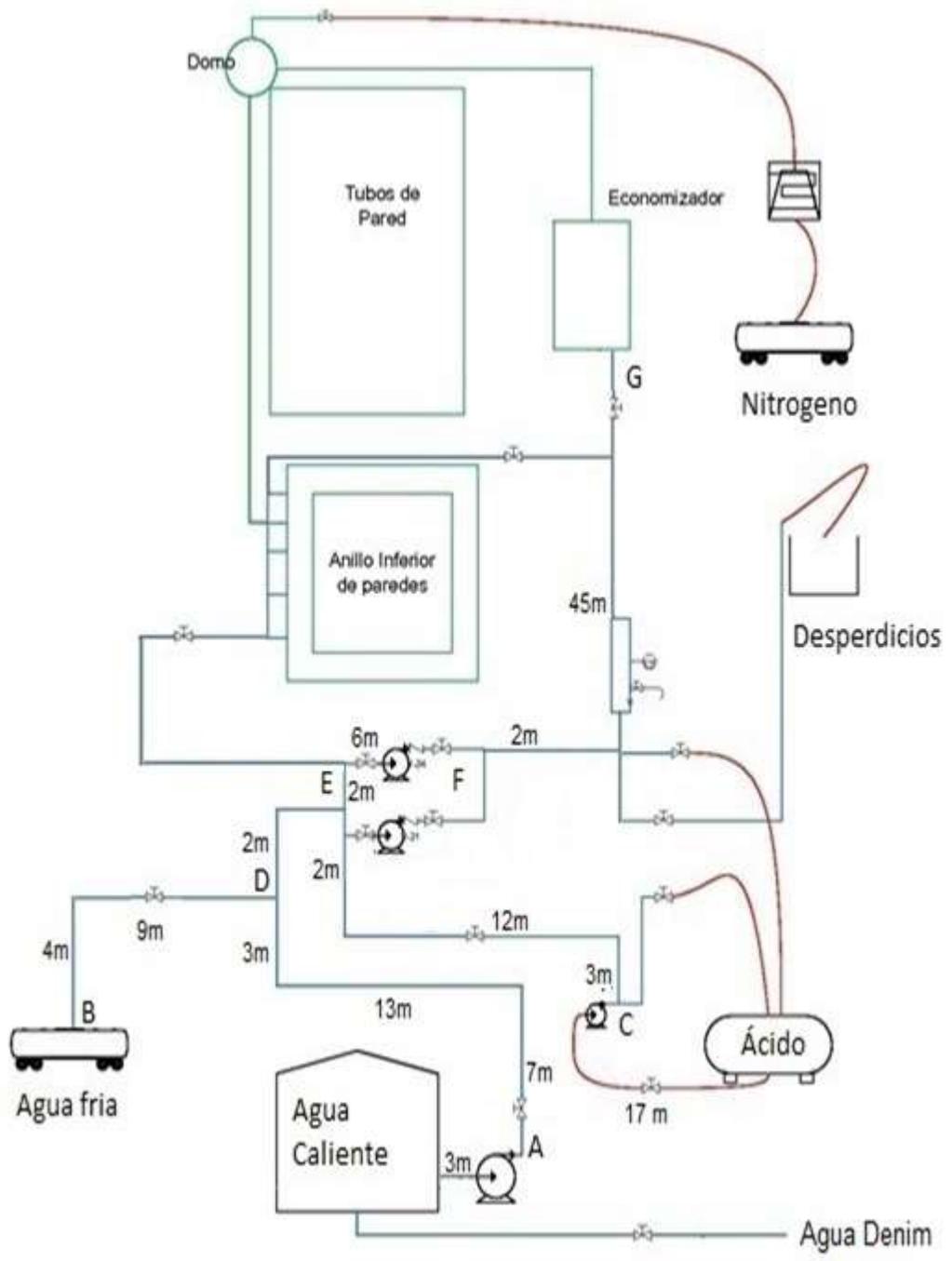


Figura 18. Layout de instalación. Fuente: Propia.

3.7 Instalación de Faena.

En términos generales, este ítem ha sido traspasado a Celulosa Arauco, con el propósito de utilizar los recursos y logísticas que esta empresa ya cuenta en la planta. En principio, pero no excluyentemente se estima necesario un lugar de cambio, baño y energía eléctrica para estos, con los requisitos propios de la planta.

Se necesita espacio para estacionamiento de vehículos menores, apoyo en las maniobras de posicionamiento de las bombas en los lugares designados, así como en las instalaciones de las tuberías y acometidas, espacio para posicionamientos de estanques móviles, confección de zanjas en camino de tránsito de vehículos.

3.8 Programa de trabajo.

La realización de los servicios propuestos por Menfis, se contemplan en turnos de 6 x 2, con un total de 6 jornadas efectivas de trabajo en terreno. Las que incluyen algunos turnos de noche. La dotación contemplada para este servicio es de 1 grupo de trabajo de 4 personas 1 ingeniero, 1 supervisor y 2 operadores.

La cantidad de turnos destinada para la ejecución total del servicio, puede ser realizada en turnos paralelos o en jornadas distintas a la propuesta, siempre y cuando sea en común acuerdo entre las partes y que no afecte el análisis comercial de Menfis.

La movilización de equipos y personal para la ejecución de los servicios, se hará una vez que Arauco Constitución defina que la caldera de recuperación pueda ser intervenida.

3.9 Procedimiento de trabajo.

Una vez obtenidas todas las variables, se procede a realizar el procedimiento de trabajo con el cual será llevada a cabo la limpieza química de la caldera. Se utilizan la experiencia previa de la empresa además de una diversa gama de herramienta, tales como, procedimientos de trabajo de procesos similares, como el flushing y micro filtrado, además de libros sobre este tema. Por razones de confidencialidad la información otorgada por la empresa no puede ser adjunta en esta memoria, pero sí, el libro VGB Ritchline se puede encontrar en diversos formatos. En estos documentos podemos encontrar en que consiste cada etapa, las que fueron mencionadas en el apartado 2.2.4

3.9.1 Etapa alcalina.

Los pasos a seguir son los siguientes:

- Se deberá inspeccionar la caldera para asegurarse de no evacuar los productos a lugares indeseados.
- Se considera partir con todas las válvulas cerradas antes de alinear.
- Se procederá al llenado completo de la caldera con agua desmineralizada suministrada por el cliente, a través de las bombas centrífugas.
- Se inicia circulación por todos los sectores, succionando del domo a través de downcomer y descargando alternativamente hacia todos los equipos y tubos de la caldera.
- Iniciar calentamiento del agua hasta una temperatura de por lo menos 80°C, mediante el encendido de los pilotos o quemadores de la caldera. El calentamiento se hará mientras el agua se hace circula vía las bombas auxiliares.
- Comenzar a adicionar la solución alcalina que se ha preparado convenientemente en tanques auxiliares, mientras continua la recirculación.

Una vez que se haya terminado la inyección de solución alcalina, se alineara convenientemente las válvulas y se entregara a operaciones para iniciar el hervido alcalino.

- Se debe continuar el calentamiento hasta alcanzar una presión de 40% de la presión de operación normal de la caldera.
- Alcanzada la presión indicada, se iniciará el programa de purgas controladas, con el fin de evacuar sólidos desde los fondos. Personal de operaciones deberá mantener el nivel de operación de la caldera vía la inyección de agua habitual por inyección normal. El programa de purgas se llevará acabo cada 1 hora.
- Se tomarán muestras de la solución cada una hora, a la salida del manifold para verificar el pH y alcalinidad parcial y total.
- El proceso total, con el hervido y programa de purgas indicado se realiza por un período de doce horas.
- Durante el proceso de la etapa alcalina, se preparará agua caliente entre 80 °C y 90 °C, del orden de 380 m³ para iniciar los enjuagues.

3.9.2 Enjuague etapa alcalina.

- Los enjuagues se iniciarán una vez terminada cada etapa de la limpieza. Se procederá a enfriar la caldera con método habitual ocupado por operaciones (operación de dámper y ventiladores de tiro forzado). El enfriamiento se realizará hasta alcanzar una temperatura del orden de 100°C
- Antes de iniciar el vaciado, abrir 100% venteos de los economizadores y los del domo. Vaciar por gravedad la solución a través del blowdown tank (estanque donde el agua alcanza temperaturas normales) hacia alcantarillas que conducen a planta de tratamiento, teniendo cuidado de drenar todos los puntos de la caldera.

- Inyectar agua mezclada caliente tal que el diferencial de temperatura entre esta y la de los fierros de la caldera sea inferior a 35°C
- El enjuague se realizará primero a través de los sobrecalentadores (siempre que estos no puedan ser aislados adecuadamente) en una cantidad de 5 m³ de agua y luego se iniciará el llenado a través de los economizadores, descargando hacia paredes de tubos, pantalla y downcomers, con los drenajes a piscina de efluentes abiertos. Se procederá con este sistema hasta vaciar del orden de 10 m³.
- Cumplido lo anterior se procederá a cerrar las válvulas de drenaje hacia la piscina de efluentes y se llenará la caldera hasta 5 cm sobre el nivel de operación normal, siempre a través de los economizadores.
- Se procederá a realizar vaciado del primer enjuague, con venteos abiertos dentro de equipos y tuberías
- El enjuague alcalino finalizara una vez alcanzado un PH entre 8 a 9, y una diferencial de conductividad con el agua suministrada sea menor o igual a 50 µs/cm (conductividad electrolítica)
- El método de enjuague se reiterará hasta alcanzar las condiciones antes mencionadas, salvo que el economizador, no será necesario vaciarlo una segunda vez dado que, por metodología, será el primero en alcanzar las condiciones deseadas para el enjuague.

3.9.3 Etapa ácida.

Se acidifica en base a HCL al 7% promedio, de acuerdo al siguiente procedimiento ilustrativo:

- Previo a la etapa ácida y durante el hervido alcalino, se debe preparar la solución concentrada de HCL en estanques auxiliares. Se dispondrá de agua caliente entre 75°C a 80°C en estanque de acumulación.

- Se preparará la solución ácida diluyendo en estanques auxiliares en ácido concentrado con agua caliente, hasta alcanzar una concentración próxima al 16% y una temperatura del orden de 40°C.
- Se alinearán las válvulas de tal manera que los venteos estén 100% abierto, y las interconexiones estén de tal manera que la solución ácida suba por el downcomer primero pasando por los economizadores y luego al resto de los equipos y tubos
- Se procederá a mezclar homogéneamente esta solución diluida con inhibidor de corrosión Rodine B213, y se procederá a realizar la prueba del clavo.
- Personal de operaciones mantendrán la temperatura de los fierros de la caldera a unos 75°C tras el último enjuague de la etapa alcalina.
- La inyección de solución ácida se iniciará inmediatamente vaciado el último enjuague alcalino. Se procederá a inyectar el ácido preparado mezclándolo con agua caliente para alcanzar una solución con temperatura del orden de 70°C.
- La concentración a la cual se hará la inyección se estima en 7% en el primer tercio del llenado, 6% en el tercio central del llenado y 5% en el tercio final de esta etapa. La referencia visual del llenado lo dará el manómetro instalado en el manifold de inyección ubicado en la parte inferior de la caldera, de donde además se llevará el control de la acidez en forma permanente y seguida durante la inyección de la etapa ácida.
- Se debe alcanzar el nivel de operación normal de la caldera.
- Se dejará estanco el sistema por 30 minutos.
- Se iniciará circulación desde downcomers hacia economizadores a través de las bombas principales por espacio de 20 minutos. Alinear las válvulas para Realizar a continuación la circulación hacia los tubos de caldera.
- Dejar nuevamente estanco el sistema por espacio de 30 minutos.
- La etapa ácida con HCL durará del orden de 6 horas, o hasta estabilización de parámetros de análisis tales como acidez, fierro, cobre; tras las cuales se vaciará la caldera en ambiente inerte de N₂

- Durante la etapa ácida se habrán preparado las conexiones de N₂ necesarias para el vaciado, así como el calentamiento de agua para los enjuagues sucesivos a unos 75°C
- El vaciado de la caldera se hará con presión de N₂ positiva medida en el domo de la caldera vía la lectura de un manovacuumetro instalado previamente. Una vez alcanzada una presión de 5 Psi (instrumento mide en Psi), iniciar vaciado hacia tanques de efluentes, teniendo cuidado que la presión residual no sea inferior a 1 psi. Se tomará una muestra del compuesto durante el vaciado, con el propósito de realizar análisis representativo de la mezcla.
- Terminado el vaciado de la etapa ácida, cerrar válvulas a tanques de efluentes e iniciar llenado de caldera a través de sobrecalentador.
- El enjuague se realizará primero a través de los sobrecalentadores en una pequeña cantidad de agua y luego se iniciará el llenado a través de los economizadores, descargando hacia paredes de tubos y downcomers por 10 minutos.
- Terminado los 10 minutos, se vaciará lo acumulado a tanque de efluentes y se continuará llenando a través de economizadores. Se procederá a realizar vaciado en ambiente inerte tal como en el vaciado de la etapa alcalina sin vaciar el economizador. El enjuague ácido finalizará una vez alcanzado un pH entre 4 y 5, y un diferencial de conductividad con el agua suministrada menor o igual a 50 µs/cm. Repetir las instancias de enjuague hasta conseguir los parámetros deseados

3.9.4 Etapa secuestrante.

Para esto se seguirán los siguientes pasos:

- Durante los enjuagues de la etapa ácida, se preparará la solución de productos químicos en los estanques auxiliares.

- Se inyectará el agua y productos mezclando en línea por economizadores y downcomers. El venteo del domo, economizadores permitirá expulsar el Nitrógeno.
- Cuando se detecte el nivel de operación, cerrar venteos de Domo, Economizador. Llegar a un nivel sobre el de la etapa ácida luego recircular por media hora a través del downcomer, descargando en los economizadores y pantalla.
- Una vez terminada la recirculación, detener y comenzar a inyectar Nitrógeno por las válvulas para ello diseñadas, subiendo la presión a un valor de aproximadamente 20 psi, medido en el manovacuumetro, luego vaciar la caldera vía purgas, manteniendo una presión de 2 a 3 psi de Nitrógeno en el domo.

3.9.5 Etapa neutralizado y pasivado.

- Durante las etapas anteriores se ha preparado en sus estanques una solución concentrada de productos para el neutralizado y pasivado con los productos adecuados.
- En la etapa de neutralización y pasivación se pretende formar una capa de magnetita u oxido estable, para evitar la re-oxidación de la unidad, hasta su puesta en marcha.
- Inyectar solución pasivante y neutralizante desde el fondo de la caldera a través de los economizadores.
- Iniciar calentamiento mientras se circula hasta alcanzar 85°C manteniendo siempre la circulación y tomando análisis de alcalinidad parcial y total, pH y conductividad.
- Aislar la caldera con las válvulas auxiliares y de operación normal. Entregar a operaciones para realizar hervido alcalino, alcanzando una presión de 40% de la presión normal de operación.
- Alcanzada la presión indicada, el personal iniciara programa de purgas controladas, con el fin de evacuar sólidos desde los fondos. Personal de

operaciones deberá mantener el nivel de operación vía la inyección de agua habitual. El programa de purgas se llevará a cabo cada 1 hora.

- Una vez verificado que se tiene un PH alcalino en todos los sectores, se debe continuar con el hervido y programa de purgas indicado, por un período de doce horas.
- Cumplido el período de hervido, iniciar el enfriamiento, de acuerdo a procedimiento habitual hasta alcanzar temperaturas bajo los 90°C.
- Abrir venteos de los economizadores y en el domo. Vaciar por gravedad solución hacia estanque de contención de efluentes, teniendo cuidado de drenar todos los puntos bajos del circuito auxiliar.
- Drenar los puntos bajos de la caldera, tanto en las bombas de recirculación, así como en los cuadros de válvulas y válvulas de purgas.
- Abrir maholer del domo para continuar el enfriamiento y poder inspeccionar el resultado de la limpieza.

3.10 Seguridad.

Como es conocido al momento de trabajar con productos químicos peligrosos, se debe tener especial cuidado al momento de manipularlos, es por eso que se dedica esta sección a las medidas de seguridad que se debe presentar al trabajar con estos productos, estos riesgos son presentados por el ingeniero prevencionista de la empresa. Los riesgos implicados al trabajar con productos químicos peligrosos son:

- Riesgo por inhalación
- Riesgo por vía parenteral
- Riesgo por ingestión
- Riesgo por contacto con la piel o los ojos
- Riesgo por reacciones químicas peligrosas

El riesgo para el trabajador es peligroso para su integridad física, para esto se requiere de un metódico procedimiento de trabajo y de extremo cuidado del operador

al realizar sus funciones, además de utilizar los equipos de protección personal correspondiente. En el caso de que exista contacto con la piel o los ojos, limpiar rápidamente la zona afectada con solución neutralizadora de bicarbonato de sodio y dirigirse al centro asistencial más cercano

En el caso de derrames de ácido se debe evacuar y acordonar la zona para luego proceder con la neutralización de este utilizando sales de bicarbonato, una vez utilizado el neutralizador se debe dejar actuar por 8 horas para luego ser retirado del lugar mediante las herramientas pertinentes dependiendo de la cantidad derramada. Finalmente contactar con la empresa de manejo de desechos tóxicos para el correcto manejo del desperdicio.

3.11 Evaluación económica.

3.11.1 Personal.

En obras se necesitan, un ingeniero, supervisor de obra y dos operadores. Se determina el costo de cada individuo que fue partícipe de la faena, para el cálculo de sueldos se consideran los siguientes valores considerando todos los aspectos legales.

Primero el sueldo base fijado por la empresa son los siguientes:

- \$ 737.100 para un Ingeniero.
- \$ 547.200 para un Supervisor.
- \$ 456.200 para un Operario.

La labor de limpieza química toma 6 días en completarla, tomando esto en consideración, se tendrá un costo de mano de obra de \$1.724.940. En la tabla mostrada a continuación se pueden apreciar el costo que tiene cada individuo para la empresa, ya que al sueldo base hay que agregarle las imposiciones, seguro de cesantía, gratificaciones, entre otros, por lo tanto, el costo para la empresa que se aprecia en la tabla 2 es mucho mayor que el mostrado anteriormente.

Especialidad	Ingeniero	Supervisor	Operador 1	Operador 2
Sueldo Base	\$ 737.100	\$547.200	\$456.000	\$456.000
Gratificación	\$ 80.000	\$80.000	\$80.000	\$80.000
Bono de Producción	\$ 549.233	\$500.000	\$500.000	\$500.000
Total, Imponible	\$1.366.333	\$1.127.200	\$1.127.200	\$1.127.200
Movilización	\$140.000	\$80.000	\$80.000	\$80.000
Colación	\$140.000	\$80.000	\$80.000	\$80.000
Total, no Imponible	\$280.000	\$160.000	\$160.000	\$160.000
Total, Haber	\$1.646.333	\$1.287.200	\$1.196.000	\$1.196.000
Leyes Sociales	\$289.930	\$236.712	\$217.560	\$217.560
Sueldo Líquido	\$1.359.403	\$1.050.488	\$978.440	\$978.440
Mutual	\$17.626	\$14.541	\$13.364	\$13.364
Seguro Cesantía	\$40.990	\$33.816	\$31.080	\$31.080
Indm. Mes por Año	\$137.194	\$107.267	\$99.667	\$99.667
Basedet+Pase	\$4.543	\$4.543	\$4.543	\$4.543
Examen Médico	\$18.750	\$18.750	\$18.750	\$18.750
EPP Mensual	\$21.751	\$36.425	\$36.425	\$36.425
Cargo Empleador	\$263.424	\$245.219	\$245.311	\$245.311
Costo Total Mes	\$1.909.758	\$1.717.419	\$1.441.311	\$1.441.311
Costo Día/hombre	\$86.807	\$69.655	\$65.514	\$65.514

Tabla 2. Costo real de mano de obra

3.11.2 Maquinaria e Insumos de Menfis.

Detalle maquinarias e insumos requeridos para la faena. Los elementos hidráulicos tales como, pipping, reductores, expansores, juntas de cañerías, válvulas y otros elementos hidráulicos. Se determinó por la empresa mandante que serían facilitados por ellos para abaratar costos. El detalle de los costos de la maquinaria necesaria esta detallad en la tabla 3a y 3b.

Descripción	Unidad	Cantidad (días)	Costo Unitario	Costo Total.
Generador 50 KVA	TM	6	\$36.000	\$216.000
Bomba VOGT N624	TM	6	\$43.727	\$262.362
Bomba VOGT N365	TM	6	\$79.738	\$478.428
Mangueras para Acido	Día	6	\$2.058	\$12.348
Equipo iluminación	TM	6	\$28.294	\$169.764
Ducha emergencia	TM	6	\$30.866	\$185.196
Manifold de prueba	TM	6	\$28.294	\$169.764
Camión con Cisterna criogénica	TM	6	\$65.000	\$390.000

Tabla 3a. Maquinarias e insumos utilizados en faena.

Descripción	Unidad	Cantidad (días)	Costo Unitario	Costo Total.
Registrador de presión y temperatura	TM	6	\$59.161	\$354.966
Laboratorio de terreno químico	TM	6	\$12.861	\$77.166
Contador de Partículas	TM	6	\$141.417	\$848.502
Flujómetro	TM	6	\$20.578	\$123.468
Cámara flexible woler	TM	6	\$23.150	\$138.900
Tablero eléctrico 220	TM	6	\$6.431	\$38.586
Radio comunicación	TM	6	\$7.202	\$43.212
			Total	\$3.508.662

Tabla 3b. Maquinarias e insumos utilizados en faena.

3.11.3 Productos Químicos.

A continuación, se detalla en la tabla 4 el costo de los productos químicos a utilizar en la obra. Cada elemento fue cotizado y representa el valor real en el mercado.

Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total.
Soda Caustica	kg	2835	\$555	\$1.573.425
Trifosfato de sodio	kg	1417	\$625	\$885.625
Metasilicato de sodio	kg	1417	\$486	\$688.662
Rodine B213	kg	373	\$10.410	\$3.882.930
Antiespumante	lt	60	\$2.707	\$162.420
HCL	kg	42500	\$278	\$11.815.000
Thiourea	kg	220	\$2.498	\$549.560
Bifloruro de Amonio	kg	934	\$1.666	\$1.556.044
Ácido Cítrico	kg	933	\$1.249	\$1.165.317
Carbonato de Sodio	kg	933	\$451	\$420.783
			Total	\$22.680.766

Tabla 4. Detalle del valor real de los productos químicos en el mercado.

3.11.4 Equipamiento instalación de faenas.

No se pudo contar con la disposición de oficinas, pero sí pudo contar con un terreno en donde Memphis podrá instalar su base logística dentro de la faena, para esto se cuenta con todos los elementos primordiales para que Memphis se pueda desenvolver dentro de la empresa. Se toma en consideración que las labores se llevaran a cabo en 6 días, en base a esto se calcula el costo que tendrá el arriendo de container para oficinas. El costo relacionado a esto se encuentra en la tabla 5 a continuación.

Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total.
Contenedor Oficina Memphis	Día	6	\$6.431	\$38.586
Contenedor Bodega	Día	6	\$7.717	\$46.302
Caseta Pruebas Hidráulicas	Día	6	\$3.087	\$18.522
Baño Químico	Día	6	\$36.000	\$216.000
			Total	\$319.410

Tabla 5. Costo de instalación de oficinas.

3.11.5 Transporte equipos y personal.

Además de los productos químicos y maquinaria en general hay que considerar el traslado de los equipos y el personal necesario para llevar a cabo los trabajos. Se toma como referencia la cantidad de días que tomará la faena, así como, la cantidad de kilómetros que se deberá viajar ida y vuelta una vez realizada la faena, de esta forma estimar un gasto de arriendo de vehículos y el combustible necesario. A continuación, en la tabla 6 se muestran los gastos relacionados con transporte.

Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total.
Camioneta 4x4	Día	8	\$56.588	\$452.704
Combustible camioneta	Km	4729	\$92	\$435.068
Traslado equipos	UN	-	\$2.394.400	\$2.394.400
Peajes	UN	15	\$2.000	\$30.000
			Total	\$3.312.172

Tabla 6. Costos de transporte.

3.11.6 Otros

Se consideran los costos relacionados con los requerimientos que deben cumplir los trabajadores para realizar las obras, tales como, alojamiento, alimentación, exámenes previos y los insumos de protección personal necesarios para cada empleado. De esta forma se detalla a continuación dichos valores en la siguiente tabla (tabla 7).

Descripción	Unidad	Cantidad	Costo	Costo
Alimentación	Hombre*Día	6 días 4	\$15.000	\$360.000
Alojamiento	Hombre*Día	6 días 4	\$22.000	\$528.000
Exámenes de	UN	4	\$38.000	\$152.000
Examen espacio	UN	4	\$19.000	\$76.000
EPP	Trabajadores	4	\$36.425	\$145.700
			Total	\$1.261.700

Tabla 7. Requerimientos básicos de trabajadores.

3.11.7 Costo total y utilidad de la obra.

Considerando los valores mencionados en los puntos anteriores, la propuesta enviada a CELULOSA ARAUCO CONSTITUCION se encuentra a continuación en la tabla 8:

Total, Ítems	\$	USD	UF
Mano de Obra	1.724.940	2.587	66,22
Productos Químicos	\$22.680.766	33.110	850,32
Maquinaria e insumos	3.508.622	5.261	134,7
Instalación de faena	319.410	479	12,27
Transporte equipos y personal	3.312.172	4.966	127,16
Otros	1.261.700	1.892	48,44
Costo directo real	32.807.610	51.295	1.239,11
Gastos general Menfis 34,47%	11.308.784	17.682	427,13
Utilidad/Know how 25%	8.201.903	12.824	309,8
Impuesto utilidad 22,5%	1.845.428	2.886	69,7
Total, Costo Venta	54.163.725	79.072	2.055,34

Tabla 8. Resumen de costos totales y ganancias.

Si por causas no imputables a Menfis, tales como retrasos en los suministros por parte del mandante, impedimento de ingreso al área de trabajo, no aprobación de los

procedimientos de trabajo u otros, la empresa se reserva el derecho a cobrar cada turno inoficioso, un valor de UF 52,41 cada uno.

Una vez finalizados los trabajos y por impedimento de retirar los equipos desde lugar de faena, Menfis cobrará día stand-by por equipos a partir de tres días un valor de UF 26,69

3.12 Condiciones comerciales

Las condiciones comerciales para desarrollar el proyecto se deben dejar claras para no tener malentendidos con la empresa mandante. De esta forma tener un mejor entendimiento de la metodología de pago al momento de generarse las facturas.

- Precios netos, sin incluir IVA.
- Forma de pago con un 30% de anticipo contra factura antes del inicio de obras con la diferencia al final del servicio.
- El cliente dispondrá de 5 días hábiles para revisión de estado de pago.
- Si no existen comentarios respecto a estado de pago, se entenderá este documento aprobado por el cliente, emitiendo factura correspondiente pagadera a 30 días.
- Tasa de cambio a moneda nacional a la fecha de aprobación estado de pago
- La validez de la oferta será de 20 días corridos.
- Para una adecuada programación de los servicios y disponer de los elementos necesarios para esto, Menfis solicita aviso anticipado de 15 días hábiles, así como que el anticipo disponible 30 días hábiles antes del inicio de obras.
- La emisión de la orden de compra u otro medio de adjudicación por parte de ARAUCO, se entiende aceptadas las condiciones técnicas y comerciales del presente estudio.
- Menfis solicita encarecidamente y de acuerdo a la ley, que la bitácora de terreno sea único elemento cálido de comunicaciones formales en obra.

Capítulo 4 Inspección de caldera.

La información obtenida para este capítulo proviene de una entrevista con Mr. Paul Green (P. Green, comunicación personal, 06 de abril de 2015) y del informe del laboratorio entregado por Celulosa Arauco.

La inspección se considera parte fundamental de la planificación de los trabajos, ya que con esta se puede proceder con la determinación de todos los productos químicos y poder afinar todos los detalles de la limpieza. Para la realización de la inspección la empresa mandante contrató a un especialista certificado en calderas para llevar a cabo el trabajo, además se contó con personal de apoyo enviado por la empresa Menfis.

La caldera recuperadora fue encontrada, en una condición de deterioro muy avanzada. A pesar del buen mantenimiento que posee, se encontró que el área más crítica es el horno inferior. Este tiene una edad aproximada de 19 años y opera con una carga significativa. Cuanto mayor es la carga térmica más rápido se deterioran las unidades de la caldera.

El equipo sufre de una gran contaminación en el lado agua de las tuberías, contribuyendo de forma bastante fuerte en el deterioro de la caldera. Se determinó cierto nivel de pérdida de material de alrededor de 2 mm en la parte inferior del horno. Esta pérdida de material debe considerarse crítica ya que bastantes secciones se encuentran próximas al espesor mínimo de pared (4 mm de espesor de tubos con un 12% de reducción máxima).

El inconveniente principal que se pudo determinar, es el inadecuado tratamiento de agua. Los tubos se encuentran con una gruesa capa de contaminantes en el lado agua de la tubería, lo que implica una reducción de la superficie de calefacción, aumentando la temperatura de los tubos, ya que las incrustaciones funcionan como aislantes al poseer un coeficiente de transferencia térmica entre 15 y 200 veces menor al acero al carbono.

4.1 Información obtenida de la caldera.

La caldera fue construida por Babcock Atlantic en 1974. Esta fue modificada por Gotaverken en 1990 y posteriormente por CBC en el año 2000 (figura 19).

- Tipo de caldera Acuatubular
- Evaporación continua máxima 215.000 kg/h
- Presión de diseño máxima 8,6 MPa
- Presión máxima de trabajo 7,2 MPa
- Temperatura de vapor sobrecalentado 440°C
- Temperatura de agua de alimento 118°C
- Combustible Licor negro (ver glosario)
 - Temperatura: 120°C
 - Presión: 0,08 MPa
 - Contenido solido: 67%
- Volumen operacional 186,5 m³
- Superficie de calefacción 16086 m²



Figura 16 Caldera Recuperadora Celulosa Arauco. Fuente: Celulosa Arauco.

4.2 Limpieza.

Las paredes laterales situadas bajo el cabezal del colector deben ser correctamente limpiadas, la falta de limpieza implica un excesivo trabajo extra para realizar la inspección. La solución más simple para evitar este problema sería la utilización de mangueras de alta presión. El problema principal que se encontró es la falta de compuertas aceptables en la caldera para introducir la manguera. Normalmente en una caldera deberían existir dos puertas de acceso justo debajo del colector. Como opción se utilizaron las compuertas superiores del techo de seguridad.

4.3 Estanque de disolución.

El tanque es de acero al carbono cubierto con un revestimiento de acero inoxidable, este contiene dos agitadores horizontales situados en un lado. Los agitadores se encontraron en buenas condiciones, pero se detectó que el revestimiento en el lado derecho comenzó a deteriorarse, deformándose con pocos agujeros debido a la presión. El inspector recomendó reparación o un reemplazo del estanque.

4.4 Quemadores.

En la caldera Existen 3 quemadores (B&W Burners). Estos se desmontaron para llevar a cabo la inspección. Se analizaron todos los componentes en detalle, donde se hicieron pruebas para encontrar residuos de aceite y otros elementos contaminantes. Una vez terminadas las pruebas los resultados demostraron que no se encontraban defectos ni residuos de contaminación, concluyendo que se encontraban en buenas condiciones.

4.5 Aberturas de los quemadores.

Hay 3 aperturas en los quemadores, todas fueron fabricadas de acero al carbono (SA-210-A1 Acero al carbono para tuberías de caldera con una composición de 0,27% y 0,93% de manganeso) unidas con soldadura TIG 625 (aleación de níquel-cromo-molibdeno).

La inspección se llevó a cabo de forma visual desde el interior con el método de líquidos penetrantes, este consiste en un ensayo no destructivo para detectar e identificar discontinuidades presentes en la superficie de los materiales, se aplica un líquido coloreado o fluorescente a la superficie que se va a estudiar, este líquido penetra en cualquier defecto que pudiera existir debido al fenómeno de capilaridad. Al ser inspeccionadas no se encontró nada anormal.

El último día de la parada de la caldera, se reportó una grieta en el exterior, posteriormente se descubrió que la inspección por líquidos penetrantes se realizó solo al interior. Luego de ser informado el desperfecto a la empresa las grietas y todas las otras imperfecciones fueron reparadas eliminando todas las zonas con concentradores de esfuerzo (figura 19).



Figura 19 grietas en la apertura del quemador, Fuente: Informe técnico de inspección de caldera, Celulosa Arauco.

4.6 Tubos del colector.

En total hay 74 tubos en el colector de acero SA-210-A1 con dimensiones de 76,2 x 4 mm. La inspección se realizó en cada uno de ellos, la mayoría de los tubos se encontraban en buenas condiciones, pero se detectaron daños severos en los tubos #53 y #54 (figura 20), estos se reemplazaron antes de proceder con la limpieza química.



Figura 20 Daño en la tubería #53, Fuente: Informe técnico de inspección de caldera, Celulosa Arauco.

4.7 Alimentación de agua.

El sistema de alimentación de agua fue inspeccionado el primer día, este contiene 24 paneles con 10 tubos cada panel. La parte vertical contiene tubos sueltos conectados por remaches de acero, la parte horizontal está formada por un diseño de membrana.

Se descubrió que todos los tubos estaban conectados por planchas de madera para poder tener acceso al sobre calentador inferior y que algunos defectos se encontraban escondidos tras estas planchas, por lo que se removieron para realizar una correcta inspección, Se revelo 2 tubos con daños, los cuales fueron reemplazados al finalizar la inspección, se cortaron ambos tubos lo que revelo una gran cantidad de sedimentos en el lado agua (figura 21).



Figura 21 Depósitos en tubos de alimentación de agua, Fuente: Informe técnico de inspección de caldera, Celulosa Arauco.

4.8 Sobrecalentadores.

4.8.1 Sobrecalentador secundario I y II

Los sobrecalentadores secundarios I y II contienen 24 paneles cada uno con 16 tubos cada panel, los tubos fueron diseñados usando acero SA213-T22 (acero para tubos de caldera con composición de 0,05-0,15 %C y 0,3-0,6 %Mn) con dimensiones de 63,5 x 5,0 x 5,5 mm. El sistema es de flujo directo, los sobrecalentadores fueron inspeccionados en toda su extensión sin presentar defectos.

4.8.2 Sobrecalentador primario I y II

Ambos sobrecalentadores contienen 18 paneles con 30 tubos cada panel. Los paneles fueron diseñados usando acero SA213-T22 con dimensiones de 57 x 5,0 mm. Al igual que los sobrecalentadores secundarios el flujo es directo. Estos fueron inspeccionados en toda su extensión sin encontrar defectos.

4.9 Colectores.

4.9.2 Colector superior (Domo vapor).

El colector superior fue encontrado extremadamente sucio en el lado agua, una gruesa capa de sedimento gris fue encontrada cubriendo el armazón y una gran parte del lado interno del colector (figura 22). Los sedimentos fueron fácilmente removidos y no se encontraban adheridos a la superficie. Bajo la suciedad se observó una capa de óxido (figura 23). Las tuberías del sistema de alimentación se encontraban cubiertas por una gran cantidad de sedimentos (figura 24).



Figura 22 sedimento gris, Fuente: Informe técnico de inspección de caldera, Celulosa Arauco.



Figura 23 Capa de óxido luego de remoción de depósitos, Fuente: Informe técnico de inspección de caldera, Celulosa Arauco.



Figura 24 tuberías obstruidas, Fuente: Informe técnico de inspección de caldera, Celulosa Arauco.

4.9.3 Colector inferior (domo agua)

El colector completo fue encontrado cubierto por una película significativa de sedimento gris (figura 25), además se encontró que bajo esta suciedad se encontraba una capa gris-negra de óxido. Al terminar la inspección dentro del estanque de agua se procedió a revisar las tuberías del colector mediante una cámara de alta resolución y se encontraron incrustaciones en estas (figura 26 y 27)

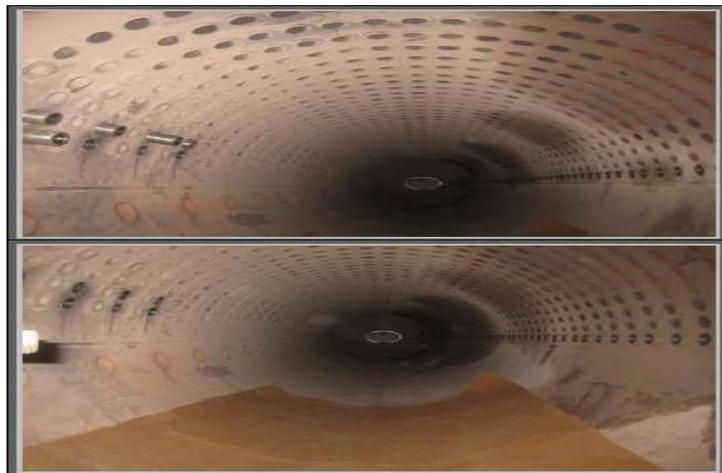


Figura 25 sedimentos dentro de la batería, Fuente: Informe técnico de inspección de caldera Celulosa Arauco.



Figura 26 Análisis con cámara de alta definición del colector inferior. Fuente: Propia.

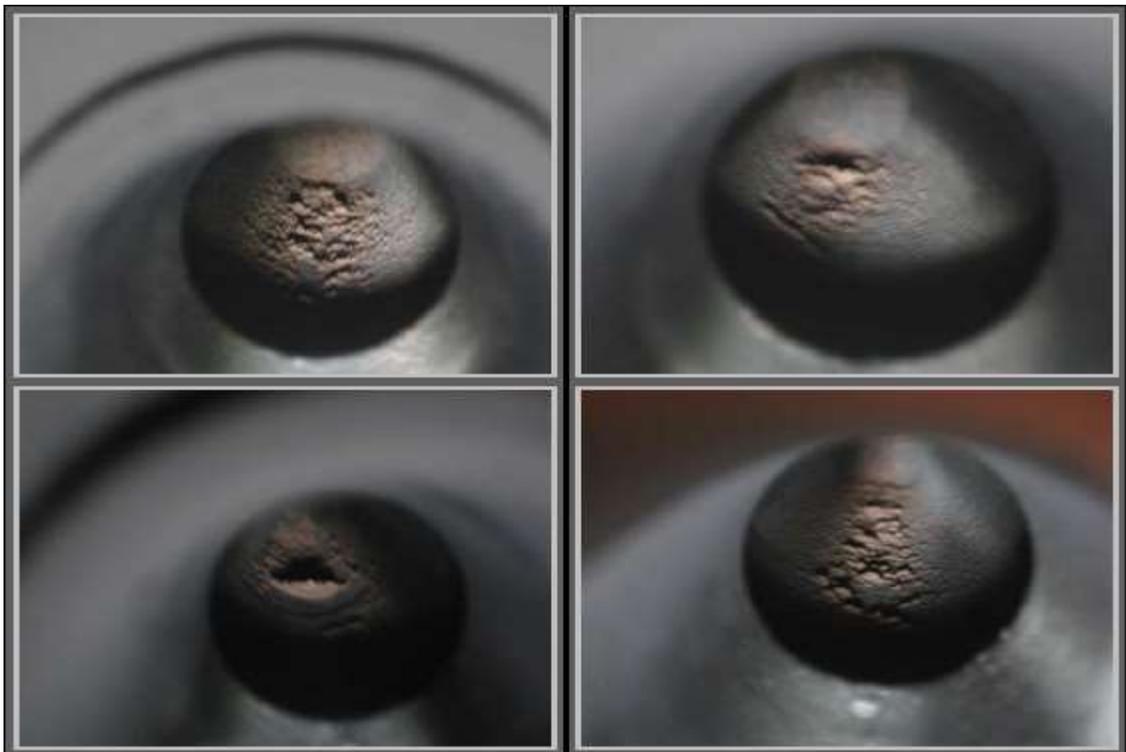


Figura 27 Sedimentos en las tuberías, Fuente: Informe técnico de inspección de caldera, Celulosa Arauco.

4.10 Economizador I y II.

Los economizadores I y II fueron inspeccionados en toda su extensión. Con la excepción de pequeñas deformaciones en su interior, estos no presentaron defectos en las partes sometidas a presión, por lo que los economizadores se encuentran operativos y en buen estado.

4.11 Depósitos e incrustaciones.

Celulosa Arauco entregó el informe de laboratorio realizado al momento de terminar la inspección de la caldera. Las muestras se obtienen mediante corte de las tuberías con una dimensión de 100 a 500 mm de largo, quedando de un largo de 250 mm. A continuación, se extrae una muestra de la superficie y se inserta en una probeta para proceder con el análisis de fotometría.

En primera instancia se realiza un análisis de la densidad de las incrustaciones en gr/m^2 , para esto se pesa la muestra de 25 cm y luego se realiza un proceso de desbarbado, en el que se quitan todos los recubrimientos y capas de corrosión para luego dejar con un acabado liso el metal y se vuelve a pesar, luego se utiliza la siguiente fórmula:

$$m_{RB} = \Delta m * \frac{1}{A_i}$$

Donde:

- Δm : Diferencia de masas (g).
- m_{RB} : Cantidad específica de la capa de residuos (g/m^2).
- A_i : Superficie interior (m^2)

El análisis de partículas se realiza con un Spectrophotometer, para entender cómo funciona el equipo, se debe conocer que es la espectrofotometría. Esto es la medición de la cantidad de energía radiante que absorbe o transmite un sistema químico en

función de la longitud de onda. El espectrofotómetro es un instrumento q permite comparar la radiación absorbida o transmitida por una solución que contiene una cantidad de soluto y una que contiene una cantidad conocida de la misma sustancia. El método de análisis para los elementos se puede encontrar en el Anexo 2 únicamente para algunos elementos.

4.11.1 Densidad de incrustaciones en las muestras.

Se analizaron los elementos mediante el procedimiento descrito en el punto anterior, obteniendo la densidad de incrustaciones en gr/m^2 , la que se puede encontrar en la tabla 9. La medición se llevó a cabo en el sector frío correspondiente a la parte exterior de los tubos paredes y en el lado caliente, es decir en el interior de paredes y tubos.

Nro. Muestra	Densidad lado caliente (gr/m^2)	Densidad lado frío (gr/m^2)	Promedio (gr/m^2)	Ubicación
1	569	161	365	Pared tubo 33 lado mar
2	361	159	230	Pared tubo 42 MT elev 12070
3	286	170	228	Pared tubo 42 lado mar
4	635	146	391	Pared tubo 42 Elev 8670
5	595	111	353	Pared tubo 70 Elev 22670
6	228	45	136	Sobrecal. tubo 6
7	156	26	91	Sobrecal. tubo 9
8	171	176	123	Economizador 2 tubo 32
9	356	344	350	Economizador 1 tubo 32
10	263	113	189	Pantalla tubo D

Tabla 9. Densidad de las incrustaciones en las muestras.

4.11.2 Tipos de depósitos en las muestras analizadas.

El análisis se hizo a través de un espectrofotómetro para identificar los tipos de depósitos que se encuentran en las muestras cuyo procedimiento de análisis se encuentra en el anexo 2 de esta memoria. Al realizar el análisis de tubos se pudo determinar que contienen grandes depósitos de hierro, cobre, fosforo entre otros elementos que se pueden apreciar en la tabla 10.

Elementos	Tubo 33	Tubo 42
Fe	48,36%	38,78%
P	11,06%	17,04%
Mg	8,66%	10,57%
Cu	7,32%	4,035
Si	2,76%	
Al	2,2%	
Mn	1,68 %	2,15%

Tabla 10. Tipos de depósitos en los tubos de muestra.

4.11.3 Resultados obtenidos de los análisis.

De acuerdo a los resultados anteriores se puede concluir los siguiente:

- La densidad de depósitos que fue encontrada en los tubos 33 y 42, zona caliente, esta sobre los 500 gr/m², lo que se considera alto para este tipo de calderas. El deposito predominante es principalmente óxido de hierro.
- Los depósitos presentan cobre metálico en varias de las muestras analizadas. La cantidad encontrada en algunas muestras es relevante, principalmente en zonas de alta temperatura. Este tipo de incrustación es perjudicial para los

tubos de la caldera ya que genera corrosión del tipo pitting (se produce cementación del acero).

- En el estudio realizado no se hace mención a la presencia de residuos orgánicos dentro la caldera, pero es normal encontrar algún grado de contaminación por este tipo de depósito.

4.11.4 Análisis de tubos de piso, pantalla y resultados.

El tubo fue analizado de acuerdo a la norma ASTM-D-3483-83 método B, según el método estándar de remoción del depósito por solvente, utilizando una solución acuosa de ácido clorhídrico con el inhibidor de corrosión adecuado. De esto se determinó que el tubo de pantalla presentaba un depósito con distintas tonalidades de color café con una densidad media.

El tubo con estoperoles presentaba un depósito de color café apreciándose claramente una mayor densidad de depósitos en la zona caliente. Las incrustaciones estaban distribuidas de forma uniforme en todo el tubo. Luego se removió todo contaminante de las paredes y se encontró corrosión del tipo pitting en varios sectores del tubo de pantalla, esto quiere decir que existe una gran cantidad de cobre en los tubos.

Una vez removidos los depósitos en el tubo con estoperoles (lado caliente), se observó que en el lado donde existía la mayoría de los depósitos orgánicos semi-coquificados quedo con otra tonalidad después del pasivado. El tubo no se aprecia con pitting como el en caso del tubo de pantalla. Los resultados del análisis de tubos se encuentran en las tablas 11 y 12.

Datos	Lado fuego	Lado frio
Densidad gr/m²	478	601
Solubilidad (%)	77,5	90,7
Insolubles (%)	22,5	9,3
Sílice (%)	2	1,1
Orgánicos (%)	20,5	8,2
Fe como Fe₃O₄ (%)	64,2	71,78
Cu como CuO (%)	3,6	4,1
Otros Solubles (%)	9,7	14,8

Tabla 11. Análisis tubo de pantalla.

Datos	Lado fuego	Lado frio
Densidad gr/m²	601	172,8
Solubilidad (%)	81,6	78,7
Insolubles (%)	18,4	21,3
Sílice (%)	3,3	4,5
Orgánicos (%)	15,1	16,8
Fe como Fe₃O₄ (%)	58,2	66
Cu como CuO (%)	7,4	4,4
Otros Solubles (%)	16	4,1

Tabla 12. Análisis tubo con estoperoles

Los dos tubos analizados en el laboratorio se cobrizaron durante la remoción de depósitos en la etapa acida, esto indica que existe en algunos sectores puntuales, altas concentraciones de cobre. Además en los dos tubos existen depósitos del tipo orgánico.

Capítulo 5 Ingeniería.

Para llevar a cabo la limpieza química de la caldera de Celulosa Arauco planta Constitución se cuenta con el manual de limpieza para calderas Babcock, de donde se obtienen todos los datos necesarios y variables a tomar en cuenta para realizar el trabajo.

Como se ha mencionado anteriormente la limpieza química es un proceso que se utiliza para eliminar los sedimentos que existen dentro de una caldera, sea cual sea el origen de estos. Este proceso restaura el rendimiento que se ve mermado por las impurezas, para esto se requiere de personal experto en el tema ya que todo procedimiento de mantención puede resultar riesgoso y atentar contra la integridad física de los trabajadores si este es realizado por personal sin experiencia.

Para llevar a cabo la tarea de la limpieza es necesario adquirir una serie de maquinaria y productos auxiliares, para ello se cuenta con la información que se ha adquirido por la experiencia previa en este tipo de labores y el libro mencionado anteriormente, con el objetivo de facilitar el cálculo de los elementos necesarios y proceder con el trabajo.

Identificados todos los equipos que van a estar presente en la limpieza, además del layout de la instalación, en donde se pueden ver exactamente como van instalados los equipos, se puede realizar el cálculo de todos los elementos hidráulicos presentes en la tarea de limpieza.

Otra de las cosas importantes que se debe tener en cuenta, se destaca el procedimiento de trabajo, los productos químicos con los que será llevada a cabo esta labor y sin lugar a dudas las condiciones de seguridad necesarias para el desarrollo correcto de la limpieza.

5.1 Velocidad del agua.

Para obtener un suficiente efecto de limpiado la velocidad del agua debe de ser al menos de 0,5 m/s para las tuberías horizontales, en el caso de tuberías en vertical debe de ser al menos de 1 m/s (**valores obtenidos de manual VGB Richtline**). En el caso especial de los economizadores que están formados por un arreglo de tubos paralelos, solo altas velocidades lograran un eficiente limpiado de estas tuberías. Con este fin son requeridas bombas con la suficiente capacidad para lograr dichos objetivos. Al seleccionar las velocidades del agua se debe tomar en cuenta el diseño de la caldera, ya que unas disposiciones de tubos horizontales requieren menores velocidades que los verticales para la limpieza.

El efecto de limpieza se incrementa cuando se inyecta aire libre de aceite o nitrógeno. Con esto se obtiene un efecto doble, el primero es aumentar la capacidad de flujo turbulento para llevar a cabo la limpieza y remover las partículas de oxígeno alojadas en las tuberías para eliminar un aumento en la oxidación.

5.2 Cálculos y consideraciones.

Haciendo referencia al layout de la instalación (sección 3.6), se pueden calcular los parámetros necesarios que se van a utilizar en la obra en la obra. Partiendo por calcular las pérdidas de cargas de las tuberías, válvulas, conexiones, entre otros elementos hidráulicos, una vez hecho esto se puede proceder con el cálculo de los parámetros para determinar las bombas a utilizar.

Dentro de las consideraciones que se toman en cuenta, se tiene una limitante para la velocidad y la temperatura del fluido de la bomba principal, la cual bombea la mezcla de agua y ácido a la caldera. En el caso de la velocidad esta se encuentra limitada por las condiciones de lavado químico las cuales serán de 0,5 m/s para las bombas de succión que se encuentran en los estanques y para las bombas principales una condición de velocidad de 1 m/s. Las condiciones de velocidad antes mencionadas se pueden hallar en el libro VGB Ritchline. La limitante de temperatura está condicionada por uno de los productos químicos que participan dentro del lavado, este producto es

el inhibidor de corrosión que para una temperatura mayor a 80°C pierde la condición de inhibidor quedando inutilizable. Tomando en cuenta estas limitantes se procederá con el cálculo respectivo.

5.2.1 Pérdidas de carga del sistema.

Para comenzar a calcular las pérdidas de carga se necesita identificar los elementos que presentan pérdidas de carga en las conexiones principales que componen el sistema, los cuales se detallan a continuación:

- Pipping cedula 80 de acero al carbono con un diámetro de tubería de 6" y 8"
- Válvulas Saunders para el manejo de ácido
- Acoples tales como codos a 45°, conexiones tipo Tee, expansores y reductores.

Una vez determinado los elementos que se utilizaran en la instalación se procede a calcular las pérdidas de carga en los tramos más importantes haciendo alusión a la sección 3.6, es decir, en aquellas secciones donde se disponga una bomba, estos valores de pérdidas dan el inicio para poder seleccionar las bombas más adecuadas. Además, se realiza la curva del sistema para entender mejor cómo se comportan las caídas de presión a distintos caudales.

5.2.1.1 Pérdidas de carga en tramo A-E.

Para determinar las pérdidas de carga en este tramo hay que conocer como está distribuido el sistema (figura 28). A continuación de lo anterior se debe utilizar la ecuación de Darcy-Weisbach. En este caso el resultado queda en unidades de metros de columna de agua (mca)

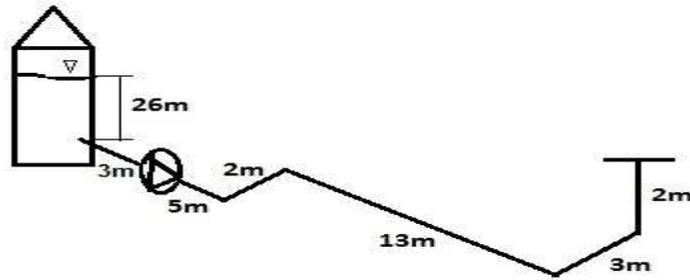


Figura 28. Sistema A-E.

La ecuación de Darcy-Weisbach es:

$$h_l = f \left(\frac{L}{D} \right) \left(\frac{V^2}{2g} \right)$$

Donde:

- h_l : Pérdidas de carga medidas en m.
- f : Coeficiente de fricción (adimensional).
- L : Largo de la tubería en m.
- D : Diámetro interno de la tubería en m.
- V : Velocidad del fluido dentro de la tubería en m/seg
- G : Gravedad de la tierra en m/seg^2

Bajo los términos de la ecuación anterior, en el tramo A-E se tienen los siguientes datos:

- Largo total de la tubería es de 25 m
- Tubería cédula 80 con un diámetro nominal de 6 pulg. y un diámetro interno de 0,1464m.

- Velocidad del fluido de 0,5 m/seg
- Gravedad de la tierra 9,81 m/seg²
- Fluido es agua a 80°C

A continuación, se debe determinar el coeficiente de fricción f . Para esto se debe utilizar el diagrama de Moody (figura 30), la ecuación que determina la rugosidad relativa del material y el número de Reynolds. Para el caso de la rugosidad relativa tenemos la siguiente ecuación.

$$K = \frac{D}{\varepsilon}$$

Donde:

- K: rugosidad relativa (adimensional).
- D: Diámetro interno de la tubería en m.
- ε : Rugosidad absoluta del material en m (figura 29).

Material	Coficiente de Manning n	Coef. Hazen-Williams C _H	Coef. Rugosidad Absoluta e (mm)
Asbesto cemento	0.011	140	0.0015
Latón	0.011	135	0.0015
Tabique	0.015	100	0.6
Fierro fundido (nuevo)	0.012	130	0.26
Concreto (cimbra metálica)	0.011	140	0.18
Concreto (cimbra madera)	0.015	120	0.6
Concreto simple	0.013	135	0.36
Cobre	0.011	135	0.0015
Acero corrugado	0.022	--	45
Acero galvanizado	0.016	120	0.15
Acero (esmaltado)	0.010	148	0.0048
Acero (nuevo, sin recubrim.)	0.011	145	0.045
Acero (remachado)	0.019	110	0.9
Plomo	0.011	135	0.0015
Plástico (PVC)	0.009	150	0.0015
Madera (duelas)	0.012	120	0.18
Vidrio (laboratorio)	0.011	140	0.0015

Figura 29. Rugosidad absoluta para diferentes materiales. Fuente: Computing applications of hydraulic Engineering, Quinta Edición.

Los datos conocidos son los siguientes:

- $D = 0,1464\text{m}$.
- ε : Se obtiene de la figura 29, dando un valor de $0,00015\text{ m}$.

Resolviendo se obtiene:

$$K = \frac{0,1464}{0,00015}$$

$$K = 976 \text{ (adimensional)}$$

Una vez determinada la rugosidad relativa del material se procede a calcular el número de Reynolds:

$$Re = \frac{VD}{\nu}$$

Donde:

- Re : Es el número de Reynolds (adimensional).
- V : Es la velocidad del fluido en m/s .
- ν : La viscosidad cinemática en m^2/seg .
- D : Diámetro interno de la tubería en m .

Como los datos de velocidad y diámetro son conocidos. Se agrega además que el fluido que circula por el tramo de tubería A-E es agua a 80°C , con estos datos se determina que la viscosidad cinemática que tiene un valor de $0,000000364\text{ m}^2/\text{seg}$. A continuación, se resuelve la ecuación de Reynolds.

$$Re = \frac{0,5 * 0,1464}{0,000000364}$$

$$Re = 201908,9 \text{ (Adimensional)}$$

Obtenidos todos los valores, se procede a resolver la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$hl_1 = f\left(\frac{L}{D}\right)\left(\frac{V^2}{2g}\right)$$

$$hl_1 = 0,023 * \left(\frac{25}{0,1464}\right)\left(\frac{0,5^2}{2*9,81}\right)$$

$$hl_1 = 0,050045816 \text{ m}$$

Una vez obtenidos los valores de pérdida correspondientes a las cañerías se procede a calcular las caídas de presión debido a los accesorios hidráulicos en el tramo A-E para esto se utiliza la ecuación mostrada a continuación.

$$hl = K\left(\frac{V^2}{2g}\right)$$

Donde:

- K: es el coeficiente de resistencia depende únicamente del tipo de accesorio que se utiliza.

El coeficiente de resistencia se puede obtener mediante una tabla que especifica el valor de K en función del diámetro del accesorio, esto se puede apreciar bien en el Anexo 3 (tabla con coeficientes de resistencia para distintos accesorios hidráulicos).

Los elementos hidráulicos y sus respectivos coeficientes de resistencia para los elementos presentes el tramo A-E son los siguientes:

- 1 Válvula Saunders: K= 5 (adimensional)
- 4 Codos 45°: K= 3 (adimensional)
- 1 Unión Tee: K= 0,13 (adimensional)

Tomando en cuenta los coeficientes de resistencia se procede a resolver la ecuación para determinar las pérdidas de carga en los elementos hidráulicos. En el primer caso se determina que en el circuito que corresponde al tramo A-E hay 1 válvula Saunders, detallando su cálculo a continuación.

$$hl_2 = K \left(\frac{V^2}{2g} \right)$$

$$hl_2 = 5 \left(\frac{0,5^2}{2 * 9,81} \right)$$

$$hl_2 = 0,063 \text{ m}$$

Además, se tienen 4 codos de 45° cuyas pérdidas de carga son:

$$hl_3 = K \left(\frac{V^2}{2g} \right)$$

$$hl_3 = 4 * 3 \left(\frac{0,5^2}{2 * 9,81} \right)$$

$$hl_3 = 0,152 \text{ m}$$

Finalmente, las pérdidas de carga en la unión tipo Tee:

$$hl_4 = K \left(\frac{V^2}{2g} \right)$$

$$hl_4 = 0,13 \left(\frac{0,5^2}{2 * 9,81} \right)$$

$$hl_4 = 0,0016 \text{ m}$$

Una vez obtenidas las pérdidas de carga de todos los elementos que se encuentran en el circuito, se debe determinar las pérdidas de carga totales, a esto se le agrega la columna estática de agua que corresponde a 2 m, estas se calculan de la siguiente forma.

$$hl_{total} = hl_1 + hl_2 + hl_3 + hl_4 + 2$$

$$hl_{total} = 0,050045 + 0,063 + 0,152 + 0,0016 + 2$$

$$hl_{total} = 2,2539 \text{ m}$$

Para determinar la curva del sistema de tuberías se toma en cuenta la siguiente ecuación:

$$H_{sist} = C_{ET} + (K_T * Q^2)$$

Donde:

- H_{sist} : Altura del sistema en m.
- C_{ET} : Columna estática total en m.
- K_T : Coeficiente de pérdidas de carga globales.
- Q : Caudal m^3/h

La columna estática total es la diferencia de nivel entre la superficie del líquido de aspiración y descarga. Estos datos los encontramos en la figura 29.

$$C_{ET} = C_{ES} + C_{ED}$$

Donde:

- C_{ES} : Columna estática de succión (Altura geométrica entre el nivel del líquido en la aspiración y la ubicación de aspiración de la bomba)

- C_{ED} : Columna estática de descarga (Altura geométrica entre la ubicación de descarga de la bomba y el nivel del líquido)

Tomando en consideración que la distancia desde el piso al eje de succión de la bomba es 1 m y considerando la situación más crítica en la que el fluido se encuentra a 1 m sobre el eje de succión. Resolviendo:

$$C_{ET} = C_{ES} + C_{ED}$$

$$C_{ET} = -1 + 2$$

$$C_{ET} = 1 \text{ m}$$

El caudal está limitado por la velocidad de operación de la limpieza química, siendo esta de 0,5 m/seg, por lo tanto, el caudal está dado por:

$$Q = V * A$$

Donde:

- Q: Es el caudal en m^3/hora
- V: La velocidad en m/hora
- A: Área de la sección transversal de la tubería en m^2

Al valor de velocidad que es conocido se le aplica un factor para transformarlo a las unidades pertinentes dando un resultado de 1800 m/hora. El área de la sección transversal se calcula con el diámetro de la tubería obteniendo un valor de 0,01683 m

$$Q = V * A$$

$$Q = 1800 * 0,01683$$

$$Q = 30,29 \text{ m}^3/\text{hora}$$

Con el valor de caudal se determina el coeficiente de pérdidas de carga globales de la siguiente forma:

$$K_T = \frac{h_{\text{perd}}}{Q^2}$$

Donde:

- h_{perd} : Pérdidas de carga en el sistema en m.
- Q: Caudal.

Por lo tanto:

$$K_T = \frac{h_{\text{perd}}}{Q^2}$$

$$K_T = \frac{2,2539}{30,29^2}$$

$$K_T = 0,000277$$

Ya con todos los valores se puede determinar la curva del sistema correspondiente al tramo A-E. utilizando la siguiente ecuación se establece una tabla (Tabla 13) para determinar la curva correspondiente (figura 31).

$$H_{\text{sist}} = C_{\text{ET}} + (K_T * Q^2)$$

Caudal (m ³ /hora)	H _{sist} (m)
0	1
5	1,0069
10	1,0277
15	1,062325
20	1,1108
25	1,173125
30	1,2493
35	1,339325

Tabla 13. Relación de caudal y Altura del sistema.

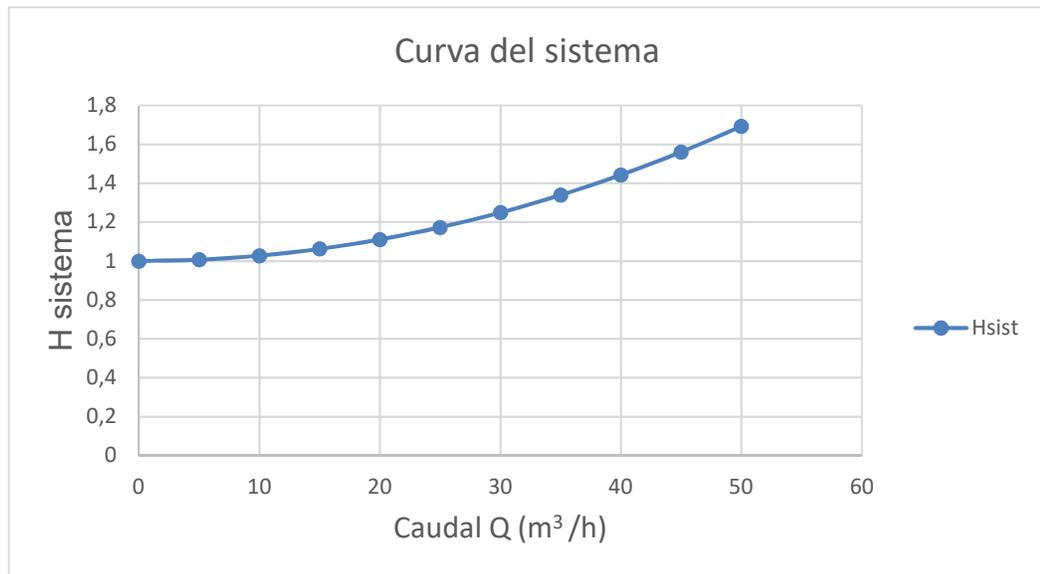


Figura 31. Curva del sistema correspondiente al tramo A-E.

5.2.1.2 Pérdidas de carga en tramo B-E.

Se utiliza el mismo método anterior para determinar las pérdidas de carga en este tramo, tomando en cuenta la ecuación de Darcy-Weisbach, el sistema está distribuido como se presenta en la figura 33 los datos para este tramo son los siguientes:

- Largo total de la tubería es de 15 m
- Tubería cedula 80 con un diámetro nominal de 6 pulg. y un diámetro interno de 0,1464m.
- Velocidad del fluido de 0,5 m/seg
- Gravedad de la tierra 9,81 m/seg²
- El fluido es agua a 20°C

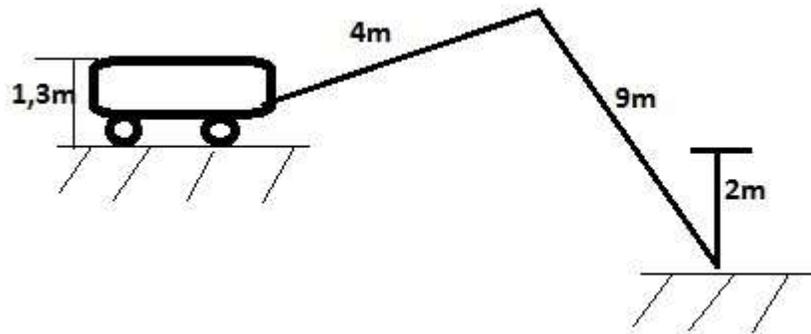


Figura 32. Sistema B-E.

Como en el apartado anterior se debe determinar el coeficiente de fricción f . nuevamente se utiliza el diagrama de Moody, la ecuación que determina la rugosidad relativa del material y el número de Reynolds.

Entonces para la rugosidad relativa, tomando el dato de rugosidad absoluta para un acero al carbono de la figura 29, con un valor de 0,00015 m y un diámetro de 0,1464 m obtenemos lo siguiente:

$$K = \frac{D}{\varepsilon}$$

$$K = \frac{0,1464}{0,00015}$$

$$K = 976 \text{ (adimensional)}$$

Para obtener el número de Reynolds se debe obtener el valor de la viscosidad cinemática para un fluido de agua a una temperatura de 20°C, este dato se obtiene mediante una tabla de cualquier libro relacionado con mecánica de fluidos, dando un valor de 0,000001 m²/seg.

Luego resolviendo la ecuación de Reynolds:

$$Re = \frac{VD}{\nu}$$

$$Re = \frac{0,5 * 0,1464}{0,000001}$$

$$Re = 73200 \text{ (adimensional)}$$

Este valor corresponde a un flujo turbulento. Con el valor de rugosidad y el resultado anterior se procede a determinar el factor de fricción f utilizando el diagrama de Moody mostrado en la figura 30. Gracias a la gráfica obtenemos un valor para f de 0,025. A continuación, se calculan las pérdidas de carga en las tuberías utilizando la ecuación de Darcy-Weisbach.

Calculo de pérdidas de carga en tuberías:

$$hl_1 = f\left(\frac{L}{D}\right)\left(\frac{V^2}{2g}\right)$$

$$hl_1 = 0,025\left(\frac{15}{0,1464}\right)\left(\frac{0,5^2}{2 * 9,81}\right)$$

$$hl_1 = 0,0032 \text{ m}$$

Después de obtener los resultados correspondientes a las tuberías del tramo B-E, se procede por determinar las pérdidas de carga en los accesorios hidráulicos pertenecientes a este sistema. Para esto se determinan los elementos que están presentes en este tramo:

- Codos 45°= 2
- Tee's= 1

Una vez identificados los elementos, se determina el coeficiente de resistencia K para ellos (Anexo 3) dando como resultado que para los codos de 45° se obtiene un K de 3 y un k de 1 para la Tee.

Para cálculo de pérdidas de carga en elementos hidráulicos se tiene que:

$$hl_2 = K\left(\frac{V^2}{2g}\right)$$

$$hl_2 = 2 * 3\left(\frac{0,5^2}{2 * 9,81}\right) + 1\left(\frac{0,5^2}{2 * 9,81}\right)$$

$$hl_2 = 0,1146$$

Al igual que en el apartado anterior, se deben calcular las pérdidas de carga totales del sistema, que corresponde a la suma de todas caídas de presión más la columna estática de descarga que corresponde a 2 m, como se puede apreciar en la figura 33.

Pérdidas de carga totales:

$$hl_{\text{total}} = hl_1 + hl_2 + 2$$

$$hl_{\text{total}} = 2,1179$$

Si bien se tienen las pérdidas de carga en el tramo B-E, se debe proceder a obtener la curva del sistema, para esto se tienen los siguientes datos:

- $C_{ES} = 1,3 \text{ m}$
- $C_{ED} = 2 \text{ m}$

Columna estática total:

$$C_{ET} = C_{ES} + C_{ED}$$

$$C_{ET} = -1,3 + 2$$

$$C_{ET} = 0,7 \text{ m}$$

Al igual que en el apartado anterior el caudal está delimitado por la velocidad del fluido. Aplicando las correcciones necesarias a los valores se procede con el cálculo de caudal:

$$Q = V * A$$

$$Q = 1800 * 0,01683$$

$$Q = 30,29 \text{ m}^3/\text{h}$$

Ahora que se tiene el valor de caudal se determina el coeficiente de pérdidas de carga globales:

$$K_T = \frac{h_{\text{perd}}}{Q^2}$$

$$K_T = \frac{0,1179}{30,29^2}$$

$$K_T = 0,000129$$

Con todos los valores obtenidos se puede crear la curva del sistema correspondiente al tramo A-E. Utilizando la siguiente ecuación se establece la tabla 14 para determinar la curva (figura 34).

$$H_{\text{sist}} = C_{\text{ET}} + (K_T * Q^2)$$

Caudal (m³/hora)	H_{sist} (m)
0	0,7
5	0,7069
10	0,7278
15	0,762
20	0,811
25	0,874
30	0,905
35	1,04
40	1,145

Tabla 14. Relación de caudal y Altura del sistema.

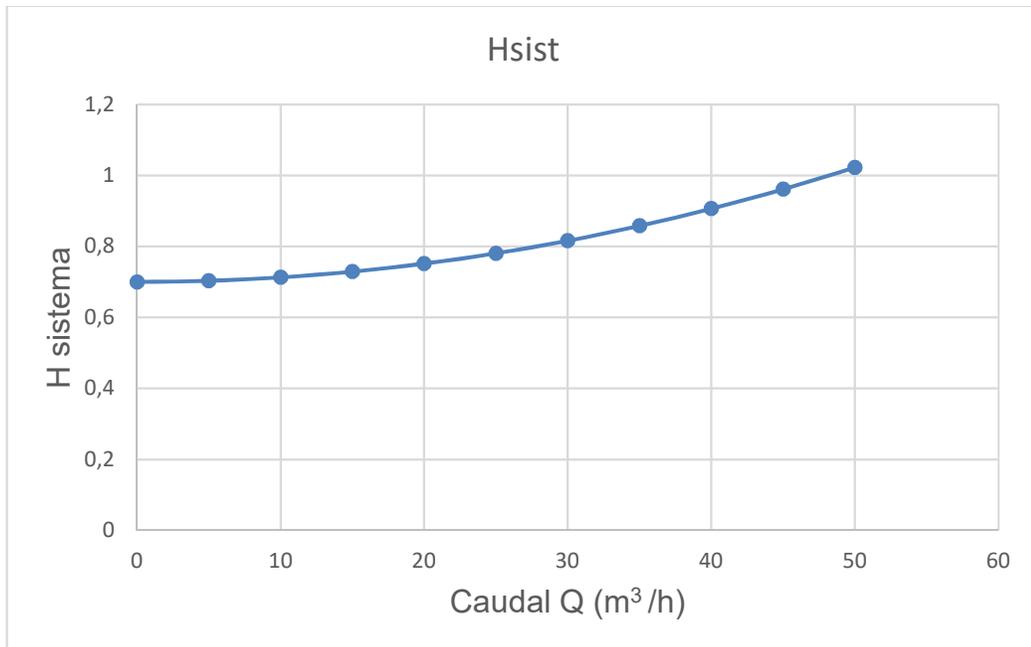


Figura 33. Curva del sistema correspondiente al tramo B-E.

5.2.1.3 Pérdidas de carga en tramo C-E.

Se sigue utilizando el mismo método para calcular las pérdidas de carga, a diferencia de los tramos anteriores, por este circula ácido clorhídrico a una temperatura de 40°C. El sistema se representa en la figura 34. Los datos correspondientes a este sistema son los siguientes:

- Largo total de la tubería 19 m
- Tubería cedula 80 con un diámetro nominal de 6 pulg. y un diámetro interno de 0,1464 m
- Velocidad del fluido 0,5 m/seg
- Gravedad 9,81 m/seg²
- El fluido es HCL a 40°C

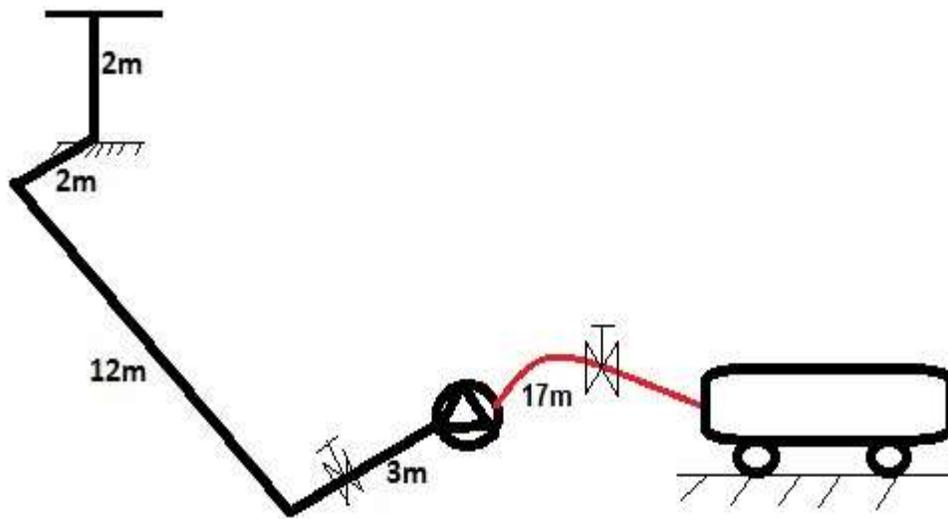


Figura 34. Sistema C-E.

Ahora para el coeficiente de fricción f se debe determinar el coeficiente de rugosidad relativa, para esto se utiliza la figura 29 y se selecciona la rugosidad absoluta para una tubería de acero al carbono. Dando un valor de 0,00015 m.

Luego:

$$K = \frac{D}{\varepsilon}$$

$$K = \frac{0,1464}{0,00015}$$

$$K = 976 \text{ (adimensional)}$$

Para utilizar la ecuación de Reynolds se debe conocer el valor de la viscosidad cinemática del ácido clorhídrico a 40°C. Dato obtenido del libro Robert L. Mott. Mecánica de fluidos. Dando un resultado de 0,000014171 m²/seg.

La ecuación de Reynolds queda:

$$Re = \frac{VD}{\nu}$$

$$Re = \frac{0,5 * 0,1464}{0,000014172}$$

$$Re = 5165,11(\text{adimensional})$$

Al igual que en los casos anteriores este resultado corresponde a un flujo turbulento. Una vez obtenido el número de Reynolds y el coeficiente de rugosidad relativa, se puede obtener el valor del coeficiente de fricción f utilizando el diagrama de Moody. Dando un valor f de 0,039. Utilizando la ecuación de Darcy-Weisbach se obtienen las pérdidas de carga.

$$hl_1 = f \left(\frac{L}{D} \right) \left(\frac{V^2}{2g} \right)$$

$$hl_1 = 0,039 \left(\frac{19}{0,1464} \right) \left(\frac{0,5^2}{2 * 9,81} \right)$$

$$hl_1 = 0,0644 \text{ m}$$

A continuación, se calculan las pérdidas de carga en los accesorios hidráulicos que son:

- Válvula Saunders= 1
- Codos 45°= 3
- Tee's=1

Ya con los elementos hidráulicos identificados, se procede a determinar el coeficiente de resistencia K para los accesorios, siendo este de, $K=5$ para la válvula, $K=3$ para los codos de 45° y $K=1$ para la Tee

Luego para el cálculo de las pérdidas de carga en los accesorios se tiene que:

$$hl_2 = K \left(\frac{V^2}{2g} \right)$$

$$hl_2 = 5 \left(\frac{0,5^2}{2 * 9,81} \right) + 3 * 3 \left(\frac{0,5^2}{2 * 9,81} \right) + 1 \left(\frac{0,5^2}{2 * 9,81} \right)$$

$$hl_2 = 0,1911 \text{ m}$$

Luego las pérdidas de carga totales son:

$$hl_{\text{total}} = hl_1 + hl_2 + 2$$

$$hl_{\text{total}} = 0,0644 + 0,1911 + 2$$

$$hl_{\text{total}} = 2,2555 \text{ m}$$

Nuevamente se calcula la curva del sistema, para esto se cuenta con la siguiente información.

- $C_{ES} = 1 \text{ m}$
- $C_{ED} = 2 \text{ m}$

Columna estática total:

$$C_{ET} = C_{ES} + C_{ED}$$

$$C_{ET} = -1,3 + 2$$

$$C_{ET} = 0,7 \text{ m}$$

Nuevamente el caudal está delimitado por la velocidad de operación. Al aplicar los cambios de unidades a los valores el cálculo del caudal está dado por:

$$Q = V * A$$

$$Q = 1800 * 0,01683$$

$$Q = 30,29 \text{ m}^3/\text{h}$$

Coeficiente de pérdidas de carga globales:

$$K_T = \frac{h_{\text{perd}}}{Q^2}$$

$$K_T = \frac{0,2555}{30,29^2}$$

$$K_T = 0,0002784$$

Con los datos obtenidos se realiza la siguiente tabla (Tabla 14) y se realiza la curva correspondiente (figura 35) del tramo C-E.

Caudal (m³/hora)	H_{sist} (m)
0	0,7
5	0,7069
10	0,727
15	0,762
20	0,811
25	0,874
30	0,95
35	1,04
40	1,14

Tabla 14. Relación de caudal y Altura del sistema.

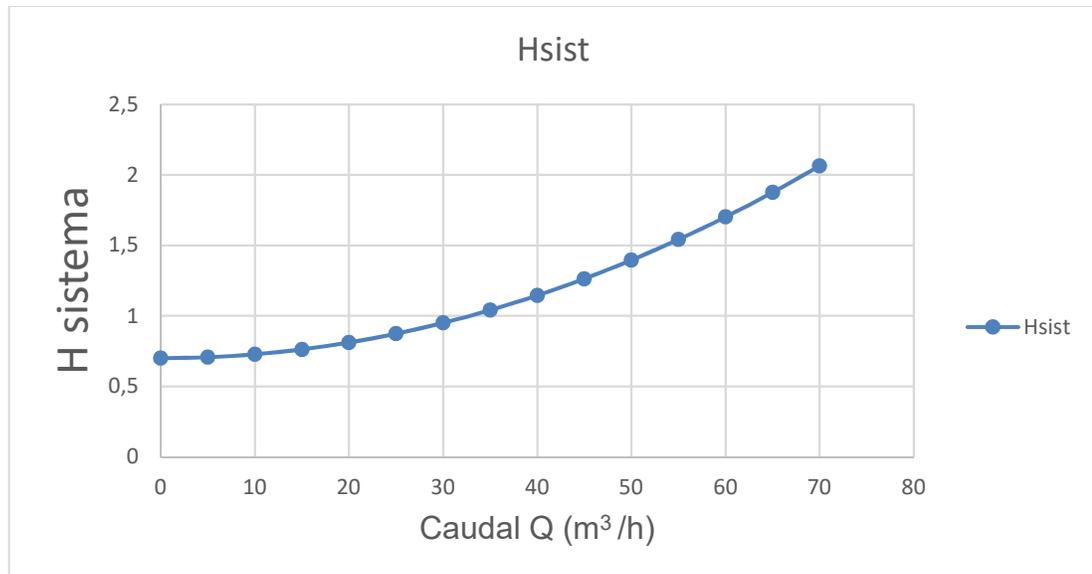


Figura 35. Curva del sistema correspondiente al tramo C-E.

5.2.1.4 pérdidas de carga en tramo F-G.

El sistema del tramo F-G se muestra en la figura 36. Para calcular las pérdidas de carga en este tramo se toman otras consideraciones como:

- Altura geométrica de descarga = 45 m
- Altura geométrica de succión 0 m
- Fluido: agua + ácido clorhídrico a una temperatura entre 65-70 °C
- Velocidad del fluido 1 m/seg (VGB Ritchline)
- Tubería cedula 80 de 8 pulg. diámetro nominal con 0,194 m de diámetro interno.
- Viscosidad cinemática de 0,00000013305 m²/ seg.
- Largo total de tubería de 47 m.

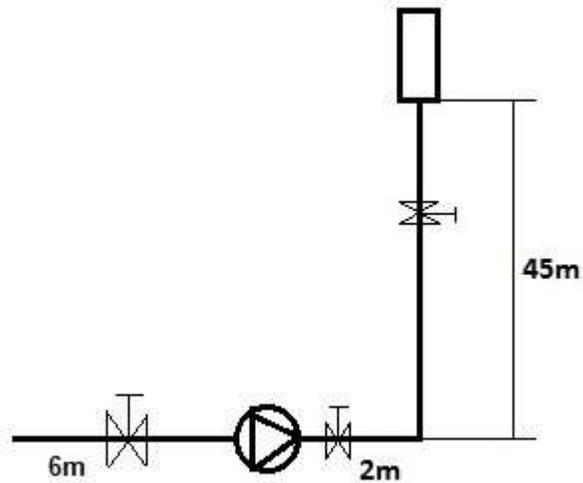


Figura 36. Sistema F-G.

Nuevamente debemos encontrar el coeficiente de fricción f , a través del diagrama de Moody. Para utilizar la ecuación de Darcy-Weisbach, para esto se debe calcular la rugosidad relativa del material utilizando la figura 29

y el número de Reynolds.

Rugosidad relativa:

$$K = \frac{D}{\varepsilon}$$

$$K = \frac{0,194}{0,00015}$$

$$K = 1293,3 \text{ (adimensional)}$$

Número de Reynolds:

$$Re = \frac{VD}{\nu}$$

$$Re = \frac{1 * 0,194}{0,00000013305}$$

$$Re = 145803(\text{adimensional})$$

El resultado de la ecuación del Reynolds corresponde a un flujo turbulento. Con los valores obtenidos se determina a través del diagrama de Moody (figura 30) el coeficiente de fricción f . Dando un valor de 0,021.

Luego las pérdidas de carga en las tuberías son:

$$hl_1 = f\left(\frac{L}{D}\right)\left(\frac{V^2}{2g}\right)$$

$$hl_1 = 0,021\left(\frac{47}{0,194}\right)\left(\frac{1^2}{2 * 9,81}\right)$$

$$hl_1 = 0,259 \text{ m}$$

Para las pérdidas de carga en los elementos hidráulicos se tienen los siguientes accesorios:

- Codos 45°= 1
- Válvulas Saunders=2

Luego las pérdidas de carga son:

$$hl_2 = K \left(\frac{V^2}{2g} \right)$$

$$hl_2 = 2 * 5 \left(\frac{1^2}{2 * 9,81} \right) + 3 \left(\frac{1^2}{2 * 9,81} \right) + 45$$

$$hl_2 = 45,7807 \text{ m}$$

Al igual que los apartados anteriores se procede con la elaboración de la curva del sistema. Para el primer calculo que es la columna estática total se consideran los siguientes datos que se pueden obtener de la figura 36:

- $C_{ES} = 0 \text{ m}$
- $C_{ED} = 45 \text{ m}$

Columna estática total:

$$C_{ET} = C_{ES} + C_{ED}$$

$$C_{ET} = 0 + 45$$

$$C_{ET} = 45 \text{ m}$$

Cálculo de caudal para una velocidad de 1 m/seg:

$$Q = V * A$$

$$Q = 3600 * 0,0295$$

(- 108 -)

$$Q = 106,41 \text{ m}^3/\text{h}$$

Coefficiente de pérdidas de carga globales:

$$K_T = \frac{h_{\text{perd}}}{Q^2}$$

$$K_T = \frac{0,7807}{106,41^2}$$

$$K_T = 0,000129$$

Con los datos obtenidos se realiza la siguiente tabla (tabla 14) y la curva correspondiente (figura 37).

Caudal (m³/hora)	H_{sist} (m)
0	45
15	45,0155
30	45,062
45	45,139
60	45,248
75	45,387
90	45,558
105	45,76
120	45,99

Tabla 14. Relación de caudal y Altura del sistema.

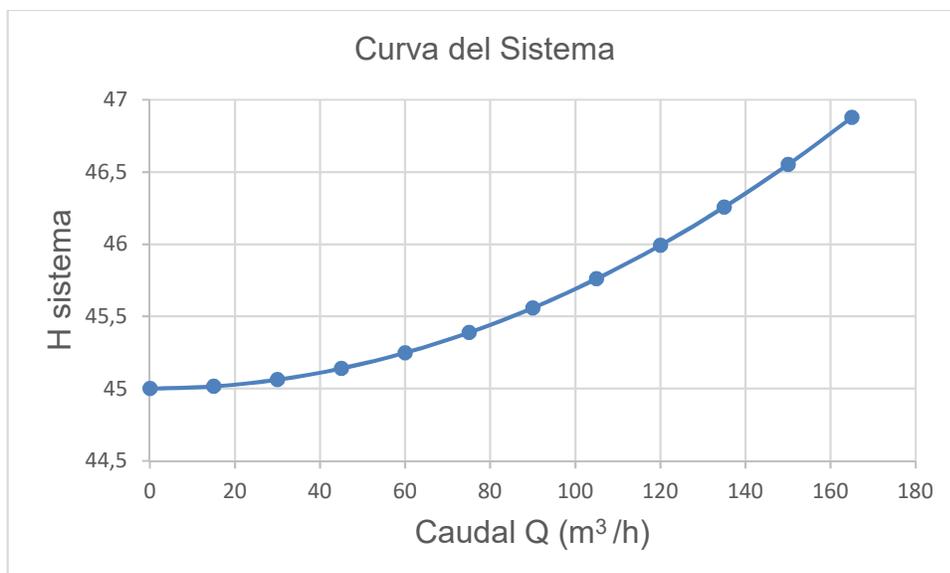


Figura 37. Curva del sistema correspondiente al tramo F-G.

5.2.2 Cálculo de bombas.

Inmediatamente después de obtenidas las pérdidas de carga, se procede a seleccionar y verificar las bombas que componen el sistema. Para esto se cuenta con 2 tipos de bombas marca VOGT serie N, que son las que dispone la empresa Menfis. Una vez seleccionada la bomba, se procede a verificar que las bombas funcionen correctamente, es decir que no caviten. Finalmente intersectar la curva de pérdida de carga con la curva característica de la bomba, con el fin de esclarecer la decisión de utilizar dicha bomba.

5.2.2.1 Bomba tramo A-E.

Se toma en consideración la figura 28 para determinar las alturas geométricas de aspiración y descarga. Luego para llevar a cabo el cálculo se siguen el procedimiento que será mostrado a continuación.

Primeramente, se calcula la altura total real, que corresponde a las pérdidas de carga totales de presión del sistema, según:

$$H = C_{ET} + C_{DT}$$

Donde:

- H: Altura total real en m
- C_{DT} : Columna dinámica total en m (dada por los coeficientes de pérdida de aspiración y descarga y multiplicada por el caudal al cuadrado ($Q=m^3/\text{seg}$))

La columna estática total ya fue calculada anteriormente para este tramo, dando un valor de -23 m. La columna dinámica total corresponde a las pérdidas de carga en la aspiración y descarga de la bomba, por lo que este dato ya se ha calculado en el apartado 4.2.1.1. con un resultado de 0,2539 m. Luego la altura total será de -22,7461 m.

Para la primera bomba se tomó en consideración que la caída del fluido debido a la gravedad es suficiente para transportar el agua a su destino, pero en caso de contrario, en la cual la gravedad no sea suficiente para lograr el caudal total, Menfis dispone de una bomba VOGT serie NE 620 para lograr dicho objetivo.

La curva característica de una bomba representa una relación entre los distintos valores de caudal proporcionado por la misma con la altura manométrica, el rendimiento hidráulico y la potencia requerida. La curva se obtiene en fábrica mediante el estrangulamiento de una válvula colocada en la salida de la bomba. Los caudales y alturas correspondientes a distintas posiciones de la válvula son obtenidos mediante caudalímetros y manómetros respectivamente.

La bomba antes mencionada se encuentra sobredimensionada para realizar la tarea correspondiente, esto se puede apreciar en la gráfica a continuación (figura 38), pero al no contar con la bomba adecuada Don Rodrigo Maureira ingeniero mecánico a cargo del proyecto, tomo la decisión de utilizarla igualmente.

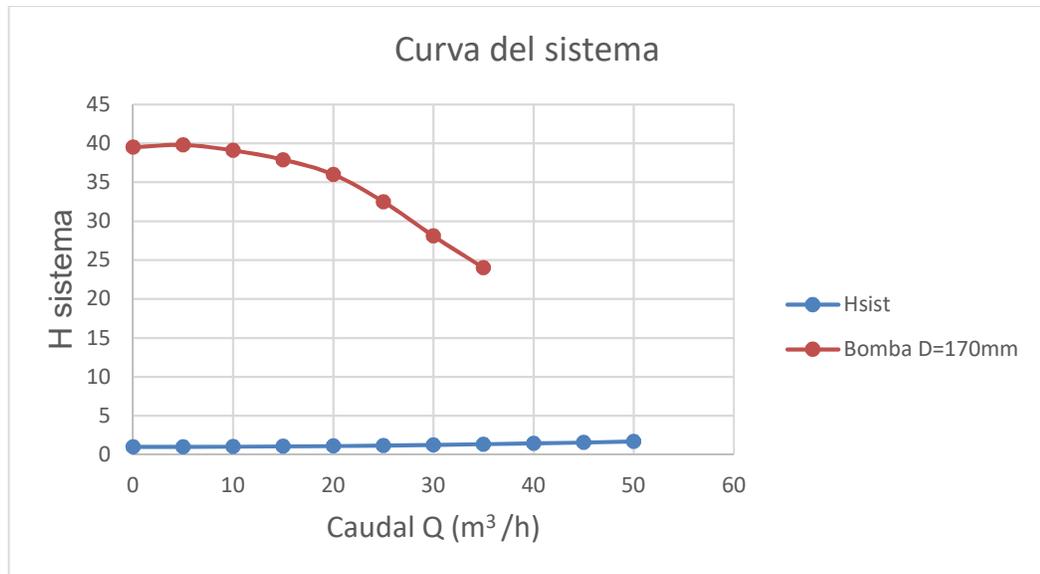


Figura 38. Intersección de la curva del sistema con la curva característica de la bomba.

Ya con la bomba seleccionada se procede a verificar que la bomba no cavita y funciona correctamente. Para esto se trabaja con la condición de que:

$$CNSPD \geq CNSPR$$

Donde:

- CNSPD: Columna neta de succión positiva disponible.
- CNSPR: Columna neta de succión positiva requerida (dato otorgado por el fabricante de bombas).

CNSPD:

$$CNSPD = P_{atm} - h_{asp} - h_{perd} - P_v$$

Donde:

- $P_{atm} = 1$ atm que corresponde a 10,33 m
- h_{asp} : Altura entre el nivel de líquido en el estanque de succión y la succión o eje de la bomba
- h_{perd} : Pérdidas de carga en la aspiración de la bomba.
- $P/\rho g$: Presión de líquido saturado a una temperatura determinada (Anexo 4) en m

Datos:

- $h_{asp} =$ Se toma la condición más crítica en la cual el fluido del estanque se encuentra a 1 metro sobre el eje de succión de la bomba.
- $P_v = 0,24$ m

La pérdida de carga en la aspiración está dada por los elementos hidráulicos que están en la etapa de succión de la bomba para esto se calcula la tubería de aspiración, y la reducción de entrada a la bomba, obteniendo un valor de pérdidas de carga de $h_{perd} = 0,1149$ m.

Calculando CNSPD:

$$CNSPD = P_{atm} - h_{asp} - h_{perd} - P/\rho g$$

$$CNSPD = 10,33 + 1 - 0,1149 - 0,25$$

$$CNSPD = 10,9651 \text{ m}$$

CNSPR se obtiene de las curvas que otorga el fabricante de bombas, esta se puede encontrar en el anexo 5, dando un valor de 2,1 m. Estos valores se comparan para determinar si se cumple la condición de cavitación:

$$\text{CNSPD} \geq \text{CNSPR}$$

$$10,9651 \geq 2,1$$

Como se cumple la condición propuesta para que la bomba no la bomba funcionara de manera correcta sin cavitación, aportando energía en caso de ser necesario.

5.2.2.2 Bomba tramo B-E.

El tramo B-E cuenta con un estanque móvil perteneciente a la empresa Memphis, que posee una bomba centrífuga integrada, se regula su nivel de caudal mediante un variador de frecuencia. El variado de frecuencia es un sistema para el control de la velocidad rotacional de un motor de corriente alterna, por medio del control de la frecuencia de alimentación suministrada al motor. De esta manera no hay necesidad de efectuar ningún cálculo ni seleccionar una bomba.

5.2.2.3 Bomba tramo C-E.

Tomando en consideración las alturas geométricas de la instalación mostradas en la figura 34, con las alturas geométricas de aspiración y descarga. Con lo anterior se determina la altura total de la bomba.

Datos:

- C_{ET} : 1 m
- C_{DT} : 0,2555

Luego la altura total real de funcionamiento es de 0,7 m, para esta condición de altura Memphis no posee dentro de su inventario una bomba capaz de mantener un caudal bajo esta condición. Pero posee una bomba marca VOGT serie N 626 con una velocidad del motor de 1450 RPM, al igual que en el apartado 4.2.2.1 la bomba

también se encuentra sobredimensionada (figura 39), pero con el fin de abaratar costos se recibe instrucciones de utilizarla igualmente.

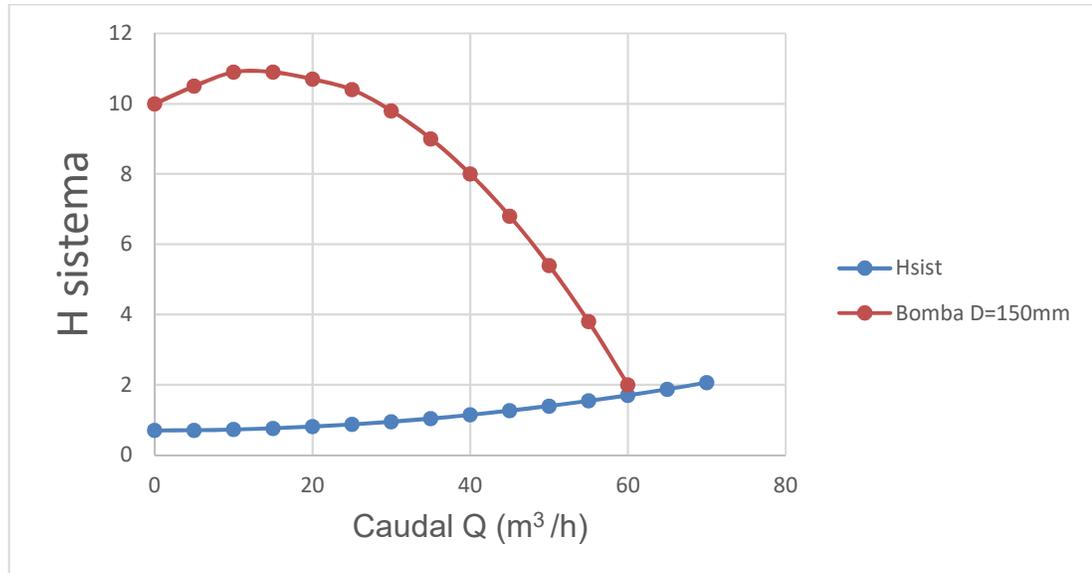


Figura 39. Intersección de la curva del sistema con la curva característica de la bomba.

En el caso que haya que ajustar el caudal, este ajuste se realizará con un variador de frecuencia. A continuación, se procede a verificar que la bomba no cavitará y funcionara correctamente.

$$CNSPD \geq CNSPR$$

CNSPD:

$$CNSPD = P_{atm} - h_{asp} - h_{perd} - P_v$$

Donde:

- $P_{atm} = 1 \text{ atm}$ que corresponde a 10,33 m

- h_{asp} : Altura crítica que para este caso según la figura 35 es de 0,5 m sobre el nivel del eje de succión de la bomba.
- h_{perd} : las pérdidas de carga en la succión corresponden a una manguera de 17 m y una válvula Saunders. El valor correspondiente a ellas es de 0,128 m.
- $P/\rho g$: Fluido correspondiente a ácido clorhídrico a 40°C. Este dato se obtiene de la empresa distribuidora con un valor de 0,9 m

Calculando CNSPD:

$$CNSPD = P_{atm} - h_{asp} - h_{perd} - P/\rho g$$

$$CNSPD = 10,33 + 0,5 - 0,128 - 0,9$$

$$CNSPD = 9,802 \text{ m}$$

CNSPR se obtiene de las curvas que otorga el fabricante de bombas, esta se puede encontrar en el anexo 5, dando un valor de 4,5 m. Estos valores se comparan para determinar si se cumple la condición de cavitación:

$$CNSPD \geq CNSPR$$

$$9,802 \geq 4,5$$

Como se cumple la condición propuesta para que la bomba no cavite funcionara de manera correcta, cumpliendo su función a cabal, con un caudal de agua de 53,87 m³/h.

5.2.2.4 Bomba tramo F-G

En este tramo se toman en consideración 2 bombas una operativa y otra de apoyo en caso que la primera falle. Tomando en consideración las alturas geométricas de la instalación mostradas en la figura 36, con las alturas geométricas de aspiración y descarga. Con lo anterior se determina la altura total de la bomba.

Datos:

- C_{ET} : 45 m
- C_{DT} : 0,7807

Luego la altura total real de funcionamiento es de 45,7807 m, para esta condición de altura Memphis posee en su inventario una bomba capaz cumplir con esta condición. Esta es una bomba marca VOGT serie N 631 con una velocidad del motor de 2900 RPM, la elección del caudal óptimo para este sistema se puede apreciar en la figura 40 a continuación.

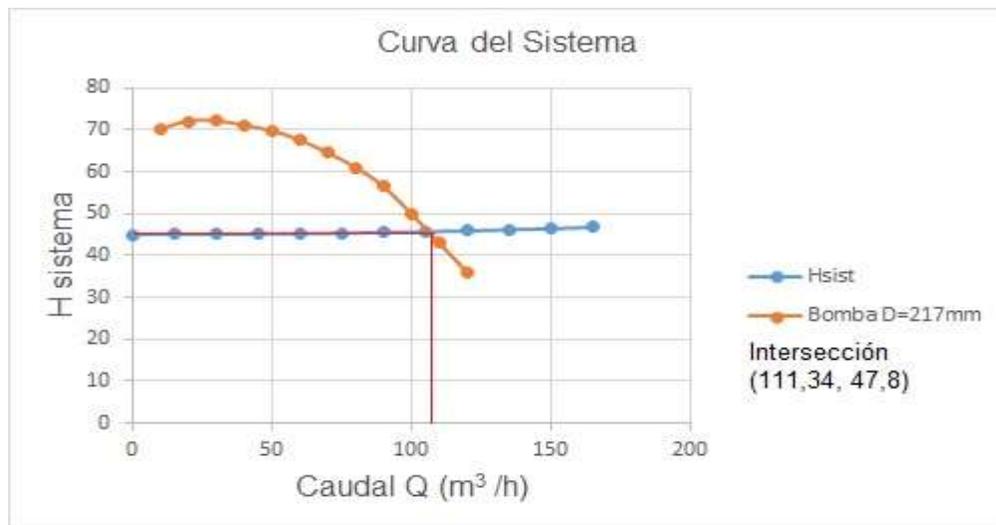


Figura 40. Intersección de la curva del sistema con la curva característica de la bomba.

La bomba operará con un caudal óptimo de 111,34 m³/h cumpliendo con todas las condiciones anteriormente mencionadas. En el caso que haya que ajustar el caudal, este ajuste se realizará con un variador de frecuencia. A continuación, se procede a verificar que la bomba no cavitará y funcionara correctamente.

$$\text{CNSPD} \geq \text{CNSPR}$$

CNSPD:

$$\text{CNSPD} = P_{\text{atm}} - h_{\text{asp}} - h_{\text{perd}} - P_v$$

Donde:

- $P_{\text{atm}} = 1 \text{ atm}$ que corresponde a 10,33 m.
- h_{asp} : Altura entre el nivel del fluido y el eje de la bomba, en este caso la succión proviene del sistema de tuberías por la altura de aspiración es 0 m.
- h_{perd} : las pérdidas de carga en la succión corresponden a una manguera de 6 m y una válvula Saunders. El valor correspondiente a ellas es de 0,309 m.
- P/pg : Fluido correspondiente a un 7% de HCL y 93% de agua. Como en la composición predomina la cantidad de H₂O, en la práctica se considera como si el fluido correspondiera a una cantidad de un 100% de agua. Como resultado se obtiene un valor de 3,18 m.

Calculando CNSPD:

$$\text{CNSPD} = P_{\text{atm}} - h_{\text{asp}} - h_{\text{perd}} - P/pg$$

$$\text{CNSPD} = 10,33 + 0 - 0,309 - 3,18$$

$$\text{CNSPD} = 6,84 \text{ m}$$

CNSPR se obtiene de las curvas que otorga el fabricante de bombas, esta se puede encontrar en el anexo 5, dando un valor de 4,5 m. Estos valores se comparan para determinar si se cumple la condición de cavitación:

$$\text{CNSPD} \geq \text{CNSPR}$$

$$6,84 \geq 5,1$$

Como se cumple la condición propuesta para que la bomba no cavite funcionara de manera correcta, cumpliendo su función a cabal, con un caudal de agua de 53,87 m³/h.

5.2.3 Mangueras para manejo de ácido.

Debido al fluido corrosivo que circulara por las mangueras estas deben estar diseñadas especialmente para trabajar con ácidos. Para esto se selecciona una manguera “transmaster especial” (figura 41) distribuida por la empresa POBERAJ SA. (Anexo 7), está compuesta de filmes y tejidos de polipropileno, con refuerzo interior de alambre revestido en polipropileno y refuerzo exterior de alambre galvanizado.

Las mangueras se seleccionan mediante la temperatura de trabajo, siendo esta para la limpieza de un máximo de 80°C. La manguera seleccionada tiene un alcance de temperatura entre los -20°C a 100°C.



Figura 41. Manguera para manejo de ácidos. Fuente: POBERAJ SA.

5.2.4 Reductor y juntas de expansión.

Se seleccionan reductores y expansores de la empresa AGUAMARKET modelos j-10 y j-11 del mismo material que el usado en las mangueras para ácido, debido a esto, no presentan problemas para su uso en la limpieza química de la caldera. Estas se pueden apreciar en la figura 42.



Figura 42. Reductores y juntas de expansión modelo J-10 y J-11. Fuente: AGUAMARKET

5.2.5 Camión con cisterna criogénica y vaporizador.

Este es el encargado de aportar el nitrógeno a la caldera para evitar la oxidación de esta misma durante el decapado de ácido, se conecta directamente al domo mediante mangueras especiales de nitrógeno, la función principal es remover el oxígeno que existe en las tuberías de la caldera, se utiliza nitrógeno ya que no reacciona químicamente con el HCL. Este camión es arrendado por la empresa contratista.

5.3 Cálculo de concentración de productos químicos.

Es de suma importancia conocer la concentración exacta a emplear de cada producto químico presente en las obras. Para esto se hace brevemente referencia a la parte química, sobre todo a disoluciones y fases para comprender mejor de que trata esta sección.

Cada limpieza llevada a cabo es sin lugar a dudas diferentes unas de otras, nunca se encontrarán las mismas condiciones de trabajo en las calderas como para volver a utilizar el mismo método, por eso es importante realizar un estudio de las sustancias químicas antes de llevar a cabo el desarrollo del proyecto e identificar todos los parámetros esenciales.

5.3.1 Fases y disoluciones.

La materia puede presentarse en dos formas distintas, homogéneas y heterogéneas, un material heterogéneo es una mezcla y cada porción homogénea de la misma, constituye desde el punto de vista químico una fase. Cada una de ellas presenta sus propiedades características y en general pueden separarse unas de otras (figura 43).

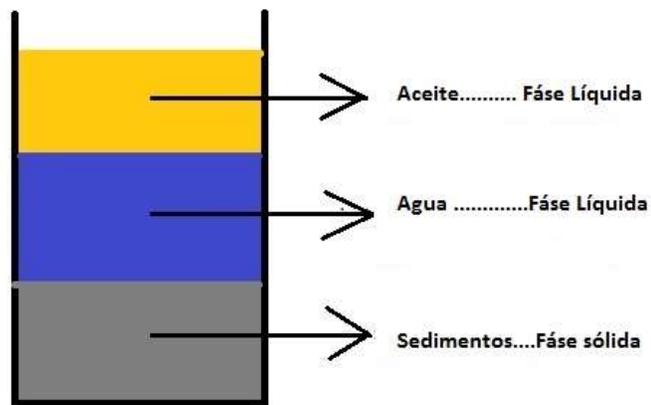


Figura 43. Separación de las fases mediante densidades.

5.3.1.1 Disoluciones.

En términos generales, si una fase homogénea tiene una composición variable se denomina disolución. Las disoluciones pueden ser sólidas, pero la mayoría de ellas son líquidas. El componente que está en mayor proporción y que generalmente es líquido, se denomina “disolvente” y el que está en menor proporción es el “solute” las disoluciones más utilizadas son las acuosas en que el disolvente es el agua, como el caso del dióxido de carbono en agua, formando agua carbonatada.

Las disoluciones se indican normalmente en valores de % del soluto en la disolución final esto es la suma del soluto más el disolvente. La cantidad de cada componente es generalmente en “peso”, en ocasiones puede ser en volumen, pero en este caso debe indicarse claramente. En este trabajo las disoluciones son en base agua, es decir, que los productos químicos están disueltos en ella.

5.3.1.2 Disolución de productos líquidos.

Por motivos de condiciones de obtención o de manejo seguro, muchos productos líquidos se comercializan como soluciones acuosas, es decir, se vende un producto que no es 100% del elemento que se requiere, sino que vienen diluidos en agua. Obviamente es de la mayor importancia conocer la concentración del producto que se está adquiriendo.

Por ejemplo, el ácido clorhídrico se comercializa al 32% esto es que en cada 100 kg de HCL hay 32 kg de ácido puro y 68 kg de agua. Al emplear este producto directamente se estará empleando una solución al 32%. Ahora si se desea emplear una solución de 100 kg de ácido al 5% se deben poner 15,625 kg de 32% de HCL en 84,375 kg de agua (en los 15,625 kg hay 5 de 100% ácido y 10,625 de agua). Ahora si se asume que la gravedad específica del 32%HCL es 1,16275 (agua =1) se debe poner 13,438 litros de 32%HCL en 84,375 litros de agua. En la práctica las cifras se redondean y si no se considera la gravedad específica, se enriquece un poco la solución y puede ponerse 15 litros de ácido en 85 litros de agua.

5.3.1.3 Disolución de productos sólidos.

Cuando los productos sólidos no contienen agua en sus moléculas, equivale a un producto líquido al 100% y por lo tanto la concentración de la solución se obtiene directamente disolviendo kilos del producto en agua para completar el 100%

Hay varios productos sólidos que pueden o no contener agua en sus moléculas:

- Si el producto indica que es “anhídrido” entonces no contiene agua en sus moléculas
- Si el producto es “hidratado” entonces debe conocerse su fórmula química, para saber cuánto producto 100% y cuánta agua hay realmente en su molécula.

Por ejemplo, el Fosfato trisódico “penta hidratado”. Su fórmula química es $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, entonces el peso molecular (ver Anexo 6)

- Peso molecular Na = 23 g/mol
- Peso molecular P = 31 g/mol
- Peso molecular O = 16 g/mol
- Peso molecular H = 1 g/mol

Luego el peso molecular de $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ es:

$$23 * 3 + 31 + 16 * 4 + 5 * (1 * 2 + 16) = 254 \text{ g/mol}$$

Peso molecular de Na_3PO_4 es:

$$23 * 3 + 31 + 16 * 4 = 164 \text{ g/mol}$$

Es decir que en el fosfato penta hidratado hay 164/254 de fosfato puro (64,5%)

5.3.1.4 Disolución de productos químicos líquidos “hidratados”.

Algunos productos líquidos pueden venir diluidos, pero a la vez su molécula puede contener agua, en consecuencia, hay agua en la disolución y también en su molécula, cuya suma disminuye el producto efectivo que se dispone para la reacción química que se requiere.

Por ejemplo, la Hidracina 80% “hidratada” indica que, en 100 partes de peso de producto, hay 80 partes de hidracina, pero en su molécula también hay agua, por lo que para calcular esta nueva cantidad de agua se requiere conocer la fórmula de este producto que es $N_2H_4H_2O$ y su gravedad específica cuyo valor es 1.1.

Entonces el peso molecular de $N_2H_4H_2O$ es:

- Peso molecular del nitrógeno = 14 g/mol

$$14 * 2 + 1 * 4 + 1 * 2 + 16 = 50 \text{ g/mol}$$

El peso molecular de N_2H_4

$$14 * 2 + 1 * 4 = 32 \text{ g/mol}$$

Es decir, en la hidracina hidratada hay 32/50 de hidracina pura (64%). Pero como se aplica esto, a continuación, se presentará un ejemplo en como aplicamos esta información para saber cuántos kg de hidracina se necesitan para un volumen determinado.

- Ejemplo: se requiere preparar una solución de 500 ppm en un volumen de 170 m^3 . ¿Cuántos kg de 80% hidracina hidratada se necesitan?

La forma de resolver esto es la siguiente:

$$170 (m^3) * 500 (ppm) * \frac{50}{32} * \frac{1}{0,8} * 1,1 * \frac{1}{1000}$$

Esto da como resultado que se requieren 182,6 kg de hidracina en 170 m³ de agua.

5.3.2 Productos químicos.

Una vez obtenidos los resultados del laboratorio se pueden determinar los productos químicos necesarios para cada etapa de la limpieza, para ello se identifican las incrustaciones en las tuberías de la caldera, estas se encuentran en directa relación con los productos a utilizar en la operación. El porcentaje de concentración se puede encontrar en el manual de limpieza para esta caldera. A continuación, se detalla los productos y la cantidad necesaria para la limpieza.

Es de suma importancia determinar la cantidad de químicos en kg o en litros dependiendo de cómo los vende el fabricante. Estos que serán utilizados en todas las etapas de la limpieza para ello existe un método de cálculo que será detallado a continuación:

$$Volumen\ del\ fuerte = \frac{volumen\ del\ debil * grav.\ esp\ del\ debil * \% \ del\ debil}{grac.\ esp\ del\ fuerte * \% \ del\ fuerte}$$

- Cuando se habla del fuerte se refiere al producto químico a utilizar, soda caustica, ácido clorhídrico, trifosfato sódico, entre otros elementos químicos.
- Débil se refiere a la mezcla final con la concentración correspondiente a utilizar.
- Cuando se habla de % se refiere al porcentaje de concentración del producto, para el fuerte este dato viene dado por el fabricante y para el débil depende de las condiciones de limpieza.

5.3.2.1 Productos químicos etapa alcalina.

5.3.2.1.1 Soda Caustica 2%.

Es un hidróxido caustico es un sólido blanco cristalino sin olor, compuesta por sodio, hidrógeno y oxígeno altamente corrosiva. Usado en la industria en la fabricación de papel, tejidos y detergentes, en este caso se utiliza principalmente por su característica de detergente para desbloquear las tuberías de residuos orgánicos. Ya que la soda caustica es un polvo se distribuye en kg

Datos:

- Volumen del débil: 186500 lt
- % del débil: 2%
- % del fuerte: 97%
- Gravedad específica débil: 1,03
- Gravedad específica fuerte: 2,13
- Densidad: 1,525 gr/cm³

$$\text{Volumen del fuerte} = \frac{186500 * 1,03 * 2}{2,13 * 97}$$

$$\text{Volumen del fuerte} = 1859 \text{ lt}$$

Multiplicamos por la densidad y obtenemos un peso de 2835 kg por cada 186.500 lt de agua.

5.3.2.1.2 Trifosfato de sodio 1%

Es una agente de limpieza, aditivo de comidas, removedor de manchas y desengrasante. Es blanco, granular y sólido cristalino, altamente soluble en agua, produciendo una solución alcalina. Se utiliza principalmente por su característica de desengrasante y propiedades alcalinas. Para determinar el peso a utilizar en este paso se calcula con una relación directa de volumen de 1 es a 1 tomando como volumen total la capacidad máxima de la caldera y una concentración del 1% dando como resultado:

$$\frac{186500 \text{ lt}}{X} = \frac{100\%}{1\%}$$

Normalmente se distribuye en kg por lo que se debe hacer una conversión correspondiente. De esto obtenemos un volumen de 1417 kg de producto por cada 186500 lt de agua

5.3.2.1.3 Metasilicato de sodio 1%.

También es conocido como vidrio soluble, es una sustancia inorgánica que se encuentra en soluciones acuosas y también en forma sólida dentro de muchos compuestos, entre ellos el cemento, impermeabilizadores. Se utiliza principalmente por sus propiedades físicas de detergente, desengrasante y alcalinidad. Al igual que el producto anterior también se calcula considerando una relación de 1 es a 1 con el volumen máximo de la caldera, de esto se obtiene un resultado de 1417 kg de producto por cada 186,5 m³ de agua. Comercialmente se encuentra en kg

5.3.2.2 Productos químicos etapa ácida.

5.3.2.2.1 Inhibidor de corrosión 0,2%

Un inhibidor es un producto que actúa formando películas sobre superficies metálicas para evitar la corrosión. En este caso se utiliza un inhibidor Rodine B213 especial para inhibir el ataque de ácido clorhídrico en el hierro y el acero durante operaciones

de limpieza industrial. Es de suma importancia que no supere una temperatura de 80°C ya que pierde su característica de inhibidor. En el comercio se compra en kg

Datos:

- Volumen del débil 186500 lt
- % del débil: 0,2%
- % del fuerte: 100%
- Gravedad específica débil: 1,15
- Gravedad específica fuerte: 1,05
- Densidad: 1 gr/cm³

$$\text{Volumen del fuerte} = \frac{186500 * 1,15 * 0,2}{1,05 * 100}$$

$$\text{Volumen del fuerte} = 373 \text{ lt}$$

Luego se multiplica por la densidad y obtenemos un peso de 373 Kg por cada 186.500 lt de agua.

5.3.2.2.2 Antiespumante 0,03%

El producto antiespumante es básicamente un aditivo que sirve para limitar la formación de espuma y reducirla al mínimo, su función principal es evitar la cavitación de la bomba. En el procedimiento de limpieza se utiliza en relación 1 es a 1 con una concentración de 0,03%. Comercialmente este producto se vende en lt dando como resultado 60 lt de antiespumante por cada 186.500 lt de agua.

5.3.2.2.3 HCL 7%

El ácido clorhídrico o ácido muriático es una disolución acuosa del gas cloruro de hidrógeno. Es muy corrosivo, se emplea comúnmente como reactivo químico. Ácido fuerte que se disocia completamente en disolución acuosa. Es de vital importancia ya que remueve los óxidos de cobre y hierro en las tuberías de la caldera.

- Volumen del débil 186500 lt
- % del débil: 7%
- % del fuerte: 32%
- Gravedad específica débil: 1,03495
- Gravedad específica fuerte: 1,15275
- Densidad: 1,159 gr/cm³

$$\text{Volumen del fuerte} = \frac{186500 * 1,03495 * 7}{1,15275 * 32}$$

$$\text{Volumen del fuerte} = 36628 \text{ lt}$$

Comercialmente se distribuye en kg. De ahí se obtiene una cantidad de 42,5 toneladas de ácido clorhídrico en una solución de agua de 185.000 lt.

5.3.2.2.4 Thiourea 0,2%

La thiourea es estructuralmente similar a la urea excepto que en vez de un átomo de oxígeno es reemplazado por un átomo de azufre. Es un compuesto térmicamente estable en su mayoría cristalinos. Se utiliza principalmente porque al reaccionar con ácido clorhídrico forma una película limpiadora que ayuda a desplazar los residuos alojados en las paredes de las tuberías.

- Volumen del débil 186500 lt
- % del débil: 0,2%
- % del fuerte: 99%

- Gravedad específica débil: 1,36
- Gravedad específica fuerte: 2,4
- Densidad: 1,405 gr/cm³

$$\text{Volumen del fuerte} = \frac{186500 * 1,36 * 0,2}{2,4 * 99}$$

$$\text{Volumen del fuerte} = 152 \text{ lt}$$

Comercialmente se distribuye en kg por lo que se obtienen 220 kg de tiourea en una mezcla de 186.500 lt de agua

5.3.2.2.5 Producto Bifloruro de Amonio 0,5%.

El Bifloruro de Amonio es un compuesto inorgánico, se produce a partir de amoniaco y fluoruro de hidrógeno. Esta sal es un cristal incoloro, se utiliza principalmente como agente limpiador. Este producto se distribuye en kg por lo que se debe hacer la conversión correspondiente.

- Volumen del débil: 186.500 lt
- % del débil: 0,5%
- % del fuerte: 97%
- Gravedad específica débil: 1,03
- Gravedad específica fuerte: 1,503
- Densidad: 151 gr/cm³

$$\text{Volumen del fuerte} = \frac{186500 * 1,03 * 0,5}{1,503 * 97}$$

$$\text{Volumen del fuerte} = 618 \text{ lt}$$

Al multiplicar el resultado con la densidad obtenemos que se necesitan 934 kg de este producto.

4.3.2.3 Productos químicos en etapa secuestrante.

5.3.2.3.1 Ácido cítrico 0,25 %.

Es un compuesto natural que se encuentra en todos los seres vivos, pero está concentrado en las frutas cítricas. Se utiliza principalmente como regulador de pH y previene la oxidación de aceites y grasas.

Tiene una concentración de 1 es a 1 dentro de la mezcla, por lo que se requieren 466 lt de ácido con una densidad de 1,69 g/cm³, comercialmente se vende en kg por lo que su conversión a peso es de 788 kg mezclados en 186,5m³ de agua.

5.3.2.4 Productos químicos etapa neutralizado y pasivado.

5.3.2.4.1 Carbonato de Sodio 0,5%.

Es una sal blanca y translúcida que es usada en otras cosas en la fabricación de jabón, vidrio y tintes, se puede hallar en la naturaleza u obtenerse de forma artificial. Se utiliza principalmente como regulador de pH en los tratamientos de agua. Dentro del proceso de limpieza tiene una relación de 1 es a 1 con la cantidad de agua suministrada es decir que con una concentración del 0,5% encontramos un total de 933 lt de carbonato de sodio o en su efecto 933 kg en la solución acuosa.

5.3.2.4.2 nitrógeno.

En sustitución de la hidracina para la eliminación de oxígeno en las tuberías se hace circular nitrógeno por estas. Las tuberías quedan ávidas de oxígeno luego del proceso de limpieza, para esto se hace circular nitrógeno mediante una bomba centrífuga, este desplaza el oxígeno alojado en los tubos eliminándolo.

5.4 Resultados.

La limpieza química fue desarrollada de acuerdo a lo planeado, solo hubieron inconvenientes con respecto al transporte de maquinarias y productos químicos, que

al ser trasladados desde la ciudad de Antofagasta, no se encontraban en el lugar de trabajo al momento de empezar la faena.

Como fue dicho en la sección 4.2.2, existían 2 bombas que se encontraban sobre dimensionadas, pero funcionaron de forma correcta al modificar el caudal de salida de la bomba mediante una válvula Sanders, siempre con el cuidado de que estas no cavitaran.

Durante la faena todos los trabajadores presentes siguieron todas las condiciones de seguridad previstas para este tipo de trabajos, por lo que no se produjeron accidentes durante la faena. El único inconveniente presentado fue por un error de personal de Celulosa Arauco en el que al momento de terminar la faena no siguieron las instrucciones y se produjo un pequeño derrame de sustancias peligrosas, la cual fue neutralizada rápidamente bajo el protocolo de la empresa Memphis, lo que no llego a mayores.

Conclusión.

En esta memoria se llevó a cabo una limpieza química de la caldera recuperadora de CELULOSA ARAUCO. Para esto se necesitó identificar cuáles son las generalidades que componen la limpieza, partir de lo más básico hasta abarcar todos los conceptos importantes del proceso.

El trabajo de limpieza depende de la característica del depósito a disolver. La estructura de una incrustación depende a su vez del tipo y de la concentración de impurezas, temperatura, presión del proceso, flujo. Estos valores varían en cada sistema, por lo cual es indispensable evaluar el tipo de depósitos mediante la inspección del equipo en cuestión y el análisis químico del mismo. La finalidad es determinar si es viable o no la limpieza química y en el caso de ser positivo, verificar si es adecuada para la remoción del depósito.

En base a lo anterior la memoria abarca los resultados de las operaciones realizadas, con el fin de hacer posible la limpieza de la caldera, para esto se planificaron todas las actividades en base a visitas de planta y conversaciones con el cliente. Tan importante como la planificación es la realización de una inspección en la caldera misma para esclarecer la condición de esta y poder emplear los cálculos correspondientes para finalizar la planificación del proyecto. Se pudieron encontrar depósitos de cobre y hierro entre otros.

Una vez hecho lo anterior, se procedió a realizar el cálculo de todos los productos químicos presentes en la limpieza, para que una vez determinada la concentración de cada uno, cotizarlos y comprarlos. Elaborar el procedimiento de trabajo, indicando todos los pasos a seguir y el tiempo necesario para llevarlos a cabo. Finalmente se envió la propuesta al cliente, que fue aceptada con algunas modificaciones que por motivos de confidencialidad no pueden ser nombradas.

La limpieza fue llevada a cabo con éxito sin ningún impertinente. Los trabajos se realizaron en base a los datos obtenidos de la inspección de la caldera, los cálculos

previos y al pie de la letra del procedimiento de trabajo que fue incluido en esta memoria. Realizando un trabajo satisfactorio bajo toda la normativa que se utiliza para este tipo de obras.

Especial mención tiene la seguridad que se debió tener al realizar la limpieza, por manejarse productos químicos peligrosos, por lo general ácidos y bases concentradas, siempre utilizando los elementos de protección personal adecuados.

Dentro de los aspectos relevantes que se debe señalar, es la importancia de la limpieza química como proceso de mantención de calderas. Alarga la vida de los equipos, mejora el rendimiento de los equipos e incluso tienen una ventaja medio ambiental al no permitir que los desperdicios vayan a terminar a embalses de residuos, es económico. Al realizar este proceso existe un ahorro considerable de dinero por parte de la empresa mandante, al no tener que reemplazar los equipos.

La limpieza química se ha hecho muy popular en los últimos 40 años, existiendo una gran cantidad de variantes para este procedimiento, como el Flushing, micro filtrado, limpiezas químicas de turbinas entre otros. Cada procedimiento proviene de la misma base mecánica y química.

MENFIS SPA pudo incluir la limpieza química de calderas a la lista de productos ofrecidos por la empresa, ya que fue realizada tomando en cuenta esta memoria como un manual de operación, generando utilidades para la empresa, cumpliendo así el objetivo propuesto en este trabajo.

Glosario

Energía térmica: Energía liberada en forma de calor, es decir, pasa de un cuerpo más caliente a otro que presenta una temperatura menor.

Motor de combustión interna: Es un tipo de máquina que obtiene energía mecánica directamente de la energía química de un combustible que arde dentro de la cámara de combustión.

Caldera humutubular: Esta construida por un recipiente que contiene agua en ebullición y que es atravesado por tubos, por el interior de los cuales circulan los gases producto de la combustión. Estos se generan en el hogar, aquí la transmisión de calor se realiza por radiación, los gases son conducidos a un segundo pasaje donde la transmisión de calor es por convección.

Refractario: Propiedad de algunos materiales de resistir el fuego sin destruirse.

Rayos gamma: Radiación electromagnética muy penetrante, parecida a los rayos x, pero de mayor longitud de onda, que se produce durante la desintegración de los núcleos de elementos radioactivos.

Espectrofotómetro: Instrumento usado en el análisis químico que sirve para medir, en función de la longitud de onda, la relación entre valores de una misma magnitud fotométrica.

Convección: Es una forma de transferencia de calor. Es el transporte de calor por medio del movimiento de un fluido.

Radiación: Propagación de energía en forma de ondas electromagnéticas o partículas subatómicas a través del vacío.

Deflector: Dispositivo que sirve para cambiar o desviar la dirección de la corriente de un fluido.

Baffles: Es un dispositivo que funciona como deflector de gases.

Álabes: Es una paleta curva que forma parte del rodete, difusor o del distribuidor. Desvían el flujo de corriente para la transformación de energía.

Descarbonatación: Es una tecnología que se utiliza en la industria para eliminar la dureza temporal del agua y evitar incrustaciones calcáreas.

Inyector: Es un dispositivo utilizado para bombear fluidos.

Downcomer: Es un conducto que dirige los gases desde la parte superior de la caldera hasta el estanque inferior.

Ánodo: Es un electrodo en el que se produce una reacción de oxidación, mediante el cual un material, al perder electrones, incrementa su estado de oxidación.

Cátodo: Es un electrodo con carga negativa que sufre una reacción de reducción, mediante la cual un material reduce su estado de oxidación al recibir electrones.

Capilaridad: Es una propiedad de los líquidos que depende de su tensión superficial, la cual, a su vez, depende de la cohesión del líquido y que le confiere la capacidad de subir o bajar por un tubo capilar.

Pitting: Una forma de corrosión localizada caracterizado, que se produce en pequeñas grietas de un metal.

Manómetro: Instrumento para medir la presión de los fluidos.

Vacuometro: Instrumento para medir la presión de un fluido cuando esta es menor que la atmosférica.

Fase homogénea: Que está compuesta por una sola fase.

Manifold: Es un bloque que posee integrado un circuito hidráulico, con sus correspondientes válvulas, ya sea adosadas o insertadas, que responden a una o varias funciones específicas.

Tanque de efluentes: Estanque en donde se desprende un fluido.

Cavitación: Es un fenómeno físico, mediante el cual un líquido, en determinadas condiciones, pasa a estado gaseoso y unos instantes después pasa nuevamente a estado líquido.

Licor Negro: Sub producto del proceso de Kraft de una celulosa al separar la pulpa de la madera.

Bibliografía.

1. Robert L. Mott. Mecánica de fluidos. Sexta edición.
2. NEXXO. Manual de Limpiezas químicas, 2001
3. Fundación de la energía de la comunidad de Madrid. Guía básica, calderas industriales eficientes, 2015
4. Universidad de Burgos. Manual de calderas industriales, 2006
5. Cisneros Freddy. Calderas de vapor pirotubulares y acuotubulares, 2012
6. Colman, Anthin. Manual de calderas. Madrid: Mac Graw Hill, 2000.
7. VGB Richtlinie, Internal cleaning of Water-Tube Steam Generating Plants and Associated Pipework. Segunda edición. 2006
8. DR 2800, Spectrophotometer Procedures Manual. Segunda edición. 2007.
9. Gómez Félix. Manual Básico De Corrosión Para Ingenieros. Primera edición.
10. Menfis SpA. Procedimiento de trabajo de limpiezas Químicas. 2016
11. Palacios Carolina. Matriz de seguridad para limpiezas químicas. 2016
12. Arribas Carmen, Salomón Catatila. Fundamentos de química para Ingenieros. Primera edición.
13. Profesor Ramiro Mege. Formulario de Maquinas.

Anexos

Anexo 1. Plano de una caldera acuotubular proveniente de fábrica sin modificaciones.

Anexo 2. Metodología de análisis de laboratorio de un espectrofotómetro.

Aluminio

Método 8012

Método Aluminón¹

Sobres de reactivo en polvo

(0.008–0.800 mg/L)

Campo de aplicación: Para agua y aguas residuales

¹ Adaptación de *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*.



Preparación del análisis

Antes de comenzar el análisis:

La determinación de aluminio requiere una digestión previa.

Lavar los artículos de vidrio con ácido clorhídrico 6,0 N y con agua desionizada antes de usarlos, para evitar los contaminantes absorbidos en el vidrio

Para obtener resultados de precisión, la temperatura de la muestra debe estar entre 20 - 25°C

Se requieren los siguientes elementos:

Cantidad

Sobres de reactivo de aluminio AluVer 3 en polvo	1
Sobres de reactivo de ácido ascórbico en polvo	1
Sobres de reactivo Bleaching 3 en polvo	1
Tubo mezclador, graduado de vidrio, 50-mL, con tapón	1
Cubeta de análisis, cuadrada, de una pulgada, 10-mL	2

Nota: En la pág. 6 encontrará información para realizar el pedido de fungibles y repuestos.

Sobres de reactivo en polvo

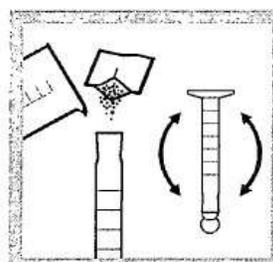
Método 8012



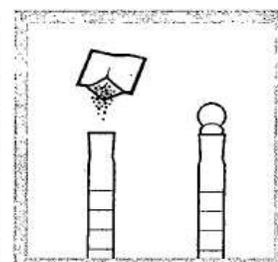
1. Seleccionar en la pantalla: **Programas almacenados**



2. Seleccionar el test.

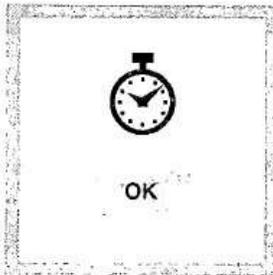


3. Llenar un tubo mezclador graduado de 50-mL hasta la marca de 50-mL con muestra. Añadir el contenido de un sobre de ácido ascórbico en polvo. Tapar el tubo e invertir despacio varias veces para disolver el polvo.

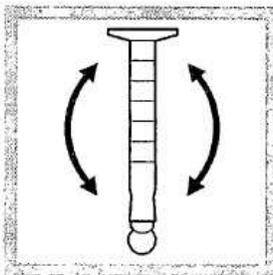


4. Añadir el contenido de un sobre de reactivo de aluminio AluVer 3 en polvo. Tapar el tubo. En presencia de aluminio se formará un color rojo-naranja

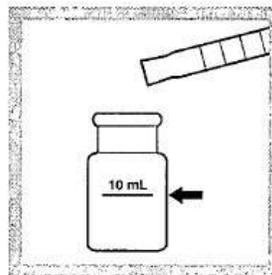
Aluminio (0.008–0.800 mg/L)



5. Seleccionar en la pantalla el símbolo de temporizador y pulsar OK



6. Invertir el tubo repetidamente durante un minuto para disolver el polvo. Si hay polvo sin disolver se obtendrán resultados erróneos



7. Preparación del blanco: llenar una cubeta cuadrada de una pulgada de 10-mL hasta la marca de 10-mL con mezcla del tubo mezclador.



8. Añadir el contenido de un sobre reactivo Bleaching 3 en polvo a la cubeta



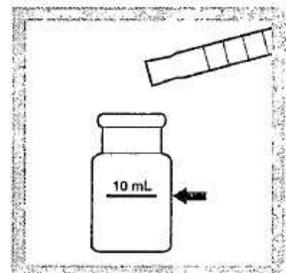
9. Seleccionar en la pantalla el símbolo de temporizador y pulsar OK



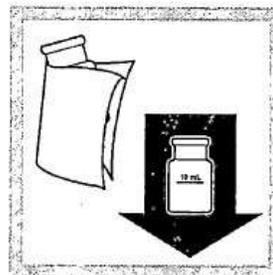
10. Agitar, con rotación enérgica durante 30 segundos. Esta solución debería adquirir un color anaranjado de claro y medio



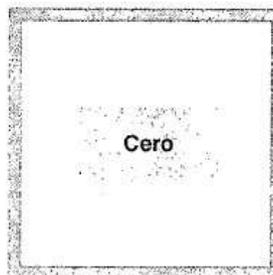
11. Seleccionar en la pantalla el símbolo de OK. Comienza un período de reacción de 15 minutos



12. La muestra preparada: llenar otra cubeta cuadrada de una pulgada de 10-mL hasta la marca de 10-mL con mezcla del tubo mezclador

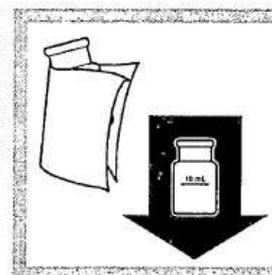


13. Dentro de los 5 minutos siguientes al período de reacción limpiar bien el exterior del blanco y colocar el blanco en el soporte portacubetas con la marca de llenado hacia la derecha



14. Seleccionar en la pantalla: Cero
La pantalla indicará:

0.000 mg/L Al³⁺



15. Inmediatamente limpiar bien el exterior de la cubeta (la muestra preparada) y colocar la cubeta en el soporte portacubetas con la marca de llenado hacia la derecha

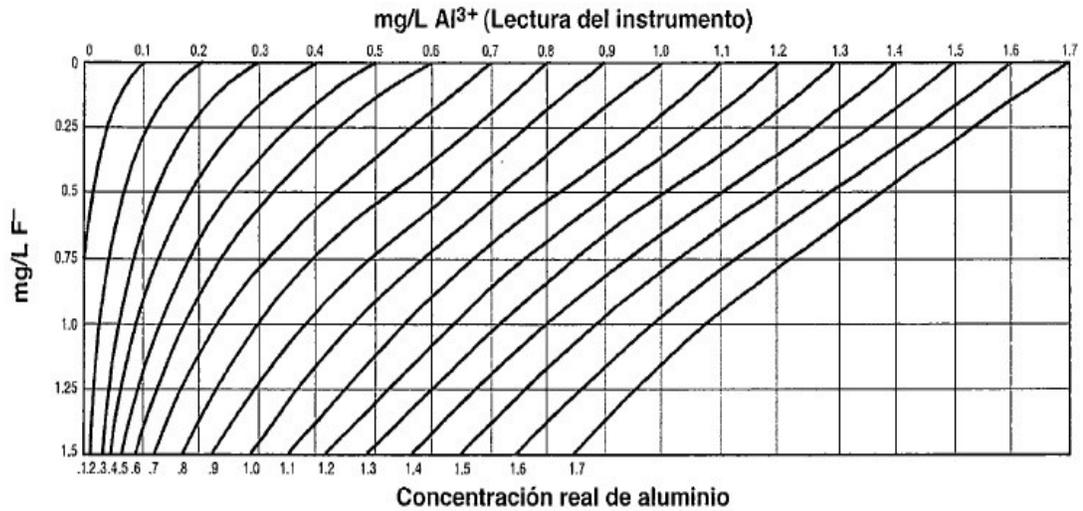


16. Seleccionar en la pantalla: Medición
el resultado aparecerá en mg/L Al³⁺

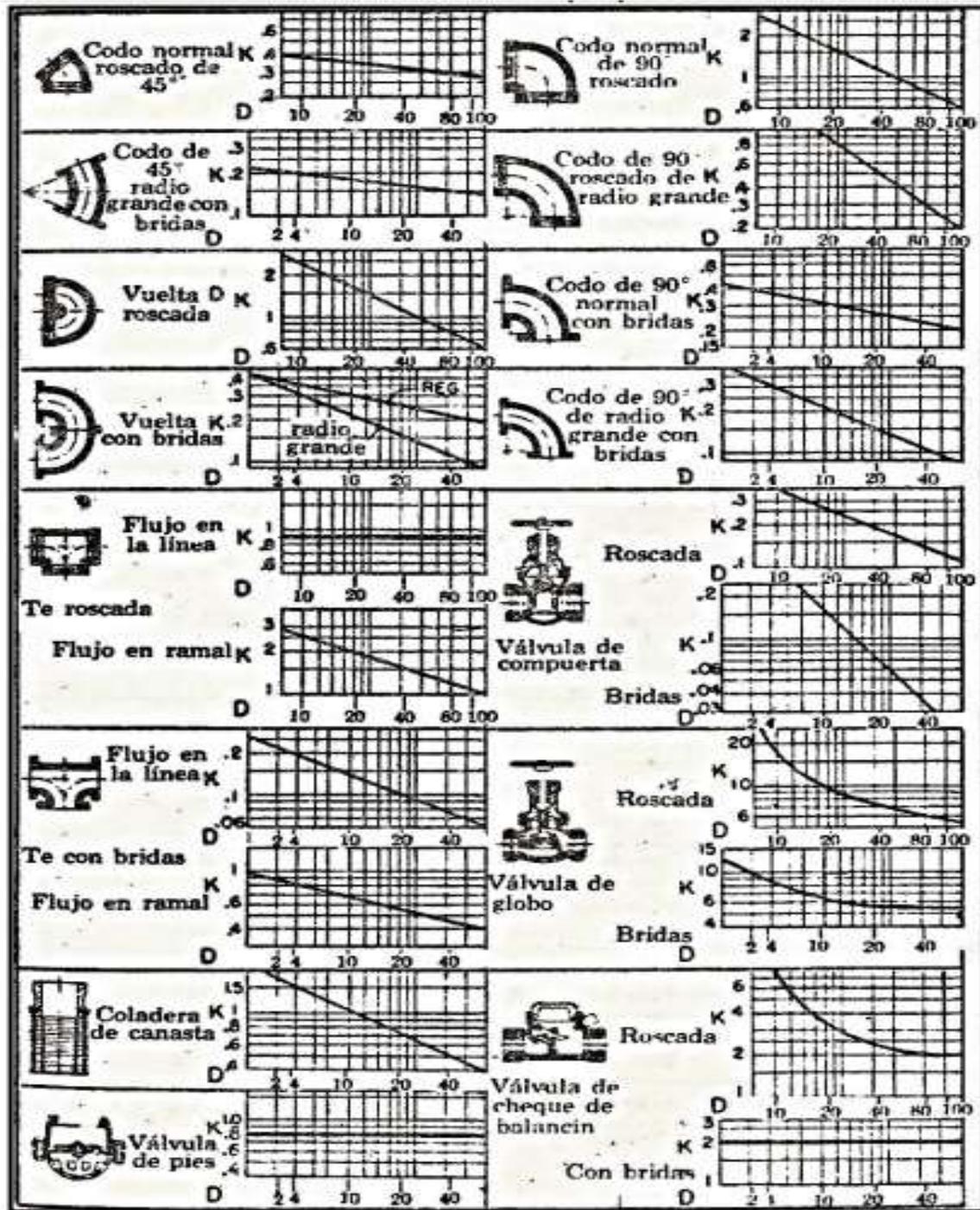
Interferencias

Tabla 1 Sustancias interferentes y niveles de interferencia

Sustancia interferente	Niveles de interferencia y tratamientos
Acidez	<p>Mayor que 300 mg/L como CaCO_3. Las muestras con acidez en concentraciones superiores deben ser tratadas de la manera siguiente:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Añadir una gota de solución indicadora de m-nitrofenol¹ a la muestra en el paso 3. 2. Añadir una gota de solución patrón de hidróxido sódico¹ 5.0 N. Tapar el tubo. Invertir para mezclar. Repetir tantas veces como sea necesario hasta que el color cambie de incoloro a amarillo. 3. Añadir una gota de la solución patrón de ácido sulfúrico¹ 5.25 N, para cambiar la solución de amarilla a incolora. Continuar con el procedimiento.
Alcalinidad	<p>1000 mg/L como CaCO_3. Las interferencias por concentraciones de alcalinidad más altas se pueden eliminar mediante el siguiente tratamiento preliminar:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Añadir una gota de solución indicadora de m-nitrofenol¹ a la muestra en el paso 3 del procedimiento. Un color amarillo indica una alcalinidad excesiva. 2. Si la muestra está amarilla, agregar una gota de solución patrón de ácido sulfúrico¹ 5.25 N. Tapar el tubo. Invertir para mezclar. Si el color amarillo persiste, repetir hasta que la muestra cambie a incolora. Continuar con el procedimiento.
Fluoruro	Interfiere a todos los niveles. Véase la Figura en la página 4.
Fosfato	Mayor que 50 mg/L
Hierro	Mayor que 20 mg/L
Polifosfato	El polifosfato interfiere a todos los niveles, causando errores negativos y no debe estar presente. Antes de efectuar el procedimiento el polifosfato debe ser convertido a ortofosfato por el Método con hidrólisis ácida como se describe en los procedimientos de fósforo.



Anexo 3. Coeficiente de resistencia K para algunos elementos hidráulicos.



Anexo 4. Tabla A-4 Libro Yunes A. Cengel. Termodinámica.

914
TABLAS DE PROPIEDADES, FIGURAS Y DIAGRAMAS (UNIDADES SI)

TABLA A-4

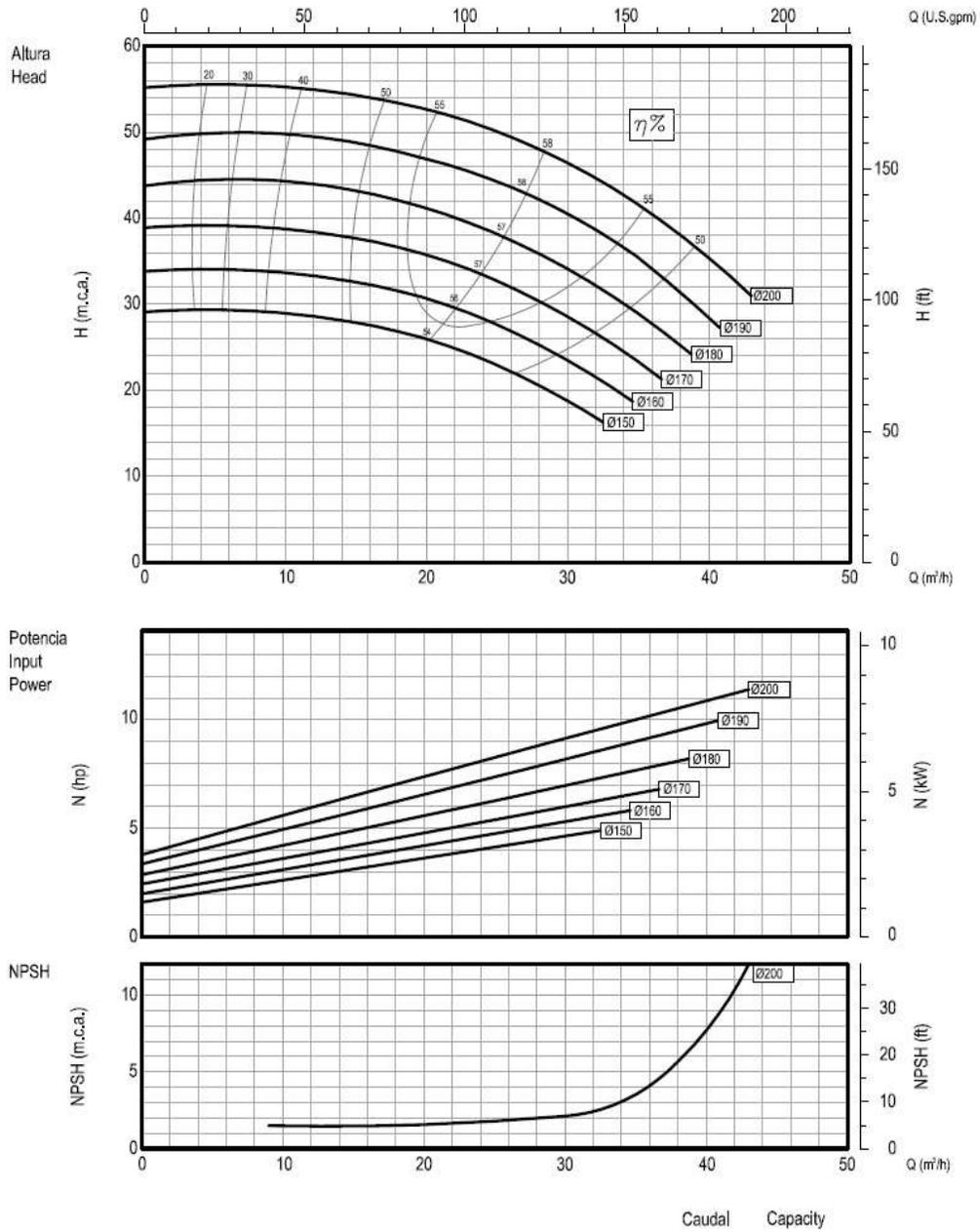
Agua saturada. Tabla de temperaturas

Temp., T °C	Pres. sat., P _{sat} kPa	Volumen específico, m ³ /kg		Energía interna, kJ/kg			Entalpía, kJ/kg			Entropía, kJ/kg · K		
		Liq. sat., v _f	Vapor sat., v _g	Liq. sat., u _f	Evap., u _{fg}	Vapor sat., u _g	Liq. sat., h _f	Evap., h _{fg}	Vapor sat., h _g	Liq. sat., s _f	Evap., s _{fg}	Vapor sat., s _g
0.01	0.6117	0.001000	206.00	0.000	2374.9	2374.9	0.001	2500.9	2500.9	0.0000	9.1556	9.1556
5	0.8725	0.001000	147.03	21.019	2360.8	2381.8	21.020	2489.1	2510.1	0.0763	8.9487	9.0249
10	1.2281	0.001000	106.32	42.020	2346.6	2388.7	42.022	2477.2	2519.2	0.1511	8.7488	8.8999
15	1.7057	0.001001	77.885	62.980	2332.5	2395.5	62.982	2465.4	2528.3	0.2245	8.5559	8.7803
20	2.3392	0.001002	57.762	83.913	2318.4	2402.3	83.915	2453.5	2537.4	0.2965	8.3696	8.6661
25	3.1698	0.001003	43.340	104.83	2304.3	2409.1	104.83	2441.7	2546.5	0.3672	8.1895	8.5567
30	4.2469	0.001004	32.879	125.73	2290.2	2415.9	125.74	2429.8	2555.6	0.4368	8.0152	8.4520
35	5.6291	0.001006	25.205	146.63	2276.0	2422.7	146.64	2417.9	2564.6	0.5051	7.8466	8.3517
40	7.3851	0.001008	19.515	167.53	2261.9	2429.4	167.53	2406.0	2573.5	0.5724	7.6832	8.2556
45	9.5953	0.001010	15.251	188.43	2247.7	2436.1	188.44	2394.0	2582.4	0.6386	7.5247	8.1633
50	12.352	0.001012	12.026	209.33	2233.4	2442.7	209.34	2382.0	2591.3	0.7038	7.3710	8.0748
55	15.763	0.001015	9.5639	230.24	2219.1	2449.3	230.26	2369.8	2600.1	0.7680	7.2218	7.9898
60	19.947	0.001017	7.6670	251.16	2204.7	2455.9	251.18	2357.7	2608.8	0.8313	7.0769	7.9082
65	25.043	0.001020	6.1935	272.09	2190.3	2462.4	272.12	2345.4	2617.5	0.8937	6.9360	7.8296
70	31.202	0.001023	5.0396	293.04	2175.8	2468.9	293.07	2333.0	2626.1	0.9551	6.7989	7.7540
75	38.597	0.001026	4.1291	313.99	2161.3	2475.3	314.03	2320.6	2634.6	1.0158	6.6655	7.6812
80	47.416	0.001029	3.4053	334.97	2146.6	2481.6	335.02	2308.0	2643.0	1.0756	6.5355	7.6111
85	57.858	0.001032	2.8261	355.96	2131.9	2487.8	356.02	2295.3	2651.4	1.1346	6.4089	7.5435
90	70.183	0.001036	2.3593	376.97	2117.0	2494.0	377.04	2282.5	2659.6	1.1929	6.2853	7.4782
95	84.609	0.001040	1.9808	398.00	2102.0	2500.1	398.09	2269.6	2667.6	1.2504	6.1647	7.4151
100	101.42	0.001043	1.6720	419.06	2087.0	2506.0	419.17	2256.4	2675.6	1.3072	6.0470	7.3542
105	120.90	0.001047	1.4186	440.15	2071.8	2511.9	440.28	2243.1	2683.4	1.3634	5.9319	7.2952
110	143.38	0.001052	1.2094	461.27	2056.4	2517.7	461.42	2229.7	2691.1	1.4188	5.8193	7.2382
115	169.18	0.001056	1.0360	482.42	2040.9	2523.3	482.59	2216.0	2698.6	1.4737	5.7092	7.1829
120	198.67	0.001060	0.89133	503.60	2025.3	2528.9	503.81	2202.1	2706.0	1.5279	5.6013	7.1292
125	232.23	0.001065	0.77012	524.83	2009.5	2534.3	525.07	2188.1	2713.1	1.5816	5.4956	7.0771
130	270.28	0.001070	0.66808	546.10	1993.4	2539.5	546.38	2173.7	2720.1	1.6346	5.3919	7.0265
135	313.22	0.001075	0.58179	567.41	1977.3	2544.7	567.75	2159.1	2726.9	1.6872	5.2901	6.9773
140	361.53	0.001080	0.50850	588.77	1960.9	2549.6	589.16	2144.3	2733.5	1.7392	5.1901	6.9294
145	415.68	0.001085	0.44600	610.19	1944.2	2554.4	610.64	2129.2	2739.8	1.7908	5.0919	6.8827
150	476.16	0.001091	0.39248	631.66	1927.4	2559.1	632.18	2113.8	2745.9	1.8418	4.9953	6.8371
155	543.49	0.001096	0.34648	653.19	1910.3	2563.5	653.79	2098.0	2751.8	1.8924	4.9002	6.7927
160	618.23	0.001102	0.30680	674.79	1893.0	2567.8	675.47	2082.0	2757.5	1.9426	4.8066	6.7492
165	700.93	0.001108	0.27244	696.46	1875.4	2571.9	697.24	2065.6	2762.8	1.9923	4.7143	6.7067
170	792.18	0.001114	0.24260	718.20	1857.5	2575.7	719.08	2048.8	2767.9	2.0417	4.6233	6.6650
175	892.60	0.001121	0.21659	740.02	1839.4	2579.4	741.02	2031.7	2772.7	2.0906	4.5335	6.6242
180	1002.8	0.001127	0.19384	761.92	1820.9	2582.8	763.05	2014.2	2777.2	2.1392	4.4448	6.5841
185	1123.5	0.001134	0.17390	783.91	1802.1	2586.0	785.19	1996.2	2781.4	2.1875	4.3572	6.5447
190	1255.2	0.001141	0.15636	806.00	1783.0	2589.0	807.43	1977.9	2785.3	2.2355	4.2705	6.5059
195	1398.8	0.001149	0.14089	828.18	1763.6	2591.7	829.78	1959.0	2788.8	2.2831	4.1847	6.4678
200	1554.9	0.001157	0.12721	850.46	1743.7	2594.2	852.26	1939.8	2792.0	2.3305	4.0997	6.4302

Anexo 5. Catálogo de bombas usadas VOGT serie N.

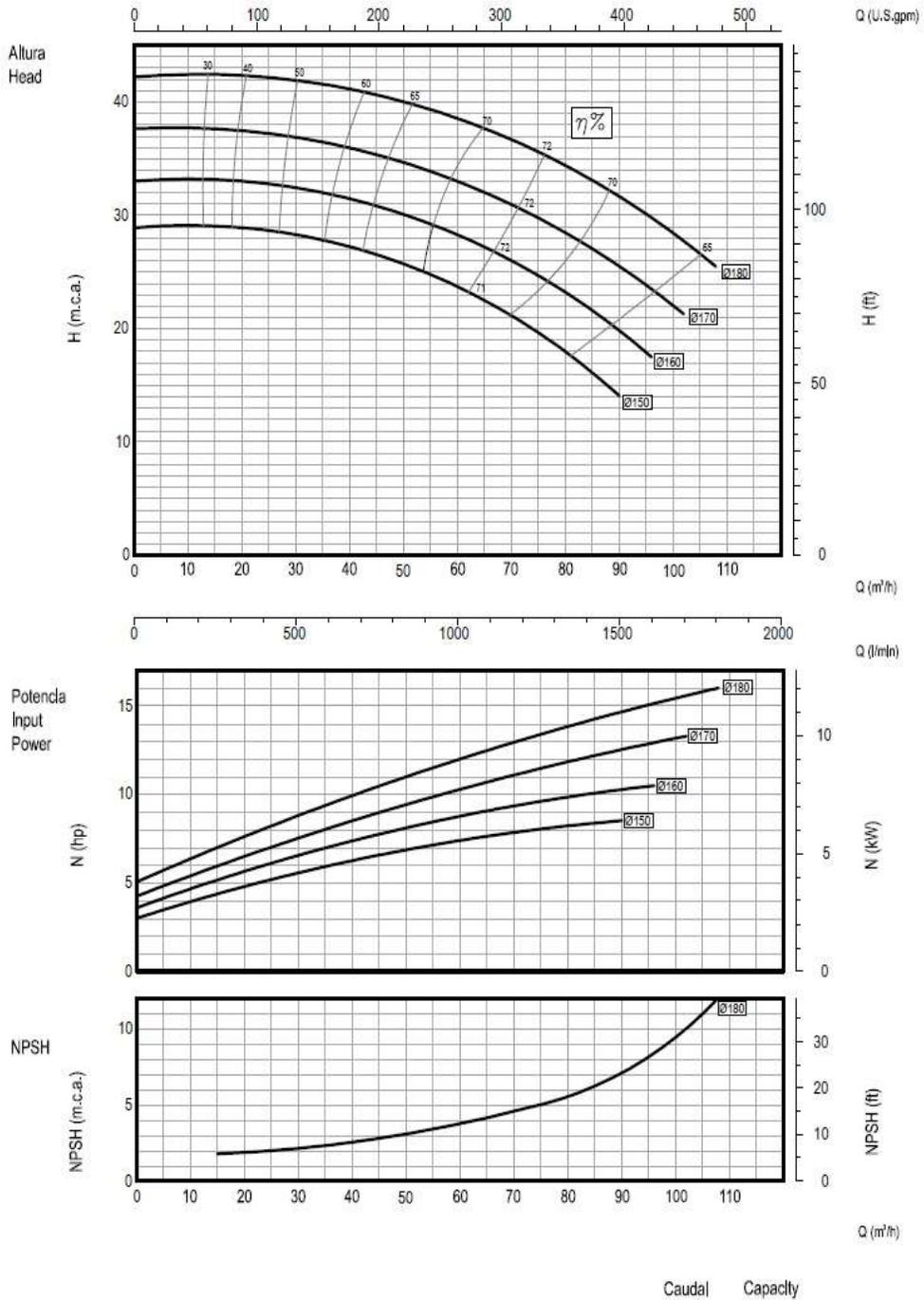


Diam. Entrada Salida / Input Output Diam. 2" X 1 1/2"	Velocidad Nominal / Nominal Speed 2900 1/min	Serie NE	Modelo/Type 620
---	--	--------------------	---------------------------



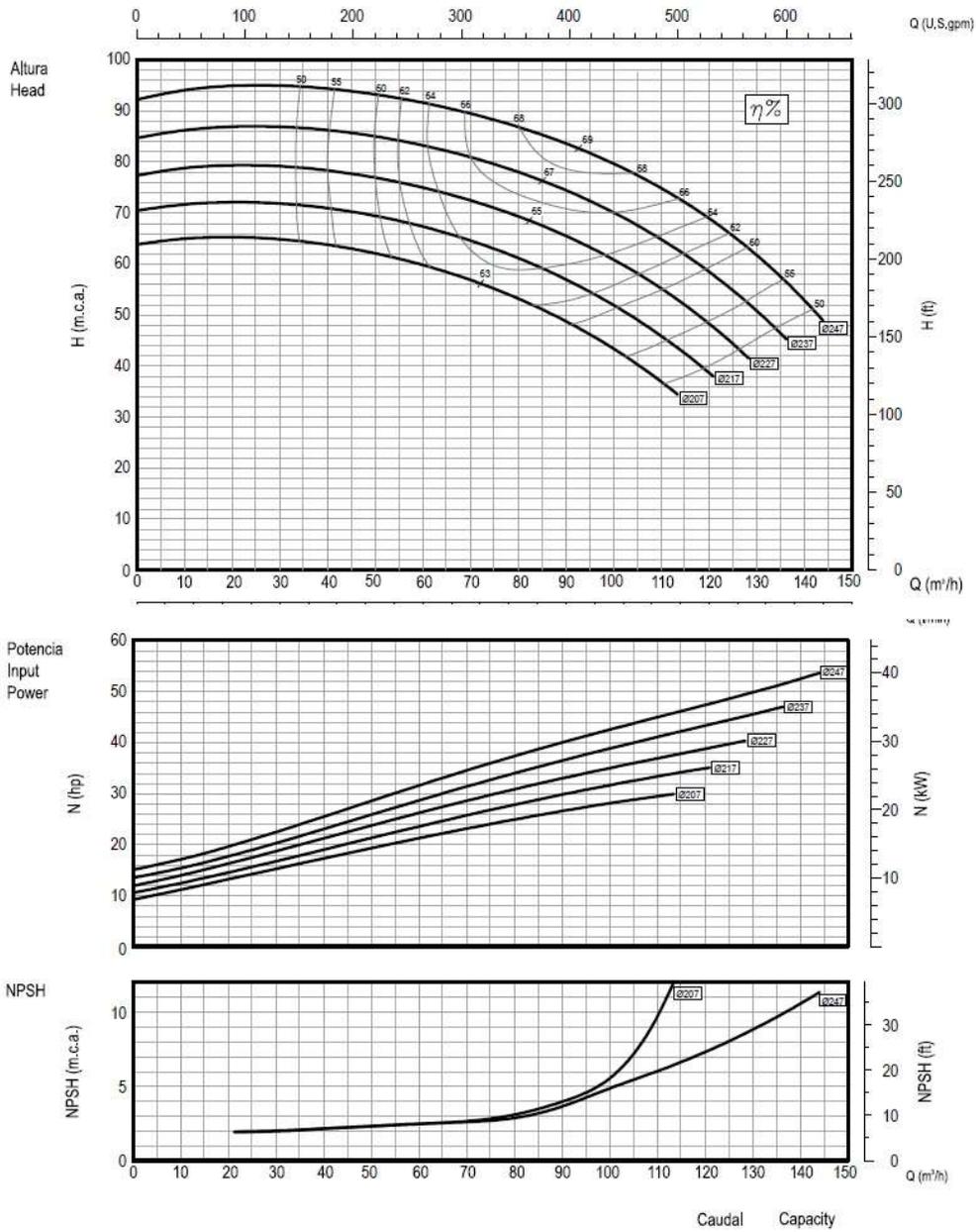


Diam. Entrada Salida / Input Output Diam. 3" X 2 1/2"	Velocidad Nominal / Nominal Speed 2900 1/min	Serie N	Modelo/Type 626
---	--	-------------------	---------------------------





Diam. Entrada Salida / Input Output Diam. 2 1/2" X 2"	Velocidad Nominal / Nominal Speed 2900 1/min	Serie N Modelo/Type 631
---	--	---------------------------------------



Anexo 6. Peso molecular de los elementos.

ELEMENTO	SIMBOLO	NUMERO ATOMICO	PESO ATOMICO
Actinio	Ac	89	
Aluminio	Al	13	26,98154
Americio	Am	95	
Antimonio	Sb	51	121,75
Argón	Ar	18	39,948
Arsénico	As	33	74,9216
Astato	At	85	
Azufre	S	16	32,06
Bario	Ba	56	137,34
Berilio	Be	4	9,01218
Berkelio	Bk	97	
Bismuto	Bi	83	208,9804
Boro	B	5	10,81
Bromo	Br	35	79,904
Cadmio	Cd	48	112,40
Calcio	Ca	20	40,08
Californio	Cf	98	
Carbono	C	6	12,011
Carbono	12C	6	12 (exactamente)
Cerio	Ce	58	140,12
Cesio	Cs	55	132,9054
Holmio	Ho	67	164,9304
Indio	In	49	114,82
Iridio	Ir	77	192,22
Iterbio	Yb	70	173,04
Itrio	Y	39	88,9059
Kriptón	Kr	36	83,80
Lantano	La	57	138,9055
Lavrencio	Lv	103	
Litio	Li	3	6,941
Lutecio	Lu	71	174,97
Magnesio	Mg	12	24,305
Manganeso	Mn	25	54,9380
Mendelevio	Md	101	
Mercurio	Hg	80	200,59
Molibdeno	Mo	42	95,94
Neodimio	Nd	60	144,24
Neón	Ne	10	20,179
Neptunio	Np	93	237,0482
Niobio	Nb	41	92,9064
Níquel	Ni	28	58,71
Nitrógeno	N	7	14,0067
Nobelio	No	102	
Oro	Au	79	196,9665

ELEMENTO	SIMBOLO	NUMERO ATOMICO	PESO ATOMICO
Cloro	Cl	17	35,453
Cobalto	Co	27	58,9332
Cobre	Cu	29	63,546
Cromo	Cr	24	51,996
Curio	Cm	96	
Disproσιο	Dy	66	162,50
Einstenio	Es	99	
Erbio	Er	68	167,26
Escandio	Sc	21	44,9559
Estaño	Sn	50	118,69
Estroncio	Sr	38	87,62
Europio	Eu	63	151,96
Fermio	Fm	100	
Fierro	Fe	26	55,847
Fluor	F	9	18,99840
Fósforo	P	15	30,97376
Francio	Fr	87	
Gadolinio	Gd	64	157,25
Galio	Ga	31	69,72
Germanio	Ge	32	72,59
Hafnio	Hf	72	178,49
Helio	He	2	4,00260
Hidrógeno	H	1	1,0079
Osmio	Os	72	190,2
Oxígeno	O	8	15,9994
Paladio	Pd	46	106,4
Plata	Ag	47	107,868
Platino	Pt	78	195,09
Plomo	Pb	82	207,2
Plutonio	Pu	94	
Polonio	Po	84	
Potasio	K	19	39,098
Praseodimio	Pr	59	140,9077
Prometio	Pm	61	
Protactinio	Pa	91	231,0359
Radio	Ra	88	226,0254
Radón	Rn	86	
Renio	Re	75	186,2
Rodio	Rh	45	102,9055
Rubidio	Rb	37	85,4678
Rutenio	Ru	44	101,07
Samario	Sm	62	150,4
Selenio	Se	34	78,96
Silicio	Si	14	28,086

Anexo 7. Manguera para manejo de ácidos.

Manguera P15 "Transmaster Oil Light y Oil Heavy"

Composite

M054



N° Código	Diámetro interior manguera		Número de la medida	Presión de trabajo		Presión de Prueba		Presión de Rotura		Radio mínimo de curvatura (mm)	Peso Kg/m
	pulgadas	milímetros		BAR	Lb/pulg ²	BAR	Lb/pulg ²	BAR	Lb/pulg ²		
OIL-016L	1"	25.40	16	10	145.00	15	217.50	50	725.00	70.0	0.45
OIL-024L	1.1/2"	38.10	24	10	145.00	15	217.50	50	725.00	100.0	0.85
OIL-032L	2"	50.80	32	10	145.00	15	217.50	50	725.00	127.0	1.10
OIL-040L	2.1/2"	63.50	40	10	145.00	15	217.50	50	725.00	135.0	1.90
OIL-048L	3"	76.20	48	10	145.00	15	217.50	50	725.00	181.0	2.10
OIL-048H	3"	76.20	48	14	203.00	21	304.50	70	1015.00	280.0	3.70
OIL-064L	4"	101.60	64	10	145.00	15	217.50	50	725.00	230.0	3.10
OIL-064H	4"	101.60	64	14	203.00	21	304.50	70	1015.00	400.0	6.70
OIL-096H	6"	152.40	96	14	203.00	21	304.50	70	1015.00	500.0	10.60
OIL-126H	8"	203.20	126	14	203.00	21	304.50	70	1015.00	740.0	16.40