



Tesis de Máster: Sistema de Recuperación de Condensados de una Línea de Decapado de Bobinas Laminadas en Caliente

Presentado por: Míriam Martínez Herranz

Dirigido por: Dr. D. José Miguel Arnal Arnal

Máster en Seguridad Industrial y Medio Ambiente

Valencia, diciembre 2009

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Puntos de mejora en materia ambiental.....	4
1.2. Generalidades del proceso de Decapado.....	5
1.3. Tanques de ácido.....	7
1.4. Tanques de lavado.....	8
1.5. Mejoras Técnicas Disponibles.....	9
2. ANTECEDENTES.....	12
2.1. Definición de vapor.....	12
2.2. Razones para la utilización del vapor en la industria.....	12
2.3. Generación de vapor.....	12
2.4. Condensación del vapor.....	13
2.5. Circuito de vapor.....	15
2.6. Pérdidas de energía en las redes de vapor.....	16
2.7. Sistema de recuperación de condensados.....	17
2.7.1. Tipos de trampas de vapor.....	18
2.8. Efecto del aire en los sistemas de vapor.....	22
3. OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN.....	23
3.1. Objetivos.....	23
3.2. Justificación del trabajo.....	23
4. METODOLOGÍA.....	24
4.1. Energías consumidas en la línea.....	24
4.2. Generación del agua desmineralizada.....	24
4.3. Generación del vapor.....	27
4.4. Tratamiento del agua residual.....	27
4.5. Descripción del funcionamiento de los tanques de ácido.....	30
4.6. Descripción del sistema de vapor de la línea de Decapado.....	30
4.7 Descripción del funcionamiento de los tanques de lavado.....	45
4.7. Descripción de la situación actual.....	45
5. RESULTADOS.....	48
5.1. Descripción del funcionamiento del sistema de reutilización de condensados.....	48
5.2. Pruebas de conductividad y caudal de las muestras de condensados del	

tanque de almacenamiento	51
5.3. Mejoras necesarias en la línea	52
5.4. Funcionamiento del sistema de recuperación de condensados	53
5.5. Ahorros energéticos en la línea	53
5.6. Presupuesto del sistema.....	54
6. CONCLUSIONES.....	56
7. BIBLIOGRAFÍA	57
ANEJO: Normativa aplicable.....	61
ANEJO: Abreviaturas.....	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de flujo de la empresa	2
Figura 2: Flujo de entradas y salidas en un proceso de laminación en frío.....	3
Figura 3: Esquema general de los tanques de ácido	7
Figura 4: Esquema general de los tanques de lavado	8
Figura 5: Gráfica de temperatura entalpía/temperatura del ciclo de vapor	13
Figura 6: Tanque con una tubería parcialmente llena con agua caliente.....	14
Figura 7: Películas aislantes en las conducciones de vapor.....	14
Figura 8: Sistema de generación y distribución del vapor.....	16
Figura 9: Trampa de vapor termostática.....	19
Figura 10: Trampa de vapor mecánica	20
Figura 11: Trampa de vapor termodinámica	21
Figura 12: Esquema general de entrada/salida de material de decapado	24
Figura 13: Esquema general del sistema de generación de agua desmineralizada.....	26
Figura 14: Sistema de tratamiento de las aguas residuales de la planta	29
Figura 15: Elementos de los intercambiadores de calor	31
Figura 16: Distribución de los intercambiadores de calor en los tanques de ácido.....	32
Figura 17: Distribución de los intercambiadores de calor en los tanques de lavado.....	32
Figura 18: Distribución de intercambiadores de calor en el tanque 1 de ácido.....	36
Figura 19: Distribución de intercambiadores de calor en el tanque 2 de ácido.....	37
Figura 20: Distribución de intercambiadores de calor en el tanque 3 de ácido.....	38
Figura 21: Distribución de intercambiadores de calor en el tanque 4 de ácido.....	39
Figura 22: Sistema de evacuación de condensados de los intercambiadores de calor ...	44
Figura 23: Sistema de conducción de los condensados al tanque de almacenamiento ...	47
Figura 24: Conducción de condensados hacia el tanque de almacenamiento	49
Figura 25: Recuperación de condensados desde el tanque de almacenamiento hacia los tanques de lavado.....	50
Figura 26: Ahorros energéticos del sistema de recuperación de condensados.....	54

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: Tipos de oxidación	5
TABLA 2: Parámetros de calidad del agua de la caldera.....	27
TABLA 3: Presión y temperatura del vapor generado en la caldera.....	27
TABLA 4: Parámetros de los tanques de ácido.....	30
TABLA 5: Número de intercambiadores de calor por tanque de ácido y de lavado.....	32
TABLA 6: Leyenda de los elementos que forman el sistema de vapor	35
TABLA 7: Parámetros de los tanques de lavado.....	45
TABLA 8: Temperatura y caudal de generación de condensados de los tanques de ácido del sistema	52
TABLA 9: Ahorros energéticos directos de la línea	54
TABLA 10: Presupuesto del sistema de recuperación de condensados.....	55

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1: Tanques de ácido de la línea	8
Fotografía 2: Tanques de lavado de la línea	9
Fotografía 3: Trampa de vapor termostática.....	19
Fotografía 4: Trampa de vapor mecánica	20
Fotografía 5: Trampa de vapor termodinámica	21
Fotografía 6: Conjunto de elementos que forman el sistema de intercambiadores de calor	31
Fotografía 7: Estación reductora de presión	33
Fotografía 8: Válvula automática de alimentación de los tanques de ácido.....	34
Fotografía 9: Válvulas automáticas de alimentación de los tanques de lavado.....	34
Fotografía 10: Conducción de evacuación de condensados	40
Fotografía 11: Balsa de cascarilla.....	41
Fotografía 12: Pila de toma de muestras	41
Fotografía 13: Sumidero del lavador de humos.....	42
Fotografía 14: Balsa neutralizadora.....	42
Fotografía 15: Tanque de almacenamiento de condensados	43
Fotografía 16: Lavador de humos de los vapores ácido de la línea.....	43

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Conductividad de los tanques de condensados	51
Gráfico 2: Caudal de generación de condensados	52

1. INTRODUCCIÓN

La presente Tesis de Máster en Seguridad Industrial y Medio Ambiente está basado en la necesidad de optimizar el consumo energético de una empresa del sector siderúrgico, como consecuencia de la realización de unas prácticas en la misma.

La actividad industrial de la empresa consiste en la laminación en frío de bobinas de acero laminadas en caliente previamente. En la laminación en frío, las propiedades de los productos planos (banda) laminados en caliente, tales como las características mecánicas y técnicas, se modifican mediante compresión entre rodillos sin calentamiento previo del material.

Las fases del proceso, indicadas en la figura 1, son:

- Decapado.
- Laminación en frío, para reducir el espesor.
- Recocido o tratamiento térmico, para regenerar la estructura cristalina de los grados de acero.
- Laminación de temple, para obtener las propiedades mecánicas, la forma y la rugosidad superficial deseada.
- Acabado final.

Los productos fabricados en la empresa son:

- Productos decapados.
- Productos tandemizados.
- Productos fríos.
- Productos recubiertos.

El proceso que se lleva a cabo en la empresa queda recogido en el diagrama de flujo de la figura 1.

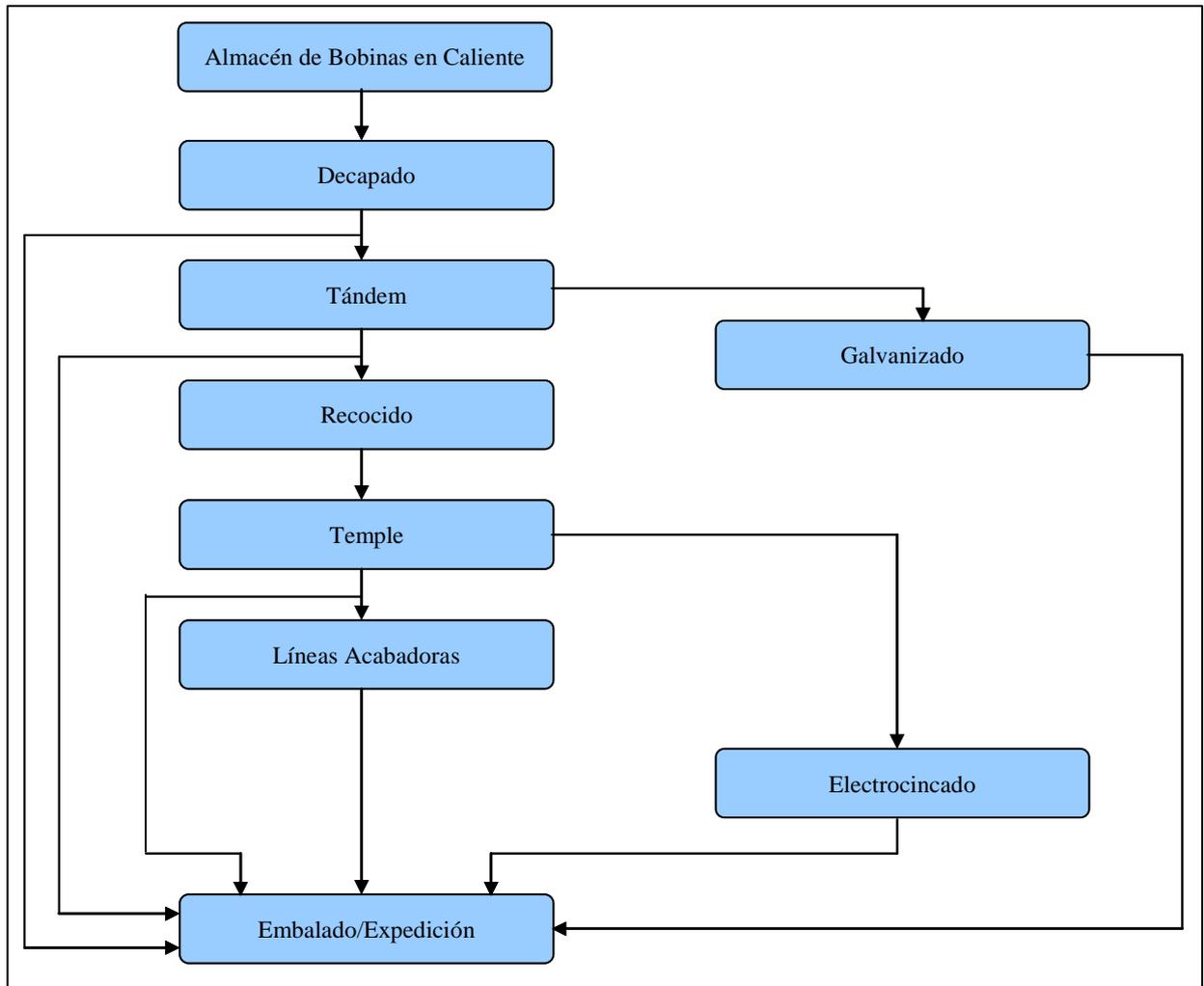


Figura 1: Diagrama de flujo de la empresa (Fuente: Elaboración propia).

Las plantas de laminación en frío tienen un flujo general de entradas y salidas de material, así como de energías necesarias para el proceso y los subproductos generados. Este flujo de entradas y salidas se observa en la figura 2.

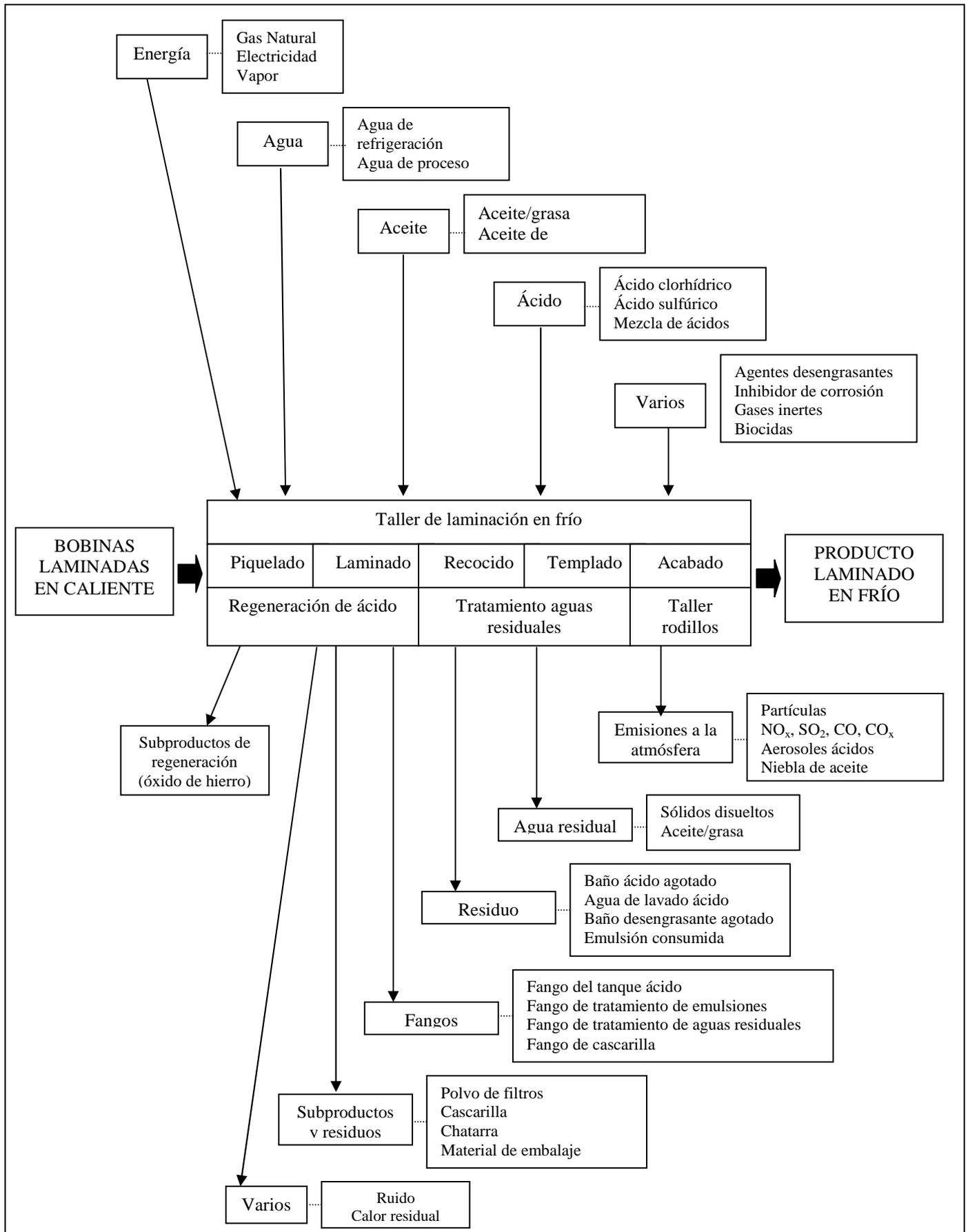


Figura 2: Flujo de entradas y salidas en un proceso de laminación en frío (Fuente: Documento de referencia de Mejores Técnicas Disponibles en la Industria de Procesos de Metales Férreos, 2006)

Como se observa en el diagrama anterior, el primer paso en el tratamiento de la banda laminada en caliente consiste en aplicar un decapado químico sobre la misma.

El compromiso de la empresa con el medio ambiente se encuentra recogido en los principales puntos de la política ambiental de la misma, los cuales son:

1. Desarrollo sostenible, manteniendo un equilibrio duradero entre el entorno, la actividad económica y el bienestar social.
2. Cumplir la legislación y reglamentación ambiental aplicable, así como cualquier otro requisito suscrito por la organización y colaborar con las Administraciones y Organismos competentes.
3. Mejora continua de los resultados ambientales, controlando sistemáticamente la influencia interna y en el entorno, estableciendo objetivos para la reducción de vertidos, de residuos peligrosos, de embalajes de los productos fabricados, y otros aspectos que la organización desee suscribir para ejercer el desempeño ambiental.
4. Prevenir la contaminación de la actividad industrial, aplicando los métodos productivos de bajo impacto ambiental, y empleando mejores técnicas disponibles, evitando cualquier tipo de incidente.
5. Desarrollo y fabricación de productos respetuosos con el medioambiente, teniendo en cuenta su vida útil y posterior reciclado, en estrecha colaboración con proveedores y clientes.
6. Explotación eficaz de los recursos naturales, energías y suelos.
7. Gestionar adecuadamente las emisiones de CO₂, y reducirlas siempre que sea técnica y económicamente factible.
8. Compromiso del personal en las actividades diarias de protección ambiental, asumiendo sus responsabilidades. Para ello, la organización proporciona información y formación adecuada a todos los trabajadores y colaboradores.
9. Exigir y fomentar las mejoras ambientales en los productos y servicios de proveedores y contratistas.
10. Comunicación abierta y diálogo sobre los temas ambientales con todas las partes implicadas.

1.1. Puntos de mejora en materia ambiental

Los puntos en los que se basa la empresa para la mejora continua en la actuación ambiental son los relacionados con:

- Generación y gestión de residuos.
- Identificación y almacenamiento de residuos.
- Generación y control de vertidos de aguas residuales.
- Mantenimiento en maquinaria e instalaciones relacionadas con aspectos ambientales.
- Generación y control de emisiones químicas a la atmósfera.
- Generación y control de emisiones de ruido al exterior.
- Identificación y capacidad de respuesta antes posibles situaciones de riesgo y/o emergencia que puedan causar daños al medio ambiente.
- Aprovechamiento de recursos naturales y energéticos (agua, energía eléctrica y combustibles).
- Requisitos de tipo ambiental por parte de la Administración Pública y clientes.

1.2. Generalidades del proceso de Decapado

La realización de este Trabajo Fin de Máster se va a centrar en la reducción del consumo energético y del vertido en el proceso de decapado ácido.

En el proceso de fabricación de una banda laminada en caliente, el hierro se combina con el oxígeno de la atmósfera, formando diferentes óxidos en la superficie de la banda. Esta oxidación es favorecida por la alta temperatura del acero durante el proceso de laminación en caliente mediante el Tren de Bobinado en Caliente (T.B.C.).

La capa de óxido que recubre la superficie de la bobina caliente recibe el nombre de cascarilla. Se trata de una cascarilla superficial, en caso de estar incrustada se debería a inclusiones de escoria ajenas al acero, que han quedado atrapadas en el slab (lingote de acero antes de ser laminado en caliente), o a un mal funcionamiento de los sistemas de descascarillado del T.B.C.

Existen tres tipos de grados de oxidación, en función de la zona en la que se encuentre el óxido más rico en oxígeno. Los tipos de oxidación se recogen en la tabla 1.

TABLA 1: Tipos de oxidación (Fuente: Manual del proceso de Decapado, 2000)

Tipo de óxido	Espesor (%del total)	Situación en la banda
Hematita (Fe_2O_3)	1%	Parte superficial
Magnetita (Fe_3O_4)	10%	Zona central
Wustita (FeO)	90%	En contacto con la chapa de acero

El decapado es el proceso de eliminación de la capa de óxidos de la superficie del metal. El proceso se puede realizar por medios físicos y/o químicos. Lo más común es emplear primero un método físico (tren temple) seguido de uno químico con ácido.

En el decapado físico, la banda es sometida a un alargamiento entre el 1 y el 3%, produciéndose un agrietamiento de la cascarilla. En este momento se elimina parte de esta cascarilla y se prepara la banda para un mejor ataque del ácido.

Durante el decapado químico, la banda es sometida a una inmersión en un baño de ácido, el cual reacciona con los óxidos disolviéndolos, por lo que se obtiene una superficie de la banda limpia y preparada para su posterior laminación.

Para el decapado químico se pueden emplear tanto el ácido clorhídrico como el sulfúrico. Presentando el primero una serie de ventajas sobre el segundo, que conlleva a que la práctica totalidad de los decapados se lleven a cabo con clorhídrico. Estas ventajas son:

- Decapado más rápido con concentraciones similares.
- Decapado más limpio, ya que consigue una mejor disolución de los óxidos, pudiendo llegar a trabajar sin descascarillado previo.
- Menor consumo de vapor, porque permite trabajar a menores temperaturas.
- Reacciona preferentemente con los óxidos, produciéndose un menor ataque al metal base y minimizando los sobredecapados. En el caso del ácido sulfúrico, pequeños tiempos de estancia de la banda sumergida en él provoca una fuerte reducción del espesor de la banda.
- Menor consumo de ácido, por menores pérdidas por evaporación.
- Posibilidad de regeneración del ácido agotado, permitiendo la recuperación de un elevado porcentaje de ácido y formación de un subproducto, el óxido de hierro que se puede emplear en otros procesos, como es el caso de las azulejeras.

El poder decapante de un baño de ácido depende fundamentalmente de:

- Concentración de HCl libre.
- Temperatura del baño.
- Concentración de FeCl₂.

Una banda está bien decapada cuando:

- No tiene óxido residual.
- No tiene residuos de decapado.
- No está sobredecapada.

- Presenta un aspecto general homogéneo.

Sin embargo, una banda puede estar subdecapada si presenta los siguientes puntos:

- Aspecto general oscuro, sobre todo en bordes.
- Existencia de puntos de calamina localizados, dando lugar a la aparición de rugosidad.
- Si existe óxido en la superficie, fundamentalmente en el borde.

Por el contrario, la banda está sobredecapada si:

- Existen pequeños cráteres de profundidad variable sobre la banda.
- La banda tiene una fuerte rugosidad.
- Presenta una importante disminución del espesor.
- Existen manchas blanquecinas sobre la superficie.

1.3. Tanques de ácido

El proceso de decapado se lleva a cabo haciendo pasar la banda a través de 4 tanques de ácido. El calentamiento de los baños se realiza indirectamente con 23 intercambiadores de calor, alimentados con vapor saturado generado externamente a la instalación. El decapado tiene lugar por inmersión de la banda en el interior de los baños. En la fotografía 1 se muestra una imagen de los tanques de ácido de la línea.

En figura 3 se muestra un esquema de los baños de ácido de la línea, así como las concentraciones y temperaturas medias del ácido contenido en los mismos.

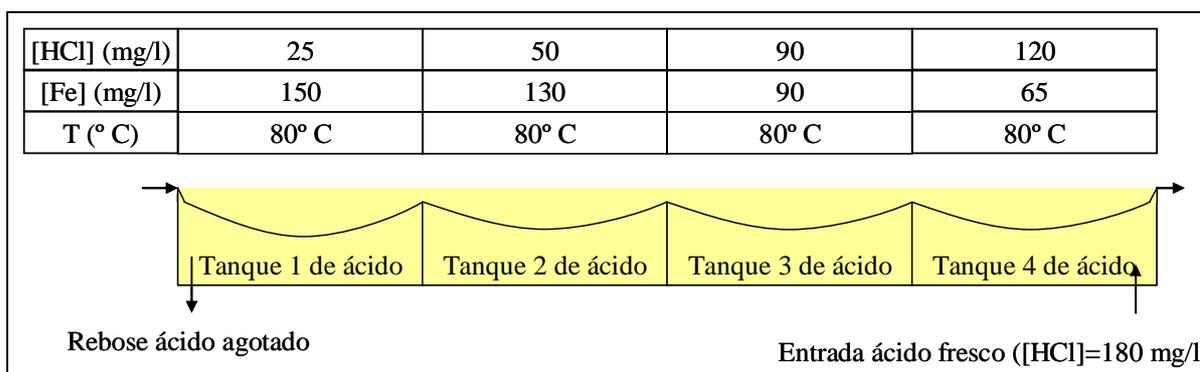


Figura 3: Esquema general de los tanques de ácido (Fuente: Manual del proceso de Decapado, 2000)



Fotografía 1: Tanques de ácido de la línea (Fuente: Elaboración propia)

1.4. Tanques de lavado

Para completar el decapado químico se lava la banda en agua desmineralizada caliente. Para ello, se dispone de 5 tanques de lavado, mostrados en la fotografía 2, en los que se elimina los restos de ácido y sales que pudieran quedar sobre la superficie de la banda, rociándola con agua de lavado.

En la figura 4 se observan los tanques de lavado de la línea, con las limitaciones de calidad del agua de lavado de cada tanque, pH para el tanque 2 y conductividad para los tanques 3 y 5 de lavado.

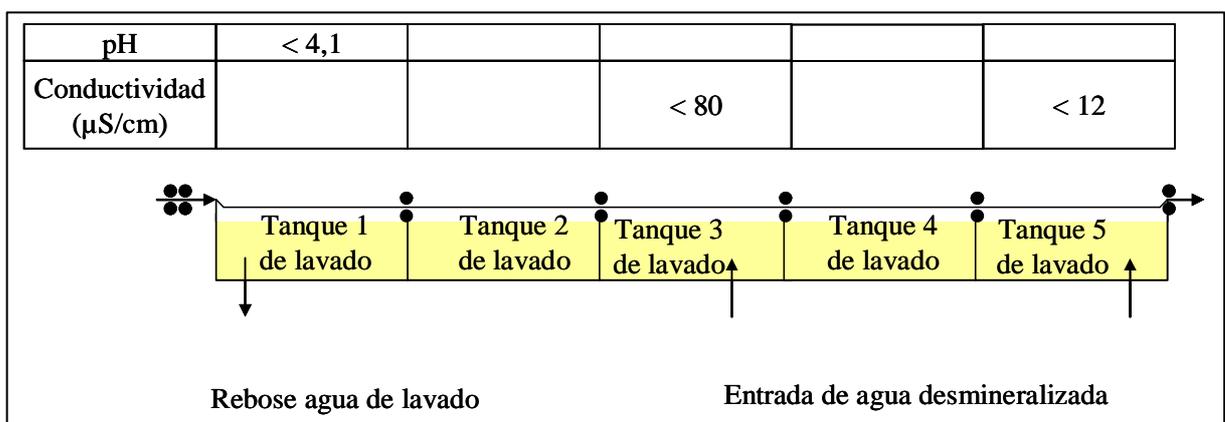


Figura 4: Esquema general de los tanques de lavado (Fuente: Manual del proceso de Decapado, 2000)



Fotografía 2: Tanques de lavado de la línea (Fuente: Elaboración propia)

1.5. Mejores Técnicas Disponibles

Los principales problemas medioambientales de la laminación en frío son los residuos ácidos y las aguas residuales, los humos del desengrasante, las emisiones de nieblas ácidas y de aceite a la atmósfera y los gases de combustión de los hornos. Dentro del proceso de decapado, los principales problemas ambientales son las emisiones ácidas, que provienen tanto del decapado de la banda como de la regeneración de ácido.

De acuerdo con el Plan de Prevención y Control Integrados de la Contaminación, se deben aplicar las Mejores Técnicas Disponibles (MTD) en el proceso de decapado con ácido clorhídrico (HCl), siempre que sea económicamente posible. Estas MTD son:

- Reutilización del HCl utilizado.
- Regeneración del ácido mediante pulverizaciones de tostación por rociado o lecho fluidizado (o proceso equivalente) con recirculación del regenerado.
- Calentamiento indirecto mediante intercambiadores de calor, alimentados por vapor. No emplear inyección directa de vapor en los baños de ácido.
- Sistemas de lavado en cascada con reutilización interna del excedente de caudal (de baños de ácido a baños de lavado).
- Ajuste y gestión precisa del sistema de regeneración-lavado de los ácidos de decapado.
- Tratamiento por neutralización, floculación, etc. cuando no pueda evitarse la purga de agua ácida del sistema.

Un objetivo fundamental debe ser la reducción del volumen de aguas residuales, así como la minimización de los contaminantes vertidos a los caudales residuales, mediante la optimización del proceso de decapado.

Las técnicas generales para la reducción del volumen de agua residual y de la carga contaminante son las siguientes:

- Reducción de la formación de óxido de hierro durante la laminación en caliente y la manipulación del acero.
- La sustitución parcial o total de los procesos de decapado en medio acuoso por un tratamiento mecánico sin agua residual (descascarillado mecánico).
- Reducción de los costes de consumo y regeneración de ácidos, agregando agentes químicos adecuados (inhibidores) para el decapado de acero de baja aleación y acero aleado (no aplicable a acero inoxidable).
- Reducción de la concentración de ácido utilizando elevadas temperaturas de decapado.
- Reducción de la concentración de ácido utilizando procesos eléctricos.
- Minimización del volumen de agua residual mediante el uso de flujo en cascada.
- Minimización del volumen de agua residual utilizando equipos mejorados de decapado y enjuague (pretratamiento mecánico, tanques cerrados para reducir los efluentes del lavado de gases, tratamiento con pulverizadores en lugar de por inmersión, rodillos de escurrido para eliminar la solución del baño de decapado adherida y reducir el arrastre de solución de decapado y agua de enjuague, etc.).
- Reciclaje interno y filtración mecánica de la solución de decapado y del agua de enjuague para prolongar su vida útil.
- Regeneración del ácido de decapado.
- Intercambio iónico con corriente lateral o electrodiálisis para regeneración del baño.
- Selección cuidadosa de materias primas para minimizar la contaminación de los caudales residuales.
- Reducción de la formación de polvo de óxido (durante el desbobinado, el aplanado o en el acumulador de entrada) mediante el uso de cabezales de aspiración adecuados.
- Calentamiento indirecto del ácido. La forma más común de calentar el ácido es el uso de intercambiadores de calor. El calentamiento directo por inyección de vapor diluye ácido residual, impidiendo su regeneración.

Actualmente, en la línea ya existe un proceso de regeneración del ácido agotado de los baños de decapado, así como un calentamiento mediante intercambiadores de calor alimentados por vapor. Por lo que, como mejora ambiental se quiere reutilizar el agua del condensado de los intercambiadores de calor de los baños de ácido para el lavado final de la banda, maximizando el trabajo obtenido con el ciclo de vapor (Casros C, 2002).

En los últimos años, la conciencia energética y la percepción medioambiental han transformado el sistema de condensado, pasando de ser considerado como un subproducto residual de la distribución de vapor sin apenas valor, a ser un recurso muy valioso para cualquier industria (Villarces J. et al).

2. ANTECEDENTES

2.1. Definición de vapor

El vapor es agua en estado gaseoso. Si se añade calor al agua, su temperatura aumenta hasta que alcanza un valor a partir del cual ya no puede subsistir como líquido. Cualquier nueva adición de energía provoca que parte del agua hierva y se convierta en vapor.

2.2. Razones para la utilización del vapor en la industria

El vapor ha sido utilizado como vehículo de energía desde la Revolución Industrial por diversas razones (Yunchao et al, 1989):

- El vapor posee un elevado poder calorífico por unidad de masa, lo que permite transportar una buena cantidad de energía por unidad de masa.
- El vapor tiene un excelente coeficiente de transferencia térmica (2,3-2,9 kW/(m²·C °), por lo que resulta relativamente fácil que el vapor transfiera su calor a otros puntos del sistema que se encuentren a menor temperatura.
- No necesita energía adicional para su transporte, ya que se distribuye desde la propia caldera de generación.
- No presenta riesgo de incendio.
- Con un sistema de válvulas resulta sencillo el control de la presión y la temperatura del sistema de vapor.
- La obtención del vapor es sencilla, basta con calentar agua en el interior de una caldera hasta alcanzar la temperatura y presión adecuadas.

2.3. Generación de vapor

La energía química contenida en el combustible de la caldera se convierte en energía calorífica al quemarse éste. Esta energía se transmite a través de las paredes del hogar de la caldera hasta el agua que contiene. Mediante la adición de dicha energía calorífica, la temperatura del agua aumenta hasta alcanzar el punto de saturación, en el que hierva y se convierte en vapor. En la figura 5 se observa la gráfica de temperatura-entalpía del ciclo de vapor.

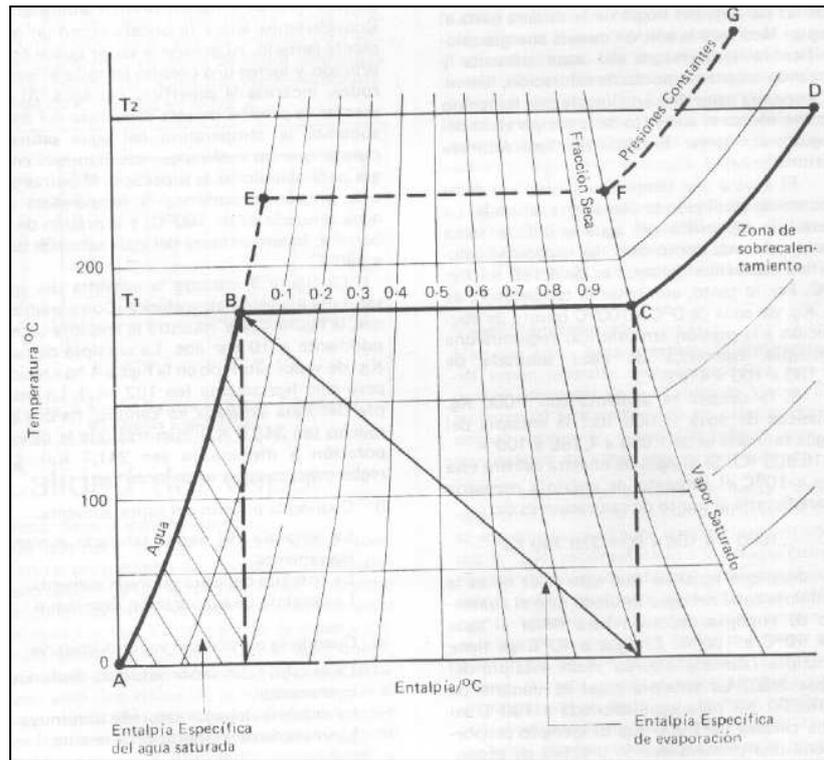


Figura 5: Gráfica de temperatura-entalpía/temperatura del ciclo de vapor (Fuente: Spiraxsarco)

2.4. Condensación del vapor

Tan pronto como el vapor deja la caldera, empieza a ceder parte de su entalpía a cualquier superficie con menor temperatura. Por lo que una parte del vapor condensa, convirtiéndose en agua a la misma temperatura. Este proceso es el inverso del que tiene lugar en el interior de la caldera, cuando el agua en estado líquido se convierte en gas por adición de calor.

Cuando el vapor condensa, pierde su entalpía de evaporación, formándose agua caliente que cae a la parte baja de la conducción que transporta el vapor. Esta agua caliente recibe el nombre de condensado y tiene que ser drenada del circuito de vapor. En caso de que la formación de condensado sea más rápida que el drenaje de la tubería, esta pasa a llenarse de agua caliente. Este fenómeno se observa en la figura 6.

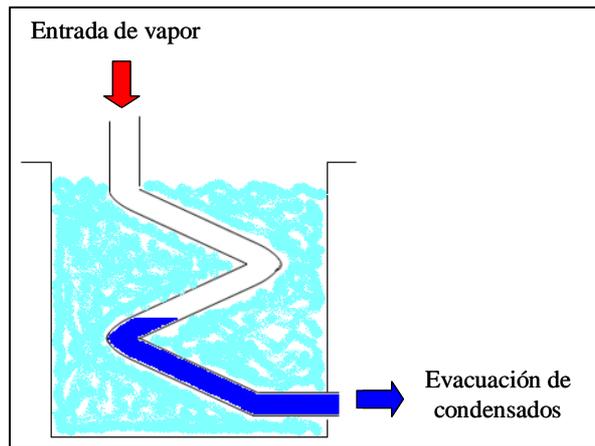


Figura 6: Tanque con una tubería parcialmente llena con agua caliente (Fuente: Spiraxsarco)

A pesar de que la temperatura del vapor y del condensado recién formado es la misma, la del condensado disminuye al transferir energía a la tubería y, por tanto, se transmite menor calor al producto final que se pretende calentar. Este hecho reduce la diferencia de temperatura entre el agua condensada y la pared de la conducción, disminuyendo el flujo de calor, ya que el coeficiente de transferencia es menor entre el condensado y la tubería que entre la tubería y el vapor. De forma que, el flujo de calor en la parte de la conducción que contiene el condensado es mucho menor que en la parte que está llena de vapor.

La máxima transferencia de calor entre el vapor y el producto a calentar se obtiene eliminando lo más rápidamente posible el condensado de la tubería, dejando paso al vapor.

En las tuberías no sólo el condensado reduce la transferencia de calor. En la figura 7 se observan las películas aislantes que de forma general están presentes en las conducciones de vapor.

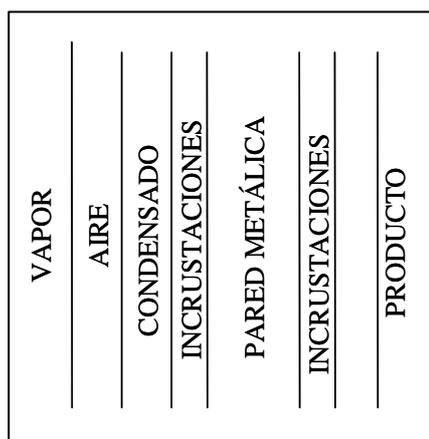


Figura 7: Películas aislantes en las conducciones de vapor (Fuente: Spiraxsarco)

Cuando el vapor entra en contacto con la superficie fría de transferencia de calor, cede su entalpía de evaporación y condensa. La condensación puede producir gotas de agua o

puede formar una película completa. Incluso en el caso de formación de gotas, éstas se juntan formando películas de agua y, cuando comienzan a aumentar de espesor, el agua se empieza a resbalar por la pared.

El agua tiene una elevada resistencia a la transferencia de calor. Una película de agua de sólo 0,25 mm de espesor ofrece la misma resistencia a la transferencia de calor que una pared de hierro de 17 mm o una de cobre de 120 mm, de ahí la necesidad de eliminar el condensado formado lo más rápidamente posible (Spiraxsarco)

La recuperación del condensado puede suponer un ahorro entre el 35 y el 50% de la energía necesaria para la producción de vapor, por lo que resulta imprescindible en cualquier industria su optimización y reutilización (Franco Al er al, 2001).

2.5. Circuito de vapor

El vapor se genera en una caldera y se transporta hasta el punto de consumo final a través de una red de tuberías. En primer lugar, el vapor generado se transporta por unas tuberías principales de distribución. A partir de estas tuberías, existen otras de menor diámetro que transportan el vapor hasta los equipos individuales de consumo.

Al abrir la válvula de la caldera, el vapor se distribuye rápidamente por las tuberías de distribución, las cuales en un primer momento se encuentran frías, por lo que el vapor les transmitirá parte de su energía calorífica. El aire que rodea las tuberías también se encuentra a menor temperatura que el vapor, con lo cual el sistema irradia calor al aire conforme se va calentando.

Esta pérdida de calor a la atmósfera provoca que una parte del vapor condense. El agua formada por condensación se deposita en la parte más baja de la tubería y circula empujada por el flujo de vapor.

Cuando una válvula de los equipos individuales se abre, el vapor empieza a fluir por ese sistema, poniéndose de nuevo en contacto con superficies más frías, por lo que, cede parte de su calor y condensa.

De esta forma se establece un flujo continuo de vapor desde la caldera hasta los puntos finales de consumo. Para poder satisfacer esta demanda de vapor es necesario que en la caldera se produzca de forma continua vapor. La generación continua de vapor obliga a inyectar combustible en la caldera y a bombear agua a la misma para compensar la que se evapora.

Si se introduce agua caliente en lugar de agua fría a la caldera, la cantidad de calor necesaria para llevarla a ebullición sería menor, con lo que se reduciría el combustible necesario para generar vapor. Por lo que, el condensado que se forma en las tuberías de

distribución y en los equipos del proceso se puede reutilizar como agua de alimento de la caldera.

En la figura 8 se muestra un sistema básico de generación y distribución de vapor. Los componentes principales de este sistema son:

- Sistema de alimentación y tratamiento de agua para la caldera.
- Quemadores: Dispositivos de la caldera donde se lleva a cabo la reacción química del aire con el combustible fósil, para transformarse en calor.
- Caldera: Es el lugar donde se transforma el agua en estado de saturación en vapor.
- Sistema de distribución del vapor: Está formado por las conducciones que transportan el vapor desde la caldera hasta los puntos de consumo del proceso.
- Sistema de retorno de condensados: Sistema de conducciones que permiten retornar el condensado generado en el sistema de distribución y en los equipos del proceso hasta la caldera.

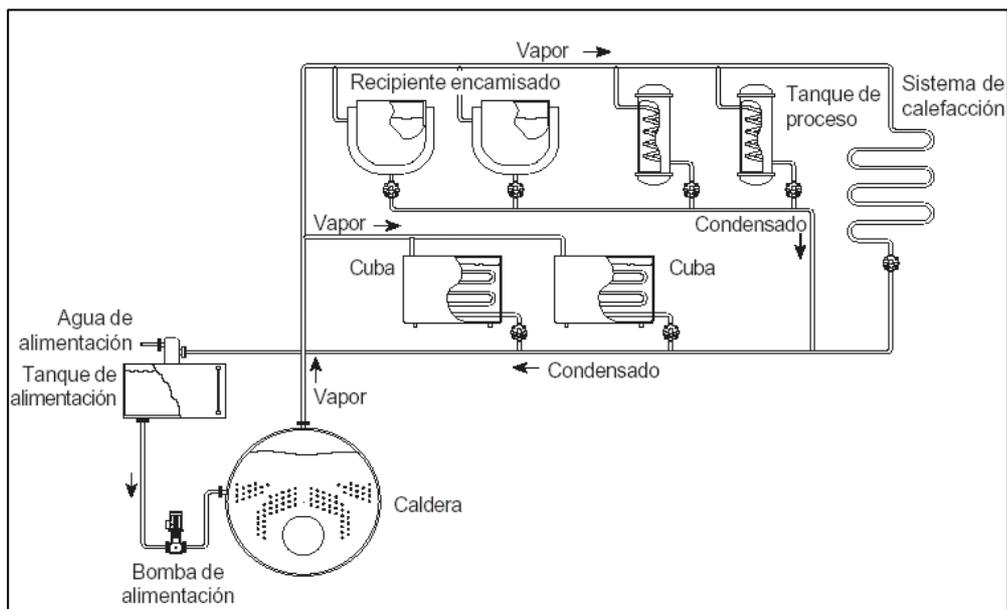


Figura 8: Sistema de generación y distribución del vapor (Fuente: Guía de vapor para la industria, 2002)

2.6. Pérdidas de energía en la redes de vapor

La red de distribución del vapor, como ya se ha comentado anteriormente, es el conjunto de elementos que unen la caldera con los equipos de consumo del proceso. Este sistema está formado por los siguientes componentes:

- Red de tuberías principales y secundarias.
- Distribución general, soportes, anclajes, abrazaderas y juntas.

- Aislamientos térmicos.
- Sistema reductor de presión.
- Válvulas de seguridad.
- Sistema de trampas de vapor para la evacuación de condensados.
- Red de retorno de condensados.
- Purgadores de aire de las redes de distribución.
- Filtros del sistema de vapor.

Es fundamental diseñar circuitos de vapor eficientes que minimicen las pérdidas de calor y del condensado, por lo que resulta indispensable la recuperación del condensado generado. Un sistema de generación-distribución eficiente aprovecha el 70% de la energía aportada al sistema, frente al 30% aprovechado en el caso de un sistema ineficiente. Las ineficiencias en la caldera y el sistema de distribución implica un mayor consumo de combustible, pero también un incremento proporcional en las emisiones generadas de gases de combustión.

Los principales puntos de pérdida energética del sistema son:

- Dimensionado incorrecto de las redes: La velocidad óptima del vapor es de 15 a 50 m/s. A mayor velocidad del vapor, aumenta la erosión y el ruido en el sistema
- Insuficiencia de puntos de drenaje en la red: Los condensados generados es necesario evacuarlos, a fin de que llegue un vapor seco y saturado al equipo.
- Incorrecto o inexistente aislamiento de las conducciones.

2.7. Sistema de recuperación de condensados

En todas las líneas y equipos de vapor siempre existe condensación debido al gradiente térmico existente entre las paredes interiores de la conducción, en contacto con el vapor, y las paredes exteriores, que están a temperatura ambiente (con o sin aislamiento).

Mediante la instalación de un sistema de recuperación de condensados no sólo se recupera la masa de agua tratada, sino también la energía térmica que contiene.

Los principales problemas que presenta el condensado son:

- Corrosión de las superficies metálicas.
- Disminución del coeficiente de transmisión de calor.
- Golpe de ariete que puede llevar asociado el condensado, por el flujo de vapor en forma de partículas por el interior de la conducción que alcanzan velocidades de hasta 45 m/s. El golpe de ariete se produce cuando el condensado, en vez de ser

purgado en los puntos bajos del sistema, es arrastrado por el vapor a lo largo de la tubería y se detiene bruscamente al impactar con algún obstáculo del sistema.

Para evacuar el condensado del sistema de vapor, se instalan trampas de vapor. Su función principal es eliminar el condensado, el aire y otros gases no condensados de las redes principales y de los equipos que trabajan con vapor, lo más rápidamente posible.

Las trampas de vapor deben proporcionar:

- Pérdidas de vapor mínimas.
- Resistencia a la corrosión.
- Venteo del aire y de otros gases.
- Funcionamiento en contrapresión.

2.7.1. Tipos de trampas de vapor

Existen 3 tipos principales de trampas de vapor:

- Grupo termostático: Identifica el vapor y el condensado mediante la diferencia de temperatura a la que opera un elemento termostático. Es decir, el condensado debe enfriarse por debajo de la temperatura de vapor antes de ser eliminado. En la figura 9 y en la fotografía 3 se observa una trampa de vapor termostática.

El funcionamiento de este tipo de trampas de vapor está basado en la existencia de una cápsula que contiene una pequeña cantidad de un líquido especial, con una temperatura de ebullición algo inferior a la del agua. En las condiciones frías de arranque, la cápsula está en posición de reposo, por lo que permanece abierta y permite la salida del aire del circuito. Conforme va entrando condensado al purgador de presión equilibrada, se transfiere calor al líquido del interior de la cápsula. El líquido que la llena, comienza a hervir antes de que el vapor llegue al purgador. La presión del vapor dentro de la cápsula hace que se expanda y, por tanto, cierra la válvula. Cuando el condensado dentro del purgador se enfría, el vapor de dentro de la cápsula se condensa y la cápsula se contrae, abriendo nuevamente la válvula y descargando el condensado, hasta que de nuevo se aproxima a la temperatura del vapor y comienza de nuevo el ciclo.

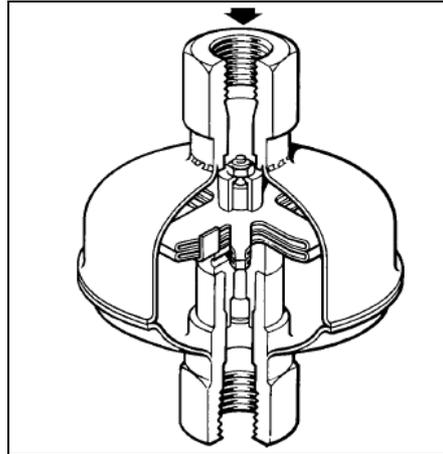


Figura 9: Trampa de vapor termostática (Fuente: Spiraxsarco,)



Fotografía 3: Trampa de vapor termostática (Fuente: Seditesa)

- Grupo mecánico: Las trampas de este tipo operan mecánicamente por la diferencia de densidad entre el vapor y el condensado. El movimiento de un flotador o de un balde actúa sobre la válvula de salida. Este tipo de trampa se representa en la figura 10 y en la fotografía 4. Las trampas mecánicas son las que se emplean cuando se requiere una rápida evacuación del condensado.

El purgador de boya o mecánico es un tipo de purgador de descarga continua, eliminando el condensado en el momento en que se forma. Durante la puesta en marcha de la instalación, el eliminador termostático de aire permite el paso del aire evitando un bloqueo por aire del sistema. El condensado caliente cerrará el eliminador de aire herméticamente, pero en cuanto encuentra en la cámara principal del purgador, la boya se eleva y el mecanismo que está unido a la palanca abrirá la válvula principal, de manera que se mantiene el sistema libre de condensado en todo momento. Cuando llega el vapor, la boya cae y cierra de nuevo la válvula

principal. Las principales ventajas de los purgadores de boya son su gran capacidad de descarga en la puesta en marcha del sistema, su cierre hermético y su resistencia a los golpes de ariete y vibración.

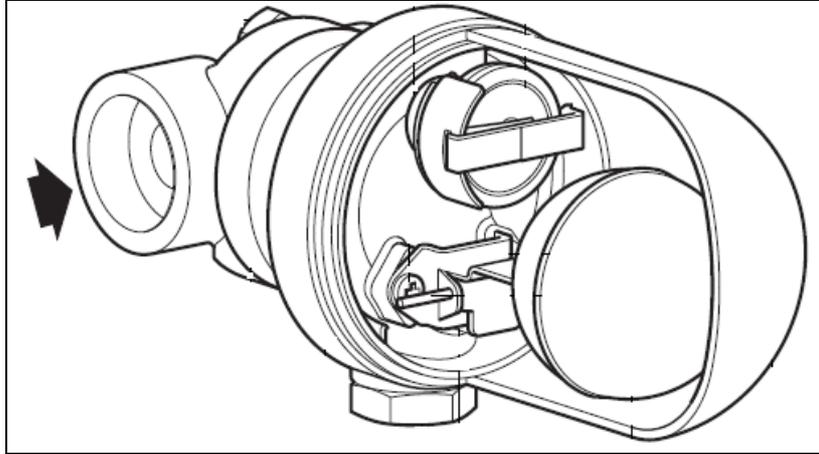


Figura 10: Trampa de vapor mecánica (Fuente: Spiraxsarco)



Fotografía 4: Trampa de vapor mecánica (Fuente: Flowserve)

- Grupo termodinámico: Estas trampas trabajan por la diferencia de velocidad entre el vapor y el condensado. La válvula consiste en un disco que cierra con la alta velocidad del revaporizado (vapor producido espontáneamente al descargar el condensado de un nivel de presión a otro menor) y abre con la baja velocidad del condensado. Se puede ver una trampa termodinámica en la figura 11, así como en la fotografía 5. En el caso de que exista riesgo de heladas es recomendable la instalación de purgadores termodinámicos.

El funcionamiento de estos purgadores está basado en la utilización de un disco para controlar la salida del condensado y retener el vapor. El purgador abre y cierra

rítmicamente para descargar los condensados a temperatura próxima al vapor saturado y cierra herméticamente entre descargas. El disco, que es la única parte móvil del sistema, se eleva y cae en respuesta a las fuerzas dinámicas producidas por una revaporización parcial del condensado caliente. Por el orificio central entra condensado frío, aire y otros gases no condensables, los cuales elevan el disco y salen por el orificio de salida. Cuando el condensado alcanza la temperatura del vapor, una parte se revaporiza al entrar al purgador. El revaporizado pasa a alta velocidad por debajo del disco a la cámara de control en la parte superior. El desequilibrio de presiones fuerza el disco a bajar al asiento parando la circulación. El purgador permanece herméticamente cerrado hasta que la pérdida de calor a través del cuerpo hace bajar la presión en la cámara de control, permitiendo que la presión de entrada eleve el disco y repita el ciclo.

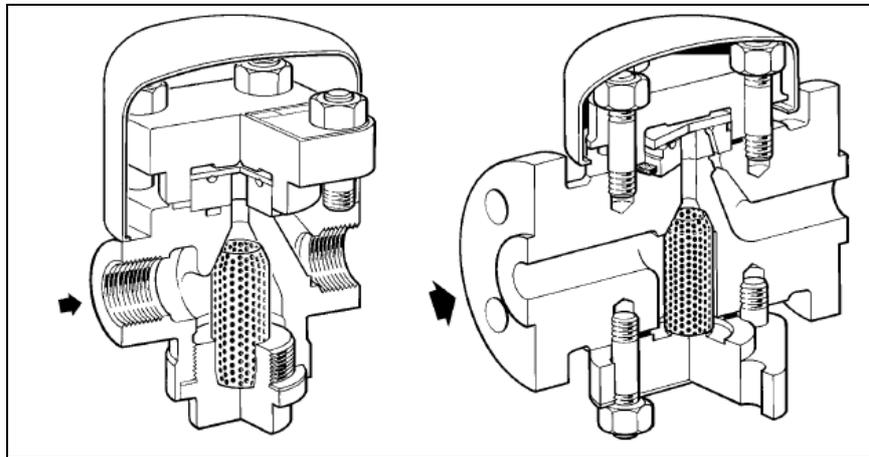


Figura 11: Trampa de vapor termodinámica (Fuente: Seditesa)



Fotografía 5: Trampa de vapor termodinámica (Fuente: Seditesa)

2.8. Efecto del aire en los sistemas de vapor

En una mezcla de gases, cada uno ejerce una presión parcial sobre la mezcla. La suma de las presiones parciales de los gases proporciona la presión total de la mezcla.

Cuando un sistema de distribución o un equipo de vapor se pone en servicio, el espacio destinado originalmente al vapor está ocupado por aire. Al entrar el vapor, éste conduce el aire hacia el punto de drenaje o hacia la zona opuesta a la entrada del vapor. Una parte del mismo llega a la superficie de transferencia donde permanece como una película cuando se forma condensado. Esta película de aire es una barrera importante para la transmisión de calor desde el vapor a la superficie de calefacción del equipo.

Hay que tener en cuenta que una película de aire de 1 mm de espesor puede ofrecer la misma resistencia al flujo de calor que una película de agua de 25 mm, una de hierro de 1,7 m o una de cobre de 12 m de espesor (Spiraxsarco).

No todo el aire que llega a los puntos de drenaje es descargado inmediatamente por las trampas de vapor. Incluso en el caso de que puedan eliminar aire, éste necesita cierto tiempo para salir, por lo que hay que facilitar su salida. Parte del aire puede quedar retenido formando bolsas, dado el carácter aislante que posee, se convierten en puntos fríos del sistema. En algunos casos, el aire puede aislar temporalmente una trampa, impidiendo la salida del condensado.

Por lo que, es necesario la elección de trampas de vapor que eliminen el aire que se vaya formando en las conducciones.

3. OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN

3.1. Objetivos

El objetivo principal de esta Tesis Fin de Máster consiste en la reutilización de los condensados generados en el circuito de calentamiento de los tanques de ácido de un decapado químico, para el lavado posterior de la banda con agua desmineralizada.

Con esta reutilización se pretende disminuir el consumo de agua desmineralizada y de las aguas residuales de la instalación, así como reducir el consumo de vapor necesario para el calentamiento de los tanques de lavado.

3.2. Justificación del Trabajo

La realización de este Trabajo Fin de Máster está enmarcada dentro de unas prácticas realizadas en una empresa del sector siderúrgico. El sistema de vapor empleado no contempla la posibilidad de reutilizar el condensado generado. Dentro de la política medioambiental de la empresa está la mejora continua de las instalaciones, adaptándolas a las Mejores Técnicas Disponibles, siempre que sea económicamente viable.

El aprovechamiento de los condensados supone una reducción de los consumos energéticos directos de la línea (agua desmineralizada, vapor y agua residual) y, además, contribuye a la disminución de los consumos del departamento energético de la empresa (agua de aportación de pozos y gas natural).

Como ventaja adicional al empleo de los condensados de los tanques de ácido en el lavado final de la banda, se encuentra la utilización de instalaciones existentes en la línea y que actualmente se encuentran en desuso (tanque de almacenamiento de condensados, conducciones de retorno de los condensados a los tanques de lavado y valvulería en general). Por lo que, el coste final de implantar este sistema de reutilización de condensados se reduce, al ya existir algunos de los elementos necesarios en la instalación.

4. METODOLOGÍA

4.1. Energías consumidas en la línea

Para el proceso de decapado químico de la banda es necesario el empleo de diversas energías, indicadas en la figura 12, entre las que cabe destacar el agua desmineralizada y el vapor, por el volumen total de consumo. La propuesta de mejora del proceso se centra en estas dos fuentes de energía.

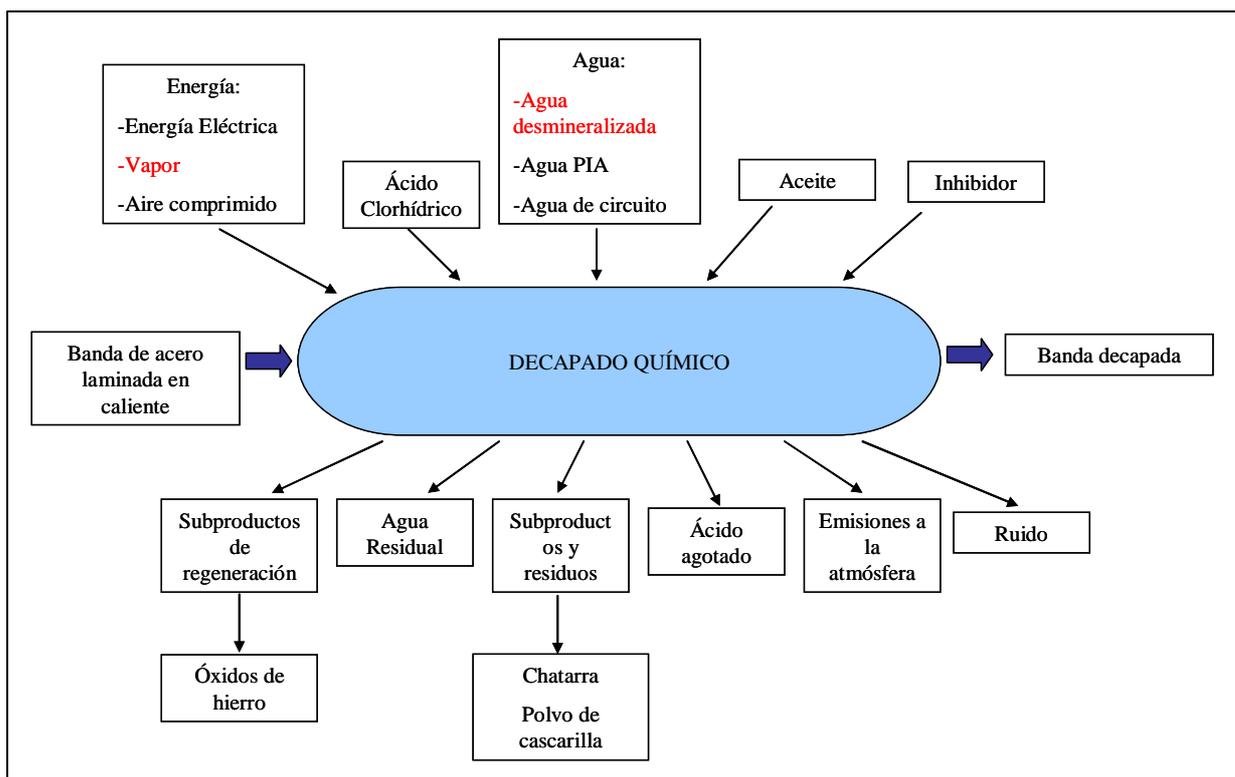


Figura 12: Esquema general de entrada/salida de material de decapado (Fuente: Elaboración propia)

4.2. Generación del agua desmineralizada

En primer lugar, el agua proveniente de los pozos recibe un pretratamiento. Éste consiste en:

- Filtro de arena.
- Dosificador de un dispersante.
- Microfiltro.

La planta de agua desmineralizada de la factoría consta de dos fases:

- Ósmosis inversa: Osmotización del agua a través de membranas de poliamida.
- Afino, mediante intercambio iónico.

Existen 5 cadenas de desmineralizadoras. El agua de aporte procede de pozos cercanos, con un contenido en sales de 1.500-3.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Una vez realizado el proceso en la línea de ósmosis inversa, el contenido en sales disminuye hasta 5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y un pH comprendido entre 7 y 8.

De estas 5 cadenas, 3 trabajan en lechos asentados y 2, en lechos fluidificados. En la figura 13 se indica un esquema general de la planta de producción de agua desmineralizada.

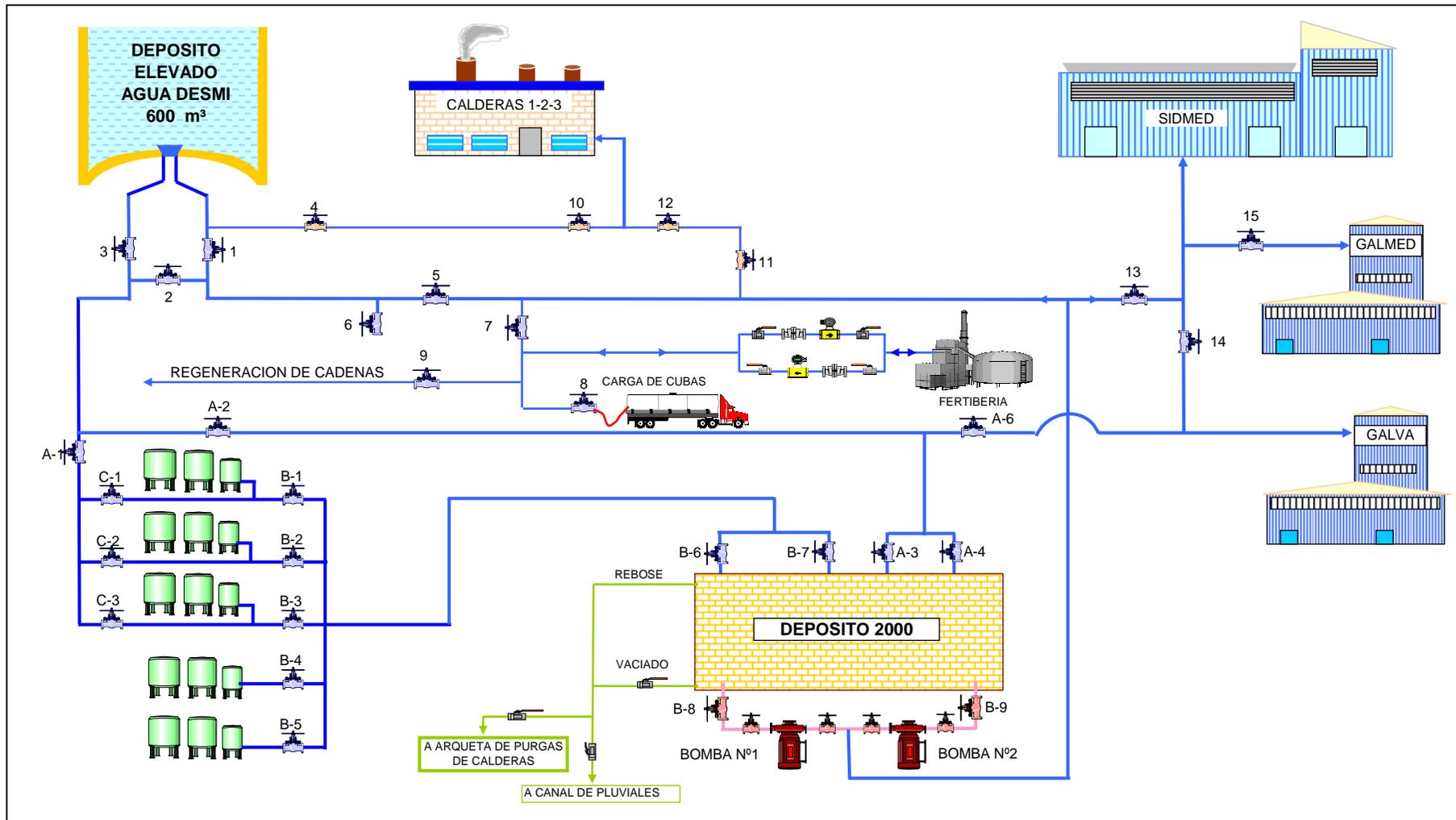


Figura 13: Esquema general del sistema de generación de agua desmineralizada (Fuente: Descripción técnica de los equipos de l departamento de Energías)

4.3. Generación del vapor

El sistema de generación de vapor de la factoría está constituido por 3 calderas de vapor: 1 funcionando de forma continua, 1 en apoyo (por si aumenta la demanda de vapor) y 1 parada (para entrar a trabajar en caso de avería de alguna de las otras 2). Las 3 funcionan habitualmente con gas natural, aunque también podrían trabajar con otras fuentes de energía. En la tabla 2 se muestra los parámetros del agua de la caldera. Mientras que, en la tabla 3 se indica la presión y temperatura del vapor saturado la salida de la caldera.

TABLA 2: Parámetros de calidad del agua de la caldera (Fuente: Descripción técnica de los equipos del departamento de Energías)

AGUA DE LA CALDERA	
pH	7-9
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	< 25
Alcalinidad total (TAC) (ppm CaCO_3)	< 0,3 ppm
Cloruros (Cl^- ppm)	< 4
Hierro (Fe^{++} ppm)	< 0,1

TABLA 3: Presión y temperatura del vapor generado en la caldera (Fuente: Descripción técnica de los equipos del departamento de Energías)

CALIDAD DEL VAPOR	
Presión (bar)	8
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	220

4.4. Tratamiento del agua residual

La planta de tratamiento de aguas residuales recoge todas las aguas residuales de las instalaciones. Esta agua se puede dividir en:

- Aguas negras, con alto contenido en materia orgánica de origen humano, procedentes de los locales de pública concurrencia, oficinas y sanitarios.
- Aguas de proceso: Se trata de aguas residuales industriales (ARI), contaminadas físicamente o que contienen sales minerales disueltas. La procedencia de esta agua es diversa: De los procesos siderúrgicos, de las instalaciones de tratamiento de agua, y de los sótanos y desagües de las instalaciones industriales. Esta agua contiene partículas metálicas, precipitados de carbonato de cal o lodos, y restos de aceite.

El sistema de tratamiento de las aguas residuales, mostrado en la figura 14, consta de los siguientes elementos:

- Homogenizador.
- Separadores primarios.
- Cámaras de mezcla.
- Silos de cal.
- Coaguladores.
- Sección de tratamiento de aceite usado.
- Sección de tratamiento de aguas crónicas.
- Canal perimetral.
- Eras de secado.

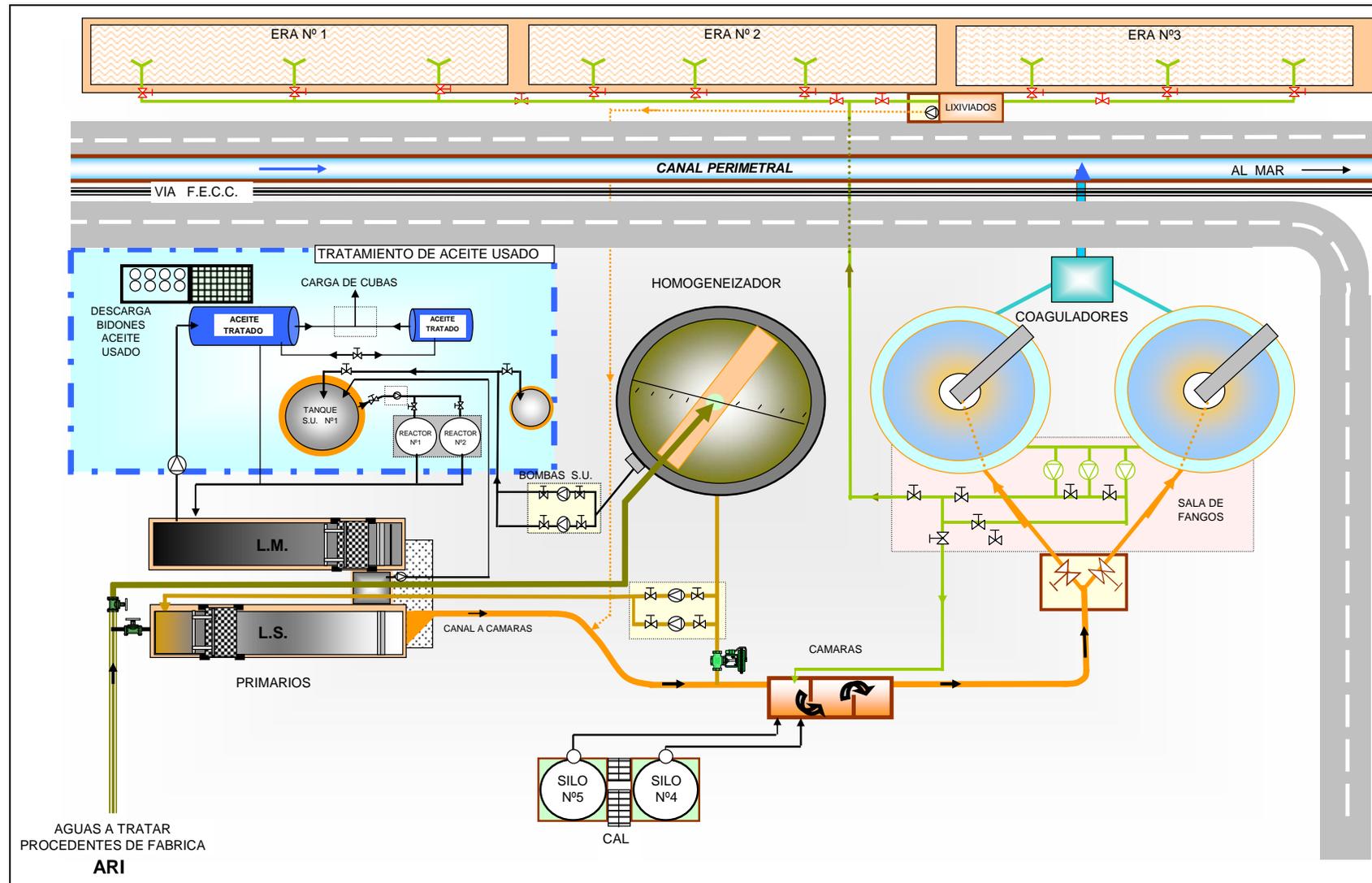


Figura 14: Sistema tratamiento de las aguas residuales de la planta (Fuente: Descripción técnica de los equipos del departamento de Energías)

4.5. Descripción del funcionamiento de los tanques de ácido

La línea de decapado consta de 4 baños de ácido, donde la banda es tratada por inmersión en los mismos durante un determinado tiempo que depende principalmente de las concentraciones de ácido y de hierro, y de las temperaturas de los baños. En la tabla 4 se indican los rangos óptimos de concentraciones y temperaturas.

TABLA 4: Parámetros de los tanques de ácido (Fuente: Manual del proceso de Decapado, 2000)

	TANQUES DE ÁCIDO			
	Tanque 1	Tanque 2	Tanque 3	Tanque 4
[HCl] (g/l)	20-40	45-65	80-100	90-150
[Fe] (g/l)	130-170	110-145	70-100	45-80
T (° C)	70-90	78-85	78-85	78-85

A medida que la banda va pasando por los baños, la concentración de HCl va disminuyendo y la de Fe aumentando, por lo que es necesario la renovación del ácido conforme se va empobreciendo al eliminar la cascarilla de la superficie de la banda.

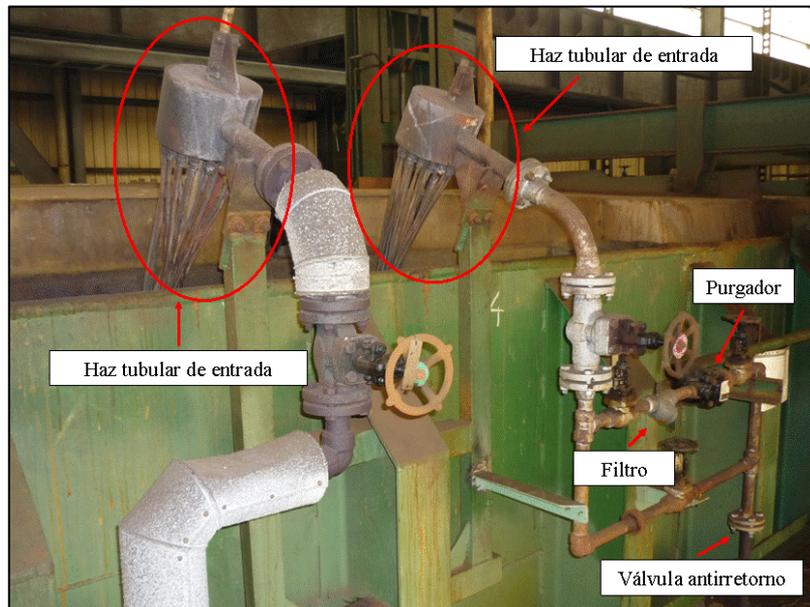
El HCl se aporta con una concentración de 190 g/l en el tanque 4, llegando hasta los otros 3 tanques por cascada.

Para trabajar a mayores concentraciones y temperaturas en los baños y, por tanto, aumentar la velocidad del proceso de decapado se emplea un inhibidor. Los inhibidores son agentes catalizadores, que inhiben el ataque del ácido y favorecen la disolución de los óxidos de hierro. El rango de trabajo del inhibidor está comprendido entre 300 y 500 ppm. La adición del inhibidor al proceso también se realiza desde el tanque 4, llegando al resto por cascada.

4.6. Descripción del sistema de vapor de la línea de Decapado

Para calentar los baños de ácido se dispone de intercambiadores de calor sumergidos en los propios baños. Los intercambiadores están formados por serpentines de plástico (haces tubulares) que se introducen en los laterales de los tanques y que se encuentran en contacto con el ácido de los mismos. El conjunto de estos serpentines constituye una gran área de transmisión de calor con el ácido de los tanques. A la salida de cada intercambiador existe un filtro (para eliminar posibles impurezas del sistema), un purgador o trampa de vapor (para evacuar los condensados y el aire del sistema) y una válvula de retención o antirretorno (que impide que el condensado se introduzca de nuevo en los equipos durante

las paradas de la instalación). A continuación, en la figura 15 y la fotografía 6, se muestran los componentes de un intercambiador de calor.



Fotografía 6: Conjunto de elementos que forman el sistema de intercambiadores de calor (Fuente: Elaboración propia)

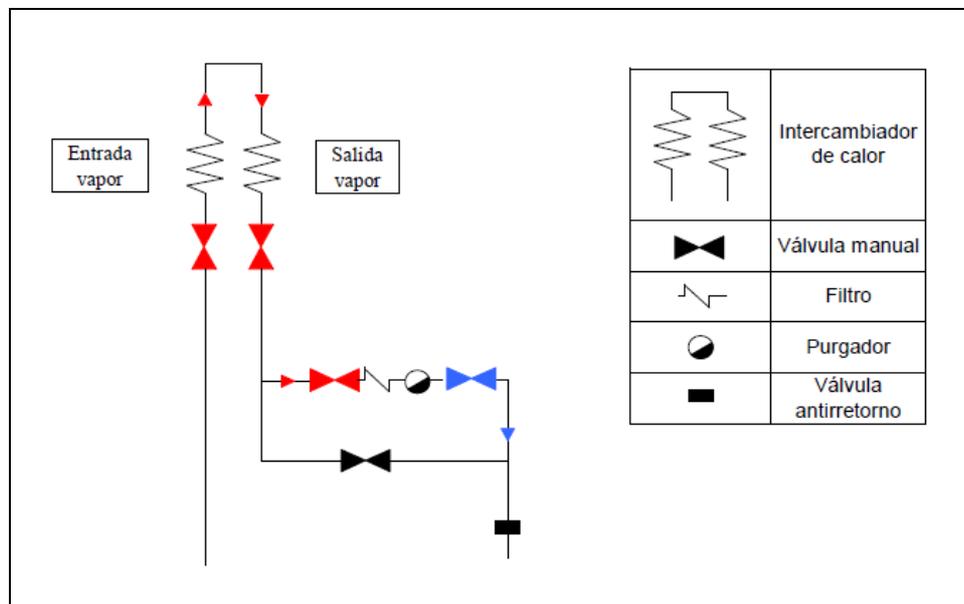


Figura 15: Elementos de los intercambiadores de calor (Fuente: Elaboración propia)

Los intercambiadores están alimentados por vapor saturado a 160°C y 7 kg/cm^2 , suministrado por la planta de Energías de la factoría. El número de intercambiadores por

tanque se indica en la tabla 5. En las figuras 16 y 17 se muestran la distribución de los intercambiadores de calor en los tanques de ácido y de lavado.

TABLA 5: Número de intercambiadores de calor por tanque de ácido y de lavado (Fuente: Elaboración propia)

	Nº tanque	Nº intercambiadores
Tanques de ácido	1	10
	2	5
	3	4
	4	4
Tanques de lavado	3	1
	4	1
	5	2

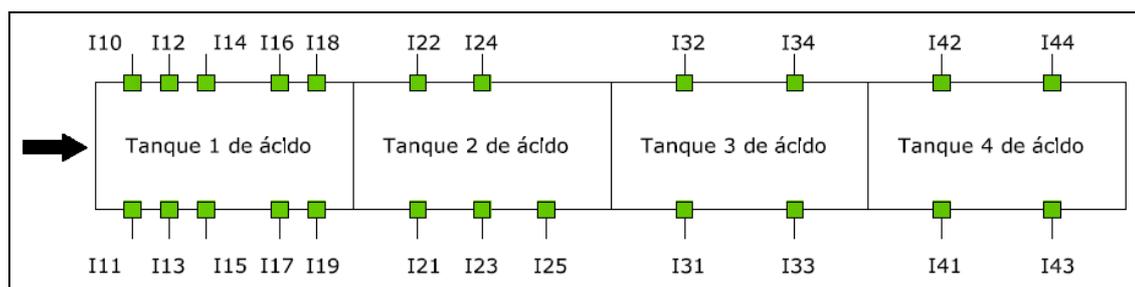


Figura 16: Distribución de los intercambiadores de calor en los tanques de ácido (Fuente: Elaboración propia)

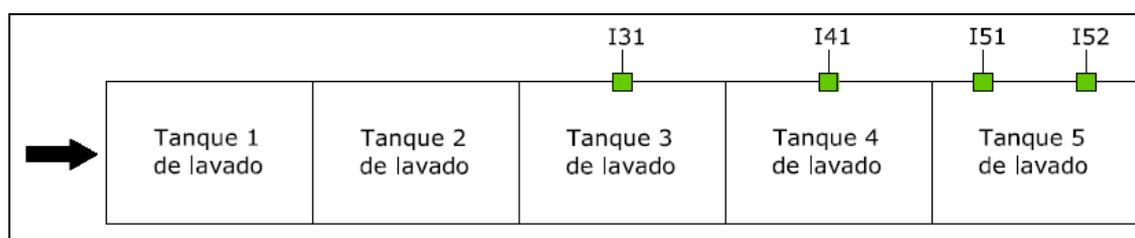
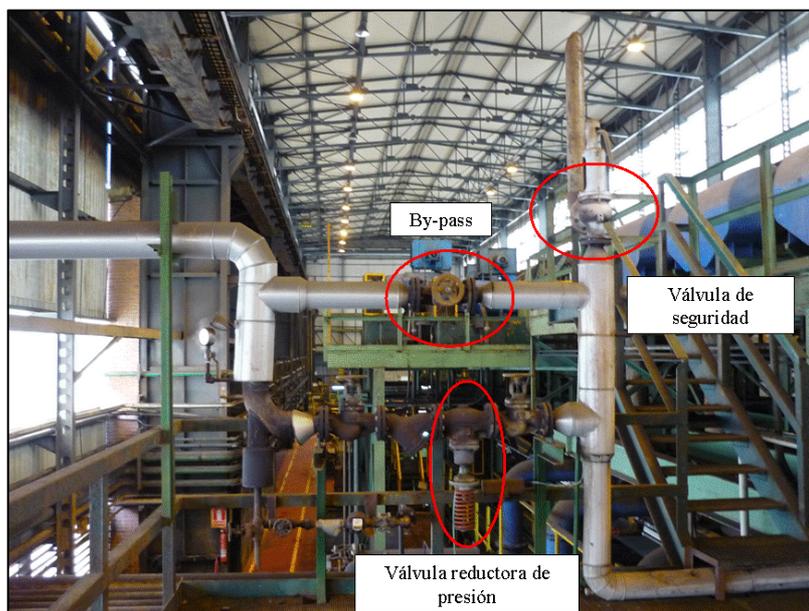


Figura 17: Distribución de los intercambiadores de calor en los tanques de lavado (Fuente: Elaboración propia)

El sistema de vapor de la línea consta de 3 sistemas de reducción de presión que convierten la presión de 7 kg/cm^2 de entrada en 5 kg/cm^2 a su salida. El primero para el tanque 1 de ácido, el segundo para los tanques 2, 3 y 4 de ácido y, finalmente el tercero para la distribución de vapor en los tanques de lavado. Los sistemas de reducción de presión están

formados por una válvula reductora de presión, una válvula de seguridad (modo de escape del vapor en caso de superar una presión de tarado) y un by-pass (para permitir el paso del vapor al sistema de calentamiento en el supuesto de avería de la válvula reductora). Estos elementos están representados en la fotografía 7.

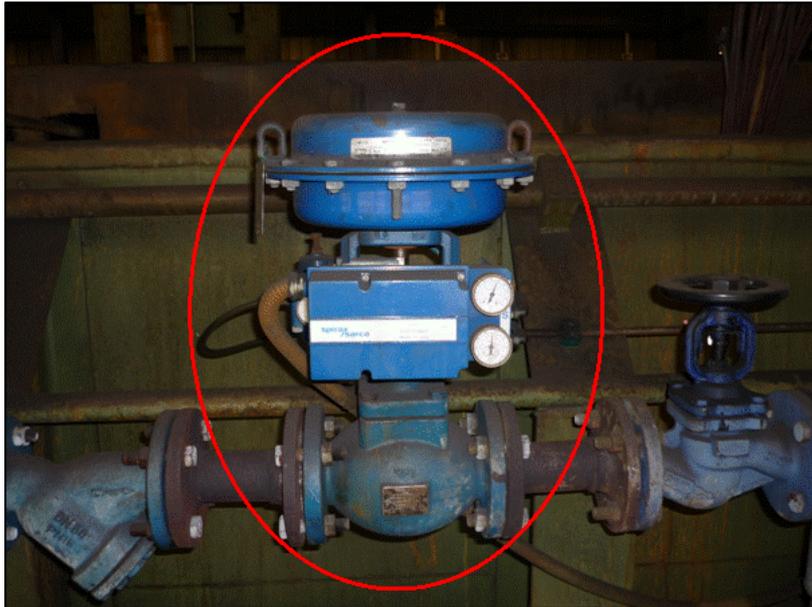


Fotografía 7: Estación reductora de presión (Fuente: Elaboración propia)

La alimentación de vapor se realiza en los intercambiadores a través de válvulas automáticas que regulan su apertura y cierre en función de la temperatura de los baños en cada instante, de forma que se trabaje en una temperatura alrededor de 80° C en los tanques de ácido y 50° C en los de lavado. En la fotografía 8 se muestra una válvula automática para los intercambiadores de los tanques de ácido, mientras que las válvulas automáticas de los tanques de lavado se observan en la fotografía 9.

En caso de ser necesario un mayor suministro de vapor a la línea de decapado, por encontrarse los tanques de ácido a menor temperatura de 80° C, se pueden abrir 5 válvulas de vapor directo (VD en los esquemas de distribución de los intercambiadores de calor), para introducir vapor directamente en los baños de ácido. En condiciones normales de funcionamiento, estas válvulas están cerradas. De estas 5 válvulas, 2 están en el tanque 1 de ácido y 1 en cada uno de los otros tanques.

El consumo de vapor de la línea es de 5.500 kg de vapor/h y la producción de acero es de 250 T/h, por lo que el consumo específico de vapor es de 22 kg de vapor/T acero producida. El volumen de ácido contenido en cada tanque es de 100 m³.



Fotografía 8: Válvula automática de alimentación de los tanques de ácido (Fuente: Elaboración propia)

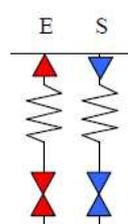
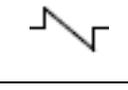
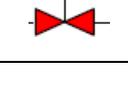


Fotografía 9: Válvulas automáticas de alimentación de los tanques de lavado (Fuente: Elaboración propia)

A continuación, en las figuras 18, 19, 20 y 21 se observa la distribución de los intercambiadores de calor para cada tanque de ácido. En color rojo se simboliza la entrada de vapor desde las estaciones reductoras de presión hasta los intercambiadores de calor. Mientras que, de azul se representa el camino que sigue el condensado evacuado de los intercambiadores. El condensado se junta en una conducción única, desde donde se dirige al tanque de almacenamiento de los condensados. La flecha de color negro representa la dirección de paso de la banda de acero a través de los tanques. La leyenda de los elementos

representados en las siguientes figuras se muestra en la tabla 6. En cada figura existe un cuadro de apertura y cierre de válvulas para el correcto funcionamiento del sistema, en el que 1 significa válvula abierta y 0, válvula cerrada.

TABLA 6: Leyenda de los elementos que forman el sistema de vapor (Fuente: Elaboración propia)

Símbolo	Elemento
	Intercambiador de vapor: E: Entrada del vapor S: Salida del vapor
	Purgador
	Filtro
	Válvula manual
	Válvula automática

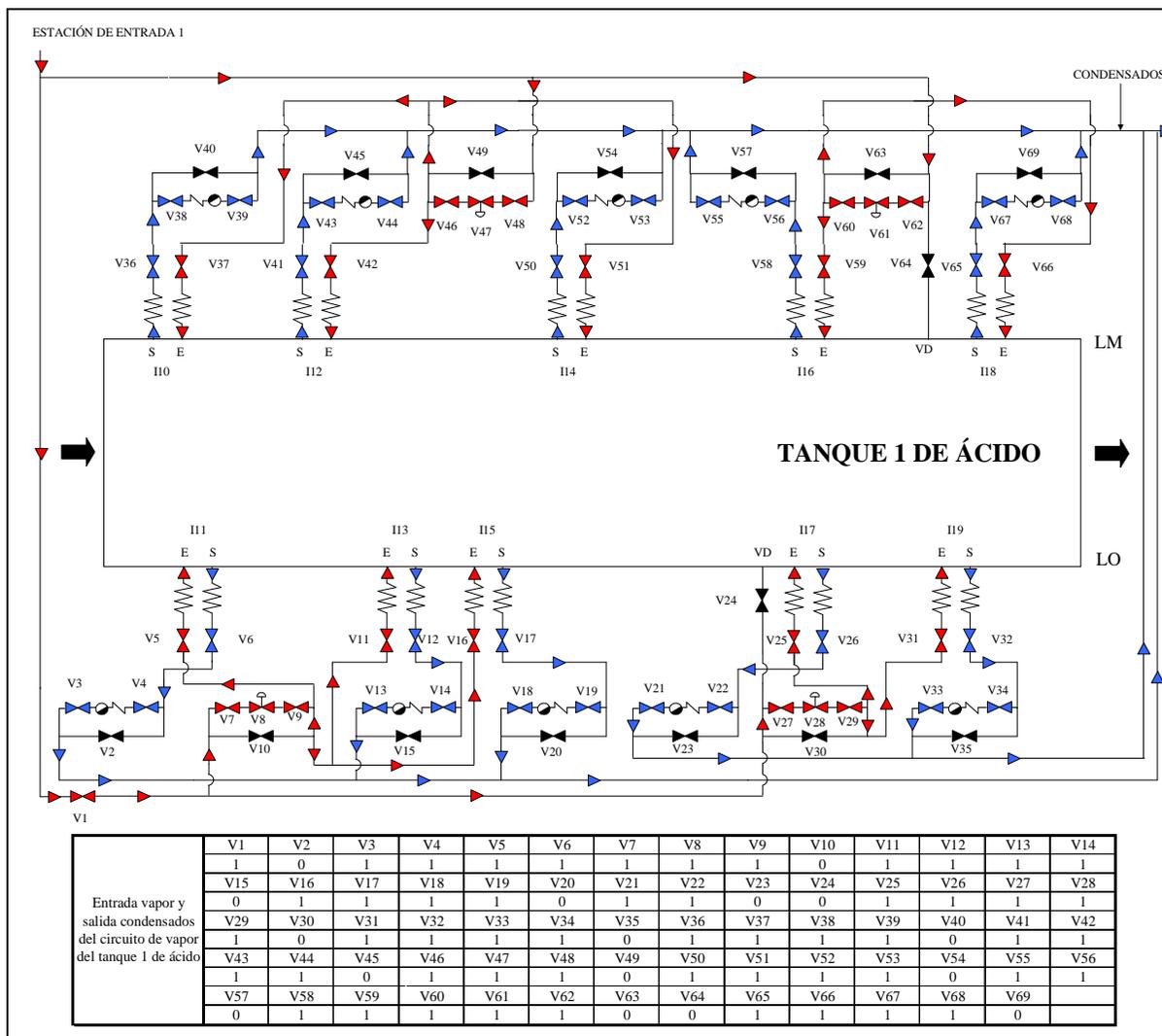


Figura 18: Distribución de intercambiadores de calor en el tanque 1 de ácido (Fuente: Elaboración propia)

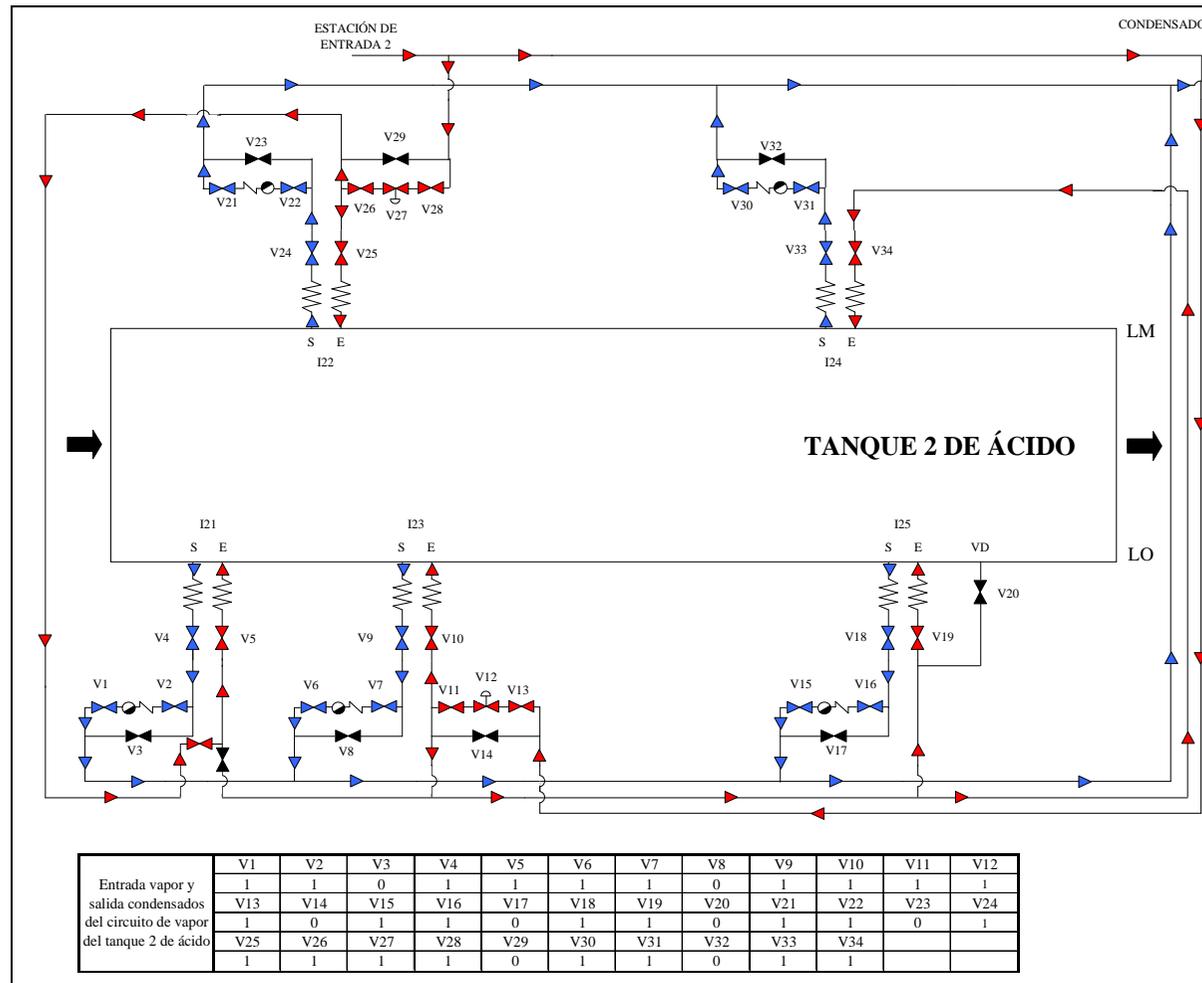


Figura 19: Distribución de intercambiadores de calor en el tanque 2 de ácido (Fuente: Elaboración propia)

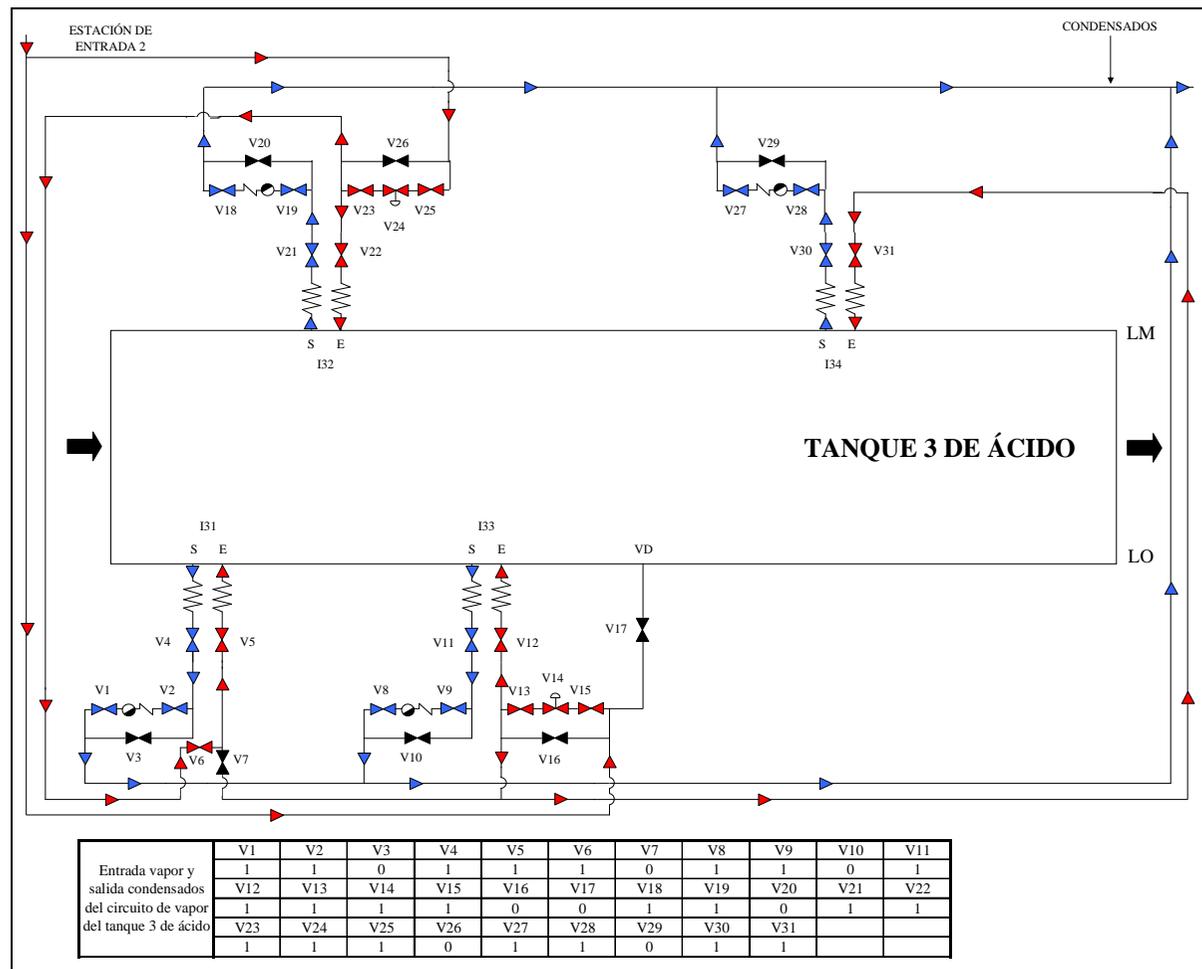


Figura 20: Distribución de intercambiadores de calor en el tanque 3 de ácido (Fuente: Elaboración propia)

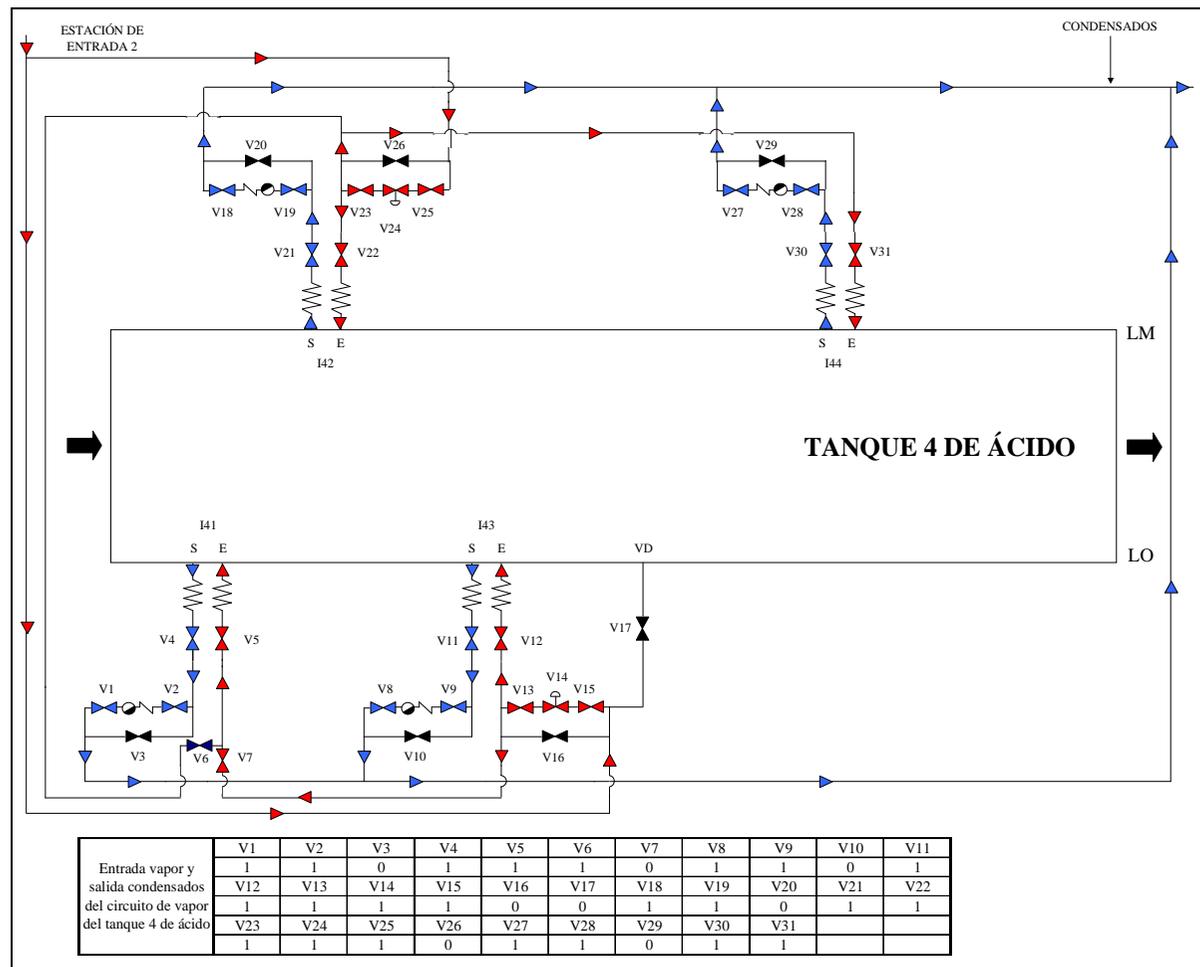


Figura 21: Distribución de intercambiadores de calor en el tanque 4 de ácido (Fuente: Elaboración propia)

El sistema de evacuación de los condensados se muestra en la figura 22, donde se observa que los condensados de los tanques de ácido van evacuando en una misma conducción, la cual se puede conducir hacia el tanque de almacenamiento de los condensados o hacia el sumidero del lavador de humos de la línea. Esta conducción se muestra en la fotografía 10. En la figura 22, se indican las válvulas que tienen que permanecer abiertas con 1 en el cuadro inferior del esquema, mientras que con 0 se simbolizan las válvulas cerradas.



Fotografía 10: Conducción de evacuación de condensados (Fuente: Elaboración propia)

Las posibles vías de evacuación de los condensados, como ya se ha comentado, son:

- Condensados del tanque 1 de ácido: Balsa de cascarilla de la línea (ver fotografía 11) y de ahí a las aguas residuales.



Fotografía 11: Balsa de cascarilla (Fuente: Elaboración propia)

- Condensados de los tanques 2, 3 y 4: Pila de toma de muestras y de ahí hacia el sumidero del lavador de humos, para posteriormente ser enviado a la balsa neutralizadora y, finalmente a las aguas residuales (ver fotografías 12, 13 y 14, respectivamente).



Fotografía 12: Pila de toma de muestras (Fuente: Elaboración propia)



Fotografía 13: Sumidero del lavador de humos (Fuente: Elaboración propia)



Fotografía 14: Balsa neutralizadora (Fuente: Elaboración propia)

- Condensados de los 4 tanques de ácido: Hacia el tanque de almacenamiento de condensados y de ahí al lavador de humos (ver fotografías 15 y 16).



Fotografía 15: Tanque de almacenamiento de condensados (Fuente: Elaboración propia)



Fotografía 16: Lavador de humos de los vapores ácidos de la línea (Fuente: Elaboración propia)

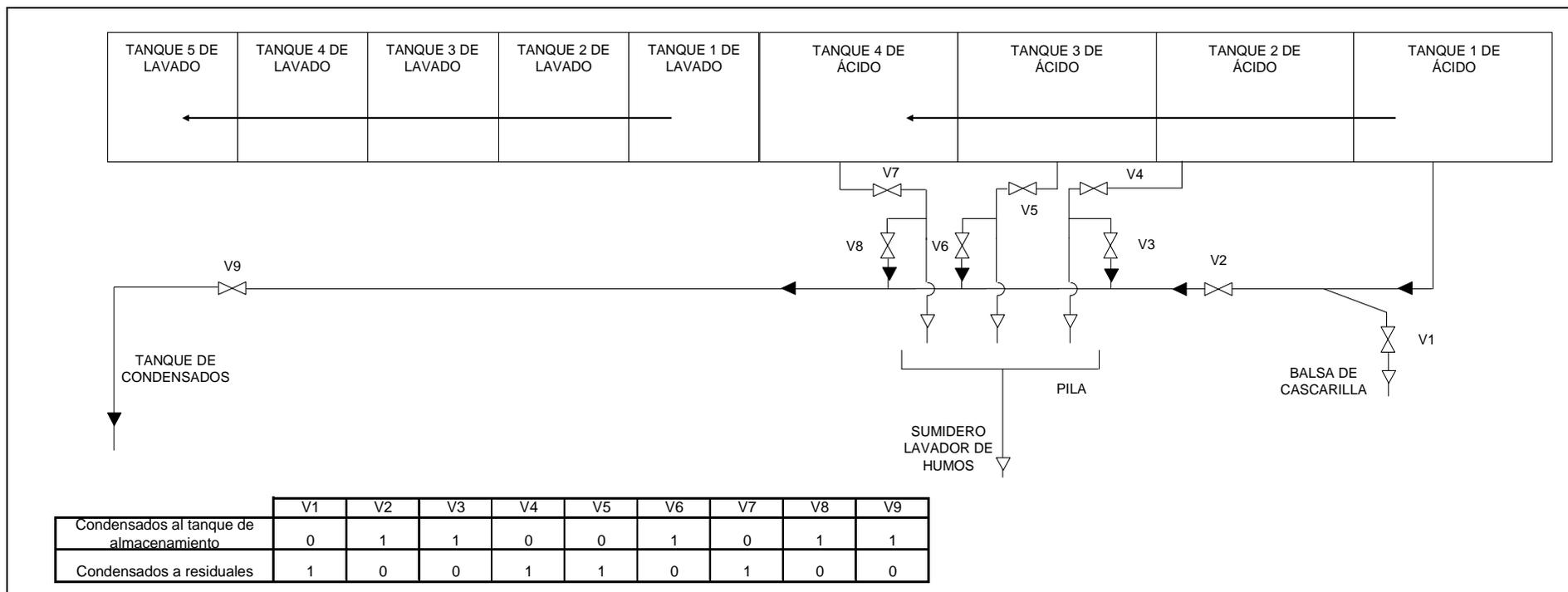


Figura 22: Sistema de evacuación de condensados de los intercambiadores de calor (Fuente: Elaboración propia)

4.7. Descripción del funcionamiento de los tanques de lavado

Los baños de lavado de la banda están situados a continuación de los baños de ácido. Su función principal es eliminar los restos de ácido y sales que puedan permanecer en la superficie de la banda.

El lavado de la banda se efectúa por rocío sobre la misma con agua desmineralizada caliente (50° C), tanto por la parte superior como por la inferior de la banda. En este caso, la banda no va sumergida en agua, sino apoyada sobre unos rodillos de goma y el agua de lavado es rociada sobre la banda.

Para impedir la formación de sales sobre la banda, que puedan ocasionar puntos de óxido en contacto con el agua, es necesario controlar la calidad del agua de los baños de lavado. Estos parámetros quedan recogidos en la tabla 7.

TABLA 7: Parámetros de los tanques de lavado (Fuente: Manual del proceso de Decapado, 2000)

	TANQUES DE LAVADO				
	Tanque 1	Tanque 2	Tanque 3	Tanque 4	Tanque 5
T (° C)	50	50	50	50	50
Conductividad (μS/cm)			< 80		< 12
pH		4,1			
Volumen (m ³)	11,3	13,8	14,3	14,7	18,7

La aportación del agua desmineralizada se realiza a través de los tanques 3 y 4 de lavado, llegando al resto por cascada. El rebose o evacuación del agua sobrante se realiza por el tanque 1. El calentamiento de los baños de lavado se realiza con 4 intercambiadores de calor sumergidos en los baños 3, 4 y 5, alimentados por 3 válvulas automáticas situadas junto a la estación reductora de presión.

El consumo de agua desmineralizada es de 15 m³/h en los tanques de lavado y, como ya se ha comentado anteriormente, la producción de la línea es de 250 T/h, por lo que el consumo específico de agua es de 0,06 m³ de agua desmineralizada/T acero producida. La capacidad total de los tanques de lavado es de 73 m³.

4.8. Descripción de la situación actual

Actualmente, en la línea, los condensados de los tanques de ácido son vertidos directamente a la red de agua residual. Por un lado, los condensados del tanque 1 de ácido se vierten a una balsa empleada para recoger los restos de cascarilla de los sumideros de la

línea, desde la cual se mandan a la red de residuales. Por otro lado, los condensados de los tanques 2, 3 y 4 se evacúan a través de una pila de recogida de condensados, desde donde son conducidos al sumidero del lavador de humos y de ahí a la red de residuales, como ya se ha comentado anteriormente.

Esta situación queda reflejada en la figura 23, donde en color rojo aparece el camino que siguen los condensados actualmente, vertidos directamente a la red de aguas residuales. Igual que en esquemas anteriores, 1 representa las válvulas abiertas y 0 las cerradas del sistema.

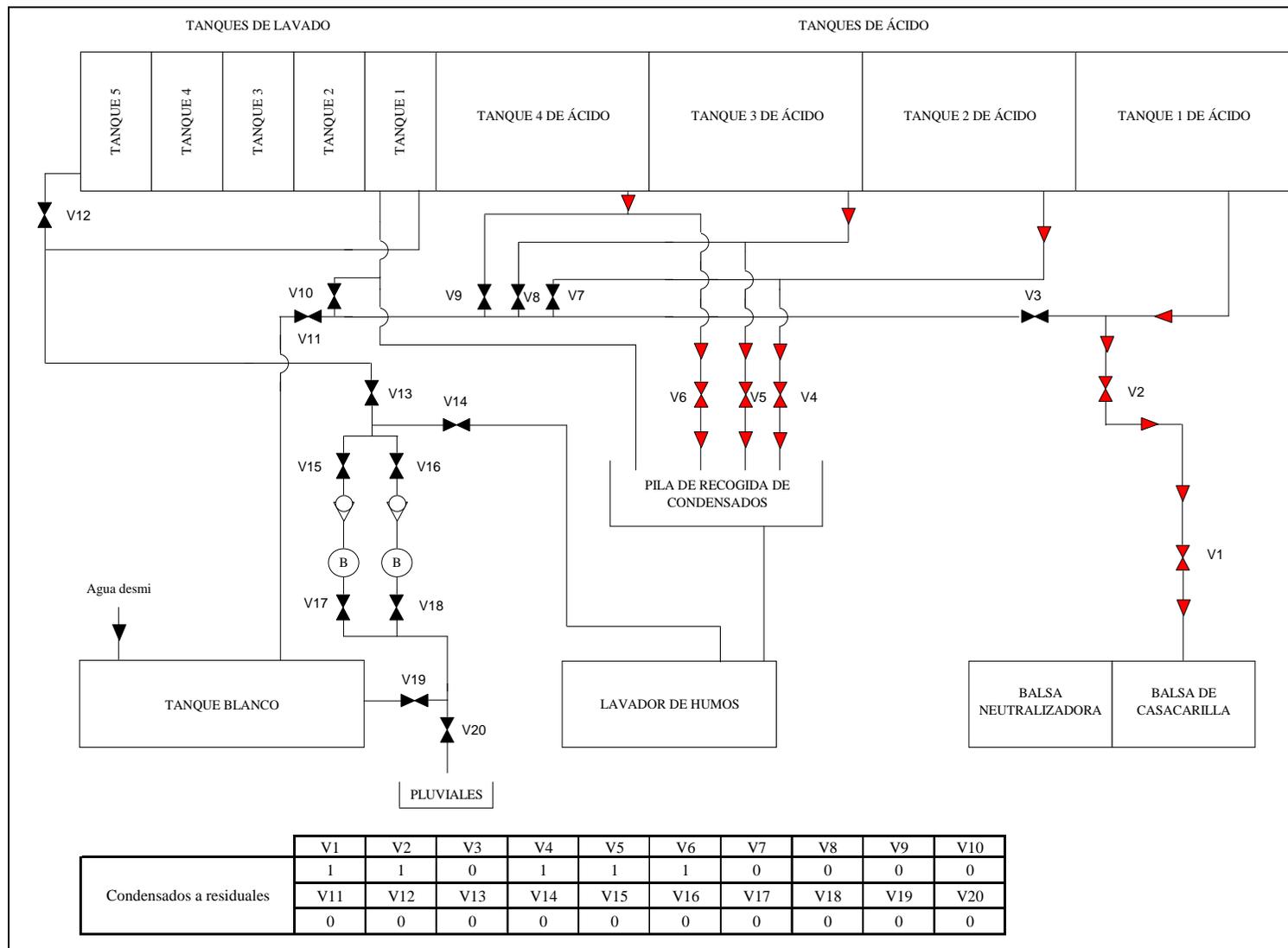


Figura 23: Sistema de conducción de los condensados al tanque de almacenamiento (Fuente: Elaboración propia)

5. RESULTADOS

5.1. Descripción del funcionamiento del sistema de reutilización de condensados

El sistema propuesto de reutilización de condensados consiste en conducir los condensados generados en los intercambiadores de calor, desde los tanques de ácido hasta el tanque de condensados. Una vez esté contenido en el tanque se comprueba su conductividad. Mientras que la conductividad del tanque de condensados sea inferior a 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (el límite de conductividad en el tanque 3 es de 80 $\mu\text{S}/\text{cm}$), se introduce el agua al tanque 3.

En caso de que la conductividad sea superior a 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$, el contenido del tanque de condensados es vertido a las aguas residuales, para su tratamiento antes de su vertido final al mar. Otra posibilidad a considerar es el envío de esta agua al punto de alimentación de las cadenas desmineralizadoras, para disminuir el consumo de agua de aporte, aprovechando que se trata de un agua previamente tratada.

En la figura 24 se indica un esquema del sistema de distribución de los condensados hasta el tanque de condensados, en la que aparece marcado en rojo el camino de los condensados desde los tanques de ácido hacia el tanque de almacenamiento. Mientras que, de color azul se indican las válvulas que deben permanecer cerradas para evitar que los condensados se desechen directamente a la red de aguas residuales.

El sistema de reutilización de los condensados desde el tanque de condensados hasta el tanque 3 de lavado se muestra en la figura 25. La conducción de los condensados hacia los tanques de lavado está marcada en rojo en la figura.

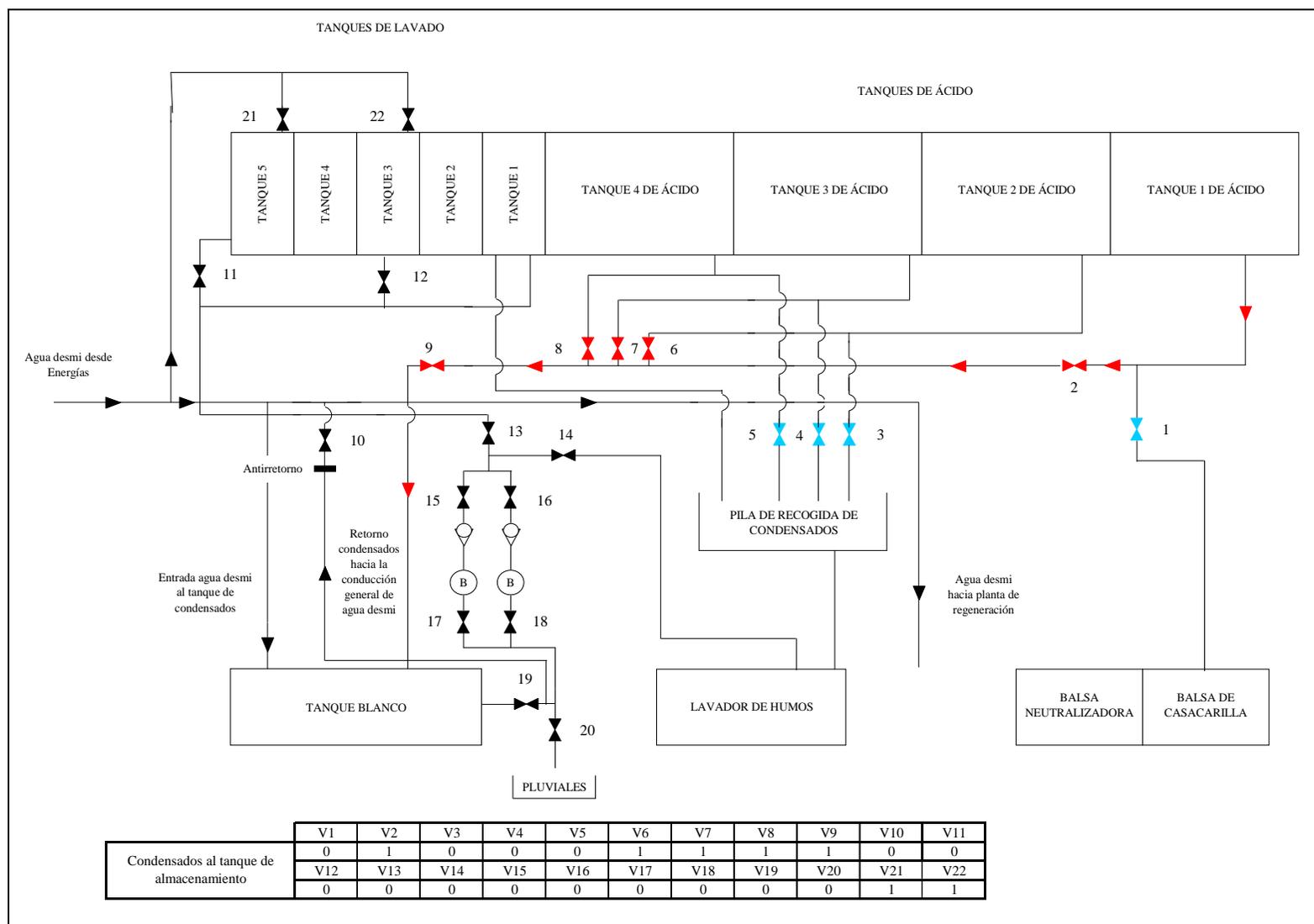


Figura 24: Conducción de condensados hacia el tanque de almacenamiento (Fuente: Elaboración propia)

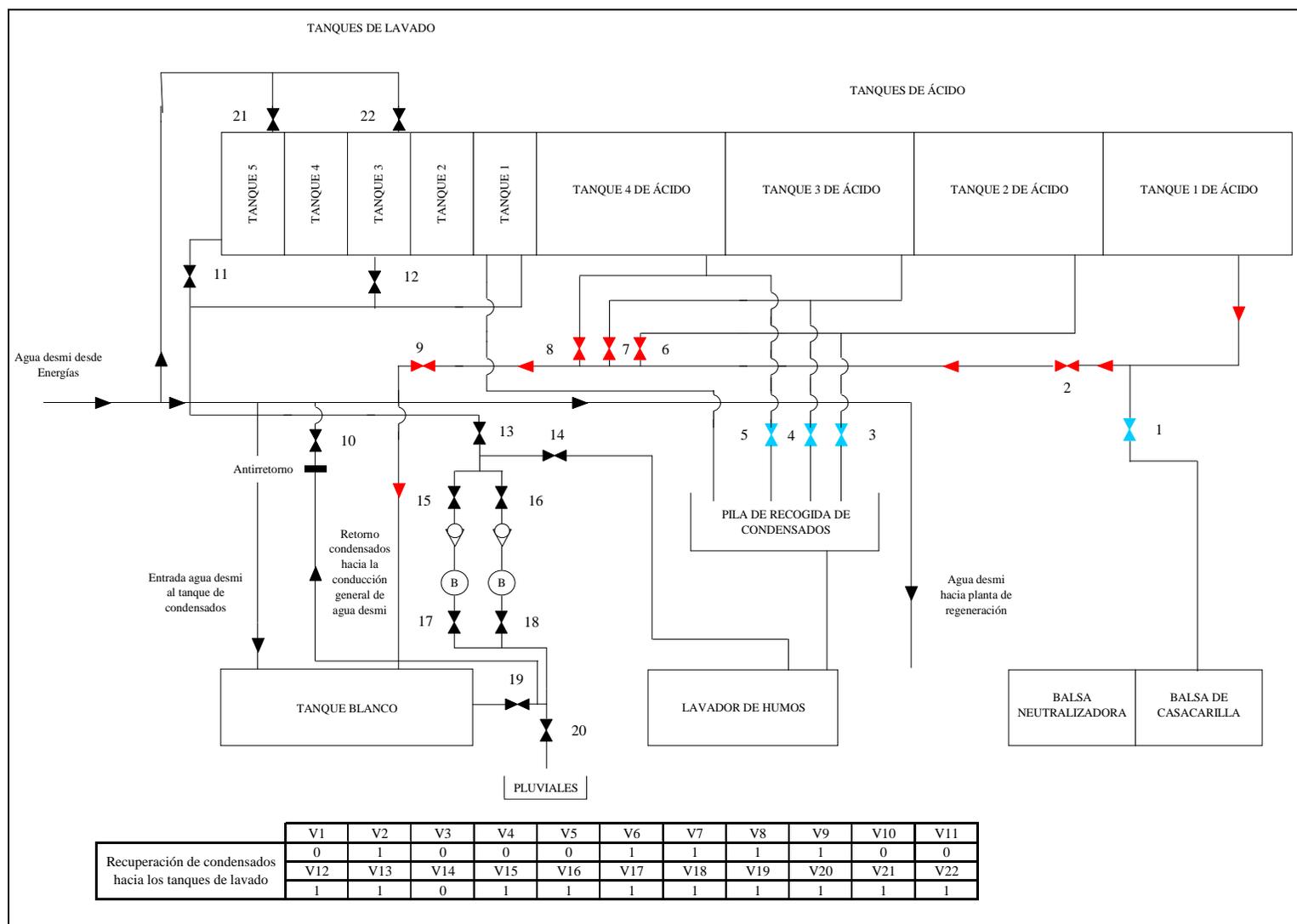


Figura 25: Recuperación de condensados desde el tanque de almacenamiento hacia los tanques de lavado (Fuente: Elaboración propia)

5.2. Pruebas de conductividad y caudal de las muestras de condensados del tanque de almacenamiento

Para poder reutilizar los condensados en el tanque 3 de lavado es necesario que su conductividad no supere los 80 $\mu\text{S}/\text{cm}$. En el gráfico 1 se recogen los valores de conductividad de los condensados almacenados que provienen de los tanques de ácido, mientras que en la tabla 8 se indica la temperatura y el caudal de generación de condensados durante el funcionamiento normal de la instalación. El caudal generado se muestra también el gráfico 2.

En condiciones normales de funcionamiento de la línea, la conductividad de los condensados almacenados no supera los 40 $\mu\text{S}/\text{cm}$. En algunas muestras, aparecen valores superiores de conductividad, debido a perforaciones de algún intercambiador de ácido del sistema, pero los valores no sobrepasan en ninguna ocasión los 80 $\mu\text{S}/\text{cm}$ límites del tanque 3 de lavado.

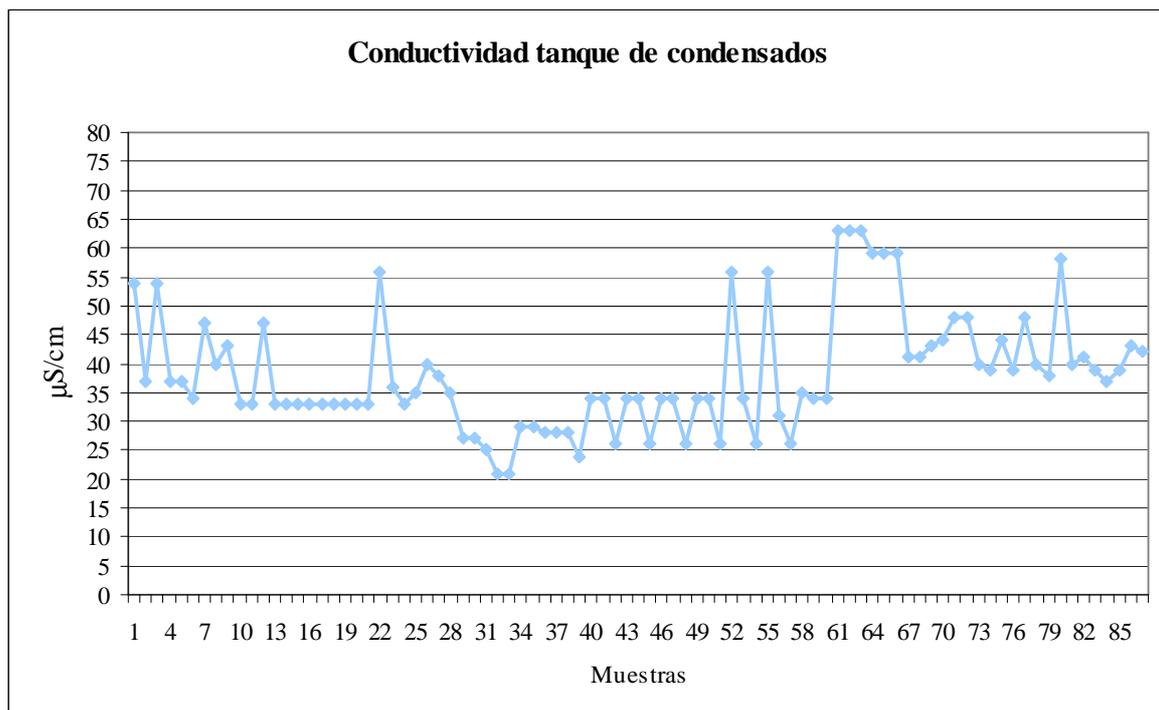


Gráfico 1: Conductividad de los tanques de condensados (Fuente: Elaboración propia)

TABLA 8: Temperatura y caudal de generación de condensados de los tanques de ácido del sistema (Fuente: Elaboración propia)

Muestra	Volumen (ml)	Tiempo (s)	T (° C)	Caudal (m ³ /h)
1	2.300	2	73,1	4,14
2	2.960	3	71,4	3,55
3	1.950	2	72,7	3,51
4	1.800	2	70	3,24
5	1.600	2	70	2,88
6	3.500	3	74,9	4,20
7	3.680	3	76,5	4,42

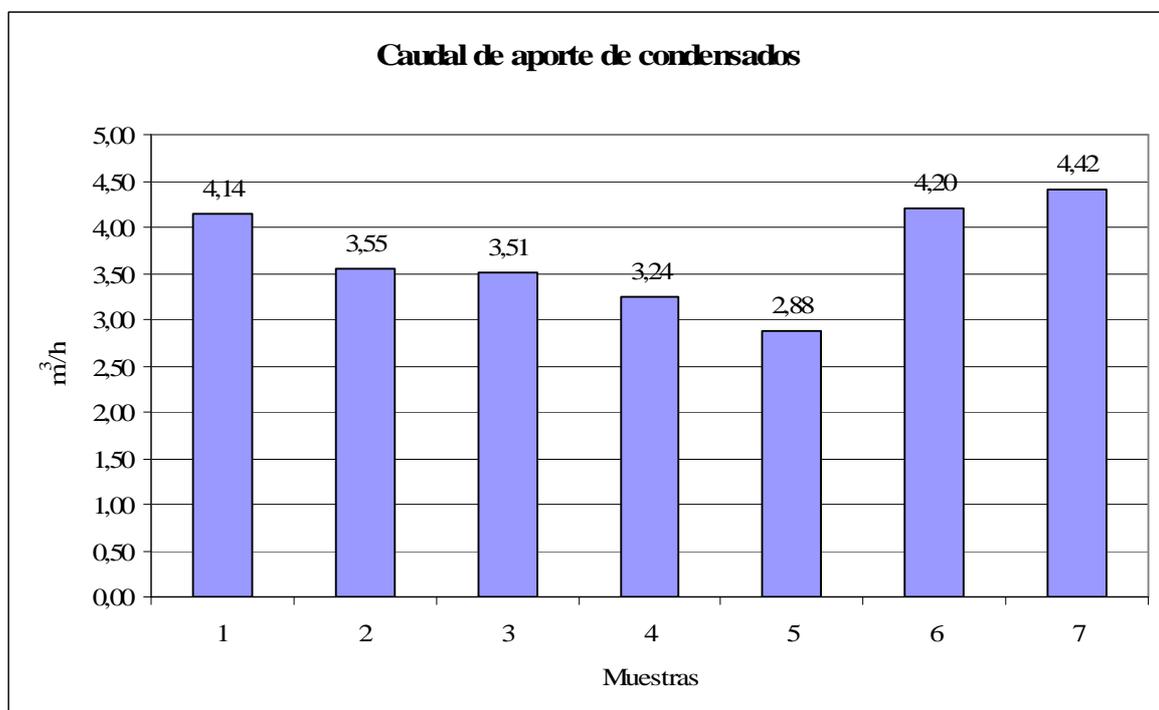


Gráfico 2: Caudal de generación de condensados (Fuente: Elaboración propia)

5.3. Mejoras necesarias en la línea

Los elementos necesarios para la utilización del sistema de recuperación de condensados son:

- Tubería para la conducción de los condensados de los tanques de ácido hacia el tanque de almacenamiento de los mismos. Esta conducción ya existe en la actualidad, pudiendo enviar los condensados hacia el tanque de almacenamiento o verterlos directamente a las aguas residuales en caso de que exista contaminación

de los mismos. Esta conducción se observa en la fotografía 10, como ya se ha mostrado anteriormente.

- Tanque de almacenamiento de condensados: Este tanque ya existe en la actualidad, con una capacidad de 200 m³.
- Conducción de devolución de los condensados a los tanques de lavado: En esta conducción faltaría añadir un último tramo desde esta conducción hasta la entrada al tanque 3 de lavado.
- Sistema eléctrico: Formado por un conductímetro en línea, que permita controlar en todo momento la conductividad del tanque de almacenamiento de los condensados, sensores de niveles máximo y mínimo del tanque, y una válvula de 3 vías que permita conducir los condensados recuperados hacia los tanques de lavado o hacia el sumidero del lavador de humos, dependiendo de la conductividad de los mismos.

5.4. Funcionamiento del sistema de recuperación de condensados

- Entrada de agua desmineralizada al tanque 5 de lavado siempre con el sistema actual (directamente de la conducción general de agua desmineralizada).
- Para el tanque 3 de lavado:
 - o Si la conductividad de los condensados del tanque blanco es $\leq 50 \mu\text{S/cm}$ → Enviar los condensados recuperados al tanque 3 lavado.
 - o Si la conductividad de los condensados del tanque blanco es $> 50 \mu\text{S/cm}$ → Enviar los condensados recuperados al sumidero del lavador de humos y entrada de agua desmineralizada al tanque 3 con el sistema actual (directamente de la conducción general de agua desmineralizada).

Finalmente, el funcionamiento del sistema de los niveles del tanque blanco:

- Si el nivel del tanque blanco es mayor que el nivel máximo → Vaciado del contenido del tanque de almacenamiento de condensados hacia el sumidero del lavador de humos.
- Si el nivel del tanque blanco es menor que el nivel mínimo → Entrada de agua desmineralizada al tanque 3 con el sistema actual directamente de la conducción general de agua desmineralizada.

5.5. Ahorros energéticos en la línea

Como ya se ha comentado anteriormente, los principales ahorros energéticos como consecuencia de reutilizar los condensados del sistema de vapor de los tanques de ácido,

son la disminución del consumo de agua desmineralizada, un menor consumo de vapor para el calentamiento de los baños de lavado y una menor producción de aguas residuales de la línea.

En la tabla 9 se indica los valores estimados de ahorros energéticos directos para la línea. Mientras que, como ahorros indirectos se obtendrán una menor necesidad de agua de pozo para la producción del agua desmineralizada, los consumibles necesarios para su obtención, menor consumo de gas natural y de agua desmineralizada para la producción de vapor y, por tanto, menores emisiones a la atmósfera, tal y como se observa en la figura 26.

TABLA 9: Ahorros energéticos directos de la línea (Fuente: Elaboración propia)

Consumos	Ahorro energético	Coste unitario	Ahorro específico
Agua desmineralizada	2,5-4,5 m ³ /h	1,75 €/m ³	0,01-0,018 m ³ /T acero
Vapor	0,5 T vapor/h	29,8 €/T vapor	0,002 T vapor/Tacero
Agua residual	2,5-4,5 m ³ /h	1,49 €/m ³	0,01-0,018 m ³ /T acero

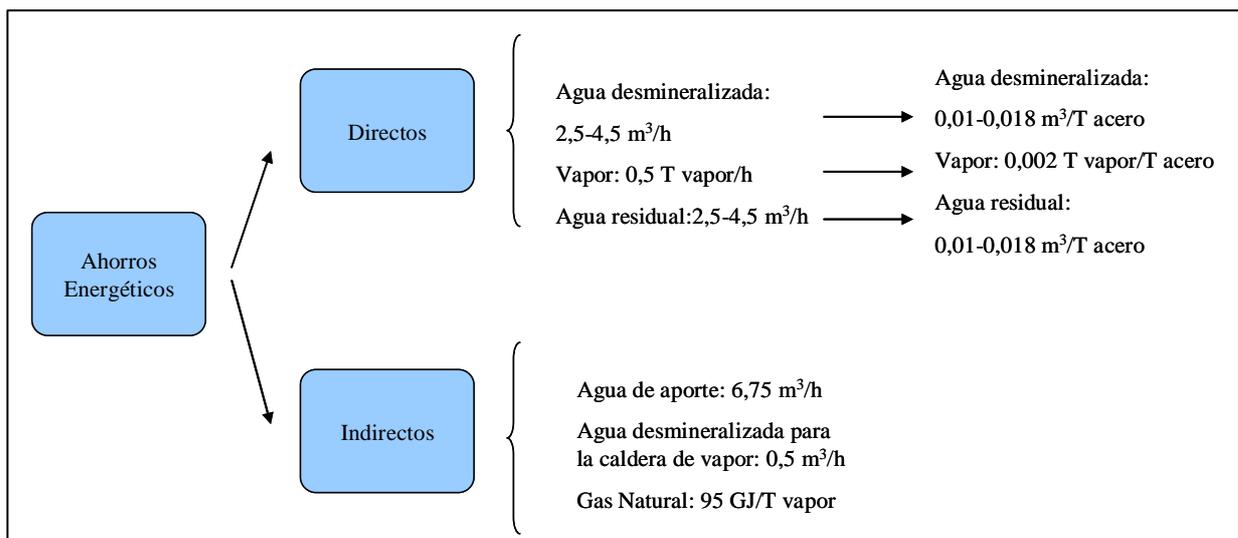


Figura 26: Ahorros energéticos del sistema de recuperación de condensados (Fuente: Elaboración propia)

5.6. Presupuesto del sistema

En la tabla 10 se indica el presupuesto del sistema de reutilización de condensados, dividido en componentes mecánicos e instalación eléctrica.

TABLA 10: Presupuesto del sistema de recuperación de condensados (Fuente: Elaboración propia)

COMPONENTES MECÁNICOS	
Componentes	Coste
Tubería hacia el tanque 3 de lavado con válvula manual	1.000 €
SISTEMA ELÉCTRICO	
Componentes	Coste
Analizador de conductividad	1.990 €
Transmisor de nivel	1.640 €
Válvula de 3 vías	1.038 €
Cableado	1.498 €
Mano de obra y puesta en servicio	3.850 €
TOTAL	11.016 €

El periodo de retorno de la inversión necesaria sería de 20 días con una producción de 24 h/día, ya que el sistema supone un ahorro de 23 €/h y el coste del sistema es de 11.016 €, considerando el ahorro de agua desmineralizada, de vapor y de agua residual a tratar.

6. CONCLUSIONES

Con la puesta en marcha del sistema de recuperación de condensados no sólo se ahorra agua desmineralizada en los baños de lavado, sino que se reduce la necesidad de calentamiento en dichos baños, puesto que el agua de los condensados ya se encuentra caliente (60-80° C)

El principal inconveniente que presenta este sistema es la contaminación potencial de los condensados si algún intercambiador de los tanques de ácido se perfora y entra en el sistema ácido. En este caso, es necesario determinar que intercambiador está perforado, aislarlo del sistema y desviar sus condensados a la red de pluviales.

La capacidad de almacenamiento del tanque de condensados es de 200 m³, por lo que, la contaminación del mismo no se produce de forma inmediata, sino que va siendo progresiva. Esto permite aislar el sistema cuando la contaminación vaya aumentando, no enviando el agua contaminada a los baños de lavado y empleando el sistema de alimentación de agua desmineralizada actual.

Cabe destacar, como resultado de la implantación de un sistema para reutilizar los condensados generados en el calentamiento de los baños de ácido, la reducción del consumo de agua desmineralizada de la línea.

La disminución del consumo de agua desmineralizada lleva aparejada una disminución de las aguas residuales generadas proporcional. Además, dado el poder calorífico asociado a los condensados, el consumo de vapor de la línea también se reducirá, puesto que la temperatura de los mismos está en torno a 50° C, que es la temperatura necesaria para la realización de un correcto lavado de la banda.

Lo comentado hasta ahora permite desarrollar el proceso de decapado de una forma más eficiente desde el punto de vista energético y respetuoso con el medio ambiente, de acuerdo con la política general de la empresa. Sin embargo, una reducción del consumo de agua desmineralizada en la línea contribuye de forma directa en una disminución del consumo de agua de aportación a la planta y de vertido al mar. La disminución del consumo de vapor favorece el empleo de menor cantidad de gas natural y agua desmineralizada para su obtención. Así como, una reducción de emisiones de gases de combustión a la atmósfera.

7. BIBLIOGRAFÍA

Abe S.I.; *Development of energy saving technology for continuous annealing furnace of stainless steel strip*; Energy utilization in the iron and steel industry, Singapore, Vol 30 (1984) 1-12.

Baghban S.H., Majodeian G.R.; *Waste heat recovery using heat pipe heat exchanger (HPHE) for surgery rooms in hospitals*; Applied Thermal Engineering; Vol. 20, Issue 14 (2000) 1271-1282.

Bassam G. Jabboury, Mohamed A. Darwish; *The effect of the operating parameters of heat recovery steam generators on combined cycle/sea-water desalination performance*; Geat recovery systems and CHO, Vol. 10, Issue 3 (1990) 255-267.

Casarosa C., Donatini F., Franco A.; *Thermoeconomic optimization of heat recovery steam generators operating parameters for combined plants*; The Internacional Congreso of Efficiency, Costs, Optimization, Simulation and Environmental Aspects of Energy Systems and Process; Vol. 29 Issue 3 (2004) 389-414.

Franco A., Russo A.; *Combined cycle plant efficiency increase based on the optimization of the heat recovery steam generator operating parameters*; International Journal of Thermal Sciences, Vol. 41 Issue 9 (2002) 843-859.

Henríquez Barzola, J.A.; *Sistema de recuperación y reutilización de condensados en la central termoeléctrica Ingeniero Gonzalo Cevallos Guzmán*. Guayaquil; Escuela Superior Politécnica del Litoral (1983) 130-140.

Laither J., Ruth M., Worrel E.; *Incorporating the productivity benefit into the assessment of cost effective energy savings potential using conservation supply curves*; Lawrence Berkeley National Laboratory (2001).

Özdemir T., Öztin C., Kincal N.S.; *Treatment of waste pickling liquors: process synthesis and economic analysis*; Chemical Engineering Communications, Vol 193, Number 5 (2006) 548-563.

Reddy B.V., Ramkiran G., Kumar K.A., Nag P.K.; *Second law analysis of a waste heat recovery steam generator*; International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 45 Issue 9 (2002) 1807-1814.

Robinson V.; *Bolier blowdown heat recovery Project reduces steam system energy losses at Augusta Newprint*; Office of Industrial Technology Energy Efficiency (2002).

Schmidtke N.W., Averill D.W.; *Steel industry wastes*; Journal of Water Pollution Control Federation; Vol. 50 Issue 6 (1978) 12 60-1269.

Villacrés J, Andrade F.; *Ahorro energético en el sistema de recuperador de condensados en una planta industrial en Guayaquil utilizando surge tank*; Escuela Superior Politécnica del Litoral (2008).

Watanabe T., Nakazato Y., Sato R.; *An outline of the stainless steel continuous annealing and pickling line at Chiba works*; Kawasaki Steel Technical Report; 16 (1984) 109-115.

Yunchao S., Mingzhong Y.; *Geothermal and waste heat recovery steam turbine*; Proceedings of the Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Vol. 5 (1989) 2155-2159.

Información técnica:

Calderas y accesorios. Spiraxsarco.

Conservación de la energía en sistema de vapor. Spiraxsarco.

Descripción técnica de los equipos del departamento de Energías.

Distribución del vapor. Spiraxsarco.

Guía de vapor para la industria. Comisión Nacional para el Ahorro de la Energía, 2002.

Las trampas para vapor y eliminación del condensado. Spiraxsarco.

Manual del proceso de Decapado, 2000.

Prevención y control integrados de la contaminación (IPPC). Documento de referencia de Mejores Técnicas Disponibles en la Industria de Procesos de Metales Férricos. Ministerio de Medio Ambiente, 2006.

Principios básicos de la ingeniería del vapor. Spiraxsarco.

Libros:

Taborek J., Rose J., Tanasawa I.; *Condensation and condenser design: proceedings of the Engineering Foundation Conference on Condensation and Condenser Design*; St Augustin, Florida, 1993.

Alarcó Bort, V.; *Diseño de líneas de vapor y condensados en una fábrica de cartón ondulado*; Valencia, UPV, 2007.

Hung Y.; *Waste treatment in the metal manufacturing, forming, coating, and finishing industries*. International Standard Book, 2009.

Shenoy U.V.; *Heat exchanger network synthesis. Process optimization by energy and resources analysis*; Texas, 1995; ISBN: 088145-319-6.

Proyectos Final de Carrera:

Alvares Bustos P.J.; Instalación de un sistema de recirculación de agua y selección de sistemas de trampas de condensado en compañía de cervezas nacionales; Escuela Superior Politécnica del Litoral (Guayaquil, Ecuador); Facultad de Ingeniería Mecánica Ciencias de la producción (2005).

Camacho Fuentes M.F; *Definición de la alternativa más viable para la recuperación del condensado del D-2503 de la planta DEMEX y del D-2604 de la planta hidrógeno del departamento de refinación de fondos de la GRB ECOPETROL S.A.*; Universidad Industrial de Santander; Facultad de ingenierías Física Química; Escuela de Ingeniería Química Bucaramanga (2009).

Hernández Matiz A.M.; *Ahorro y uso eficiente del recurso agua en una empresa del sector de aceites y grasas vegetales*; Universidad De La Salle; Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria; Bogotá (2007).

Pinelo Cambranes J.E.; *Readecuación de la red de distribución de vapor y retorno de condensado en el hospital regional San Benito (Petén)*; Universidad de San Carlos de Guatemala; Facultad de Ingeniería (2006).

Quan Hidalgo J.; *Propuesta y estudio del mejoramiento de operación del sistema de almacenamiento de condensado, en el tanque de alimentación de las calderas del hospital Roosevelt*; Universidad de San Carlos de Guatemala; Facultad de Ingeniería (2006).

Patentes:

Bundin K., Gasteiger G.; *Process for starting up a heat exchanger system for steam generation and heat exchanger system for steam generation*; Patent number: 5189988 (1993).

Kremm G.F.; *Process for pickling metal*; Patent number: 3443991 (1969).

Smith E.M., Wyncote P., Cornelison R.V., Ohio H.; *Waste heat recovery system*; Patent number: 197530 (1988).

Páginas web:

- www.stilar.net (Fecha de consulta: 16/09/09).
- www.cosmoca.com (Fecha de consulta: 22/09/09).
- www.steamcontrol.com (Fecha de consulta: 22/09/09).
- www.econormas.com (Fecha de consulta: 30/08/08).
- www.etseq.urv.es (Fecha de consulta: 31/08/09).
- www.seditesa.com (Fecha de consulta: 12/09/09).
- www.flowserve.com (Fecha de consulta: 12/09/09).

ANEJO: NORMATIVA APLICABLE

Ley 2/2006, de 5 de mayo, de Prevención de la Contaminación y Calidad Ambiental.

Decreto 40/2004, de 5 de marzo, del Consell de la Generalitat, por el que se desarrolla el régimen de prevención y control integrados de la contaminación en la Comunidad Valenciana.

Decreto 127/2006, de 15 de septiembre, por el que se desarrolla la Ley 2/2006, de 5 de mayo, de la Generalitat, de Prevención de la Contaminación y Calidad Ambiental.

Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación.

Directiva 2006/11/CEE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de febrero de 2006, relativa a la contaminación causada por determinadas sustancias peligrosas vertidas en el medio acuático de la Comunidad.

RD 508/2007, de 20 de abril, por el que se regula el suministro de información sobre emisiones del Reglamento E-PRTR y de las autorizaciones ambientales integradas.

RD 509/2007, de 20 de abril, por el que se aprueba el Reglamento para el desarrollo y ejecución de la Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación.

Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera.

Decreto 833/1975, de 6 de febrero, por el que se desarrolla la Ley 38/1972 de Protección del Ambiente Atmosférico.

Ordenanza Municipal de Protección del Medio Ambiente Atmosférico.

Reglamento (CE) nº 2037/2000 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 29 de junio de 2000, sobre las sustancias que agotan la capa de ozono.

Orden PRE/3420/2007, de 14 de noviembre, por la que se publica el Acuerdo de Consejo de Ministros por el que se aprueba la asignación individual de derechos de emisión de gases de efecto invernadero en las instalaciones incluidas en el Plan Nacional de Asignación de derechos de emisión de gases de efecto invernadero 2008-2012.

RD 1420/2007, de 29 de octubre, por el que se modifica el RD 1370/2006, de 24 de noviembre, por el que se aprueba el Plan Nacional de Asignación de derechos de emisión de gases de efecto invernadero 2008-2012.

RD 1030/2007, de 20 de julio por el que se modifica el RD 1370/2006, de 24 de noviembre, por el que se aprueba el Plan Nacional de Asignación de derechos de emisión de gases de efecto invernadero, 2008-2012.

RD 1370/2006, de 24 de noviembre, por el que se aprueba el Plan Nacional de Asignación de derechos de emisión de gases de efecto invernadero, 2008-2012.

Orden de 18 de octubre de 1976, sobre prevención y corrección de la contaminación industrial de la atmósfera.

Ley 11/2005, de 22 de junio, por la que se modifica la Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional.

Directiva 2006/11/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de febrero de 2006, relativa a la contaminación causada por determinadas sustancias peligrosas vertidas en el medio acuático de la Comunidad.

Ley 2/1992, de 26 de marzo, de Saneamiento de las Aguas Residuales de la Comunidad Valenciana.

RD 1112/1992 de 18 de octubre, por el que se modifica parcialmente el Reglamento General para desarrollo y ejecución de la Ley 22/88 del 28 de junio, de Costas, aprobado por el RD 1471/89 de 1 de diciembre.

RD 1471/1989, de 1 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento General para desarrollo y ejecución de la Ley 22/1988 de 28 de julio, de Costas.

Ley 22/1988, de 28 de julio, de Costas.

Directiva 2006/11/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de febrero de 2006, relativa a la contaminación causada por determinadas sustancias peligrosas vertidas en el medio acuático de la Comunidad.

Orden de 13 de julio de 1993, por la que se aprueba la Instrucción para el proyecto de conducciones de vertidos desde tierra al mar.

RD258/1989, de 10 de marzo, por el que se establece la normativa general sobre vertidos de sustancias peligrosas desde tierra al mar.

Ordenanza de prevención de la contaminación del mar en el litoral.

ANEJO: ABREVIATURAS

MTD: Mejores Técnicas Disponibles.

TBC: Tren de Bobinado en Caliente.

HCl: Ácido clorhídrico.

Fe: Hierro.

ARI: Agua residual industrial.