

Proyecto Fin de Carrera

Ingeniería química

Estudio y optimización de la planta de tratamiento
de aguas de la central térmica Teruel

Autor

Marcos Galve Guillén

Director y ponente

José Alfredo Tomás Tello
M^a Peña Ormad Melero

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
Departamento de Ingeniería y Medio ambiente.
Septiembre 2013

Agradecimientos

En primer lugar quiero dar las gracias a mi familia y a mi novia, porque por ellos he llegado hasta aquí, por su trabajo, su esfuerzo y su paciencia sin los cuales no hubiera tenido la oportunidad de estar donde estoy.

Por supuesto, a mis amigos y compañeros de la carrera, gracias por escucharme y por animarme siempre cuando lo he necesitado, sin ellos estos cinco años no hubieran sido lo mismo.

A Alfredo Tomás por darme la posibilidad de realizar este proyecto en la central térmica de Andorra, y a M^a Peña Ormad, por dirigirme el proyecto desde la universidad. Gracias a ellos también por su disposición y por todo el tiempo que han dedicado desde el primer día. Por facilitarme las cosas siempre que ha sido posible y por su apoyo, de nuevo, gracias

A todos los compañeros de la central térmica de Andorra, en especial a Beatriz y José Luis por permitirme y ayudarme a realizar este proyecto, en esa gran empresa.

Gracias a todos.

“Estudio y optimización de la planta de tratamiento de aguas de la central térmica Teruel.”

Resumen

Este proyecto se desarrolla en el departamento químico de la central térmica de Andorra (Teruel), en colaboración con el departamento de ingeniería química y tecnología del medio ambiente de la Universidad de Zaragoza.

Es conocido que la formación de incrustaciones en el interior de las calderas es uno de los principales problemas que pueden darse en las calderas de las centrales térmicas. El origen de las mismas está dado por las sales presentes en las aguas de abastecimiento a los generadores de vapor, principalmente carbonato de calcio, hidróxido de magnesio, sulfato de calcio y sílice.

Para evitar este problema en la central térmica de Andorra y asegurar la calidad del agua de alimentación y utilizada en las calderas, se lleva a cabo un tratamiento de desmineralización del agua a través de una serie de etapas, dentro de las cuales se incluye una precipitación química en un decantador, y una desmineralización en las resinas de intercambio. La precipitación se lleva a cabo utilizando hidróxido sódico (sosa), tratamiento que consigue reducir considerablemente la dureza del agua.

Este producto, ha visto incrementado su precio en el mercado notablemente durante los últimos años lo que ha supuesto un incremento importante en los costes del tratamiento del agua por lo que se estudia la aplicación del proceso de ablandamiento con cal sodada para analizar el coste asociado que conlleva la sustitución de este.

Así mismo, la regeneración de las resinas de intercambio iónico mediante sosa y ácido sulfúrico suponen también unos elevados costes en el tratamiento, por lo que se realiza un estudio para minimizar este gasto y reducir así los costes del tratamiento.

Los resultados obtenidos en este trabajo han permitido comprobar que debido a la dureza de los carbonatos del agua de aporte a la central térmica de Andorra, el coste del tratamiento de ablandamiento de agua mediante cal-carbonato sódico es ligeramente superior al coste de tratamiento mediante sosa.

Por otro lado se llega a la conclusión de que las resinas de intercambio están en un estado de deterioro lo que supone que tengan un consumo de reactivos para su regeneración muy superior al que deberían, encareciendo con ello los costes del tratamiento, por lo que se proponen medidas a llevar a cabo para reducir estos costes, como puede ser el realizar una inversión para renovar dichas resinas lo que supondría una importante reducción en los costes de tratamiento entre otras.

INDICE

Memoria

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
2. PROBLEMÁTICA ASOCIADA A LAS INCRUSTACIONES.....	3
2.1. Naturaleza y origen de las incrustaciones.....	3
2.1.1. Definición y tipos de incrustaciones	3
2.1.2. Química de formación de incrustaciones	4
2.1.3. Factores que influyen en la formación de incrustaciones	5
2.2. Evaluación del poder incrustante de las aguas	6
2.3. Ablandamiento de aguas mediante productos químicos	8
2.3.1. Generalidades	8
2.3.2. Química del ablandamiento del agua	8
3. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA DE DESMINERALIZACIÓN DE LA CENTRAL TÉRMICA DE ANDORRA.....	13
4. PROCEDIMIENTO Y PLANIFICACIÓN EXPERIMENTAL	15
4.1. Muestras	15
4.2. Metodología de caracterización de muestras	16
4.3. Ensayos de tratamiento	17
4.3.1. Reactivos	17
4.3.2. Instrumentación.....	17
4.3.3. Descripción del procedimiento experimental de ablandamiento	18
4.4. Planificación experimental.....	19
4.4.1. Variables a estudiar e intervalos de operación.....	19
4.4.2. Planificación de experimentos a realizar.....	20
5. RESULTADOS	21
5.1. Resultados de caracterización del agua de aporte al decantador y agua de salida del mismo.	22

5.2. Proceso de ablandamiento con sosa	23
5.2.1. Primeros ensayos tentativos	23
5.2.2. Estudio de la influencia del pH	24
5.2.3. Optimización del pH de trabajo y de la cantidad de sosa	25
5.2.4. Estimación de la cantidad de reactivos utilizada en el tratamiento óptimo con sosa.....	26
5.3. Proceso de ablandamiento con cal.....	27
5.3.1. Estudio de la influencia del pH	27
5.3.2. Optimización de la concentración de cal	28
5.3.3. Estimación de la cantidad de reactivos utilizada en el tratamiento óptimo con cal	29
5.4. Proceso de ablandamiento con cal + carbonato sódico	29
5.4.1. Estudio de la influencia de la concentración de carbonatosódico	29
5.4.2. Optimización de la concentración de carbonato sódico	30
5.4.3. Estimación de la cantidad de reactivos utilizada en el tratamiento óptimo con cal + carbonato sódico.....	32
5.5. Volumen de fangos generados y humedad	33
5.6. Consumo de sosa y ácido sulfúrico en el resto de la planta de tratamiento de agua de la central térmica	34
6. ANÁLISIS DE COSTES.....	37
6.1. Costes comparativos de tratamiento	37
6.1.1. Coste del tratamiento con sosa	37
6.1.2. Coste del tratamiento con cal + carbonato sódico.....	38
6.2. Costes de la regeneración de las resinas	39
6.3. Coste de renovación de las resinas	40
7. RESUMEN Y CONCLUSIONES	43
8. BIBLIOGRAFÍA	47

Anexos

ANEXO I. DUREZA Y ALCALINIDAD DEL AGUA	49
i. Dureza del agua.....	51
ii. Cálculo de la dureza total y cálcica del agua.....	52
a. Cálculo de la dureza total	52
b. Cálculo de la dureza cálcica.....	53
iii. Alcalinidad del agua	54
iv. Cálculo de la alcalinidad del agua	55
ANEXO II. ÍNDICE DE LANGUELIER.....	57
i. Índice de Langelier	59
c. Método gráfico	60
d. Método numérico	61
ii. Ejemplo de cálculo de índices de saturación	63
iii. Datos de evolución del poder incrustante del agua de abastecimiento con la temperatura en 2008	64
ANEXO III.EL CICLO DEL AGUA EN LA CENTRAL TÉRMICA DE ANDORRA	73
i. INTRODUCCIÓN	75
ii. CAPTACIÓN	76
iii. PRETRATAMIENTO.....	76
a. Ideas de los procesos de: coagulación, sedimentación y ablandamiento	76
b. Etapas del pretratamiento.....	77
iv. DESMINERALIZACIÓN PRIMARIA	83
a. Principios elementales y generalidades.....	83
b. Elementos básicos de cada intercambiador.....	86
c. Regeneración cadena primaria	87

d.	Parámetro de control	88
v.	DESMINERALIZACIÓN SECUNDARIA	88
	Principios elementales y generalidades	88
a.	Elementos básicos de un ionexer	89
b.	Regeneración de los ionexers.....	90
c.	Parámetros de control y producción.-	90
vi.	BALSA NEUTRALIZACIÓN	91
a.	Operación de la instalación	91
vii.	AGUA DESMINERALIZADA.....	92
	ANEXO IV. MEDIDA DE SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN	93
	ANEXO V. RESULTADO EXPERIMENTALES	97
i.	Análisis del agua de aporte al decantador y agua de salida del mismo	100
ii.	Proceso de ablandamiento con sosa	101
iii.	Proceso de ablandamiento con cal.....	103
iv.	Proceso de ablandamiento con cal + carbonato sódico	104

Índice de Figuras

Figura 1: Incrustaciones en tubos de humo	3
Figura 2: Caracterización de aguas según Índices de saturación [Deg89]	7
Figura 3: Esquema del proceso de desmineralización de la central.	13
Figura 4: Jar test.....	17
Figura 5: Esquema planificación experimental	20
Figura 6: Puesta en marcha. Ablandamiento de agua con sosa. Variable: pH.....	23
Figura 7: Resultados ablandamiento de agua con sosa. Variable: pH 8-11	24
Figura 8: Ablandamiento de agua con sosa. Optimización del pH de trabajo (Febrero)	25
Figura 9: Ablandamiento de agua con sosa. Optimización de la concentración de sosa utilizada (Mayo).....	26
Figura 10: Ablandamiento de agua. Método de la cal sola. Variable pH.....	27
Figura 11: Ablandamiento de agua. Método de la cal. Optimización de la concentración de cal.....	28
Figura 12: Resultados de ablandamiento de agua con cal + carbonato sódico. Variable: Rango de concentración de carbonato sódico.....	30
Figura 13: Ablandamiento de agua con cal + carbonato sódico. Optimización de la concentración óptima de trabajo (Febrero).....	31
Figura 14: Ablandamiento de agua con cal + carbonato sódico. Optimización de la concentración óptima de trabajo (Mayo).....	31

Figura 15: Consumo de sosa/ácido en cada regeneración, en función del tiempo de regeneración.	34
Figura 16: Diagrama de Langelier	62
Figura 17: Cálculo índice de Langelier para el año 2008	72
Figura 18: Esquema de la planta completa	76
Figura 19: Decantador ACCELATOR	77
Figura 20: Decantador ACCELATOR	78
Figura 21: Filtros de gravedad	80
Figura 22: Filtros de carbón activo	82
Figura 23: Filtro de carbón activo a presión	82
Figura 24: Cadenas de caterxers y anexers	84
Figura 25: Cadenas de anexers	85
Figura 26: Cadenas de ionexers	89

Índice de Tablas

Tabla 1: Resultado de caracterización del agua de aporte a la planta.....	15
Tabla 2: Características de los reactivos.....	17
Tabla 3: Variables estudiadas en el proceso de ablandamiento.....	19
Tabla 4: Variables fijadas en el proceso de ablandamiento.....	19
Tabla 5: Análisis del agua de aporte al decantador Accelator.....	22
Tabla 6: Análisis del agua de salida del decantador Accelator	22
Tabla 7: Cantidad de sosa para el ablandamiento por este método en el laboratorio	26
Tabla 8: Cantidad de sosa para el ablandamiento de agua por este método en la central térmica	27

Tabla 9: Cantidad de cal para el ablandamiento por este método en el laboratorio	29
Tabla 10: Cantidad de carbonato sódico para el ablandamiento por este método en el laboratorio	32
Tabla 11: Volumen de fangos generados por los procesos de ablandamiento con sosa y cal + carbonato sódico	33
Tabla 12: Humedad de los fangos generados	34
Tabla 13: Gasto de sosa en función del tiempo de regeneración de la resina aniónica	36
Tabla 14: Gasto de ácido en función del tiempo de regeneración de la resina catiónica.....	36
Tabla 15: Coste del tratamiento de ablandamiento de agua con sosa.....	38
Tabla 16: Coste del tratamiento de ablandamiento de agua con cal + carbonato sódico	38
Tabla 17: Coste anual de sosa en la regeneración de la resinas aniónicas	39
Tabla 18: Coste anual del ácido en la regeneración de la resinas catiónicas.....	39
Tabla 19: Estudio económico del ahorro anual estimado con la renovación de las tres cadenas de resinas	40
Tabla 20: Tipos de dureza.....	52
Tabla 21: Datos analíticos de caracterización de agua de aporte del año 2008 y resultados	65
Tabla 22: Análisis agua de entrada y de salida del decantador Accelerator	100

Tabla 23: Ablandamiento de agua con sosa.	101
Tabla 24: Ablandamiento de agua con cal.....	103
Tabla 25: Ablandamiento de agua con cal + carbonato sódico	104

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La presente memoria fundamenta el proyecto fin de carrera y que lleva por título: “Estudio y optimización de la planta de tratamiento de aguas en la central térmica Teruel”. Este proyecto se desarrolla en el departamento químico de la central térmica de Andorra (Teruel), en colaboración con el departamento de ingeniería química y tecnología del medio ambiente de la Universidad de Zaragoza.

Este trabajo surge de la necesidad de optimizar la planta de tratamiento de aguas de la central térmica de Andorra, con el fin principalmente de disminuir los elevados costes del tratamiento químico actual que se emplea, para el acondicionamiento del agua de entrada a calderas.

Es conocido que la formación de incrustaciones en el interior de las calderas es uno de los principales problemas que pueden darse en las calderas de las centrales térmicas. El origen de las mismas está dado por las sales presentes en las aguas de abastecimiento a los generadores de vapor, principalmente carbonato de calcio, hidróxido de magnesio, sulfato de calcio y sílice; las incrustaciones formadas poseen una conductividad térmica muy baja y se forman con mucha rapidez en los puntos de mayor transferencia de temperatura, por lo que resulta un problema operacional.

Para evitar este problema en la central térmica de Andorra y asegurar la calidad del agua de alimentación y utilizada en las calderas, se lleva a cabo un tratamiento de desmineralización del agua a través de una serie de etapas, dentro de las cuales se incluye una precipitación química en un decantador. La precipitación se lleva a cabo utilizando hidróxido sódico (sosa), tratamiento que consigue reducir considerablemente la dureza del agua.

Este producto, ha visto incrementado su precio en el mercado notablemente durante los últimos años lo que ha supuesto un incremento importante en los costes del tratamiento del agua.

Así mismo, la regeneración de las resinas de intercambio iónico mediante sosa y ácido sulfúrico suponen también unos elevados costes en el tratamiento.

Por ello, el objetivo principal de este proyecto es el estudio de alternativas de reactivos y/o operación que permitan reducir la dureza eficazmente pero con un menor coste asociado.

En concreto se estudia la aplicación del proceso de ablandamiento con cal sodada. El proceso consiste en la adición de hidróxido cálcico reduciendo la dureza de bicarbonatos por precipitación de la alcalinidad de calcio como carbonato de calcio, y la alcalinidad de magnesio como hidróxido de magnesio, así como la adición de carbonato sódico (soda ash), reduciendo la dureza de no carbonatos además de la de bicarbonatos.

Este objetivo principalmente se desarrolla en los siguientes secundarios:

- 1) Estudio del origen de las incrustaciones: calidad del agua de abastecimiento, determinación del poder incrustante y/o corrosivo.
- 2) Estudio de la planta de tratamiento de la central térmica Teruel.
- 3) Búsqueda de alternativas de tratamiento.
- 4) Parte experimental: Aplicación de los tratamientos a escala de laboratorio. Estudio de influencia de variables.
- 5) Análisis de calidad del agua tratada y fangos generados.
- 6) Análisis de costes.

2. PROBLEMÁTICA ASOCIADA A LAS INCRUSTACIONES

2.1. Naturaleza y origen de las incrustaciones

2.1.1. Definición y tipos de incrustaciones

En todas las aguas naturales, debido a su alto poder disolvente, existe presencia de sustancias que pueden generar problemas de funcionamiento en una caldera, ya que repercuten en su rendimiento, en la calidad del vapor, en su conservación, duración y en la seguridad personal, puesto que incluso en algunas ocasiones pueden ser causa de explosiones. Dichas impurezas se suelen clasificar en tres grandes grupos:

- Materiales / sólidos en suspensión: Pueden ser muy diversas, tanto por su naturaleza (arena, arcilla, restos de roca; metales, materia orgánica), como por su tamaño.
- Sustancias disueltas: Algunas materias orgánicas y fundamentalmente sales minerales (iones calcio, magnesio, sodio, potasio, hierro, bicarbonatos, cloruros, sulfatos, nitratos).
- Gases: Oxígeno, anhídrido carbónico, nitrógeno, amoníaco.



Figura 1: Incrustaciones en tubos de humo

Los depósitos pueden presentarse en cualquier conducto de agua, dispositivo que emplee agua o tanque de almacenamiento y son, en términos simples, la acumulación de sedimentos o sólidos asentados que se fijan en algún punto del sistema donde la velocidad del agua disminuye a un nivel tan bajo que no es capaz de arrastrar al material en la corriente.

Sin embargo, un depósito no suele estar formado por un único componente, sino que es casi siempre una acumulación de materiales que sedimentan conjuntamente sobre una superficie, constituyendo, al final, una incrustación.

Los precipitados de sales de calcio y magnesio forman incrustaciones de gran densidad, así como los lodos adherentes, difíciles de eliminar. Estas sales son las encontradas con mayor frecuencia en incrustaciones en equipos, como pueden ser las calderas de las centrales térmicas y líneas de circulación (figura 1). Además presentan una importante capacidad aislante, de forma que terminan afectando a la eficiencia en procesos de calentamiento enfriamiento. [Pro03].

2.1.2. Química de formación de incrustaciones

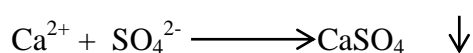
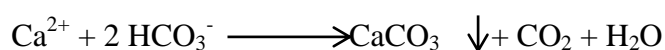
La mayoría de los depósitos observados en unidades de tratamiento y operación se han asociado tradicionalmente a las sales de Ca^{2+} y Mg^{2+} , responsables de la dureza del agua, parámetro fundamental en el presente proyecto, por lo que se detalla con mayor profundidad en el Anexo I. Además, conforme se van utilizando sistemas más complejos y condiciones de funcionamiento más extremas (temperaturas y presiones más elevadas), el papel desempeñado por ciertas impurezas presentes en el agua, como el hierro, la sílice, o el cobre, en la formación de incrustaciones también se intensifica [Dre 94].

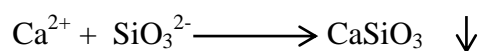
La concentración de sales de magnesio en aguas de proceso es normalmente inferior a la de sales de calcio. Debido a que, además, la solubilidad de estas últimas es mucho menor, es lógico observar precipitación de sales de calcio antes que de compuestos de magnesio, que presentan una menor tendencia a la formación de incrustaciones.

Las reacciones de precipitación de sales de Calcio y Magnesio son las siguientes:

A) Sales de Calcio

Si el agua de alimentación contiene bicarbonatos, carbonatos, sulfatos, cloruros u otros aniones, el calcio presente puede llegar las siguientes reacciones químicas, produciéndose diversos compuestos insolubles.

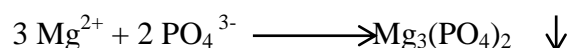
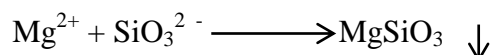
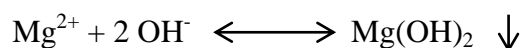




Así, la formación de carbonato, sulfato y silicato de calcio adquiere una elevada probabilidad en sistemas que tratan agua con estos componentes en disolución. Cada uno de los precipitados anteriores se forma in situ y va aglomerándose en las superficies hasta alcanzar la estructura cristalina definitiva y convertirse en una incrustación, que constituirá una inhibición para el proceso de transferencia de calor.

B) Sales de Magnesio

El magnesio disuelto en el agua, por su parte, también puede reaccionar con otros componentes produciéndose otros compuestos insolubles, según se indica a continuación.



C) Depósitos de sílice y silicatos

Debido a que el silicio es el segundo elemento con mayor presencia en la corteza terrestre, muchas aguas naturales incorporan sales de silicio, que a lo largo de los usos industriales pueden precipitar como componentes de incrustaciones. La sílice en aguas naturales puede encontrarse disuelta o en forma de partículas coloidales. La sílice soluble se caracteriza por su gran reactividad y puede formar una importante variedad de silicatos de estructura compleja. Así, a elevadas temperaturas es frecuente encontrar serpentina, $2\text{MgSiO}_3 \cdot \text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, y astonita, CaSiO_3 .

D) Depósitos de otras sales

Muchas aguas de abastecimiento incorporan ciertas cantidades de hierro disuelto en su composición, además de fosfatos de hierro y zinc que son extremadamente insolubles [Pro03].

2.1.3. Factores que influyen en la formación de incrustaciones

Los principales factores que influyen en la formación de depósitos incrustantes en equipos de procesado y tratamiento aguas son [Dre94]:

- *La temperatura de funcionamiento*, que, en casos de temperaturas elevadas, hace precipitar a aquellos compuestos cuya solubilidad es inversamente proporcional a la temperatura de la disolución.
- *La composición del agua alimentada*, donde algunos compuestos pueden estar presentes en concentraciones superiores a su límite de solubilidad a una temperatura determinada, promoviendo su precipitación en las zonas de mayor concentración.
- *El pH del agua*, que puede favorecer el desplazamiento de los equilibrios ácido base hacia la formación de especies iónicas con mayor tendencia a precipitar, junto con ciertos metales disueltos.

La formación de incrustaciones es, por tanto, una consecuencia de las reacciones de precipitación de algunos compuestos presentes en el agua en elevadas concentraciones, que provocan una disminución del contenido de sales minerales solubles de la disolución.

El precipitado que se forma puede adoptar dos comportamientos diferentes, convirtiéndose en una incrustación o en un depósito de barros o lodos. [Pro03].

2.2. Evaluación del poder incrustante de las aguas

La caracterización del agua como corrosiva o incrustante puede realizarse teniendo en cuenta dos criterios [Pro03]:

- 1) Cantidad de CO₂ libre presente
- 2) Saturación en CaCO₃

Debido a que el carbonato de calcio es uno de los compuestos presentes en el agua en mayor cantidad y debido a su fuerte poder incrustante, la saturación del agua en CaCO₃ constituye uno de los indicadores más comunes de corrosión en incrustabilidad, por lo que es el procedimiento utilizado en el presente proyecto fin de carrera.

En la ecuación [1] se define el nivel de saturación (SL) de agua en carbonato de calcio se define como la relación entre el producto de la concentración de iones calcio y carbonato disueltos y el producto de solubilidad de la sal CaCO₃ a una determinada temperatura.

$$SL = [Ca^{2+}] * [CO_3^{2-}] / K_s \quad [1]$$

Se dice que el agua esta subsaturada si todavía es capaz de disolver más carbonato cálcico, con lo que presentará un índice de saturación inferior a la unidad y será calificada como agua corrosiva. Si por el contrario, el agua, tiene concentraciones elevadas de iones calcio y carbonato, su nivel de saturación será superior a 1 y tenderá a formar precipitados de CaCO_3 . Se tratará entonces de aguas incrustantes.

Los indicadores más utilizados para determinar el poder incrustante o corrosivo del agua son:

- 1) Índice de Langelier (LSI)
- 2) Índice de estabilidad de Ryznar (RSI)
- 3) Índice de saturación propuesto en el método 2330B de Standard Methods SI

Una vez determinado el índice de saturación correspondiente, el consiguiente carácter estimando para el agua se obtiene a partir del criterio específico de cada índice, representado en la figura 2. En el presente proyecto se emplea el índice de Langelier. El cálculo y la definición de este índice se explican detalladamente en el Anexo II.

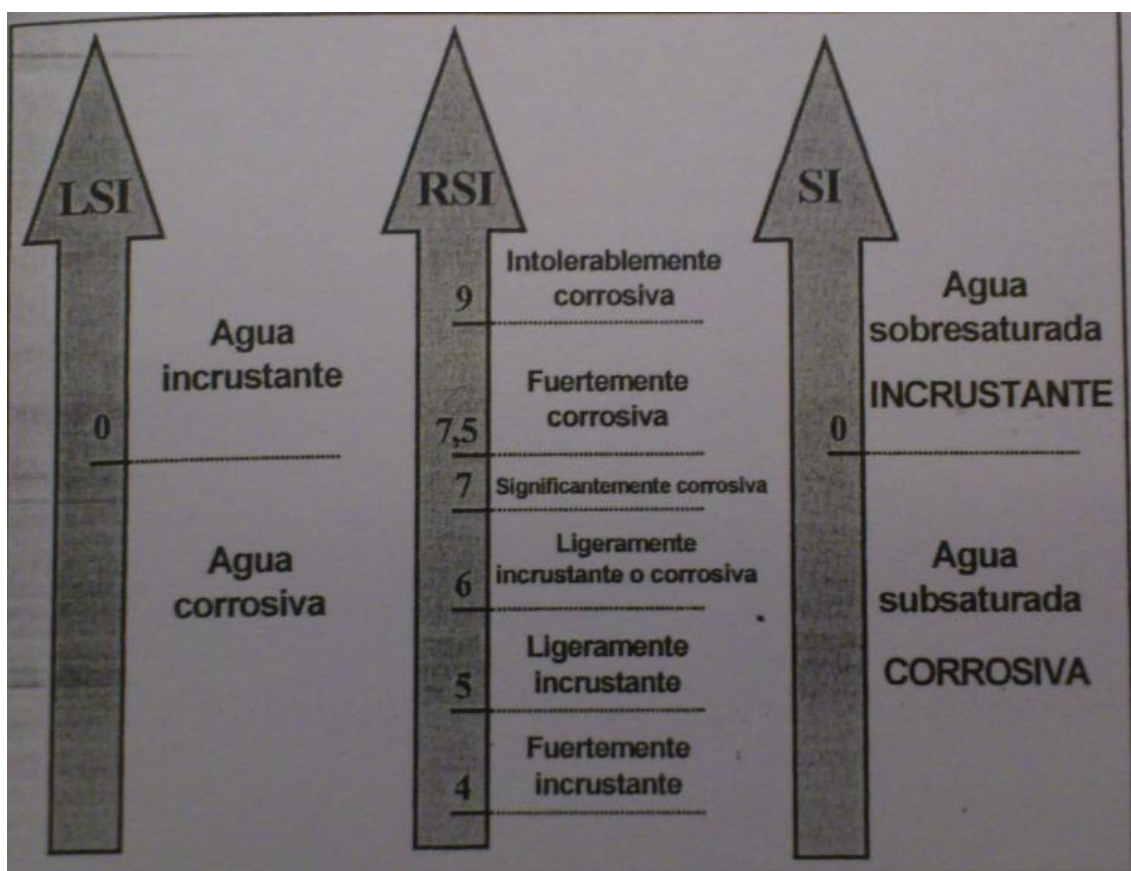


Figura 2: Caracterización de aguas según Índices de saturación [Deg89]

2.3. Ablandamiento de aguas mediante productos químicos

2.3.1. Generalidades

El ablandamiento de agua por el uso de productos químicos depende de la conversión de los compuestos solubles en el agua, que son responsables de la dureza, a compuestos insolubles, los cuales pueden entonces ser eliminados por separación mecánica.

El proceso consta de las siguientes etapas:

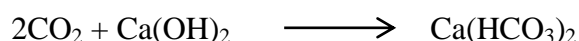
- Cálculo de las cantidades de productos químicos requeridos, basado en el análisis químico del agua bruta.
- Aplicación de los reactivos en las cantidades predeterminadas.
- Mezcla rápida de los productos químicos con el agua para efectuar una incorporación uniforme y completa, seguida de floculación preferentemente por agitación del agua por medios mecánicos.
- Sedimentación, ya sea en estado de reposo o a flujos suficientemente lentos para permitir la separación de los sólidos precipitados.
- Remoción del agua clarificada para su uso con filtración subsecuente.

2.3.2. Química del ablandamiento del agua

Para lograr una reducción de la dureza y alcalinidad del agua, se pueden utilizar dos métodos:

A) Cal-carbonato

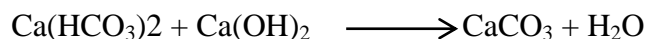
Remoción de dióxido de carbono. Antes de que pueda llevarse a cabo el ablandamiento, la cal será consumida por cualquier cantidad de dióxido de carbono libre presente en el agua:



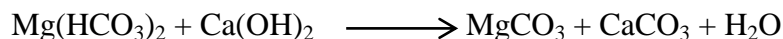
Esta primera reacción de ablandamiento produce bicarbonato de calcio en adición a la cantidad de este tipo de dureza originalmente presente en el agua.

Reducción de dureza del carbonato de calcio mediante la cal. La segunda y más importante reacción de ablandamiento de agua mediante productos químicos, es la conversión del bicarbonato soluble de calcio en carbonato insoluble, en cuya forma es eliminado por sedimentación y filtración. Esto se lleva a cabo por adición de cal en

cantidad suficiente para reaccionar el CO_2 libre, después de lo cual una adición complementaria de cal precipita el carbonato de acuerdo con la siguiente reacción:

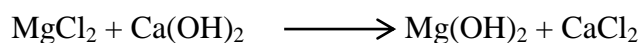
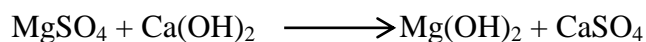


En caso de encontrarse presentes bicarbonatos de magnesio y sodio, el consumo de cal para tratamiento completo se incrementará debido a las siguientes reacciones:



Los carbonatos de sodio y magnesio, formados por las reacciones anteriores, son solubles y no precipitan. Por tanto, la cantidad adicional de cal empleada no remueve directamente una cantidad equivalente de dureza. Sin embargo, los carbonatos solubles que se forman favorecen el desarrollo del proceso a causa del exceso de estos carbonatos solubles que se producen.

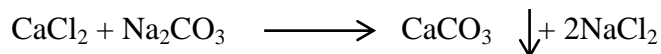
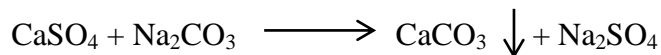
Reducción de la dureza de magnesio con cal. En la tercera reacción del ablandamiento químico, la cal precipita al hidróxido de magnesio:



El carbonato de magnesio, soluble, ha utilizado ya un equivalente de cal en su formación a partir de bicarbonato de magnesio, como se muestra en la ecuación precedente y requiere un segundo equivalente para su conversión a hidróxido. El sulfato o cloruro de magnesio cuando se precipita con cal, produce la sal correspondiente de calcio, la cual incrementa en forma correspondiente la dureza no-carbonato de calcio del agua.

En general, puede dejarse en solución la dureza de magnesio, o bien, ser eliminada por la adición de más cal, de acuerdo con los requerimientos del agua tratada. Sin embargo, cuando se agrega cal con el propósito de eliminar dureza de bicarbonato de calcio, también precipita algo del magnesio y esto da por resultado un consumo equivalente de cal, debiendo ser aumentada la dosis para satisfacer esta demanda.

Reducción de dureza de no-carbonatos con carbonato de sodio (soda ash). La cuarta reacción fundamental en el ablandamiento con cal-carbonato es la conversión por medio de soda ash del sulfato y cloruro de calcio, solubles, a carbonato de calcio, insoluble, en la siguiente forma:



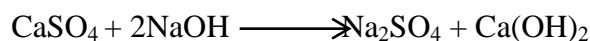
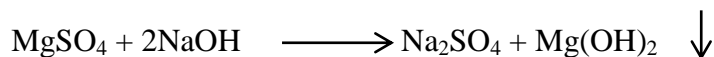
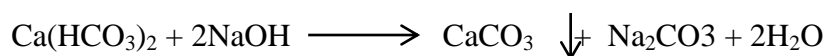
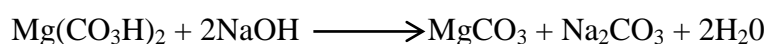
El calcio formado de este modo precipita junto con el que produce el bicarbonato de calcio.

El carbonato de sodio agregado, no sólo reduce la dureza no carbonatada de calcio, sino también, es necesario para eliminar la dureza no-carbonatada de magnesio. Esto ocurre porque el sulfato y cloruro de magnesio, al ser agregada la cal, forman una cantidad equivalente de dureza no-carbonato de calcio, la cual debe entonces ser precipitada con carbonato de sodio. En otras palabras, la dosis de soda ash debe estar basada en la cantidad total de dureza no-carbonato, y no deberá hacerse distinción entre las sales de calcio y magnesio al estimar los requerimientos del tratamiento [She70].

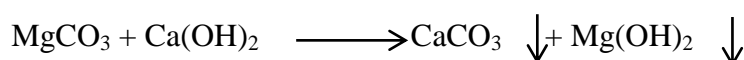
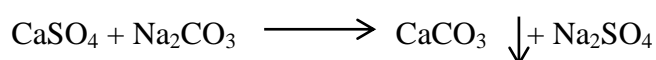
B) Sosa

La eliminación de los iones de calcio y magnesio por precipitación con sosa cáustica es una variante del proceso de tratamiento conjunto, mediante cal y carbonato sódico, que se describe en el apartado anterior.

Las reacciones básicas que se producen son las siguientes:



El carbonato sódico, la cal y el carbonato magnésico obtenidos se combinan entre sí, ya que:



Por tanto, dadas estas reacciones, al mismo tiempo que desaparece la dureza temporal también tiene lugar la desaparición de parte de la dureza permanente, ya que prácticamente las sales de calcio y magnesio nos precipitan al estado de carbonato cálcico e hidróxido de magnesio. [Man80].

Como punto de partida para realizar estos procesos de ablandamiento de aguas, es necesario calcular las dosis teóricas necesarias de reactivos para los dos procesos de ablandamiento que se estudian en el presente proyecto, lo que permite tener una primera aproximación a las cantidades óptimas a emplear en los experimentos.

A. Cálculo de la dosis de cal

Para llevar a cabo el cálculo de la dosis teórica de cal en producto puro necesaria para conseguir la precipitación óptima del carbonato cálcico se utiliza la ecuación [2] [Deg79]:

$$\text{Ca(OH)}_2 = 7.4 \cdot (\text{TAC} + \text{C}) \text{ g/m}^3 \quad [2]$$

dónde:

- TH grado hidrométrico total del agua,
- TAC grado alcalimétrico completo del agua bruta
- TCa grado hidrométrico cálcico correspondiente al contenido global de sales de calcio
- TM grado hidrométrico magnésico correspondiente al contenido global de sales de magnesio
- C contenido de ácido carbónico libre del agua, valorado en grados calculado sobre: $(\text{CO}_2 \text{ libre en mg/l}) / 4,4$
- TA grado alcalimétrico, llamado simple

Así mismo se tiene la siguiente equivalencia:

Grado francés (°fH) equivale a 10,0 mg CaCO₃/l de agua.

B. Cálculo de la dosis de carbonato sódico

Para la dosis teórica de carbonato de sodio se utiliza la ecuación 3.

$$\text{Na}_2\text{CO}_3 = 10.6 \cdot (\text{TH} - \text{TAC}) \text{ g/m}^3 \quad [3]$$

En la práctica, si se trata de un agua cuya dureza permanente es en parte magnésica, puede ser que no se cumpla esta regla, por lo que se tiene que realizar varios experimentos que permitan obtener la dosis óptima.

C. Cálculo de la dosis de sosa

Por cada grado de TAC que haya de precipitarse, la dosis será la siguiente:

$$\text{NaOH} = 8 \cdot (\text{TAC} + \text{TM} + \text{C}) \text{ g/m}^3 \quad [4]$$

Por lo que si se quieren eliminar 10° de los 12,5 que se tienen:

Este método de cálculo de dosis teóricas solo son aproximaciones orientativas que se utilizan para poder tener una idea de los rangos de concentración en los que realizar los experimentos que permiten obtener los resultados óptimos de ablandamiento de aguas.

3. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA DE DESMINERALIZACIÓN DE LA CENTRAL TÉRMICA DE ANDORRA

El esquema del proceso de desmineralización puede verse en la figura 3. El agua bruta, procedente del embalse de Calanda, en el río Guadalope, se bombea a un depósito, desde donde se alimenta por gravedad la planta, la cual se describe con más detalle en el Anexo III.

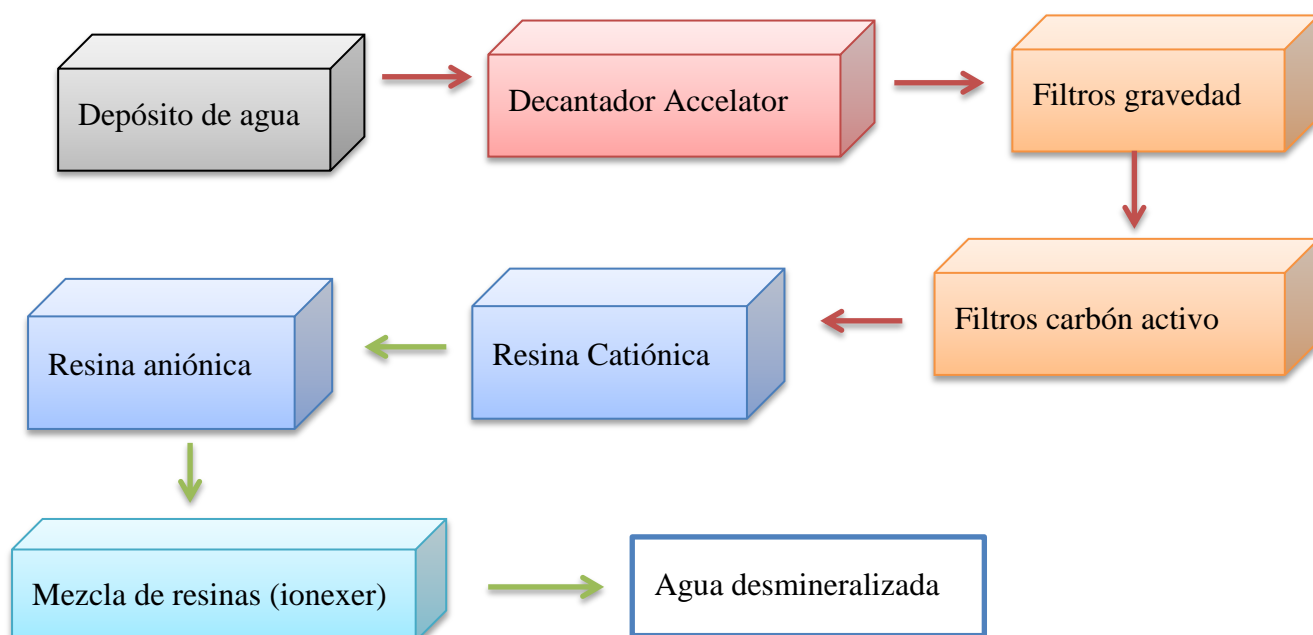


Figura 3: Esquema del proceso de desmineralización de la central.

En primer lugar el agua pasa a través de un decantador donde se producirá el ablandamiento y descarbonatación del agua a tratar. El tratamiento químico en este decantador se lleva a cabo de tal forma que se consiga la máxima reducción posible en el contenido de sólidos disueltos, utilizando una descarbonatación y eliminación consiguiente de la dureza temporal y permanente con sosa cáustica. Como coagulante para mejorar la decantación de los precipitados, se utiliza cloruro férrico.

Los consumos de reactivos en el decantador son los siguientes:

- Se utiliza una concentración de 650 gr. de sosa al 50% (densidad de la sosa 1,5 kg/litro) en peso por m³ de agua tratada en el decantador.
- Se utiliza una concentración de cloruro férrico de 63 gr /m³ rico al 100% en peso.

Seguidamente se lleva a cabo un primer filtrado en los filtros de gravedad tras los cuales se almacena en un depósito de agua filtrada. Estos filtros se componen de

una capa de antracita, una capa de arena y debajo de esta, tres capas de grava de distintas granulometrías.

Después se impulsa el agua a un segundo filtrado, en los filtros de carbón activo. Se dispone de 3 filtros de carbón activo a presión. Estos filtros tienen la función de realizar un filtrado final, antes de entrar el agua en las cadenas de desmineralización

Posteriormente, el agua llega a las cadenas de desmineralización, la cual se lleva a cabo en dos etapas:

1°. *Desmineralización primaria:* La instalación de desmineralización primaria, que consta de tres cadenas idénticas dispuestas en paralelo y cada una de ellas, formadas: por un Catexer y un Anexer, conectados en serie. En el catexer se eliminan los iones calcio y magnesio del agua filtrada. Para su regeneración se utilizara ácido sulfúrico una vez se agote esta y a contracorriente.

En el anexer el agua que ha salido del catexer se le hace pasar por el equipo de resina aniónica, que estará a su vez distribuida en dos zonas, con dos resinas aniónicas, una débil y otra fuerte, dejando los aniones. Para su regeneración se utilizara sosa cáustica, a contracorriente.

Los consumos de reactivos en la regeneración de estas resinas son los siguientes:

- Catexer: 1.06 kg de ácido al 93% en peso / m³ de agua producida
- Anexer: 1.52 kg de NaOH al 50% en peso / m³ de agua producida

2°. *Desmineralización secundaria:* La instalación de desmineralización secundaria se compone de tres ionexers. Los ionexers son cambiadores de lecho mixto de resina catiónica fuertemente ácida y resina aniónica fuertemente básica, los cuales en funcionamiento normal se encuentran en un verdadero estado de mezcla. En ellos se trata el agua desmineralizada que ha salido de las cadenas de desmineralización primarias.

Finalmente, el agua pasa al almacén de agua desmineralizada y alimentación en cantidad y calidad necesaria para los diferentes servicios.

4. PROCEDIMIENTO Y PLANIFICACIÓN EXPERIMENTAL

4.1. Muestras

El agua empleada en el presente proyecto, procede del río Guadalope, en el embalse de Calanda, agua que sirve de aporte a la central térmica de Andorra. En la tabla 1, se muestran los resultados de caracterización de dicha agua (Fuente: laboratorio EPTISA).

Tabla 1: Resultado de caracterización del agua de aporte a la planta

Fecha	Marzo	Junio	Septiembre	Diciembre	Valores de referencia		
Nº Laboratorio	AV-S8.710	AV-59.859	AV-61.184	AV-02.429	RD 849/86		
Parámetros	Resultados				Tabla 1	Tabla 2	Tabla 3
Aceites y grasas (mg/l)	< 1	< 1	< 1	< 1	40	25	20
Cloruros (mg/l)	11,5	14	14,5	11	2000	2000	2000
Conductividad a 20°C (µs/cm)	673	693	661	742
D.B.O.5 (mg/l)	< 1	< 1	2	< 1	300	60	40
D.Q.O. (mg/l)	5	< 1	9	5	500	200	160
Fluoruros (mg/l)	0,33	0,37	0,41	0,36	12	8	6
Hierro (mg/l)	0,01	< 0,01	0,01	< 0,01	10	3	2
Nitrógeno nítrico (mg/l)	1,2	1,2	0,8	0,9	20	12	10
pH in situ	8	7,9	8	8,1	5,5-9,5	5,5-9,5	5,5-9,5
Sólidos en suspensión (mg/l)	3	1	2	7	300	150	80
Sulfatos (mg/l)	230	104	225	250	2000	2000	2000
Temperatura in situ (°C)	18,4	16,1	23	8,1

Esta agua presenta una elevada dureza debido a las sales de calcio y magnesio disueltas, además de una gran alcalinidad, lo que la hace inadecuada para su uso directo en las calderas, por lo que se necesita de un tratamiento previo.

Para llevar a cabo el cálculo de la dosis teórica de cal y carbonato sódico en producto puro necesaria para conseguir la precipitación óptima del carbonato cálcico se utiliza la ecuación [2] y [3] del apartado 2.3.2.

Los parámetros de la ecuación toman los siguientes valores:

$$TH=43^\circ, TAC= 12.5^\circ, TCa=30^\circ, TM=13^\circ, C=5^\circ, TA=0^\circ$$

Por tanto la concentración teórica necesaria es:

$$Ca(OH)_2 = 7.4 \cdot (12.5+5) = 129.5 \text{ g/m}^3 = \mathbf{0.13 \text{ Kg/m}^3}$$

$$Na_2CO_3 = 10.6 \cdot (43-12.5) = 429 \text{ g/m}^3 = \mathbf{0.43 \text{ Kg/m}^3}$$

Para el cálculo de la dosis teórica por el método del ablandamiento con sosa se utiliza la ecuación [4].

$$NaOH = 8 \cdot (12.5+13+5) = 240 \text{ g/m}^3 = \mathbf{0.24 \text{ Kg/m}^3}$$

Se toma también muestras de agua a la salida del decantador de la central térmica para su posterior caracterización, lo que permite conocer el grado de dureza y alcalinidad que tiene el agua a la salida de esta etapa, parámetros fundamentales que tiene que conocerse, para obtener similares valores con los tratamientos alternativos.

4.2. Metodología de caracterización de muestras

Para una correcta caracterización del agua se procede a la medida de los siguientes parámetros:

1. *pH del agua*. Se mide el pH del agua con un pH-metro, modelo GLP 21 mediante el *method 4500-H⁺ pH value*, del Estándar Methods [Stan05].
2. *Conductividad*. Se mide la conductividad del agua con un conductivímetro Crison Basic 30, mediante el *method 2510* [Stan05].
3. *Dureza cálcica y dureza total*. Se mide la dureza cálcica y la total (ver Anexo I).
4. *Alcalinidad*. Se mide la alcalinidad por el método establecido para el kit correspondiente (ver Anexo I).
5. *Sólidos en suspensión*. Se miden los sólidos en suspensión por el método establecido. (ver Anexo IV).

4.3. Ensayos de tratamiento

4.3.1. Reactivos

En la tabla 2, se muestran las características de todos los reactivos empleados en tratamiento de ablandamiento del agua.

Tabla 2: Características de los reactivos

Reactivo	Riqueza o concentración	Disolución empleada	PM (g/mol)	Estado	Marca
$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	98% en peso	40% en peso	270,3	Sólido	PANREAC
NaOH	1M	0,25M	40,1	Líquido	PANREAC
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	90% en peso	1% en peso	74,09	Sólido	PANREAC
Na_2CO_3	99,8% en peso	5% en peso	105,99	Sólido	PANREAC
Poliacrilamida	1 ppm	-	-	Líquido	GE Water & Process technologies

4.3.2. Instrumentación

Jar Test

Se necesita un Jar Test, para realizar el procedimiento de coagulación-floculación en el laboratorio (figura 4).



Figura 4: Jar test

4.3.3. Descripción del procedimiento experimental de ablandamiento

En este apartado se describe paso a paso el procedimiento experimental seguido para un ablandamiento de agua cualquiera, de los que se llevan a cabo durante el desarrollo de este proyecto.

1. Se ponen 300 mL de agua directamente en el vaso de precipitados de 1000 mL donde se va a llevar a cabo el ablandamiento del agua.
2. Se añaden 28 µl de cloruro férrico al 40% en peso que es la dosis que se ha determinado como óptima para los 300 mL de agua, con una micropipeta.
3. Se prepara la disolución de sosa o cal y carbonato sódico, dependiendo del proceso de ablandamiento que se quiere realizar, en un matraz aforado de 100 mL.
4. Se añade la dosis que se ha determinado de carbonato sódico, en el caso en el que se vaya a llevar a cabo el ablandamiento por el método de cal-carbonato, con una micropipeta.
5. Se lleva el vaso de precipitados a una placa de agitación magnética, y comienza a agitarse a las revoluciones previamente fijadas para reducir los problemas de transferencia de materia externa.
6. Se colocan los electrodos del pH-metro midiendo en continuo dentro del vaso de precipitados, y se comienza a añadir con un cuentagotas, la sosa o la cal, dependiendo del proceso por el que se quiera ablandar el agua, hasta que se consigue el pH deseado, o se añade con una micropipeta la cantidad necesaria de cal o sosa para obtener la concentración deseada.
7. Se lleva el vaso de precipitados al Jar Test, y comienza a agitarse a las siguientes revoluciones:
 - a. 3 minutos a 200 r.p.m.
 - b. 15 minutos a 40 r.p.m.
 - c. 10 minutos de reposo

Tras el proceso de ablandamiento se mide en el agua clarificada el pH, la dureza cálcica, dureza total, alcalinidad del agua y conductividad, así como para un número

determinado de muestras, se mide en los fangos depositados, el volumen y la humedad de los mismos.

4.4. Planificación experimental

4.4.1. Variables a estudiar e intervalos de operación

La principal variable con la que se planean los experimentos llevados a cabo es la concentración de hidróxido sódico o de hidróxido cálcico utilizada (la cual proporciona un pH de trabajo distinto), así como la concentración de carbonato sódico (solo en el proceso de cal-soda ash). En la tabla 3 se observa las variables que se quieren optimizar en el proceso de ablandamiento.

Sin embargo las variables que se pueden observar en la tabla 4, también influyen en el proceso. La temperatura, un aumento de la cual disminuye la solubilidad del carbonato cálcico, la agitación, la cual es necesaria para una correcta formación de los flóculos, y la presión, se mantienen constantes debido a la imposibilidad técnica y económica de modificar estos parámetros en el decantador de la central térmica de Andorra. La concentración de cloruro férrico, determinante en la floculación, también se mantiene constante ya que se toman los valores de concentración proporcionados por el laboratorio de la central térmica.

Tabla 3: Variables estudiadas en el proceso de ablandamiento

Variable	Valor
Proceso	NaOH o $\text{Ca(OH)}_2 + \text{Na}_2\text{CO}_3$
pH	8-11
concentración de Na_2CO_3	0,1-5 kg/m ³ Na_2CO_3
Presencia polielectrolito	si / no

Tabla 4: Variables fijadas en el proceso de ablandamiento

Variable	Valor
Temperatura	Ambiente (~22 °C)
Velocidad de agitación	Jar Test
Presión	Atmosférica
Concentración cloruro férrico	0,028 Kg/m ³ FeCl al 40 % en peso

4.4.2. Planificación de experimentos a realizar

La planificación de experimentos (figura 5), se realiza de tal manera que se pueda evaluar la influencia de todas las variables indicadas en el apartado anterior sobre el grado de reducción de dureza, y con el objetivo de obtener unos intervalos óptimos de operación. Todos los experimentos se realizan por duplicado o por triplicado.

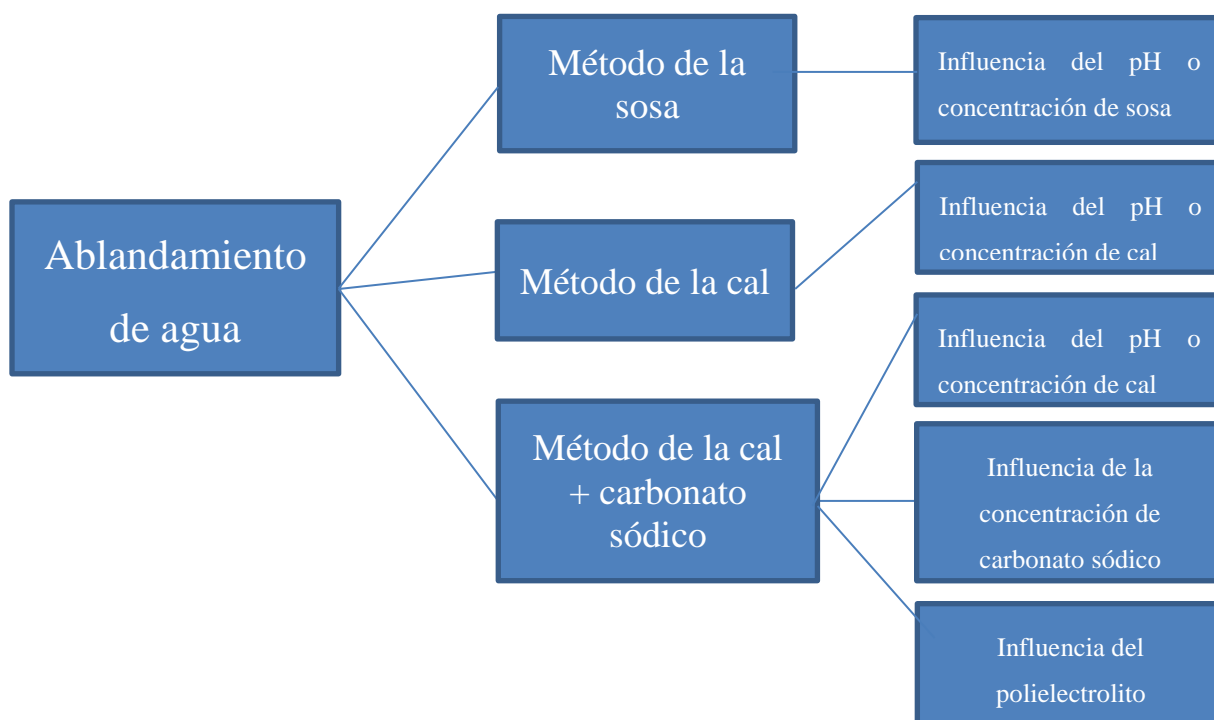


Figura 5: Esquema planificación experimental

5. RESULTADOS

En este apartado se recogen y analizan los resultados obtenidos en todos los experimentos llevados a cabo durante el desarrollo de este proyecto. Estos resultados se dividen en los siguientes bloques:

- Estudios previos y análisis del agua de aporte al decantador, y del agua de salida del mismo.
- Estudio del proceso de ablandamiento de agua y puesta en marcha del proceso de ablandamiento de agua con sosa, para reproducir en el laboratorio las condiciones que se llevan a cabo en la central térmica de Andorra.
- Estudio del proceso de ablandamiento de agua en el laboratorio únicamente con cal, y del proceso de cal + carbonato sódico.
- Volumen de fangos generados en los métodos de la sosa y de cal + carbonato sódico.
- Consumo de sosa y ácido en el resto de la planta de tratamiento de agua de la central térmica de Andorra.

Para tener un mayor conocimiento de estos procesos de ablandamiento, se llevan a cabo todos los experimentos en dos épocas distintas del año. La primera vez, en el mes de mayo y la segunda en el mes de febrero, donde la calidad del agua es mayor, debido a la gran cantidad de lluvia caída entre febrero y mayo, unida a el deshielo de las nieves.

Todos los resultados mostrados en este capítulo están recogidos en el Anexo V. En este se incluyen tablas con información detallada referente a todos y cada uno de los experimentos que aquí se mencionan, así como de sus réplicas.

5.1. Resultados de caracterización del agua de aporte al decantador y agua de salida del mismo.

En la tabla 5 y tabla 6 se observa los resultados de caracterización del agua de aporte al decantador y agua de salida del mismo, los cuales permiten conocer la calidad del agua que llega a la central térmica de Andorra, para determinar el tratamiento más adecuado al que se debe someter esta agua de aporte, y la calidad del agua de salida del decantador de la central térmica de Andorra, que va a permitir conocer el grado exacto de ablandamiento al que se debe de llegar en el laboratorio, tanto si se utiliza el método del ablandamiento con sosa o el método de la cal + carbonato sódico.

*Tabla 5: Análisis del agua de aporte al decantador
Accelerator*

Agua entrada al decantador					
Nº de muestra	pH	dureza cálcica (mg/l CaCO ₃)	dureza total (mg/l CaCO ₃)	Alcalinidad (mg/l CaCO ₃)	conductividad (µs/cm)
1 (febrero)	7,8	300	430	125	650
2 (febrero)	7,7	300	426	125	635
1 (mayo)	8,5	244	326	85	543

*Tabla 6: Análisis del agua de salida del decantador
Accelerator*

Agua salida del decantador					
Nº de muestra	pH	dureza cálcica (mg/l CaCO ₃)	dureza total (mg/l CaCO ₃)	Alcalinidad (mg/l CaCO ₃)	conductividad (µs/cm)
1 (febrero)	9,6	70	174	40	630
2 (febrero)	9,0	64	164	30	620
1 (mayo)	9,6	34	114	25	480
2 (mayo)	9,6	34	114	20	512
3 (mayo)	9,5	34	114	20	495
4 (mayo)	9,5	34	114	20	501
5 (mayo)	9,5	34	114	25	510

A la vista de los resultados obtenidos, en la tabla 5 y 6, se puede apreciar una notable diferencia en la dureza y alcalinidad del agua, entre los meses de Febrero y Mayo, tanto en el agua de aporte, como en el agua de salida del decantador, debida a las intensas lluvias de esta época, que ha provocado, una reducción de la dureza y alcalinidad en el agua del pantano de Calanda.

Además se observa la gran reducción de dureza y alcalinidad que sufre el agua en el decantador de la central térmica.

5.2. Proceso de ablandamiento con sosa

5.2.1. Primeros ensayos tentativos

Por ser éste el primer experimento que se realiza sobre el ablandamiento de agua surge la necesidad de poner en marcha un método y un sistema experimental válidos. Así, se plantea una fase de estudios previos en la que se realizan análisis y pruebas con el fin de obtener resultados fiables y que permitan validar el método que posteriormente se utilizará para el desarrollo del presente trabajo.

En la figura 6 se muestran los resultados obtenidos de dureza cálcica, dureza total y alcalinidad para los diferentes pH de trabajo, de los experimentos realizados en el laboratorio en la puesta en marcha del proceso en el mes de febrero. También se representa la dureza y alcalinidad del agua después de haber sido tratada en el decantador de la central térmica.

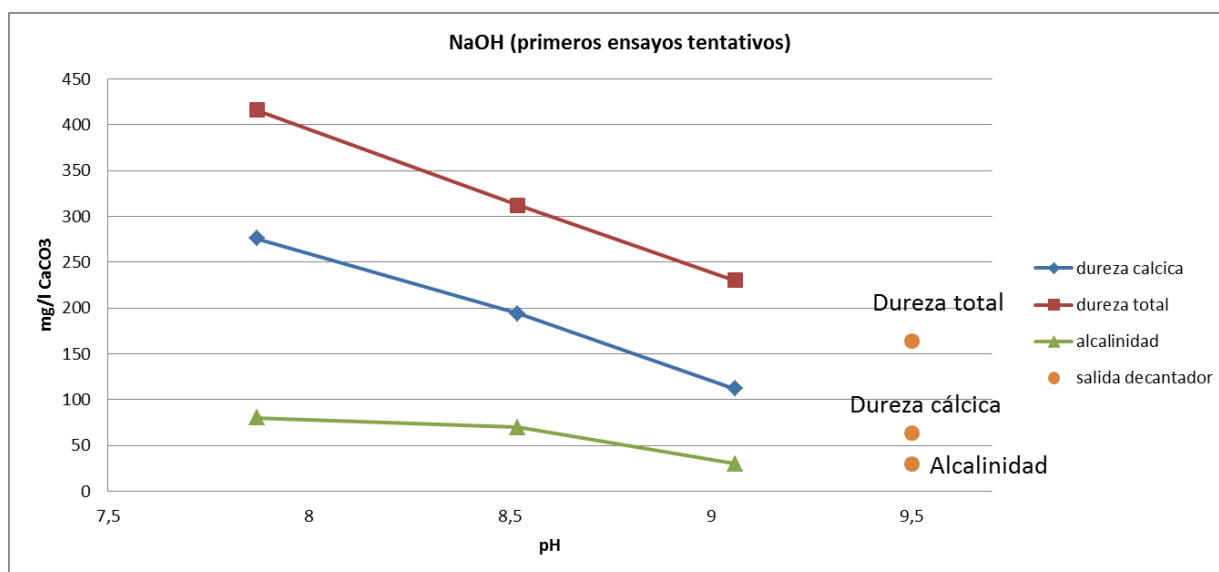


Figura 6: Puesta en marcha. Ablandamiento de agua con sosa. Variable: pH

Como se puede apreciar en la figura 6, al aumentar la concentración de sosa, se aumenta el pH de la disolución y se produce una disminución de la dureza y alcalinidad del agua, ya que precipitan las sales de calcio y magnesio en forma de carbonatos de calcio e hidróxido de magnesio.

5.2.2. Estudio de la influencia del pH

Se llevan a cabo experimentos a lo largo de todo el intervalo de pH de trabajo entre 8-11, para determinar el pH en el que se consigue un mayor grado de ablandamiento del agua.

En la figura 7 se muestran los resultados obtenidos en el mes de Febrero de dureza cálcica, dureza total y alcalinidad, para los pH de trabajo en el rango 8-11. Además se representa en el gráfico la dureza y alcalinidad del agua después de haber sido tratada en el decantador de la central térmica, lo que permite observar en que zona de pH se tiene que trabajar, para conseguir el mismo ablandamiento y alcalinidad.

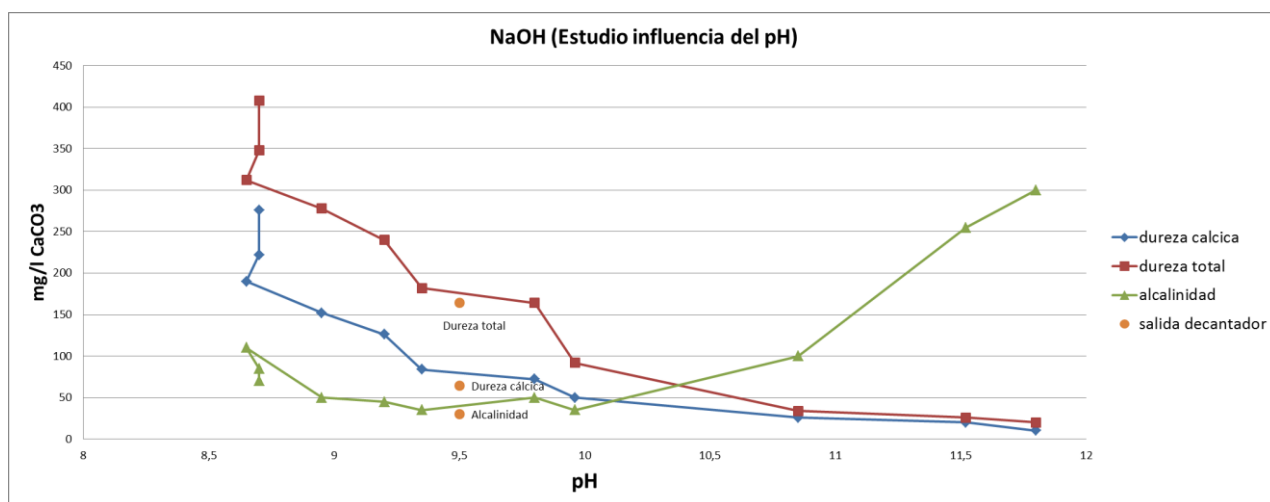


Figura 7: Resultados ablandamiento de agua con sosa. Variable: pH 8-11

Se puede observar en la figura 7 que el rango de pH al que se debe de trabajar para conseguir el mejor resultado de reducción de dureza y alcalinidad simultaneas, es 9-10,2.

5.2.3. Optimización del pH de trabajo y de la cantidad de sosa

De los resultados obtenidos en el apartado 5.3.2, surge la necesidad de realizar una nueva serie de experimentos en este rango de pH 9-10,2 que permita determinar el pH óptimo de trabajo.

Los resultados obtenidos en la nueva serie de experimentos para el mes de Febrero en este rango se muestran en la figura 8.

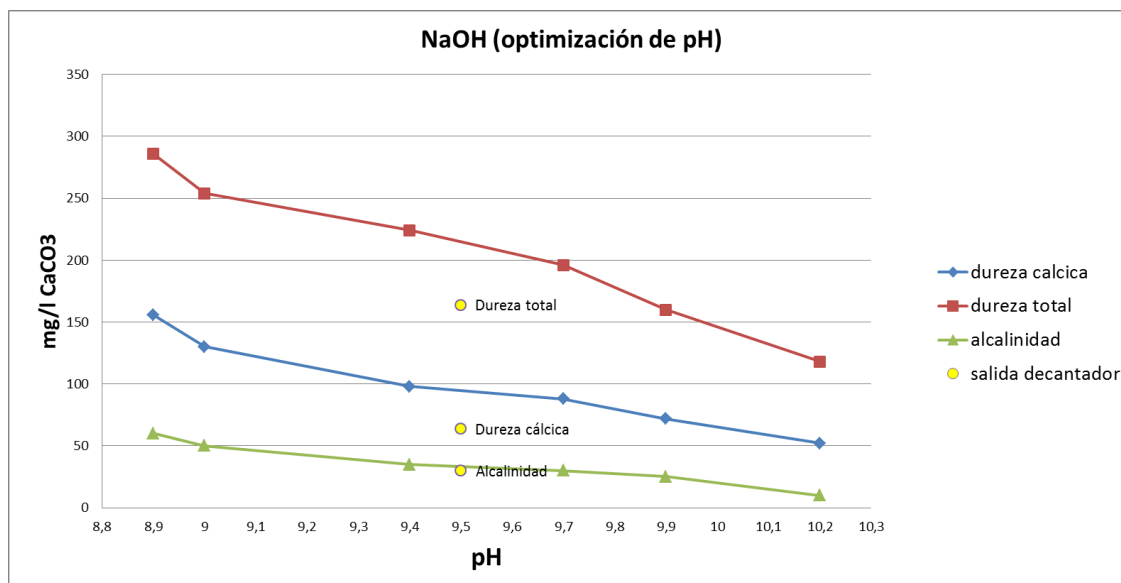


Figura 8: Ablandamiento de agua con sosa. Optimización del pH de trabajo (Febrero)

A la vista de los resultados obtenidos en la figura 8, se determina como óptimo un pH de 10,2 para conseguir la máxima reducción de dureza y alcalinidad. Sin embargo, como se puede observar, si lo que se pretende es simplemente el conseguir el mismo grado de ablandamiento del agua en el laboratorio que el que se obtiene en el decantador de la central, el pH al que se debe de trabajar es de 9,9.

Además se puede observar en la figura 9 los resultados obtenidos en el mes de Mayo de dureza cálcica, dureza total y alcalinidad, en función de la concentración de sosa utilizada en el proceso. En este caso, se representa en función de la concentración de sosa utilizada, y no en función del pH, aunque están íntimamente relacionadas, con el objeto posterior de llevar a cabo el estudio comparativo de los consumos que requiere cada tratamiento.

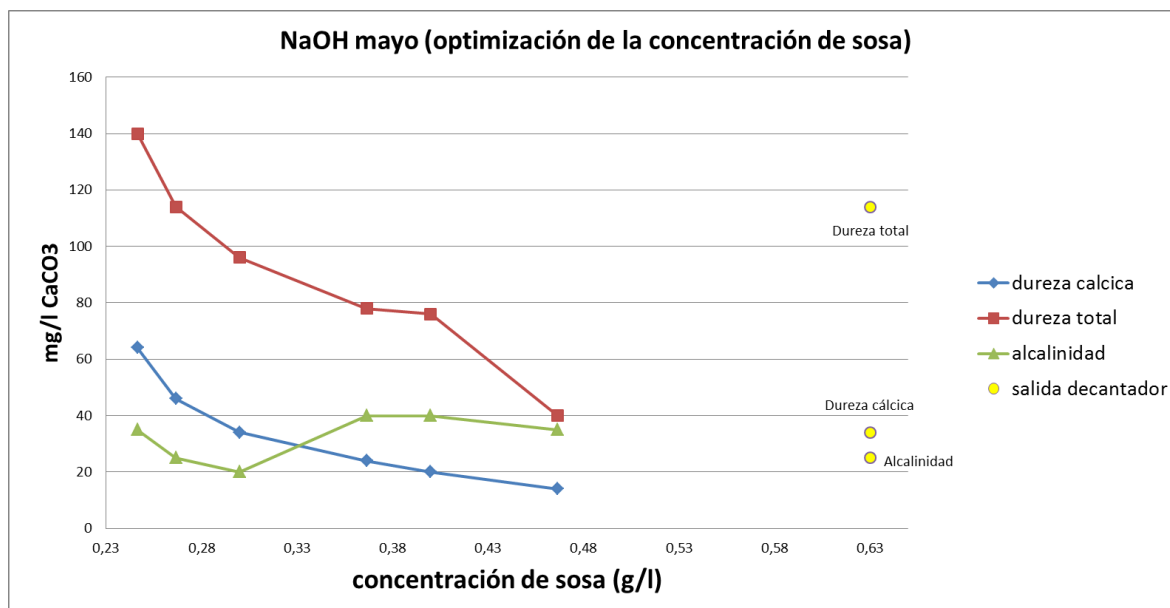


Figura 9: Ablandamiento de agua con sosa. Optimización de la concentración de sosa utilizada (Mayo)

A la vista de los resultados obtenidos en la figura 9, se determina como óptima, una concentración de sosa de 0,30 g/l para conseguir el mismo grado de ablandamiento del agua en el laboratorio que el que se obtiene en el decantador de la central.

Además, como se puede observar en los resultados de los experimentos del Anexo V, al trabajar con esta concentración de sosa, el pH del agua es de 10, reafirmando pues los resultados anteriores, en los que se representaba la dureza y alcalinidad, en función del pH.

5.2.4. Estimación de la cantidad de reactivos utilizada en el tratamiento óptimo con sosa

En las tablas 7 y 8 se puede observar la cantidad de sosa necesaria para realizar el ablandamiento del agua a nivel de laboratorio y en el decantador de la central térmica respectivamente, con el objetivo principal de cuantificar los costes de tratamiento.

Tabla 7: Cantidad de sosa para el ablandamiento por este método en el laboratorio

NaOH 50% peso	
Reactivo utilizado	NaOH 0,25 M= 10 g/l
Volumen de sosa para 300 ml de agua (ml)	4,5
g/l de sosa al 50%	0,30

Tabla 8: Cantidad de sosa para el ablandamiento de agua por este método en la central térmica

NaOH 50% peso	
Real en el decantador	Teórico del decantador
0,63 kg/m ³	0,5 kg/m ³

La cantidad de sosa a utilizar en el laboratorio, no es la misma que la utilizada realmente en el decantador de la central térmica de Andorra y diferente del teórico a utilizar.

Esta diferencia, se cree que es debida a las diferencias insalvables existentes a la hora de realizar el análisis en el laboratorio, o en el decantador Accelerator de la central térmica.

5.3. Proceso de ablandamiento con cal

5.3.1. Estudio de la influencia del pH

En este apartado se presentan los resultados obtenidos a escala de laboratorio del proceso de ablandamiento de agua utilizando solo cal, para un rango de pH de trabajo de 8,5-11,5. En la figura 10 se representan los resultados de dureza y alcalinidad del agua después de haber sido tratada en el decantador de la central térmica, que permite observar en que zona de pH se tiene que trabajar, para conseguir resultados similares entre el laboratorio y el decantador de la central.

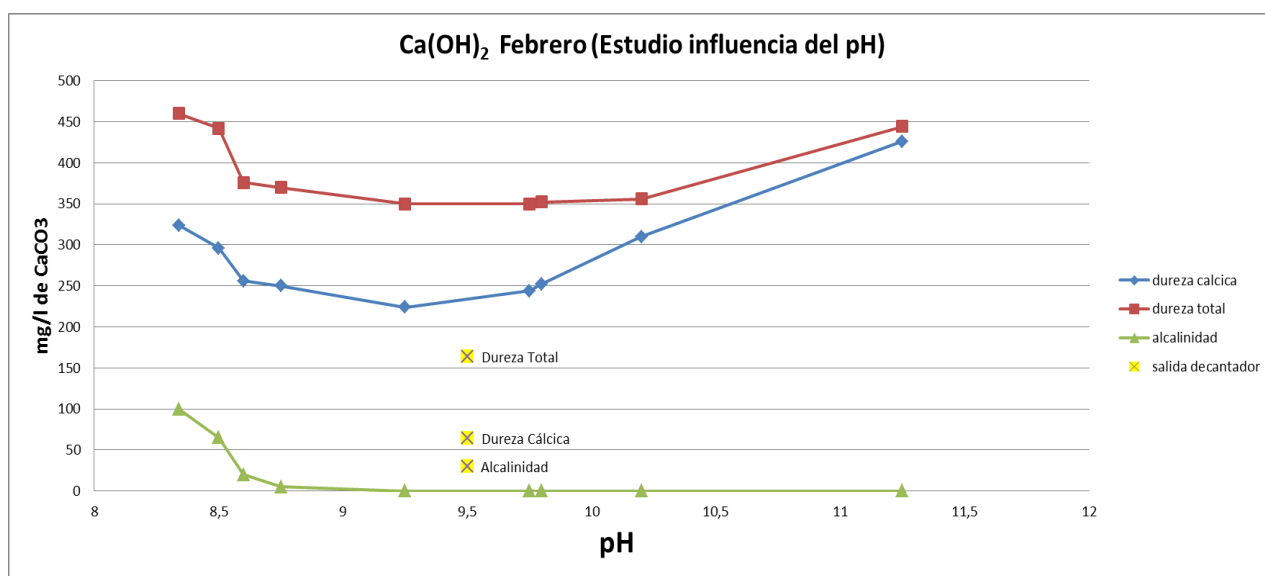


Figura 10: Ablandamiento de agua. Método de la cal sola. Variable pH.

Como se puede observar en la figura 10, la mayor reducción de la dureza total y de la cálcica, se produce para un pH de 9,25. Además se observa, que para ninguno de los pH de trabajo se consigue el grado de ablandamiento requerido. Como se puede comprobar solo se elimina un 30 % de la dureza total y un 24% de la cálcica en el caso más favorable. Esto se debe, a que con este método, solo se elimina la dureza de carbonatos, siendo imposible eliminar la dureza de no-carbonatos.

La alcalinidad, para un pH de 8,7 cae hasta cero. Esto es debido, a que al añadir el hidróxido cálcico, debido a la gran cantidad de iones Ca^{2+} que se añaden, precipitan todos los hidrogeno carbonatos (HCO_3^-) como carbonato cálcico, situación que se debe evitar ya que es necesario que quede una pequeña alcalinidad en el agua.

5.3.2. Optimización de la concentración de cal

De los resultados presentados en el apartado 5.3.1, surge la necesidad de realizar una nueva serie de experimentos en un rango de concentración determinado, [0 – 0,2 g/l] que permita determinar la concentración óptima de trabajo para conseguir la mayor reducción de dureza y alcalinidad posible. Se representa también los resultados de dureza y alcalinidad del agua después de haber sido tratada en el decantador de la central térmica. Se observa que el punto de dureza y alcalinidad del decantador está representado con concentración de cal 0 g/l, ya que el agua en el decantador se trata con sosa, y no con cal. En este caso, este punto se ha representado únicamente para poder comparar visualmente la diferencia en el grado de ablandamiento entre los ensayos de laboratorio y el decantador de la central.

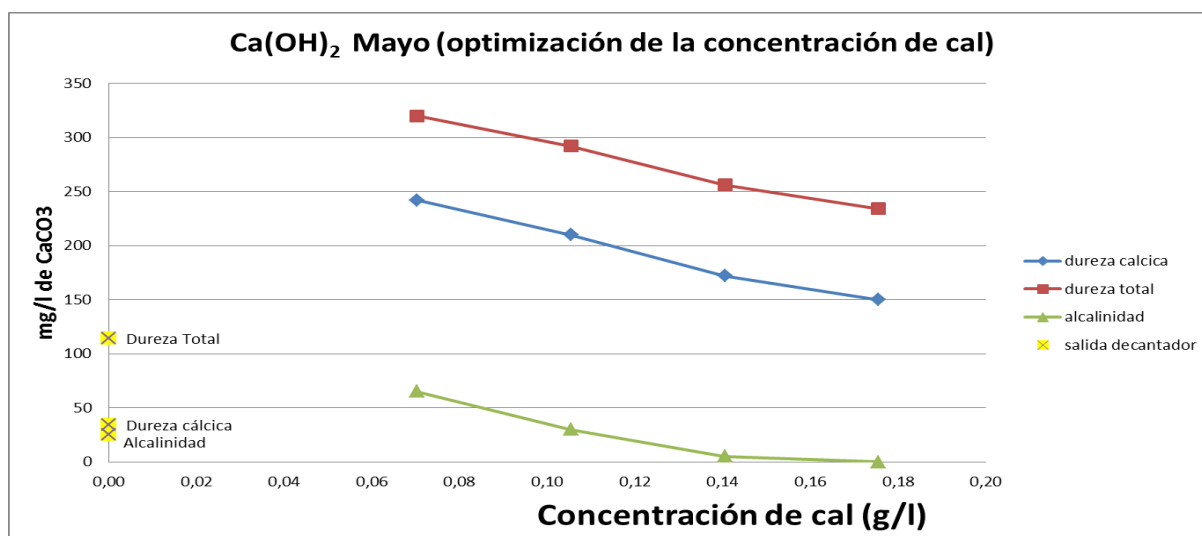


Figura 11: Ablandamiento de agua. Método de la cal. Optimización de la concentración de cal

A la vista de los resultados de la figura 11 para el mes de Mayo, se observa, que la concentración óptima de cal, para la reducción de la dureza y alcalinidad, es de 0,14 g/l, ya que a esta concentración es el punto donde la alcalinidad se reduce a 0, y a partir del cual, el añadir más cal al agua, lejos de reducir la dureza, se vuelve a aumentar.

5.3.3. Estimación de la cantidad de reactivos utilizada en el tratamiento óptimo con cal

En la tabla 9 se muestra la cantidad de cal a utilizar para el ablandamiento del agua por este método, así como el volumen necesario para una muestra de 300 mL de agua de la disolución de cal al 1% en peso.

Tabla 9: Cantidad de cal para el ablandamiento por este método en el laboratorio

Ca(OH) ₂ 93% peso	
Reactivo utilizado	Ca(OH) ₂ al 1% peso = 10 g/l
Volumen de cal para 300 ml de agua (ml)	4
kg / m ³ de cal al 93%	0,14

Este resultado, se utiliza para el cálculo del coste de tratamiento por este método

5.4. Proceso de ablandamiento con cal + carbonato sódico

5.4.1. Estudio de la influencia de la concentración de carbonato sódico

En este apartado se presentan en la figura 12 los resultados obtenidos de dureza cálcica, dureza total y alcalinidad, para el rango de concentraciones de carbonato sódico 0,15-5 g/l, ya que en este proceso, esta concentración de carbonato sódico es el parámetro más importante, y añadiendo una concentración constante de cal de 0,14 kg/m³ considerada óptima en el apartado anterior 5.3.

Se representa también en la figura 12 los resultados de dureza y alcalinidad del agua después de haber sido tratada en el decantador de la central térmica. Se observa que el punto de dureza y alcalinidad del decantador está representado con concentración de carbonato sódico 0 g/l, ya que el agua en el decantador se trata con sosa, y no con carbonato. En este caso, igual que en el apartado 5.3.2, este punto se ha representado únicamente para poder comparar visualmente la diferencia en el grado de ablandamiento entre los ensayos de laboratorio y el decantador de la central.

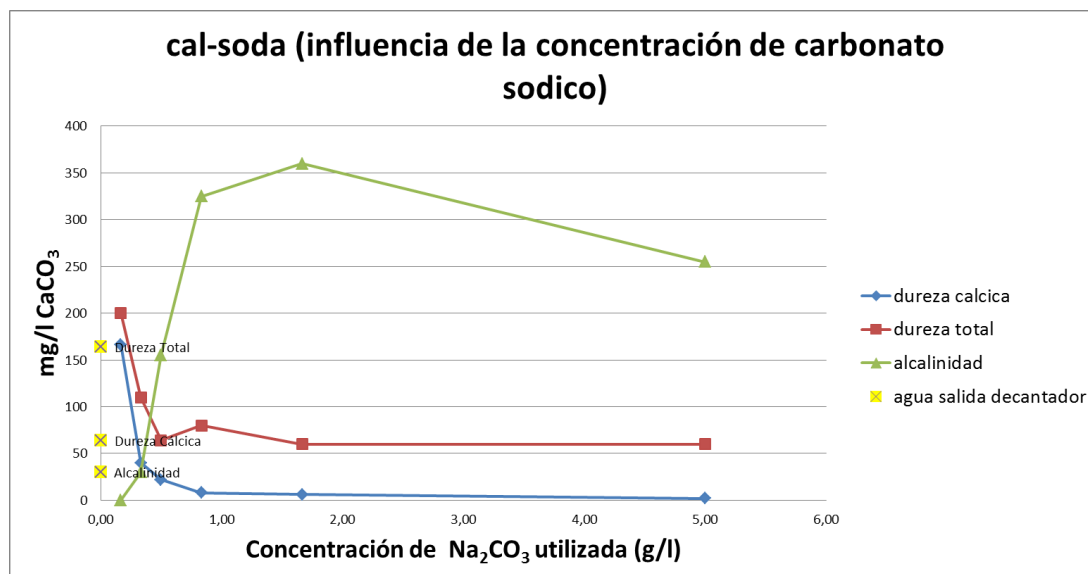


Figura 12: Resultados de ablandamiento de agua con cal + carbonato sódico. Variable: Rango de concentración de carbonato sódico.

En la figura 12 se observa que al aumentar la cantidad de carbonato sódico, tanto la dureza cálcica, como la dureza total, se ven disminuidas, hasta llegar a casi a cero en dureza cálcica y a 60 ppm en dureza total. Sin embargo, a partir de una concentración de carbonato sódico de 0,5 g/l, la alcalinidad se ve aumentada muchísimo, debido a la gran cantidad de carbonatos que se añaden, sin ser precipitados, por tanto, se puede observar, que si lo que se pretende es una disminución de dureza, junto con una disminución de alcalinidad, el rango en el que se debe trabajar es 0-0,5 g/l de Na_2CO_3

5.4.2. Optimización de la concentración de carbonato sódico

De los resultados obtenidos en el apartado 5.4.1, surge la necesidad de realizar una nueva serie de experimentos en este rango de concentración de carbonato sódico entre 0-0,5 g/l que permita determinar la concentración óptima de trabajo para conseguir el mismo grado de reducción de dureza y alcalinidad que se consigue en el decantador de la central de Andorra.

Los resultados obtenidos en la nueva serie de experimentos en este rango se muestran en la figura 13.

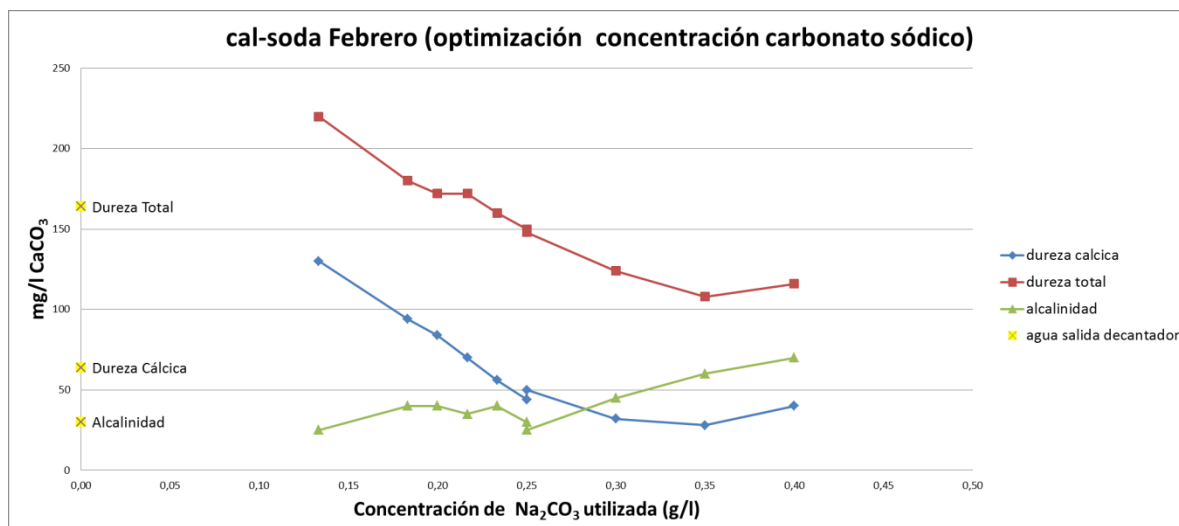


Figura 13: Ablandamiento de agua con cal + carbonato sódico. Optimización de la concentración óptima de trabajo (Febrero)

A la vista de los resultados obtenidos en la figura 13, se determina como punto óptimo de reducción de dureza y alcalinidad, cuando se trabaja con una concentración de 0,35 g/l, que es similar al teórico calculado. Sin embargo, como se puede observar, si lo que se pretende es simplemente el conseguir el mismo grado de reducción de dureza y alcalinidad que se obtiene en el decantador de la central de Andorra, la concentración a la que se debe de trabajar es de 0,20 g/l.

Como se ha comentado ya, todos los experimentos se llevan a cabo nuevamente, en el mes de Mayo. En la figura 14 se muestran los resultados obtenidos para este mes, en función de la concentración de carbonato utilizada en el proceso.

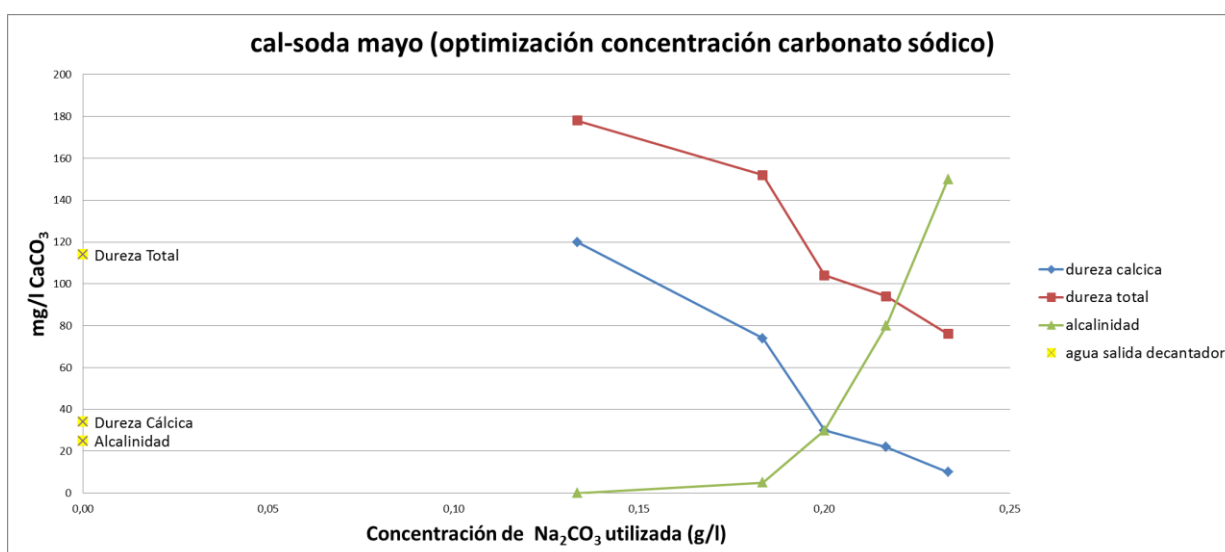


Figura 14: Ablandamiento de agua con cal + carbonato sódico. Optimización de la concentración óptima de trabajo (Mayo)

Como se puede apreciar en la figura 14, en concentraciones por debajo de 0,15 g/l, debido a la dosis de cal añadida, se tiene alcalinidades de casi 0 g/l, sin embargo, a partir de esta concentración, la alcalinidad comienza a aumentar.

Por otro lado, tanto la dureza cálcica, como la dureza total, disminuyen al incrementar la dosis de carbonato sódico, llegando a valores de dureza cálcica de 10 ppm.

Para obtener el grado de dureza y alcalinidad deseado, representado en amarillo, se utiliza una concentración de carbonato sódico de 0,20 g/l.

5.4.3. Estimación de la cantidad de reactivos utilizada en el tratamiento óptimo con cal + carbonato sódico

Se cuantifica la cantidad de cal y de carbonato sódico necesaria para realizar el ablandamiento de agua deseado, para muestras de aguas del mes de mayo.

La concentración óptima de cal es 0,14 kg/m³ como se ha comprobado en el apartado 5.3.3 y la de carbonato sódico podemos observarla en la tabla 10.

Tabla 10: Cantidad de carbonato sódico para el ablandamiento por este método en el laboratorio

Na ₂ CO ₃ 99,8% peso	
Reactivo utilizado	Na ₂ CO ₃ al 5 % en peso = 50 g /l
ml de Na ₂ CO ₃ para 300 ml de agua	1,2
Kg/m ³ de Na ₂ CO ₃	0,20

5.5. Volumen de fangos generados y humedad

Una de las principales diferencias que se dan entre el tratamiento de ablandamiento de agua con sosa y el tratamiento de ablandamiento de agua con cal + carbonato sódico, es el volumen de fangos que se generan en el proceso.

Para la determinación del volumen de fangos, se utilizan los conos de decantación. Se vierte en ellos la muestra de agua una vez tratada y se dejan decantar las partículas en suspensión durante 30 min. Una vez transcurrido ese tiempo se obtiene la medida por lectura directa sobre el cono.

En la tabla 11 se presenta los resultados de volúmenes de fangos generados para los procesos de ablandamiento de agua con sosa y con cal + carbonato sódico.

Tabla 11: Volumen de fangos generados por los procesos de ablandamiento con sosa y cal + carbonato sódico

Volumen de fangos		
	NaOH	Cal+Na ₂ CO ₃
Volumen (ml/l)	2	4,4

A la vista de los resultados de la tabla anterior, podemos observar, que en el proceso de tratamiento de agua con cal + carbonato, se producen el doble de fangos que en el proceso de ablandamiento con sosa.

Un mayor volumen de fangos generado, implica una mayor frecuencia de purga del tanque, y en muchos casos supondría un mayor coste a la hora de tratar los fangos, ya que se tendría que tratar un mayor volumen de fangos anualmente.

En la central térmica de Andorra, los fangos purgados del decantador, se almacenan en unas balsas, y se dejan decantar los sólidos en el fondo. Al no tratar los fangos, el generar un mayor o menor volumen de fangos por un proceso u otro de ablandamiento de agua, no supondría a priori un coste adicional.

Sin embargo, a largo plazo, supondría que estas balsas a las que se llevan los fangos, se saturarían en un menor plazo de tiempo.

La tabla 12 presenta los resultados de humedad que presentan los fangos generados por ambos procedimientos.

Tabla 12: Humedad de los fangos generados

Humedad fangos		
	NaOH	Cal+Na ₂ CO ₃
peso solido húmedo(mg)	500	633
peso solido seco (mg)	58	135
% humedad fangos	89,605735	82,421875

A la vista de los resultados de la tabla 12, el coste de tratamiento de los fangos generados si se llevara a cabo el proceso de la cal + carbonato sódico, sería menor que el coste de los fangos generados por el proceso de la sosa, ya que los primeros contienen una menor humedad.

5.6. Consumo de sosa y ácido sulfúrico en el resto de la planta de tratamiento de agua de la central térmica

En este apartado se presentan los resultados de los cálculos relativos a el consumo de sosa y ácido sulfúrico que se produce en el resto de la planta, el cual se da principalmente en la regeneración de las resinas de intercambio iónico.

En la figura 15, se puede observar la cantidad de sosa o ácido que se consume en cada regeneración de una resina, en función del tiempo de funcionamiento de las bombas que administran la sosa y el ácido para su regeneración, el cual se establece por el responsable del laboratorio de la central.

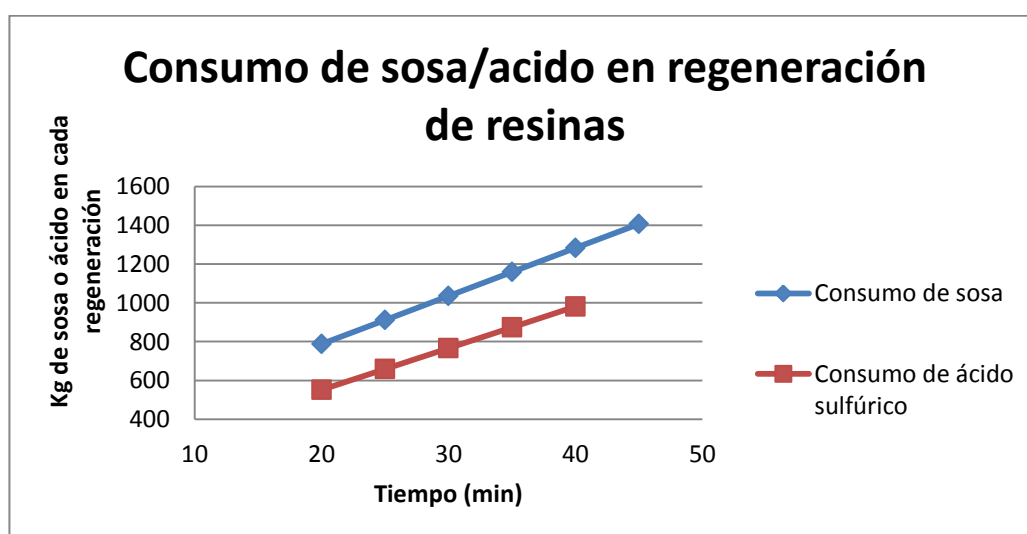


Figura 15: Consumo de sosa/ácido en cada regeneración, en función del tiempo de regeneración.

Las resinas que se utilizan en el catexer y el anexer, están diseñadas para ser regeneradas en un tiempo de 20 minutos, que como se puede observar en la figura 15, supone un consumo de sosa de 788 kg y un consumo de ácido de 552 kg. (Anexo III.iv).

Actualmente, debido al deterioro sufrido por el paso de los años en las resinas, se está utilizando un tiempo de regeneración de 45 min para la sosa, lo que supone un consumo de sosa de 1407 Kg en cada regeneración y de 40 minutos para el ácido, que suponen 981 Kg de ácido en cada regeneración.

El hecho de aumentar en más del doble los tiempos de regeneración de las resinas, provoca que el gasto de sosa para las regeneraciones de resinas, suponga un 70% del gasto total de sosa en la central térmica de Andorra, así como un gasto también importante de ácido sulfúrico, en el caso de la catiónica y con el correspondiente gasto de dinero que conlleva.

A la vista de los resultados obtenidos, con el fin de estudiar si una reducción de los tiempos de regeneración, provoca una disminución del rendimiento de las resinas, se lleva a cabo la medida inmediata de reducir el tiempo de regeneración de las resinas aniónica y catiónica en 5 min cada una, ya que se consideraban excesivos dichos tiempos, y supone un gasto innecesario de sosa y ácido.

Se reduce pues, el tiempo de regeneración de las resinas aniónicas de 45 a 40 minutos y las de intercambio catiónico de 40 a 35 min.

Estos tiempos se mantienen 3 meses, durante los cuales se llevarán controles periódicos de calidad del agua de salida, y en el caso de que no se produzca una variación en el rendimiento de las resinas y un empeoramiento de la calidad del agua de salida de las resinas, el tiempo de regeneración se vuelve a reducir nuevamente 5 minutos más, prosiguiendo de esta forma hasta que se observe una disminución del rendimiento de las resinas.

En las tablas 13 y 14 se muestra el gasto anual de sosa y de ácido en función del tiempo que se considere óptimo para la regeneración de estas resinas.

Tabla 13: Gasto de sosa en función del tiempo de regeneración de la resina aniónica

Consumo sosa en la regeneración						
NaOH						
Tiempo regeneración (min)	20	25	30	35	40	45
kg por regeneración	788	911,8	1035,6	1159,4	1283,2	1407
numero regeneraciones anuales	433	433	433	433	433	433
gasto total anual (kg)	341.204	394.809	448.415	502.020	555.626	609.231

Tabla 14: Gasto de ácido en función del tiempo de regeneración de la resina catiónica

Consumo acido en la regeneración						
H2SO4						
Tiempo regeneración (min)	20	25	30	35	40	
kg por regeneración	552	659,25	766,5	873,75	981	
numero regeneraciones anuales	433	433	433	433	433	
gasto total anual (Kg)	239016	285455	331895	378334	424773	

Como se puede observar en las tablas 13 y 14, la diferencia de consumo anual de sosa y ácido es muy significativa dependiendo del tiempo de regeneración, por tanto, se lleva a cabo un estudio económico del coste anual en sosa y ácido de la plata, así como un estudio económico para renovar las 3 cadenas de resinas, ya que con resinas nuevas se tendrían los 20 minutos como tiempo óptimo de regeneración.

6. ANÁLISIS DE COSTES

El objetivo de este estudio consiste en poder llegar a una solución lo suficientemente desarrollada como para poder tomar la decisión, con un cierto grado de seguridad, de si vale la pena seguir desarrollando e invirtiendo en el proyecto.

Se analizan los costes relativos a:

1. Comparativa de tratamientos de ablandamiento. Se analiza el coste de ambos tratamientos, el del método con sosa y el del método con cal + carbonato sódico, para determinar si es rentable llevar a cabo el cambio del tratamiento con sosa, para sustituirlo por el tratamiento con cal + carbonato sódico en el decantador de la central térmica, ya que actualmente se lleva a cabo el método de ablandamiento con sosa.
2. Regeneración de las resinas. Se analizan los costes de regeneración de resinas en función del tiempo de regeneración de estas para analizar el ahorro que supondría en el gasto en sosa y ácido disminuir progresivamente estos tiempos de regeneración.
3. Renovación de las resinas. Por último, se analizan los costes y el tiempo de recuperación de la inversión de realizar una renovación de las 3 cadenas de resinas de las que se dispone en la central térmica de Andorra.

6.1. Costes comparativos de tratamiento

En este apartado, se lleva a cabo el estudio económico para determinar el coste de tratamiento de los distintos métodos. El gasto de cloruro férrico no se va a tener en cuenta a la hora de comparar los dos métodos, ya que la concentración a utilizar en ambos métodos, es la misma, por lo que no influye en la comparativa.

6.1.1. Coste del tratamiento con sosa

La concentración óptima de sosa con la que se consigue el pH óptimo de trabajo y a su vez el grado óptimo de ablandamiento en el laboratorio, es de $0,30 \text{ Kg/m}^3$

Sin embargo, en la central térmica de Andorra, existen diferencias entre lo que supone llevar a cabo experimentos de ablandamiento de agua en laboratorio, y lo que supone hacerlo en el decantador por tanto, el análisis comparativo de costes en el tratamiento, se lleva a cabo con los datos obtenidos en el laboratorio.

En la tabla 15, se muestra el coste anual del tratamiento de ablandamiento por el método de la sosa y el coste del tratamiento por metro cúbico de agua tratada.

Tabla 15: Coste del tratamiento de ablandamiento de agua con sosa

Consumo de sosa		
	NaOH decantador	NaOH laboratorio
Concentración requerida (Kg/m3)	0,63	0,30
producción anual agua desmineralizada (m3)	413581	413581
gasto anual sosa (toneladas)	260,55	124,06
precio tonelada de sosa (€)	240,00 €	240,00 €
coste tratamiento (€/m3)	0,15 €	0,07 €
Coste anual del tratamiento(€)	62.533,96 €	29.777,88 €

6.1.2. Coste del tratamiento con cal + carbonato sódico

En este apartado, se determina el coste de este método, que incluye el gasto en cal y el gasto en carbonato sódico, que sería necesario, para conseguir el ablandamiento que se produce en la central térmica, a nivel de laboratorio, ya que como se ha visto en el apartado anterior, al aplicar el proceso en el decantador, se incrementa las dosis necesarias, debido a las diferencias existentes entre los procesos a nivel de laboratorio y a nivel industrial.

En la tabla 16 se presenta el coste detallado.

Tabla 16: Coste del tratamiento de ablandamiento de agua con cal + carbonato sódico

Consumo de cal y carbonato		
	cal en laboratorio	Na ₂ CO ₃ en laboratorio
Concentración requerida (Kg/m3)	0,14	0,2
producción anual agua desmineralizada (m3)	413581	413581
Gasto anual (toneladas)	57,90	82,71
precio tonelada de cal/carbonato (€)	140,00 €	360,00 €
coste tratamiento (€/m3)	0,02 €	0,07 €
Coste anual del tratamiento(€)	8.106,18 €	29.777,88 €

A la vista de los resultados obtenidos en las tablas 15 y 16, se determina que para obtener en el laboratorio el grado de dureza y alcalinidad indicado por el

laboratorio de la central térmica de Andorra, de los dos procesos posibles para conseguirlo, por el método de la sosa, el gasto es de 0,07 € / m³ de agua a tratar, mientras que para el método de la cal + carbonato sódico, es de 0,09 € / m³.

El coste total a nivel de laboratorio, sería de 29.777 € si se sigue aplicando el método de la sosa, y de 37.883 € si se opta por cambiar de método de ablandamiento del agua, por tanto el gasto en el que incurriríamos al cambiar el método, sería de 8.106 € a nivel de laboratorio, que muy probablemente, este gasto se incrementaría a casi el doble, cuando se aplicará el proceso en el decantador de la central térmica.

6.2. Costes de la regeneración de las resinas

El mayor gasto de la planta, no se da en el proceso del decantador, sino en el gasto en sosa y ácido, a la hora de llevar a cabo la regeneración de las tres cadenas de resinas.

En las tablas 17 y 18, se muestra de forma detallada el gasto anual en reactivos tanto de sosa, como de ácido, en los que incurre la empresa en función del tiempo en que este en marcha las bombas de sosa y ácido para la regeneración de las resinas.

Tabla 17: Coste anual de sosa en la regeneración de la resinas aniónicas

Consumo sosa en la regeneración						
NaOH						
Litros de resina aniónica en cada cadena	4000	4000	4000	4000	4000	4000
Tiempo regeneración (min)	20	25	30	35	40	45
kg por regeneración	788	911,8	1035,6	1159,4	1283,2	1407
numero regeneraciones anuales	433	433	433	433	433	433
precio tonelada sosa	240,00 €	240,00 €	240,00 €	240,00 €	240,00 €	240,00 €
total anual (€)	€ 81.888,96	€ 94.754,26	€ 107.619,55	€ 120.484,85	€ 133.350,14	€ 146.215,44

Tabla 18: Coste anual del ácido en la regeneración de la resinas catiónicas

Consumo acido en la regeneración					
H2SO4					
Litros de resina catiónica en cada cadena	9240	9240	9240	9240	9240
Tiempo regeneración (min)	20	25	30	35	40
kg por regeneración	552	659,25	766,5	873,75	981
numero regeneraciones anuales	433	433	433	433	433
precio tonelada de ácido	96,00 €	96,00 €	96,00 €	96,00 €	96,00 €
total anual (€)	€ 22.945,54	€ 27.403,70	€ 31.861,87	€ 36.320,04	€ 40.778,21

A la vista de los resultados que se presentan en las tablas 17 y 18, se puede determinar que la medida propuesta de optimizar los tiempos de regeneración suponen un ahorro muy importante, ya que para la sosa, cada 5 minutos que se reduce el tiempo de regeneración supone un ahorro anual de 12.865 €.

Para el ácido, ocurre lo mismo, y el ahorro anual que se estima por cada 5 minutos que se reducen es de 4458 €.

6.3. Coste de renovación de las resinas

Se presenta un estudio del tiempo que se tardaría en recuperar la inversión si se lleva a cabo la renovación de las resinas, con lo que se reduce los tiempos de regeneración de las mismas.

Para renovar cada cadena de resina, solo es necesario, la compra de lo que es la propia resina, a los mismos proveedores que suministraron las resinas cuando se construyó la central térmica de Andorra, ya que los tanques en que están alojadas, se mantienen los mismos.

El proceso consiste en vaciar estos tanques de resina y rellenarlos con las resinas nuevas.

Cada cadena de resinas tiene un precio de 20.000 €, por tanto como se tienen tres cadenas, la inversión a realizar es de **60.000 €**.

En la tabla 19, se muestra el estudio económico del ahorro anual que se logra con la renovación de estas tres cadenas de resinas.

*Tabla 19: Estudio económico del ahorro anual estimado
con la renovación de las tres cadenas de resinas*

Gastos anuales (€)	Sosa	Ácido
Gasto actual (€)	146.215,00 €	40.778,00 €
Gasto estimado si renovamos las resinas (€)	81.888,00 €	22.994,00 €
Ahorro anual (€)	64.327,00 €	17.784,00 €
Ahorro total anual (€)	82.111,00 €	

Como se puede observar en la tabla, el ahorro total anual, sumando el ácido y la sosa, sería de 82.111 €.

Esto quiere decir, que la inversión realizada en la renovación de las tres cadenas de resinas, se recupera en 9 meses.

La renovación de las cadenas, deber de ser progresiva. En primer lugar se renueva una cadena, y durante tres meses se comprueba su funcionamiento, para evitar posibles problemas que puedan ocasionar el paro de toda la central térmica.

Una vez que se comprueba el buen funcionamiento de una de las cadenas, se procede a la renovación de la segunda cadena, y a los 3 meses, se renueva la tercera cadena.

7. RESUMEN Y CONCLUSIONES

El objetivo global de este proyecto ha sido el estudio a escala de laboratorio del proceso de descarbonatación de agua, para poder sustituir el proceso actual, que utiliza sosa, por un proceso en el que se utilice cal + carbonato sódico, para el decantador Accelerator de la planta de tratamiento de aguas de la central térmica de Andorra.

En primer lugar se ha realizado un estudio de la calidad del agua de abastecimiento, para determinar su carácter incrustante y/o corrosivo, mediante el índice de Langelier.

Seguidamente, ha sido necesario poner en marcha un sistema experimental válido mediante la realización de experimentos de descarbonatación realizando el Jar Test a las muestras de agua, tomadas de la propia central térmica.

Una vez establecido el sistema experimental el objetivo principal del presente trabajo ha sido el de conseguir reducir la dureza y alcalinidad del agua, en la misma medida en que lo hacen en el decantador de la central térmica de Andorra, en primer lugar realizando los experimentos con sosa, ya que es como lo hacen en la central térmica, y en segundo lugar aplicando un nuevo método de ablandamiento, consistente en el uso de la cal + carbonato sódico, con el objetivo de reducir los costes de este ablandamiento de agua, debido a la reciente crecida y variabilidad del precio de la sosa en el mercado.

Además se han realizado experimentos para comprobar la influencia en el ablandamiento de agua, de variables como el pH de trabajo, la concentración de sosa, cal y la concentración de carbonato sódico, así como la presencia de un floculante a la hora de llevar a cabo la reacción.

Finalmente, se ha llevado a cabo un estudio económico del ahorro que se podría obtener en el consumo de reactivos en la planta de tratamiento de aguas de la central térmica de Andorra. Se ha estudiado el ahorro en sosa y ácido sulfúrico que se conseguiría con la reducción de los tiempos de regeneración de las resinas de intercambio catiónico y aniónico, cationers y anioners, que supondría un menor consumo de reactivos al reducir el tiempo en el que hacemos pasar reactivo para regenerarlas. Además también se ha llevado a cabo el estudio económico del tiempo que se tarda en recuperar la inversión que se tendría que llevar a cabo para renovar las resinas de

intercambio iónico. Las conclusiones del estudio realizado en este proyecto son las siguientes:

Conclusiones relativas a la calidad del agua de abastecimiento

La central térmica de Andorra se abastece, para cubrir sus necesidades de agua en el proceso de producción, del pantano de Calanda.

El agua de abastecimiento del pantano de Calanda presenta un carácter ligeramente incrustante para las muestras de agua tomadas en 2008, como indica la evolución del índice de Langelier LSI, con valores superiores a cero en todo este año, debido fundamentalmente al elevado contenido en Ca de la cuenca del Ebro.

Conclusiones relativas a los métodos de descarbonatación del agua

En relación al sistema experimental llevado a cabo en el laboratorio, para reproducir las condiciones que se dan en el decantador de la central térmica de Andorra, se puede concluir que el Jar test, es un método válido para realizar el ablandamiento de agua a nivel de laboratorio.

En relación a los métodos de descarbonatación de aguas, se ha observado que tanto por el método del ablandamiento con sosa como por el método de ablandamiento de la cal + carbonato sódico se consiguen reducciones de dureza cálcica, dureza total y alcalinidad del agua iguales e incluso mayores que las que se obtienen en el decantador de la central térmica de Andorra.

Sin embargo, se ha podido observar que por el método de la cal, no se puede reducir la dureza y alcalinidad del agua hasta los valores deseados, debido a que el agua de aporte a la central térmica procedente del pantano de Calanda, es un agua que además de contener dureza de carbonatos, también contiene dureza de no carbonatos, lo que impide poder tratarla solamente con cal.

Finalmente, se ha visto también que la presencia de un floculante, no afecta para nada en el proceso de ablandamiento de esta agua en particular, ya que es un agua que no tiene problemas de sólidos en suspensión, por lo que no se va a utilizar floculante en este proceso, ya que solo lo encarecería.

Conclusiones relativas a los costes de tratamiento

En relación a los costes de tratamiento de los dos procesos considerados válidos para obtener el ablandamiento deseado, se ha observado, que a nivel de laboratorio, el coste del tratamiento para producir el ablandamiento deseado por el método de la sosa, es de 0,07 €/m³, frente a los 0,09 €/m³ que cuesta el ablandamiento del agua por el método de la cal + carbonato sódico, los cuales se incrementarían a la hora de llevarlos a cabo a nivel industrial, por lo que no es rentable cambiar el proceso de tratamiento que se tiene actualmente en el decantador de la central térmica de Andorra.

Conclusiones relativas al consumo de reactivos en la regeneración de resinas

En relación a los estudios realizados sobre la regeneración de las resinas, se concluye que por cada 5 minutos que se reduce el tiempo de regeneración de las mismas, supone un ahorro de 124 Kg de sosa y 107 Kg de ácido sulfúrico, lo que supone un ahorro de 17.300 € anuales.

Finalmente, en relación a la renovación de las tres cadenas de resinas, que supone una inversión de 60.000 €, se concluye que si se continua en la central térmica con el ritmo de producción de agua desmineralizada de los 10 últimos años, la inversión se recuperará en 9 meses, y a partir de ese momento, supondría un ahorro anual de 82.000 €.

8. BIBLIOGRAFÍA

Libros

1. [Nor] Nordell.E. *Tratamiento de agua para la industria y otros usos*. Ed. Continental. Mexico-España-Argnetina-Chile-Venezuela. **Cap 8**.
2. [Nor] Nordell.E. *Tratamiento de agua para la industria y otros usos*. Ed. Continental. Mexico-España-Argnetina-Chile-Venezuela. **Cap 18**.
3. [Dre94] Drew Industrial Division, Ashland Chemical Corporation, 1994. *Principles of industrial wáter treatment*.
4. [Deg79] Degremont (1979). *Manual técnico del agua*. **Cap 6**
5. [Kem89] Kemmer F.N.,Mc. Callion, J., 1989. NALCO: *Manual del agua. Su naturaleza, tratamiento y aplicaciones*. Ed. McGraw-Hill. **Cap 39**.
6. [Ray02] Raymond D.L., *Calidad y tratamiento del agua. Manual de suministros de agua comunitaria*. Ed. Mc Graw Hill. **Cap 10**
7. [Rig90] Rigola. M., 1990. *Tratamiento de aguas industriales. Aguas de proceso e industriales*. Ed. Alfaomega marcombo.
8. [She70] Sheppard T. Powwell (1970). *Acondicionamiento del agua para la industria*. Ed. Limusa-Wiley. Mexico, **Cap 6**.
9. [Man80] Manual interno de servicio. Libro de operación de la central térmica de Andorra.
10. [Stan05] Andrew D. Eater, 21 st Edition, *Estándar Methods*.

Páginas web

1. [Web01] http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leip/valenzuela_m_td/capitulo3.pdf
2. [Web02] <http://es.scribd.com/doc/52813409/2-Alcalinidad-y-Dureza-del-Agua>
3. [Web03] <http://tratamientosdeaguasdecalderas.blogspot.com.es/>
4. [Web04] <http://alcalinidaddelagua.blogspot.com.es/>
5. [Web05] <http://arturobola.tripod.com/dureza.htm>
6. [Web06] <http://www.textoscientificos.com/quimica/dureza-ablandamiento-agua>
7. [Web07] <http://www.oocities.org/edrochac/sanitaria/sodaash.htm>
8. [Web08] <http://www.slideshare.net/guillermo150782/ablandamiento-11737538>

Proyectos fin de carrera

1. [pro01] Hernández Sánchez, Ismael. “Tratamiento de aguas residuales para aporte a central térmica de ciclo combinado”. Proyecto fin de carrera. Universidad Carlos III de Madrid. 2011.
2. [Pro02] Julián Pardillo, Raúl. “Tratamiento de aguas para una caldera de vapor”. Proyecto fin de carrera. Universidad de Zaragoza.2010.
3. [Pro03] Departamento de ingeniería química y medio ambiente de la universidad de Zaragoza. “Efecto de la recirculación de las aguas en el proceso de fabricación de Saica en el Burgo de Ebro (Zaragoza).2003.

ANEXO I. DUREZA Y ALCALINIDAD DEL AGUA

ANEXO I. DUREZA Y ALCALINIDAD DEL AGUA

i. Dureza del agua

La cantidad de dureza presente en las aguas naturales varía ampliamente en el mundo, y depende de las formaciones geológicas tanto superficiales como subterráneas con las que entra en contacto el agua.

La dureza se debe a la presencia de sales de calcio y magnesio: Bicarbonatos, carbonatos, sulfatos cloruros y nitratos. También causan dureza en el agua el hierro, aluminio y manganeso, pero estas sustancias no se encuentran presentes ordinariamente en cantidades apreciables. Los carbonatos normales se encuentran, solo normalmente, en aguas sumamente alcalinas. Los nitratos se hallan presentes usualmente en pequeñas cantidades y, en promedio, los sulfatos exceden a los cloruros. Existen por supuesto, muchos abastecimientos de agua en los que estas generalizaciones no se aplican.

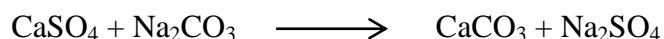
En el pasado, ha sido costumbre clasificar la dureza como temporal o permanente, ambas comúnmente presentes, aunque en ocasiones no lo están. Son preferibles los términos "dureza de carbonatos" y de "no carbonatos" los cuales son más precisos en su descripción. Las aguas que contienen dureza temporal o de carbonatos sufren ablandamiento parcial al hervirlas, mientras que la dureza permanente no se reduce por esta acción.

La razón de este comportamiento es obvia al considerar la composición química de los dos tipos de dureza. Aun cuando el carbonato de calcio (piedra caliza) es solo ligeramente soluble, se disuelve en ácido carbónico para formar bicarbonato de calcio:



El bióxido de carbono que se combina con el carbonato de calcio para formar bicarbonato de calcio, a menudo se describe como "parcialmente ligado". El calor invierte la reacción al desprender el bióxido de carbono parcialmente ligado, reproduciéndose así el carbonato normal de calcio y el agua se ablanda por la precipitación de este compuesto.

La dureza de los no-carbonatos es debida a los sulfatos o cloruros de calcio que permanecen en solución cuando el agua se calienta, y deben ser convertidos en carbonatos por medio del carbonato de sodio para poder ser eliminados. Por ejemplo,



Los requerimientos de productos químicos y los resultados de la suavización difieren respecto a las durezas de carbonatos y de no-carbonatos así como también en cuanto a las durezas de calcio y magnesio.

Ambas bases de la clasificación, deben, por tanto ser usadas para interpretar el análisis del agua y calcular los resultados del tratamiento.

Estas se muestran en la tabla 20. [She79].

Tabla 20: Tipos de dureza

Clasificación	Dureza de carbonatos	Dureza de no-carbonatos
dureza de calcio	Bicarbonato cálcico	Sulfato cálcico
	Carbonato cálcico	Cloruro cálcico
dureza de magnesio	Bicarbonato de magnesio	Sulfato de magnesio
	Carbonato de magnesio	Cloruro de magnesio

ii. Cálculo de la dureza total y cálcica del agua

a. Cálculo de la dureza total

Método normalizado

La determinación de dureza total se realiza por el método SM 2340 C.

Principio del método

La sal disódica del ácido etilendianmino-tetracético (abreviadamente EDTA), forma complejos quelatos con los cationes de calcio y magnesio presentes en una solución acuosa. Si se agregan pequeñas cantidades del indicador negro de eriocromo T a la solución anterior a un pH de 10,0 la solución vira al color rojo vino. Cuando todo el calcio y magnesio forman complejos quelatos con el EDTA adicionando, la solución vira al color azul, indicando el punto final de la valoración.

Procedimiento experimental

- Tomar un volumen de muestra en la que se necesite menos de 15 ml de solución de EDTA 0,01 M y se complete la valoración en 5 minutos después de la adición de la solución tampón.
- Diluir el volumen de muestra anterior a partir de agua destilada hasta un volumen de 50 ml.

- Añadir 1 o 2 ml de solución tampón para alcanzar el pH de 10,0 a 10,1.
- Añadir 1 o 2 gotas de la solución indicador negro de eriocromo T.
- Valorar la muestra con solución de EDTA 0,01 M hasta que el tono rojizo desaparece de la solución. El punto final de la valoración finaliza cuando la solución es de color azul.

Calculo de la dureza total a partir de la siguiente expresión:

$$\text{Dureza (mg/l de CaCO}_3\text{)} = \frac{A \cdot 1000 \cdot 1}{\text{mL muestra}}$$

dónde: A = mL consumidos solución EDTA 0,01 M valoración de la muestra (1 mg CaCO₃ equivale a 1 mL solución EDTA 0,01M).

Reactivos

La preparación de los reactivos necesarios se indica a continuación:

- Solución tampón: disolver 1,179 g de EDTA y 644 mg de cloruro de magnesio hexahidratado (MgCl₂·6H₂O) en 50 mL de agua destilada. Añadir a esta solución 16,9 g de cloruro de amonio (NH₄Cl) y 143 mL de hidróxido de amonio concentrado (NH₄OH) y diluir a 250 mL con agua destilada.

b. Cálculo de la dureza cálcica

Método normalizado

La determinación de calcio se realiza por el método SM 3550-Ca B.

Principio del método

En la titulación, el EDTA reacciona primero con los cationes de calcio libre y después con los cationes de calcio combinados con el indicador que vira del color rosa al color morado. El magnesio precipita como hidróxido de magnesio y no interfiere en la determinación. Se requiere un ajuste de la solución acuosa a valorar a un pH de 12,0-13,0.

Procedimiento experimental

- Tomar un volumen de muestra en la que se necesite menos de 15 ml de solución de EDTA 0,01 M y se complete la valoración en 5 minutos después de la adición de la solución de NaOH 1 N.

- Diluir el volumen de muestra anterior a partir de agua destilada hasta un volumen de 50 ml.
- Añadir 1 o 2 ml de solución de NaOH 1 N para alcanzar el pH de 12,0 a 13,0.
- Añadir 1 o 2 gotas de la solución indicador murexida.
- Valorar la muestra con solución de EDTA 0,01 M hasta que el tono rojizo desaparece de la solución. El punto final de la valoración finaliza cuando la solución es de color morado.

Calculo de la concentración de calcio a partir de la siguiente expresión:

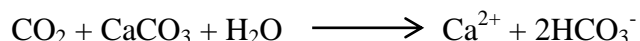
$$\text{Calcio (mg/l de CaCO}_3\text{)} = \frac{A \cdot 1000 \cdot 1}{\text{mL muestra}}$$

dónde: A = mL consumidos solución EDTA 0,01 M valoración de la muestra (1 mg CaCO₃ equivale a 1 mL solución EDTA 0,01M).

iii. Alcalinidad del agua

La alcalinidad del agua es la medida de su capacidad para neutralizar ácidos. También se utiliza el término capacidad de neutralización de ácidos (CNA), y representa la suma de las bases que pueden ser valoradas. Esta alcalinidad de las aguas naturales se debe principalmente a las sales de ácidos débiles, aunque las bases débiles o fuertes también puede contribuir.

Los bicarbonatos son los compuestos que más contribuyen a la alcalinidad, puesto que se forman en cantidades considerables por la acción del CO₂ sobre la materia básica del suelo como podemos ver en la reacción:

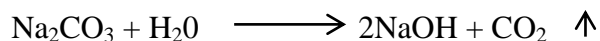


Es deseable tener alguna alcalinidad en el agua de la caldera, así que rara vez se lleva a cabo una remoción completa de la alcalinidad del remplazo de la caldera, excepto en la desmineralización. También se necesita cierta alcalinidad para dar el pH óptimo en el agua de alimentación a fin de prevenir la corrosión de la tubería y equipo.

Cuando los carbonatos y bicarbonatos se exponen a las temperaturas de la caldera, se rompen liberando CO₂:



Después, el carbonato de sodio se rompe aún más hasta caustico:



El gas dióxido de carbono se redisuelve cuando el vapor se condensa, y produce ácido carbónico corrosivo:



La cantidad de CO_2 generado es proporcional a la alcalinidad. Para una alcalinidad dada se forma el doble de CO_2 tanto a partir del HCO_3^- como del CO_3^{2-} porque la descomposición del bicarbonato es la suma de las dos reacciones anteriores. Entonces es deseable reducir la alcalinidad del agua de alimentación, para que la formación de CO_2 sea mínima, y reducir así los costos de tratamiento químico. [Web04].

iv. Cálculo de la alcalinidad del agua

Equipo

Fotómetro multiparamétrico HI83099

Especificaciones

Rango: 0 a 500 mg/l (como CaCO_3)

Resolución: 5 mg/l

Reactivos necesarios

Código: HI 93755-0

Descripción: Reactivo Indicador de Alcalinidad

Cantidad/Test: 1 Botella

Procedimiento de Medición

- Seleccione el método Alcalinidad usando el procedimiento descrito en la sección Selección del Método.
- Llene la cubeta con 10 ml de muestra sin tratar (hasta la marca) y ponga la tapa.
- Introduzca la cubeta en la célula de medición y cierre la tapa.

- Pulse la tecla ZERO. El display mostrará “-0,0” cuando el instrumento esté a cero y listo para medición.
- Retira la cubeta.
- La presencia de cloro en la muestra puede interferir en los resultados, para eliminar el cloro, añada previamente 1 gota del reactivo HI 93755-53 a la muestra.
- Añada cuidadosamente 1 ml del reactivo HI 93755-0 Reactivo Indicador de Alcalinidad, salvo para muestras con contenido inferior a 75ppm de alcalinidad que deberá añadir 0.7 ml en lugar de 1 ml. Ponga la tapa e invierta el vial 5 veces.
- Introduzca la cubeta en la célula de medición y cierre la tapa.
- Pulse READ, el medidor realizará la lectura.
- El instrumento muestra los resultados en mg/l de alcalinidad (CaCO_3).

ANEXO II. ÍNDICE DE LANGUELIER

ANEXO II. INDICE DE LANGELIER

i. Índice de Langelier

El índice de saturación de Langelier (LSI) constituye un indicador del grado de saturación del agua con respecto al carbonato de calcio. Se trata, básicamente, de un índice de equilibrio que proporciona información acerca de la fuerza impulsora para formación y aglomeración de incrustaciones de CaCO_3 , en términos de pH como variable principal. Sin embargo, su principal limitación es que no facilita ninguna indicación referente a la cantidad de CaCO_3 que precipitará para llevar el agua al estado de equilibrio.

El índice de Langelier se calcula como la diferencia entre el pH real, medido, del agua y el pH de saturación de ésta en calcita, según indica la siguiente ecuación.

$$LSI = pH - pH_s \quad [5]$$

De esta forma, si el LSI es negativo, no existirá en el agua potencial de formación de incrustaciones y se disolverá CaCO_3 , tratándose de aguas corrosivas. Valores de LSI positivos revelarán, sin embargo, que se trata de aguas incrustantes con elevada probabilidad de formar depósitos de CaCO_3 . Finalmente, si LSI es próximo a cero, el agua se encontraría inicialmente en equilibrio, aunque cualquier modificación en su calidad o en parámetros como la temperatura podría variar el valor del índice, favoreciendo los fenómenos de corrosión o la deposición de incrustaciones (Dégremont, 1989).

Aunque el valor de LSI podría obtenerse calculando el pH_s de la siguiente ecuación:

$$pH_s = pK_2^R - pK_s^R + p[\text{Ca}^{2+}] + p[\text{HCO}_3^-] \quad [6]$$

obtenida a partir del equilibrio calcio-carbónico, el cálculo de esta expresión es complicado ya que incluye parámetros como la concentración de todos los iones disueltos en el agua.

Por este motivo, el índice LSI que contempla la influencia del contenido en sales disueltas del agua observada en las constantes de disociación de H_2CO_3 y en la solubilidad del CaCO_3 a diferentes temperaturas [Kem89], se calcula de acuerdo al método desarrollado por Langelier, considerando las siguientes variables para la determinación del pH de saturación.

- Alcalinidad, prácticamente sólo como HCO_3^- , expresada en mg de CaCO_3/l
- Dureza de las sales de Calcio, en mg CaCO_3/l
- Sólidos disueltos totales, en mg/l
- Temperatura del agua

Este método de cálculo del pH_s y en consecuencia, del índice de Langelier puede desarrollarse de forma gráfica o numérica, según los modelos que se explican a continuación.

c. Método gráfico

En la metodología gráfica para la determinación del índice de saturación de Langelier, el pH de equilibrio o saturación se expresa según la siguiente ecuación.

$$\text{pH}_s = C + \text{pCa} + \text{pAlc} \quad [7]$$

donde pCa y pAlc corresponden, respectivamente, al $-\log$ de las concentraciones de iones Ca^{2+} e iones HCO_3^- , y C es una constante que recoge la dependencia de las constantes termodinámicas de las reacciones de disociación del ácido carbónico y de precipitación del carbonato de calcio con respecto a la temperatura y la concentración de sólidos disueltos totales (SDT).

En la expresión anterior se asume, por tanto, que la alcalinidad se debe principalmente a los iones bicarbonato presentes en el agua, pues las concentraciones de iones CO_3^{2-} y OH^- se consideran, en principio, despreciables.

El diagrama establecido por Langelier, representado en la figura 16 al final de este Anexo, permite obtener el valor de C para una determinada temperatura y concentración de SDT, en mg/L. Asimismo, proporciona los valores de pCa y pAlc correspondientes a unas concentraciones dadas de iones calcio e iones bicarbonato, ambas expresadas en mg CaCO_3/l . Con todo ello, es posible calcular el pH de saturación finalmente, el índice de Langelier y comprobar si las aguas tienen tendencia a la corrosión o a la formación de incrustaciones (Dégremont, 1989).

d. Método numérico

Este método de determinación del pH de saturación ha sido desarrollado a partir de ecuaciones de equilibrio calcio-carbónico, al igual que el gráfico de Langelier, de forma que el proceso de cálculo es bastante similar. El pH de equilibrio, en este caso, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\text{pH}_s = (9.3 + A + B) - (C + D) \quad [8]$$

en la que A, B, C y D son parámetros que representan la influencia en el valor del pH_s de las sales disueltas, la temperatura del agua, la dureza de calcio y la alcalinidad, respectivamente.

Las siguientes ecuaciones permiten obtener el valor de estas variables.

$$A = (\text{Log} [\text{DST}(\text{mg/l})] - 1)/10$$

$$B = -13,12 \times \text{Log} (T(^{\circ}\text{C}) + 273) + 34,55$$

$$C = \text{Log} [\text{Ca}^{2+} (\text{mg CaCO}_3/\text{l})]$$

$$D = \text{Log} [\text{HCO}_3^{-} (\text{mg CaCO}_3/\text{l})]$$

Cuando no se dispone de datos de concentración de sólidos disueltos totales, el valor de este parámetro puede estimarse a partir de datos de conductividad específica, CE. La conductividad es una medida de la concentración de sales disueltas en el agua, que a su vez corresponde a los sólidos solubles o residuo seco. De este modo, el valor de SDT se calcula en mg/l empleando la siguiente ecuación [centro canario del agua].

$$[\text{SDT}] = \text{CE}(\mu\text{s/cm}) * 0.64 \quad [9]$$

Por último, una vez conocido el pH_s e introduciendo el valor de pH medido en las aguas en la ecuación 9, podrá determinarse si éstas presentan o no un elevado poder incrustante, según el criterio establecido. [Dre89].

- $\text{LSI} > 0 \rightarrow$ Agua sobresaturada con respecto a la calcita \rightarrow Incrustante
- $\text{LSI} < 0 \rightarrow$ Agua subsaturada con respecto a la calcita \rightarrow Corrosiva

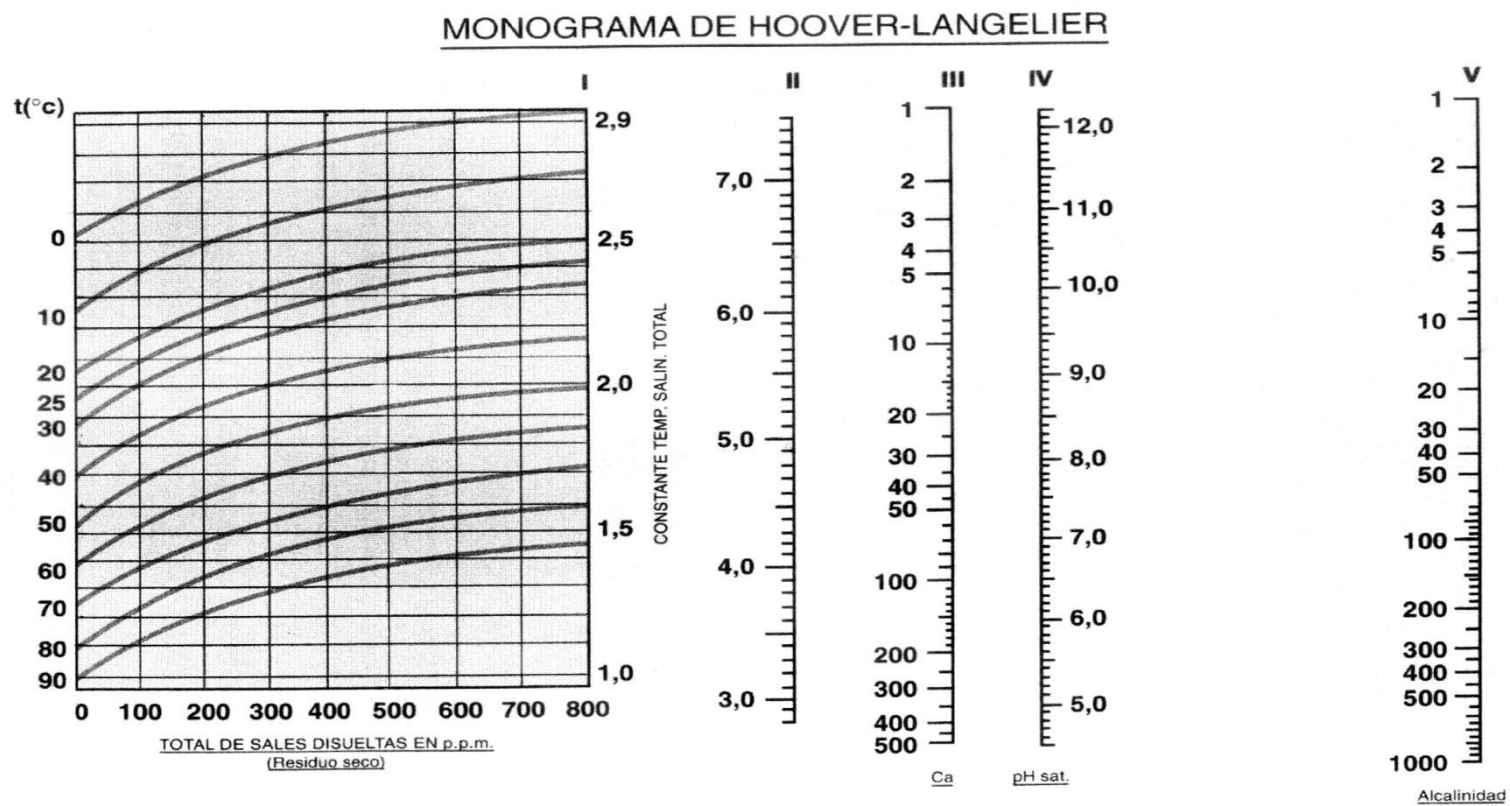


Figura 16: Diagrama de Langelier

ii. Ejemplo de cálculo de índices de saturación

Los índices de medida del poder incrustante de las aguas más utilizados en la actualidad, son el índice de Langelier, el de Ryznar y el de standard Methods. En este apartado se explica el cálculo detallado del índice de Langelier, por ser uno de los más representativos, para una muestra del agua de aporte a la central térmica de Andorra, en marzo del año 2008.

Como se ha definido en el apartado I.1 de este anexo, el índice de Langelier es la diferencia entre el pH real del agua y el pH correspondiente a la saturación en CaCO_3 . El pH_s puede obtenerse gráfica o numéricamente, aunque ambos métodos se fundamentan en el equilibrio calcio-carbónico, por ello solo se explica el método numérico.

Los parámetros analíticos necesarios para determinar LSI en la fecha considerada se obtienen a partir de datos analíticos de calidad de aguas y son los siguientes.

- $T = 16.1\text{ }^\circ\text{C}$
- $\text{CE} = 650$
- $\text{pH} = 8.00$
- $[\text{Ca}^{2+}] = 260\text{ mg CaCO}_3/\text{l}$
- $[\text{HCO}_3^-] = 130\text{ mg CaCO}_3/\text{l}$

En el método numérico se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\text{pH}_s = (9.3 + A + B) - (C + D)$$

en la que los factores A, B, C y D corresponden a las siguientes expresiones:

$$A = (\text{Log} [\text{DST}(\text{mg/l})] - 1)/10$$

$$B = -13,12 \times \text{Log} (T(^\circ\text{C}) + 273) + 34,55$$

$$C = \text{Log} [\text{Ca}^{2+} (\text{mg CaCO}_3/\text{l})]$$

$$D = \text{Log} [\text{HCO}_3^- (\text{mg CaCO}_3/\text{l})]$$

Para poder estimar estos parámetros a partir de los datos disponibles, será necesario estimar la concentración de sólidos disueltos totales con la siguiente ecuación:

$$[\text{SDT}] = \text{CE}(\mu\text{s/cm}) * 0.64$$

Por tanto se tiene:

$$[SDT] = 410$$

$$A = 0.16$$

$$B = 2.26$$

$$C = 2.41$$

$$D = 2.11$$

$$pH_s = (9.3 + A + B) - (C + D) = 7.19$$

Finalmente, el índice de Langelier se determina considerando el pH real del agua y el obtenido para el agua de aporte a la central térmica de Andorra es

$$LSI = 8.00 - 7.19 = 0.81$$

iii. Datos de evolución del poder incrustante del agua de abastecimiento con la temperatura en 2008

En este apartado se presentan los datos de evolución del índice de Langelier durante el año 2008, calculados mediante el método numérico según lo explicado en el apartado anterior. Los datos analíticos de caracterización del agua necesarios para realizar los cálculos se incluyen, junto con el resultado en la tabla 21.

Tabla 21: Datos analíticos de caracterización de agua de aporte del año 2008 y resultados

FECHA 2008	dureza total (mg/l de CaCO ₃)	dureza cálcica (mg/l de CaCO ₃)	bicarbonatos (mg/l de CaCO ₃)	CL (mg/l de CaCO ₃)	SO ₄ (mg/l de CaCO ₃)	PH	CONDUC (μs/cm)	SDT (mg/l)	T (°C)	A	B	C	D	pHs	ILS
2-ene	390	290	130	31	219	8,20	635	406	7,5	0,16	2,43	2,46	2,11	7,32	0,88
4-ene		260				8,10	637	408							
7-ene		260				8,10	625	400							
9-ene		270				8,10	630	403							
11-ene		270				8,10	640	410							
14-ene		270				8,30	640	410							
17-ene	370	260	125	29	216	8,30	630	403	7,6	0,16	2,43	2,41	2,10	7,38	0,92
21-ene		260				8,00	640	410							
25-ene		260				8,00	660	422							
28-ene		260				8,00	650	416							
30-ene	360	260	145	29	216	8,00	625	400	8,0	0,16	2,42	2,41	2,16	7,31	0,69
1-feb	370	260	135	25	225	8,00	630	403	8,0	0,16	2,42	2,41	2,13	7,34	0,66
4-feb		260				8,00	630	403							
6-feb		270	140			8,00	630	403	8,2	0,16	2,42	2,43	2,15	7,30	0,70
8-feb		270				8,00	630	403							
11-feb		270				8,00	625	400							
13-feb		270				8,10	629	403							
15-feb		270				8,00	630	403							
18-feb		270				8,10	630	403							
20-feb	380	270	140	22	228	8,00	640	410	11,0	0,16	2,36	2,43	2,15	7,25	0,75
22-feb		270				8,10	650	416							

Anexo II

FECHA 2008	dureza total (mg/l de CaCO ₃)	dureza cálcica (mg/l de CaCO ₃)	bicarbonatos (mg/l de CaCO ₃)	CL (mg/l de CaCO ₃)	SO ₄ (mg/l de CaCO ₃)	PH	CONDUC (μs/cm)	SDT (mg/l)	T (°C)	A	B	C	D	pHs	ILS
26-feb		270				8,10	640	410							
3-mar		250				8,00	640	410							
5-mar	370	250	130	21	219	8,00	640	410	16,1	0,16	2,26	2,40	2,11	7,21	0,79
7-mar		260				8,00	650	416							
10-mar		260				8,00	650	416							
12-mar		250				8,00	630	403							
14-mar		260				8,00	650	416							
17-mar		260				8,00	645	413							
19-mar	350	260	130	19	216	8,00	650	416	16,1	0,16	2,26	2,41	2,11	7,19	0,81
24-mar		250				8,00	650	416							
28-mar		260				8,10	650	416							
31-mar		260				8,10	654	419							
3-abr		260				8,10	630	403							
4-abr		250				8,10	630	403							
7-abr	350	260	130	20	210	8,10	640	410	17,0	0,16	2,24	2,41	2,11	7,18	0,92
9-abr		260	110			8,10	630	403	17,2	0,16	2,24	2,41	2,04	7,24	0,86
11-abr		260				8,10	640	410							
14-abr		250				8,10	650	416							
17-abr	350	250	110	20	220	8,10	650	416	17,2	0,16	2,24	2,40	2,04	7,26	0,84
21-abr		250				8,10	640	410							
24-abr	340	250	125	20	210	8,10	650	416	17,2	0,16	2,24	2,40	2,10	7,21	0,89
2-may		250				8,10	640	410							
5-may		240				8,10	650	416							
7-may	340	260	125	70	240	8,10	670	429	17,9	0,16	2,23	2,41	2,10	7,18	0,92

Anexo II

FECHA 2008	dureza total (mg/l de CaCO ₃)	dureza cálcica (mg/l de CaCO ₃)	bicarbonatos (mg/l de CaCO ₃)	CL (mg/l de CaCO ₃)	SO ₄ (mg/l de CaCO ₃)	PH	CONDUC (μs/cm)	SDT (mg/l)	T (°C)	A	B	C	D	pHs	ILS
8-may		250				8,20	630	403							
9-may		260				7,80	695	445							
12-may		260				8,10	670	429							
15-may		260	155			7,90	670	429	18,4	0,16	2,22	2,41	2,19	7,07	0,83
16-may	350	260	125	25	200	7,90	680	435	18,4	0,16	2,22	2,41	2,10	7,17	0,73
21-may		250	150			7,70	675	432	18,4	0,16	2,22	2,40	2,18	7,11	0,59
27-may		250				8,20	630	403							
30-may	360	260	115	20	235	8,10	630	403	18,4	0,16	2,22	2,41	2,06	7,20	0,90
2-jun		250	130	65	265	7,80	679	435	18,4	0,16	2,22	2,40	2,11	7,17	0,63
6-jun	330	250	130	70	220	7,90	650	416	18,4	0,16	2,22	2,40	2,11	7,17	0,73
10-jun	330	240	125	70	210	7,90	640	410	18,4	0,16	2,22	2,38	2,10	7,20	0,70
13-jun	340	250	130	70	210	8,20	670	429	18,4	0,16	2,22	2,40	2,11	7,17	1,03
17-jun	330	240	125	70	240	8,20	670	429	18,4	0,16	2,22	2,38	2,10	7,20	1,00
23-jun	340	250	130	28	207	8,00	660	422	18,4	0,16	2,22	2,40	2,11	7,17	0,83
25-jun		250				8,00	650	416							
27-jun	340	250	130	25	205	8,10	640	410	20,0	0,16	2,18	2,40	2,11	7,13	0,97
7-jul	340	250	125	55		7,90	685	438	20,0	0,16	2,18	2,40	2,10	7,15	0,75
9-jul		250				7,90	685	438							
10-jul		250				7,90	690	442							
11-jul	340	250	125	50	260	7,80	690	442	20,2	0,16	2,18	2,40	2,10	7,15	0,65
14-jul		250				7,90	680	435							
16-jul		250				7,80	685	438							
21-jul	330	250	130	55	265	7,80	690	442	21,3	0,16	2,16	2,40	2,11	7,11	0,69
28-jul	340	250	125	60	265	7,90	680	435	21,3	0,16	2,16	2,40	2,10	7,13	0,77

Anexo II

FECHA 2008	dureza total (mg/l de CaCO ₃)	dureza cálcica (mg/l de CaCO ₃)	bicarbonatos (mg/l de CaCO ₃)	CL (mg/l de CaCO ₃)	SO ₄ (mg/l de CaCO ₃)	PH	CONDUC (μs/cm)	SDT (mg/l)	T (°C)	A	B	C	D	pHs	ILS
1-ago	340	250	120	55	265	8,20	690	442	21,3	0,16	2,16	2,40	2,08	7,15	1,05
6-ago	340	250	120	50	265	8,10	670	429	21,3	0,16	2,16	2,40	2,08	7,15	0,95
7-ago						8,10					2,59				
8-ago	340	250	125	45	265	7,80	680	435	21,5	0,16	2,16	2,40	2,10	7,12	0,68
9-ago						7,80									
10-ago						7,80									
11-ago						7,90									
12-ago	340	250	120	40	275	7,90	680	435	22,0	0,16	2,15	2,40	2,08	7,13	0,77
14-ago	340	250	135	40	290	7,80	680	435	22,0	0,16	2,15	2,40	2,13	7,08	0,72
16-ago						7,90									
18-ago	340	250	125	40	265	7,90	680	435	22,0	0,16	2,15	2,40	2,10	7,11	0,79
21-ago						7,80									
22-ago	340	250	130	45		7,80	690	442	22,1	0,16	2,14	2,40	2,11	7,10	0,70
25-ago	330	250	125	45	265	7,80	680	435	22,1	0,16	2,14	2,40	2,10	7,11	0,69
28-ago						7,80									
29-ago	340	250	130	55	265	7,90	680	435	22,2	0,16	2,14	2,40	2,11	7,09	0,81
1-sep	350	250	130	50	265	7,91	680	435	22,2	0,16	2,14	2,40	2,11	7,09	0,82
4-sep	350	250	125	45	275	7,94	685	438	22,0	0,16	2,15	2,40	2,10	7,12	0,82
5-sep		250				7,95	690	442							
8-sep	350	250	130	45	265	7,98	688	440	23,0	0,16	2,13	2,40	2,11	7,08	0,90
10-sep		250				7,97	690	442							
12-sep	350	250	125	40	265	7,98	687	440	23,0	0,16	2,13	2,40	2,10	7,10	0,88
15-sep	340	250	130	35	265	7,98	691	442	23,0	0,16	2,13	2,40	2,11	7,08	0,90
16-sep		280	130			7,30	690	442							

Anexo II

FECHA 2008	dureza total (mg/l de CaCO ₃)	dureza cálcica (mg/l de CaCO ₃)	bicarbonatos (mg/l de CaCO ₃)	CL (mg/l de CaCO ₃)	SO ₄ (mg/l de CaCO ₃)	PH	CONDUC (μs/cm)	SDT (mg/l)	T (°C)	A	B	C	D	pHs	ILS
17-sep		270				7,95	705	451							
19-sep	340	260	125	45	215	7,98	695	445	23,0	0,16	2,13	2,41	2,10	7,08	0,90
23-sep	340	260	125	45	265	7,98	690	442	23,0	0,16	2,13	2,41	2,10	7,08	0,90
25-sep		250				7,95	683	437			2,59				
26-sep	340	260	125	50	255	7,98	685	438	23,0	0,16	2,13	2,41	2,10	7,08	0,90
29-sep	330	250				7,95	690	442							
1-oct	360	280	130	35	285	7,80	714	457	23,0	0,17	2,13	2,45	2,11	7,03	0,77
3-oct	350	265	130	40	270	7,95	700	448	23,0	0,17	2,13	2,42	2,11	7,05	0,90
8-oct	370	280	125	45	265	7,90	710	454	22,5	0,17	2,14	2,45	2,10	7,06	0,84
10-oct	360	280	130	45	245	7,90	710	454	22,5	0,17	2,14	2,45	2,11	7,04	0,86
12-oct		240				8,10	680	435							
13-oct	320	240	130	40	275	8,10	690	442	18,6	0,16	2,21	2,38	2,11	7,18	0,92
17-oct		240				8,00	685	438							
20-oct		270				8,10	695	445							
23-oct		240				7,80	680	435							
24-oct	330	240	125	35	275	7,90	687	440	17,5	0,16	2,23	2,38	2,10	7,22	0,68
28-oct	330	270	130	40	275	7,99	690	442	17,3	0,16	2,24	2,43	2,11	7,16	0,83
29-oct	450	320	125	25	325	8,16	718	460	17,3	0,17	2,24	2,51	2,10	7,10	1,06
31-oct	340	280	125	45	265	8,15	710	454	17,0	0,17	2,24	2,45	2,10	7,17	0,98
5-nov		260				8,10	590	378							
10-nov		250				8,10	590	378							
12-nov	350	260	130	25	215	8,20	610	390	14,0	0,16	2,30	2,41	2,11	7,23	0,97
14-nov		260				8,20	590	378							
17-nov		260				8,20	660	422			2,59				

Anexo II

FECHA 2008	dureza total (mg/l de CaCO ₃)	dureza cálcica (mg/l de CaCO ₃)	bicarbonatos (mg/l de CaCO ₃)	CL (mg/l de CaCO ₃)	SO ₄ (mg/l de CaCO ₃)	PH	CONDUC (μs/cm)	SDT (mg/l)	T (°C)	A	B	C	D	pHs	ILS
19-nov	350	260	150	30	200	8,30	600	384	14,0	0,16	2,30	2,41	2,18	7,17	1,13
21-nov		260				8,20	610	390							
24-nov		270				8,30	598	383							
26-nov		270				8,00	690	442							
28-nov	350	270	125	30	200	8,00	680	435	13,2	0,16	2,32	2,43	2,10	7,25	0,75
1-dic	330	240	155	30	200	8,10	590	378	13,2	0,16	2,32	2,38	2,19	7,21	0,89
5-dic		230				7,90	640	410							
9-dic		230	155			7,90	640	410	12,0	0,16	2,34	2,36	2,19	7,25	0,65
10-dic	320	230	155	30	195	7,90	590	378	12,0	0,16	2,34	2,36	2,19	7,25	0,65
12-dic		230				8,10	610	390							
16-dic		230	150			7,90	640	410	10,0	0,16	2,38	2,36	2,18	7,31	0,59
17-dic		230				7,90	600	384							
22-dic		230	155			8,20	640	410	8,6	0,16	2,41	2,36	2,19	7,32	0,88
24-dic	330	240	155	30	200	8,10	600	384	8,6	0,16	2,41	2,38	2,19	7,30	0,80
26-dic		230				7,90	640	410							
29-dic		230	150			7,90	640	410	8,4	0,16	2,41	2,36	2,18	7,34	0,56
5-ene	330	240	155	30	210	8,10	590	378	8,2	0,16	2,42	2,38	2,19	7,31	0,79
8-ene		240	155			8,10	590	378	7,9	0,16	2,43	2,38	2,19	7,31	0,79
9-ene		240	155			8,20	600	384	7,9	0,16	2,43	2,38	2,19	7,31	0,89
12-ene	330	240	155	30	205	8,20	595	381	7,7	0,16	2,43	2,38	2,19	7,32	0,88
15-ene		230	150			7,90	640	410	7,6	0,16	2,43	2,36	2,18	7,35	0,55
19-ene		230	150			7,90	640	410	7,6	0,16	2,43	2,36	2,18	7,35	0,55
22-ene		240	155			8,20	595	381	7,6	0,16	2,43	2,38	2,19	7,32	0,88
23-ene		240				8,20	595	381							

Anexo II

28-ene	330	240	155	30	200	8,20	595	381	7,5	0,16	2,43	2,38	2,19	7,32	0,88
	dureza total (mg/l de CaCO ₃)	dureza cálcica (mg/l de CaCO ₃)	bicarbonatos (mg/l de CaCO ₃)	CL (mg/l de CaCO ₃)	SO ₄ (mg/l de CaCO ₃)	PH	CONDUC (μs/cm)	SDT (mg/l)	T (°C)	A	B	C	D	pHs	ILS
Promedio	346	254	134	40	241	8,01	653								0,81
Max	450	320	155	70	325	8,30	718								1,13
MIN	320	230	110	19	195	7,30	590								0,55

Se presentan en la figura 17 los resultados del índice de Langelier para los datos de 2008.

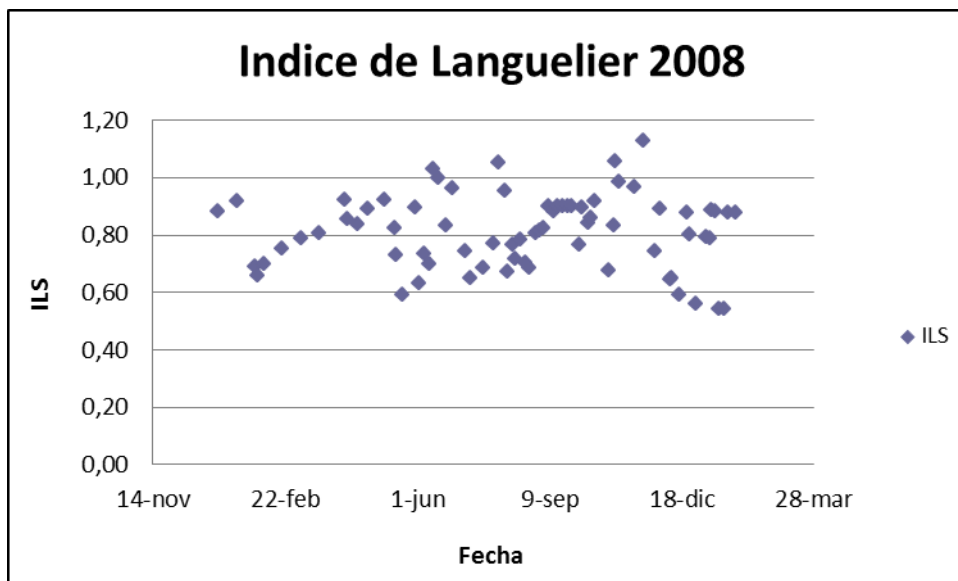


Figura 17: Cálculo índice de Langelier para el año 2008

Como se puede observar en el gráfico, todos los valores calculados del índice de Langelier, se encuentran entre 0,5 y 1,1. Valores de LSI positivos revelan, que se trata de aguas incrustantes con elevada probabilidad de formar depósitos de CaCO_3 . Sin embargo, si LSI es próximo a cero, el agua se encontraría inicialmente en equilibrio.

Como podemos observar, todos los valores del índice de Langelier se encuentran por encima de cero, lo que determina el carácter incrustante de esta agua, pero no son demasiado elevados, están próximos a cero, por lo que se tiene un agua con un carácter ligeramente incrustante.

ANEXO III. EL CICLO DEL AGUA EN LA CENTRAL TÉRMICA DE ANDORRA

ANEXO III. EL CICLO DEL AGUA EN LA CENTRAL TÉRMICA

i. INTRODUCCIÓN

Para conseguir las especificaciones de calidad del agua necesarias para su uso en calderas, es necesario el tratamiento del agua de captación en la planta de tratamiento de aguas.

El agua bruta, procedente del pantano de Calanda, en el río Guadalope, se bombea a un depósito, desde donde se alimenta por gravedad la planta que se va a describir a continuación.

La planta de tratamiento de agua para la central térmica de Teruel, abastece de agua desmineralizada en cantidad y calidad a los grupos 1, 2, y 3, a los pozos de agua de servicio y a una parte de la planta de desulfuración de gases.

Las condiciones básicas y etapas que forman dicha planta (figura 18) se exponen seguidamente.

El agua bruta, procedente del pantano de Calanda, alimenta la instalación a través de los pasos siguientes:

- El decantador donde se producirá un ablandamiento y descarbonatación del agua a tratar.
- Primer filtrado en los filtros de gravedad donde el agua de salida del decantador es filtrada y almacenada en un depósito de agua filtrada.
- Bombeo de agua filtrada, a través de 4 bombas, impulsando el agua a un segundo filtrado, en los filtros de carbón activo, dando paso a su desmineralización.
- Dicha desmineralización se realizara, en dos pasos:
- Desmineralización primaria, donde pasa el agua a través de una resina catiónica y seguida de una resina aniónica, donde se quedaran la mayoría de las sales.
- Desmineralización secundaria, donde se produce un pulido final de desmineralización.
- Dando paso al almacén de agua desmineralizada y alimentación en cantidad y calidad necesaria para los diferentes servicios.

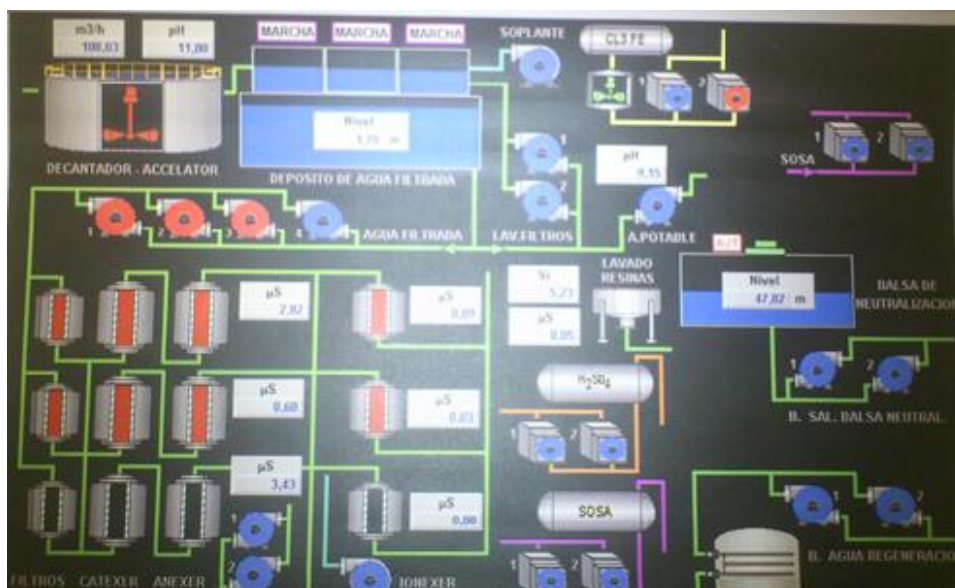


Figura 18: Esquema de la planta completa

ii. CAPTACIÓN

El agua bruta entra por gravedad a la instalación. Dado que la presión disponible (cota geométrica) no es suficiente para asegurar la correcta alimentación de la planta por gravedad, se ha instalado un bombeo de agua bruta, que incrementa la presión en 20 m.c.a., lo que asegura una presión suficiente para la instrumentación de entrada y los servicios auxiliares.

El caudal de entrada se ajusta automáticamente a la demanda mediante una válvula reguladora, controlada en función del nivel en el depósito de agua filtrada. La válvula reguladora va colocada en la tubería de agua bruta antes del paso por el decantador.

A continuación se dispone de un medidor de caudal, montado en la tubería de agua bruta, que regula la dosificación de reactivos al decantador, purgas, etc.

El agua de dilución de reactivos de toma del agua bruta, ya que no existe turbiedad.

iii. PRETRATAMIENTO

a. Ideas de los procesos de: coagulación, sedimentación y ablandamiento

Coagulación.- La coagulación consiste en introducir en el agua un producto capaz de neutralizar la carga de los coloides, generalmente electronegativos, presentes

en el agua, el coagulante utilizado en nuestro decantador acelerador, el más adecuado es una sal de hierro “cloruro férrico “que formara al precipitar un hidróxido de hierro.

Sedimentación.- El precipitado de hierro que se forma, se convierte en más grande y pesado, formando lo que llamaremos “Flóculos “que por supuesto se marcha al fondo, a este fenómeno se le conoce con el nombre de “sedimentación “.

Ablandamiento.- Añadiendo sosa cáustica se sube el pH hasta valores de 10 con lo que los bicarbonatos pasan a carbonatos, precipitando el carbonato cálcico.

b. Etapas del pretratamiento

Decantador acelerador

El decantador – ACCELATOR (figura 19 y figura 20) es una unidad de tratamiento por contacto de sólidos. Aunque en principio ha sido proyectado para el tratamiento de agua, se puede aplicar para una sorprendente variedad de problemas relativos a tratamiento de líquidos que incluyan la precipitación y eliminación de materiales de sólidos.



Figura 19: Decantador ACCELATOR

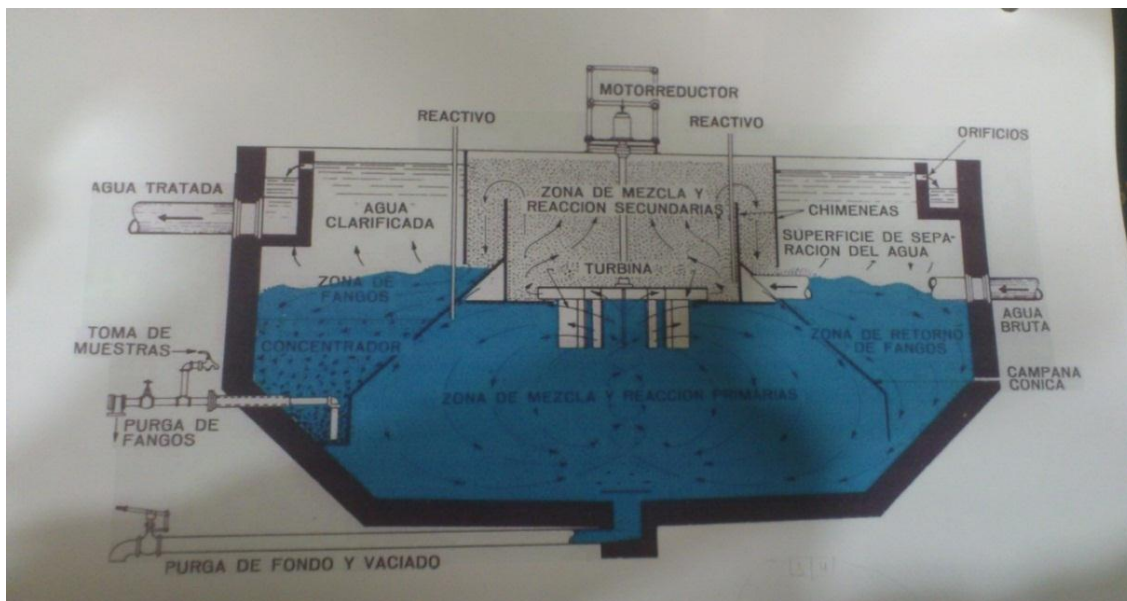


Figura 20: Decantador ACCELATOR

El tratamiento químico en este decantador se ha previsto de tal forma que se consiga la máxima reducción posible en el contenido de sólidos disueltos, utilizando una descarbonatación y eliminación consiguiente de la dureza temporal y permanente, con sosa cáustica. Como coagulante para mejorar la decantación de los precipitados, se ha previsto cloruro férrico por las ventajas que este reactivo presenta frente a otros de similar utilización, así los valores de turbiedad-hierro, disminuyen con la dosificación de cloruro férrico. Es de destacar la escasa dependencia que la floculación con cloruro férrico presenta con el pH del agua a flocular, mostrándose prácticamente invariable a los cambios de pH.

El decantador se compone de un depósito que comprende:

- Una entrada de agua bruta y un canal de repartición de la misma.
- Una zona de mezcla y reacción primaria, en forma de tronco de cono.
- Dos chimeneas concéntricas que constituyen la zona de mezcla y reacción secundaria
- Una turbina para la mezcla y recirculación de los fangos, accionada por un motor reductor, un sistema de canales de recogida del agua decantada.

El volumen de entrada de agua al acelerator es controlado por la válvula automática que se encuentra antes de entrar a este y se puede observar tanto el caudal

en tiempo real como el total de volumen de agua, este decantador acelerador está diseñado para un caudal máximo de 250 m³/h.

Las características de dicha agua son conocidas exactamente, por lo tanto el diseño del acelerador y de sus sistemas están diseñados de tal forma que se consiga la máxima reducción posible en el contenido de sólidos disueltos, utilizando la descarbonatación y eliminación consiguiente de la dureza temporal.

La primera característica propia del acelerador es que los productos químicos se agregan en las zonas de reacción de forma que la reacción química tiene lugar en presencia de flóculos previamente formado. En estas condiciones la precipitación de las impurezas del agua se lleva a cabo sobre la superficie de partículas recirculadas y el producto recirculante o granulado resultante decanta en condiciones ideales. Queda así prácticamente eliminada la formación de pequeñas partículas (moléculas en el caso de la descarbonatación) individuales.

Desde la zona de reacción primaria el agua bruta mezclada con dos o cuatro veces su volumen de fangos recirculados, pasa a la zona de reacción secundaria, en la que al continuo contacto del agua con los flóculos se consigue el equilibrio en la reacción antes de descargarse a la zona exterior del acelerador, destinada a la separación de los fangos y al agua.

Los flóculos abandonan la zona de reacción secundaria, impulsados hacia la periferia y en movimiento descendente sobre la zona de fangos que forman el ciclo de tratamiento.

El movimiento de los fangos está perfectamente controlado por la forma cónica de la campana y la aspiración creada por la turbina. De ellos se separa el agua en sentido ascendente, a medida que llega un volumen nuevo de agua bruta y un volumen análogo se separa de los fangos.

El agua se recoge en los canales de recogida y los fangos recirculan a la zona de reacción primaria.

Dosificación de reactivos en el decantador

Los reactivos utilizados son: Sosa cáustica al 50 % y cloruro férrico al 40 %.

Se dispone de un tanque de almacenaje de cloruro férrico al 40 % de donde se alimenta, a una cuba diluidora donde se queda diluido hasta el 15 % y de esta cuba, dos

bombas dosificadoras alimentaran, al acelerator. Estas bombas, su trabajo normal es, en automático entrando en servicio una cada vez, así como el agitador de esta cuba, que entraran ambas en funcionamiento dependiendo de la consigna que el por el servicio químico ponga.

Se dispone de un tanque de almacenaje de sosa al 50 % de donde se alimentan dos bombas dosificadoras impulsan la sosa a una T de mezcla donde al juntarse con el agua es diluida al 5 %. Estas bombas su trabajo normal es, en automático entrando en servicio una cada vez y su frecuencia de marcha estará en función de la consigna que el servicio químico ponga para el PH de salida del acelerator.

- Se prevé una dosis teórica de 250 gr. de sosa al 50% (densidad de la sosa 1,5 kg/litro) en peso por m³ de agua tratada en el acelerator, aunque en realidad se está utilizando 650 gr. de sosa al 50% por m³ de agua tratada.
- Se ha previsto una dosis teórica de cloruro férrico de 15 gr /m³ rico al 100% en peso, aunque en realidad se estás empleando 63 gr / m³.

Filtros de gravedad

El agua, una vez sale del decantador es conducida a los filtros de gravedad (figura 21), los cuales se componen de una cuba metálica abierta, siendo su funcionamiento a presión atmosférica. El proceso de filtración, es sobre lecho filtrante de: una capa de antracita, debajo de esta, una capa de arena y debajo de esta, 3 capas de grava de distintas granulometrías. La recogida de agua se produce a través de unas toberas, una vez el filtro se ha ensuciado, se podrá limpiar con la misma agua en sentido contrario al de filtrado.

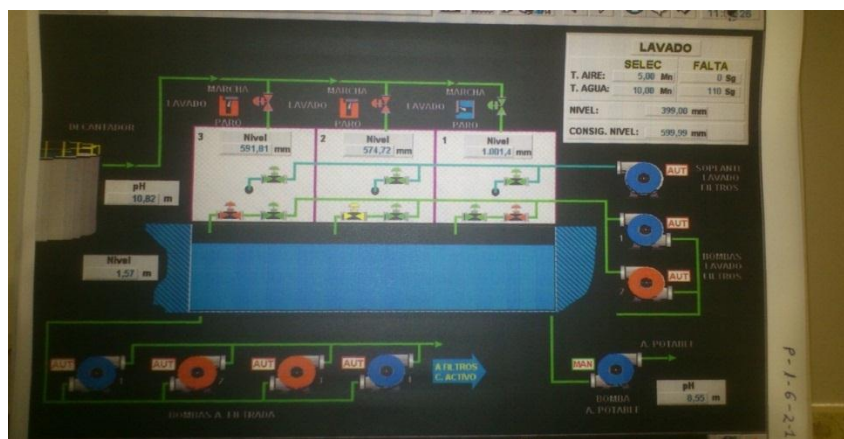


Figura 21: Filtros de gravedad

La finalidad de estos filtros, es retener los flóculos que no se han quedado en el acelerador y no han sido purgados y conducir el agua al depósito de agua filtrada.

Descripción

Consta de tres filtros, denominados PACKAGED, que actúan por gravedad.

Cada uno de los lechos filtrantes está formado por una capa de antracita, debajo de esta, una capa de arena y debajo 3 capas de grava de distintas granulometrías.

En cada filtro hay incorporado una sonda de nivel señalizándonos en milímetros la altura de agua.

Se dispone para el aire de limpieza de una soplante únicamente. También necesitamos de un grupo de dos bombas, para el lavado de los filtros que se alternan, para igualar el número de horas de funcionamiento.

Entre el acelerador y los filtros de gravedad se realiza el control de medida de pH, para lo cual se ha realizado una extracción de agua que pasa en continuo por dicho analizador, cuyo control es primordial para el buen funcionamiento del acelerador.

El caudal unitario de estos filtros es de 58 m³/h en funcionamiento normal, y filtrando como máximo 87 m³/h, lo que supone un total máximo de unos 250 m³/h con los tres filtros.

Debajo de todas las válvulas están los depósitos de agua filtrada con su nivel correspondiente, que se encarga de almacenar el agua filtrada hasta un volumen total de 2350 m³.

En la parte inferior se tiene 4 bombas que son, las bombas de agua filtrada siendo las encargadas de impulsar el agua filtrada, a la zona de segundo filtrado y desmineralización.

Filtros de carbón activo

Se dispone de 3 filtros de carbón activo (figura 22 y figura 23) los cuales se componen de una cuba metálica cerrada, siendo su funcionamiento a presión. El proceso de filtración, es sobre lecho filtrante de carbón activo y la recogida de agua se produce a través de unas mangas, una vez el filtro se ha ensuciado, se puede limpiar con la misma agua en sentido contrario al de filtrado.

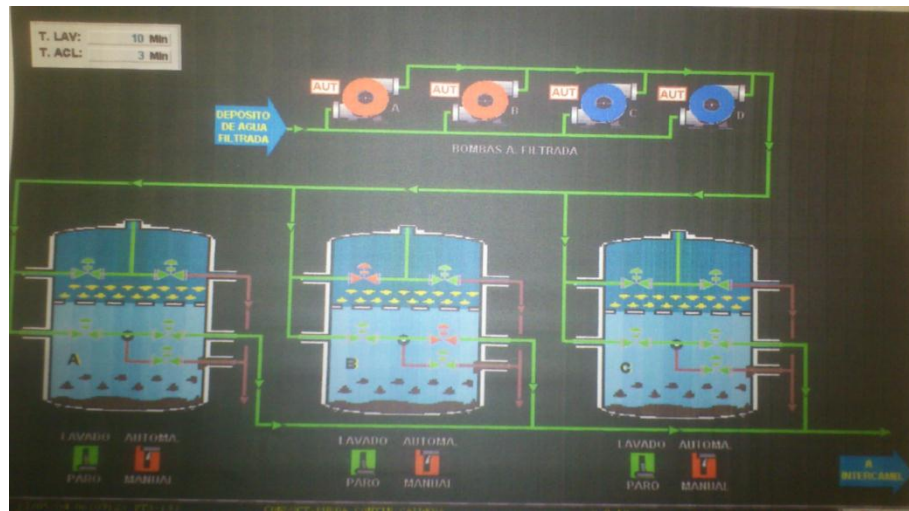


Figura 22: Filtros de carbón activo



Figura 23: Filtro de carbón activo a presión

Estos filtros tienen la función de realizar un filtrado final, antes de entrar el agua en las cadenas de desmineralización, otra función sería la de eliminación del cloro residual, procedente de una posible esterilización que tuviéramos que realizar si existiese materia orgánica en el agua bruta, que estamos utilizando en nuestra instalación, con una capacidad de retención de 5 ppm máximo.

Este carbón no es necesario regenerarlo, ya que el cloro no es realmente absorbido sino que se transforma en clorhídrico, simplemente se lavara el filtro.

Esta instalación, dispone de un by-pass para el caso de no utilizarlos, por estar el límite de cloro en 1 ppm, que es el límite de concentración que admiten las resinas sin sufrir deterioro.

Funcionamiento y lavado

Estos filtros, disponen de un lecho de carbón activo, entrando el agua impulsada, por las bombas de agua filtrada por la parte superior y saliendo dicha agua filtrada por la parte inferior, a través de unas mallas de recogida de agua. La disposición de válvulas es totalmente automática, así como su lavado.

El caudal unitario de estos filtros es de 58 m³/h en funcionamiento normal, lo que supone un total máximo de unos 174 m³/h con los tres filtros.

El lavado se realiza a contracorriente de la producción y el agua utilizada para dicho lavado, es agua filtrada extraída de los depósitos de agua filtrada, siendo impulsada por las mismas bombas de agua filtrada, saliendo el agua sucia por la parte superior y verterá el agua sucia al canal de desagüe.

iv. DESMINERALIZACIÓN PRIMARIA

a. Principios elementales y generalidades

La instalación de desmineralización primaria consta de tres cadenas idénticas dispuestas en paralelo y cada una de ellas, formadas: por un Catexer y un Anexer, conectados en serie, con capacidad unitaria neta de 57 m³/h. siempre que sea preciso.

La función de esta instalación consiste en tratar el agua filtrada que ha salido de los filtros de carbón activo, en dos partes bien diferenciadas.

En la primera parte al agua se hace pasar por un equipo de resina catiónica, llamado catexer (figura 24), dejando en él los iones calcio y magnesio del agua filtrada. Para su regeneración se utilizara ácido sulfúrico una vez se agote esta y a contracorriente.

En la segunda parte el agua que ha salido del catexer se le hace pasar por el equipo de resina aniónica (figura 25), que estará a su vez distribuida en dos zonas, con

dos resinas aniónicas, una débil y otra fuerte, llamado anexer y dejando los aniones. Para su regeneración se utilizara sosa cáustica, a contracorriente.

Con este proceso se han dejado ya los aniones y también los cationes, ya se ha obtenido un agua desmineralizada.

Las posibles variaciones de calidad de agua, por variación en el agua de alimentación o variación de rendimiento del decantador repercutirán únicamente en una reducción de producción total. La producción de agua de cada resina es de 920 m³ antes de que tenga que ser regenerada.

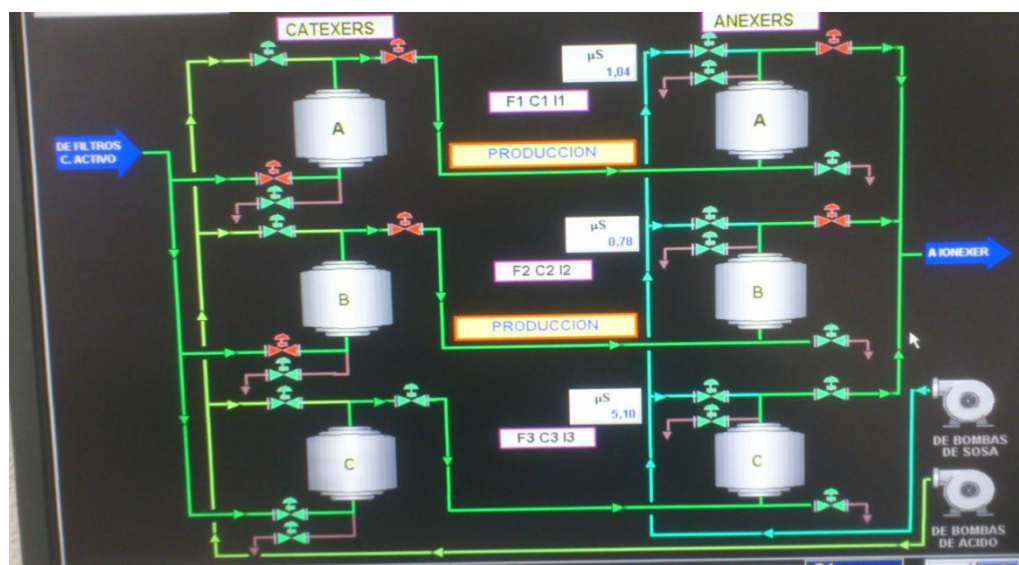


Figura 24: Cadenas de caterxers y anexers



Figura 25: Cadenas de anexers

Las resinas intercambiadoras que se han seleccionado para la desmineralización primaria, han sido las de lecho fluidificado, considerando el menor consumo de reactivos, menor fuga de iones y un menor consumo de agua lavado en las regeneraciones.

La principal característica de los lechos fluidificados es su funcionamiento en contracorriente, es decir, regenerar en sentido contrario al de servicio.

Durante la fase de servicio el agua a tratar penetra por la parte inferior de los aparatos con una velocidad tal que permita la formación de un lecho sólido, de tal forma que cuanto mayor sea el lecho sólido menor fuga de iones se produce, al mismo tiempo que favorece al intercambio iónico.

El resto de la resina que no constituye lecho sólido, puede moverse libremente en el líquido. En esta zona se retiene la mayor parte de los iones, por lo que al concluir el servicio la resina se encuentra totalmente agotada. El lecho sólido que se encuentra encima se utiliza para pulido final.

Con el fin de disminuir la pérdida de carga que la resina produce durante la fase de servicio, al estar comprimida contra las ranuras de las toberas e incluso evitar la posible obturación de las mismas, se ha colocado una capa de resina inerte de granulometrías ligeramente mayor que la resina intercambiadora, con el fondo de toberas superior y la resina.

Las resinas son marca LEWATIT de Bayer, de los siguientes tipos en cada cambiador:

CATEXER F-2-1-2 Catiónica fuerte S — 100 WS

ANEXER F-2-1-3 Aniónica débil MP — 64 WS

Aniónica fuerte M — 504 WS

Resina Inerte IN — 40

Para realizar el contralavado de las resinas, se ha dispuesto un depósito cilíndrico vertical. Este depósito está abierto en la parte superior con un pasillo para control de la expansión del contralavado.

Tener presente que solo se trasiega para contralavar la mitad del lecho de resina contenida en el cambiador.

b. Elementos básicos de cada intercambiador

Un intercambiador está compuesto de:

Un recipiente metálico, cerrado, de eje vertical, que contiene la resina intercambiadora.

La naturaleza de esta resina dependerá del intercambio que nos interese.

Los fondos: superior e inferior estarán cerrados con una placa perforada y en los agujeros, se montan unas toberas de plástico de ranuras calibradas, para conseguir que pase el agua y no se escape la resina, a parte que hace de repartidor del agua del regenerante.

En la parte superior se deja en espacio hueco para permitir su expansión y encima de este espacio una capa de resina inerte “plástico”, para evitar fugas de finos de la resina correspondiente.

c. Regeneración cadena primaria

Esta regeneración se realiza introduciendo: en el caso de las resinas catiónicas ácido sulfúrico diluido y en el caso de resinas aniónicas sosa cáustica.

Al estar en contacto, el regenerante con la resina, se produce una desorción o regeneración, liberando de la resina las sales que ha estado reteniendo durante el tiempo de producción y dejando la resina lista para ser utilizada.

La solución regenerante se adiciona por la parte de arriba sobre el lecho de resina que se encuentra en forma compacta. La parte de resina utilizada para el pulido final, se encuentra en esta fase por encima de la capa anterior fluidificada y recibe una mayor cantidad de regenerante, consiguiéndose una menor fuga de iones que con un sistema de regeneración convencional, es decir, en el mismo sentido que el flujo de agua a tratar.

Cuando el regenerante utilizado en la regeneración de la resina catiónica es el ácido sulfúrico, se corre el peligro de sulfatación de la resina, ocasionado por la precipitación del sulfato cálcico en el seno de la misma. Sin embargo, en nuestro caso, la concentración de calcio en el agua a desmineralizar es insuficiente después del ablandamiento con sosa cáustica. Además, la regeneración con ácido sulfúrico será progresiva con lo que dicho peligro desaparece.

Al principio de la regeneración se obtiene una concentración de ácido del 2 % durante el tiempo que se fija en las consignas de regeneración y transcurrido el tiempo de introducción de ácido al 2 % entrara la velocidad rápida en servicio dando una concentración del 4 % y el tiempo que se fija también en las consignas de regeneración, pasado este tiempo la bomba se parara automáticamente.

Para la regeneración de las cadenas aniónicas se tiene 2 bombas dosificadoras de sosa que toman la sosa del depósito general de sosa cáustica.

Estas bombas son iguales para la regeneración progresiva de los anexer, siendo utilizadas una de las bombas en cada regeneración.

Estas bombas solo disponen de una velocidades de trabajo obteniendo una concentración de sosa del 4 % durante el tiempo que se fija en las consignas de regeneración y transcurrido el tiempo de introducción de sosa se parara

Cantidad teórica de reactivos a utilizar en la regeneración de la resina

Catexer: - 552 kg de ácido al 93% en peso en cada regeneración

Anexer: - 778 kg de NaOH al 50% en peso en cada regeneración

Cantidad real de reactivos que se utilizan actualmente en la regeneración de la resina

Catexer: - 981 kg de ácido al 93% en peso en cada regeneración

Anexer: - 1407 kg de NaOH al 50% en peso en cada regeneración

d. Parámetro de control

La conductividad límite prevista a la salida de los anexers es de 6 $\mu\text{S}/\text{cm}$, correspondiente al 85% del agotamiento del lecho. Por tanto el agotamiento de la cadena será detectado por el analizador conectado a la salida de cada cadena, cuando la conductividad medida por el mismo alcance los 6 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Sin embargo en la práctica, esto es más estricto, ya que cuando la conductividad supera durante un tiempo determinado el valor de 3 $\mu\text{S}/\text{cm}$, se considera que está agotada, y para la producción quedando dispuesta para regenerarla.

v. **DESMINERALIZACIÓN SECUNDARIA**

Principios elementales y generalidades

Los ionexers (figura 26) son cambiadores de lecho mixto de resina catiónica fuertemente ácida y resina aniónica fuertemente básica, los cuales en funcionamiento normal se encuentran en un verdadero estado de mezcla.

El agua a tratar llega hasta los ionexers procedente del colector de salida de los anexers, es decir de la salida de la desmineralización primaria.

Cada uno de los tres cambiadores secundarios, debe estar asociado a cada una de las cadenas primarias, aunque podrá ser conectado a cualquiera de ellas indistintamente.

Cada depósito incluye cinco mirillas circulares conectadas a tres niveles, para comprobación de las alturas de resina y de ésta expandida.

Estos ionexers están destinados a retener las posibles fugas de iones y sílice que pudieran salir de los equipos de desmineralización primaria, produciendo un pulido

final y evitando fuga de iones al agua de servicio que se utiliza en nuestras instalaciones.



Figura 26: Cadenas de ionexers

Consta de tres cambiadores de lecho mixto (ionexer), para un caudal unitario de 57,5 m³/h.

La función de esta instalación consiste en tratar el agua desmineralizada que ha salido de las cadenas de desmineralización primarias.

Las resinas intercambiadoras que se han seleccionado para la desmineralización secundaria han sido una mezcla de resinas: Catiónicas y aniónicas.

Durante la fase de servicio el agua a tratar penetra por la parte superior de los aparatos con una velocidad que no permita la fuga de iones.

Las resinas son marca LEWATIT de Bayer, de los siguientes tipos en cada cambiador:

Catiónica fuerte S — 100 MB

Aniónica fuerte M — 500 MB

a. Elementos básicos de un ionexer

El fondo superior está abierto y el fondo inferior está cerrado con una placa perforada y en los agujeros, se montan unas toberas de plástico de ranuras calibradas,

para conseguir que pase el agua y no se escape la resina, a parte que hace de repartidor del agua del regenerante.

En la parte superior se deja en espacio hueco para permitir su expansión y encima de este espacio una capa de resina inerte “plástico”, para evitar fugas de finos de la resina correspondiente.

El aparato está provisto de un conjunto externo de válvulas y tuberías necesarias para realizar las diversas operaciones.

b. Regeneración de los ionexers

El proceso de regeneración lo podemos denominar como el proceso inverso de la producción.

Para que se produzca este proceso, es necesario introducir un producto regenerante, a través de toda la superficie de resina, en nuestro caso separaremos hidráulicamente las resinas, introduciendo ácido por la parte inferior y sosa por la parte superior, retirando el vertido por la parte central.

Durante el recorrido del regenerante se irán liberando las sales que fueron retenidas en la fase de producción, que serán eliminadas al desagüe.

c. Parámetros de control y producción.-

El control de agotamiento de una cadena (ionexer) puede detectarse por conductividad (valor límite: 0,5 μ mhos/cm) o por volumen de agua tratada (controlada por tiempo según secuencia de funcionamiento seguido).

Para el control de la conductividad a la salida del agua tratada por cada cambiador, se han dispuesto equipos de conductividad, formados por un monitor indicador montado en el panel de control con contacto de alarma regulable, y, una célula de conductividad con compensador automático de temperatura.

Para el control de la sílice a la salida del agua tratada, se han dispuesto equipo analizador de sílice, formado por un monitor indicador montado a la salida de agua desmineralizada.

Para el control de volumen de agua producida se ha montado un contador de agua que totaliza el caudal de agua desmineralizada procesada en la instalación, montado en el colector de salida de la planta, común a las tres cadenas.

La calidad del agua de salida de los ionexers será la de alimentación a las calderas y desulfuración.

Calidad agua salida del ionexer

- Sílice 0,01 mg/litro
- Conductividad 0,5 micromohos/cm
- Sólidos totales disueltos 0,1 ppm. máximo

Estos valores son teóricos.

En la práctica, medimos valores de conductividad del agua de:

- **0,03 μ s/cm.**
- pH = 6,5
- Sílice= 2,69 ppm

Cantidad de reactivos a utilizar en la regeneración de la resina

Ionexer: - 144 kg de ácido al 93% en peso en cada regeneración y 160 kg de NaOH al 50%

vi. Balsa NEUTRALIZACIÓN

Para la homogenización y neutralización de los vertidos que se producen en la planta de tratamiento de aguas se ha dispuesto una balsa de almacenaje, de unos 110 m³

Los vertidos de: Regeneraciones, lavados de arranque aguas de laboratorio y contra lavados de resinas llegan a la balsa por gravedad.

Una vez homogeneizados son impulsados, mediante dos bombas idénticas de 20 m³ y situadas en el foso de bombas, siendo evacuados a través de una tubería independiente y completamente enterrada, hasta la balsa del Mini Cani.

Del Mini Cani, mezclada con el resto de vertidos provenientes de toda la central, es bombeada al Perle.

a. Operación de la instalación

Los efluentes procedentes de la planta tratamiento de aguas, se van depositando en la balsa de neutralización y el nivel de esta ira subiendo.

Cuando alcance la cota del 75 % se pondrá en servicio automáticamente la turbina agitadora y cuando baja de 75 % se para automáticamente.

Las bombas igualmente se ponen o paran automáticamente según consignas pudiendo ser variadas dichas consignas, según necesidades.

vii. AGUA DESMINERALIZADA

Se tiene dos tanques pequeños de 600 m³ “intermedios” conectados entre sí y dos tanques de 3000 m³ “de almacén” conectados entre sí.

En estos tanques, la conductividad del agua que tenemos es de 0,7 µs/cm.

ANEXO IV. MEDIDA DE SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN

ANEXO IV. MEDIDA DE SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN

Equipo

Espectrofotómetro DR2800 Lange

Especificaciones

Method: 8006

Rango: (5 to 750 mg/L)

Procedimiento

- Seleccione el método Suspended Solids usando el procedimiento descrito en la sección Selección del Método.
- Llene la cubeta hasta la marca con agua destilada.
- Introduzca la cubeta en la célula de medición y cierre la tapa.
- Pulse la tecla ZERO. El display mostrará “-0,0” cuando el instrumento esté a cero y listo para medición.
- Retira la cubeta.
- Añada el agua en la que desee medir los sólidos en suspensión
- Introduzca la cubeta en la célula de medición y cierre la tapa.
- Pulse READ, el medidor realizará la lectura.
- El instrumento muestra los resultados en mg/l de sólidos en suspensión

ANEXO V. RESULTADO EXPERIMENTALES

ANEXO V. RESULTADOS

En este anexo se presentan tablas que recogen los resultados de todos los experimentos realizados

.

i. Análisis del agua de aporte al decantador y agua de salida del mismo

Tabla 22: Análisis agua de entrada y de salida del decantador Accelator

Agua entrada al decantador (febrero y mayo)								
Nº experimento	pH	dureza cálcica (ml de edta 0,01 M)	dureza cálcica (mg/l CaCO3)	dureza total (ml de edta 0,01 M)	dureza total (mg/l CaCO3)	Alcalinidad (mg/l CaCo3)	sólidos en suspensión (mg/l)	conductividad (µs/cm)
1 (febrero)	7,7	15	300	21,5	430	125	0	650
2 (febrero)	7,7	15	300	21,3	426	125	0	635
1 (mayo)	8,5	12,2	244	16,3	326	85	0	543
Agua salida del decantador (Febrero)								
Nº experimento	pH	dureza cálcica (ml de edta 0,01 M)	dureza cálcica (mg/l CaCO3)	dureza total (ml de edta 0,01 M)	dureza total (mg/l CaCO3)	Alcalinidad (mg/l de CaCo3)	sólidos en suspensión (mg/l)	conductividad (µs/cm)
1	9,6	3,5	70	8,7	174	40	9	630
2	9	3,2	64	8,2	164	30	8	
Agua salida del decantador (Mayo)								
Nº experimento	pH	dureza cálcica (ml de edta 0,01 M)	dureza cálcica (mg/l CaCO3)	dureza total (ml de edta 0,01 M)	dureza total (mg/l CaCO3)	Alcalinidad (mg/l de CaCo3)	sólidos en suspensión (mg/l)	conductividad (µs/cm)
cadena 1	9,57	1,7	34	5,7	114	25	5	480
cadena 2	9,56	1,7	34	5,7	114	20	5	512
cadena 2	9,55	1,7	34	5,7	114	20	5	495
cadena 3	9,51	1,7	34	5,7	114	20	5	501

ii. Proceso de ablandamiento con sosa

Tabla 23: Ablandamiento de agua con sosa.

Experimentos puesta en marcha con NaOH y FeCl3 (Febrero)									
Nº experimento	pH final	dureza cálcica (ml de edta 0,01 M)	dureza cálcica (mg/l CaCO3)	dureza total (ml de edta 0,01 M)	dureza total (mg/l CaCO3)	Alcalinidad (mg/l de CaCO3)	sólidos en suspensión (mg/l)	conductividad (µs/cm)	pH antes de descarbonatació
1	7,8	13,8	276	20,8	416	80	1	750	-
2	8,5	9,7	194	15,6	312	70	1	760	-
3	9,0	5,6	112	11,5	230	30	1	730	-
Experimentos rango de concentración de NaOH y FeCl3 (Febrero)									
Nº experimento	pH final	dureza cálcica (ml de edta 0,01 M)	dureza cálcica (mg/l CaCO3)	dureza total (ml de edta 0,01 M)	dureza total (mg/l CaCO3)	Alcalinidad (mg/l de CaCO3)	sólidos en suspensión (mg/l)	conductividad (µs/cm)	pH antes de descarbonatació
4	8,7	13,8	276	20,4	408	70	1	940	9
5	8,7	11,1	222	17,4	348	85	1	700	9,9
6	8,6	9,5	190	15,6	312	110	1	709	9,5
7	8,9	7,6	152	13,9	278	50	1	777	9,7
8	9,2	6,3	126	12	240	45	1	787	10
9	9,3	4,2	84	9,1	182	35	1	704	10,5
10	9,8	3,6	72	8,2	164	50	1	719	10,7
11	9,9	2,5	50	4,6	92	35	1	740	11
12	10,8	1,3	26	1,7	34	100	1	895	11,3
13	11,5	1	20	1,3	26	255	1	1530	11,7

Experimentos optimización de pH con NaOH y FeCl3 (Febrero)

Nº experimento	pH final	dureza cálcica (ml de edta 0,01 M)	dureza cálcica (mg/l CaCO3)	dureza total (ml de edta 0,01 M)	dureza total (mg/l CaCO3)	Alcalinidad (mg/l de CaCO3)	sólidos en suspensión (mg/l)	conductividad (µs/cm)	pH antes de descarbonatació
15	8,9	7,8	156	14,3	286	60	1	680	9,75
16	9,0	6,5	130	12,7	254	50	1	710	10
17	9,4	4,9	98	11,2	224	35	1	665	10,25
18	9,7	4,4	88	9,8	196	30	1	670	10,5
19	9,9	3,6	72	8	160	25	1	675	10,75
20	10,2	2,6	52	5,9	118	10	1	680	11

Experimentos optimización de pH con NaOH y FeCl3 (Mayo)

Nº experiment	pH final	concentración de sosa (g/l)	dureza cálcica (ml de edta 0,01 M)	dureza cálcica (mg/l CaCO3)	dureza total (ml de edta 0,01 M)	dureza total (mg/l CaCO3)	Alcalinidad (mg/l de CaCO3)	sólidos en suspensión (mg/l)	conductividad (µs/cm)	pH antes de descarbonatación
21	10,6	0,47	0,7	14	2	40	35	0	670	11,0
22	10,5	0,40	1	20	3,8	76	40	0	660	10,9
23	10,2	0,37	1,2	24	3,9	78	40	0	590	10,7
24	9,9	0,30	1,7	34	4,8	96	20	0	568	40,45
25	9,5	0,27	2,3	46	5,7	114	25	0	560	10,2
26	9,3	0,25	3,2	64	7	140	35	0	555	10,04

iii. Proceso de ablandamiento con cal

Tabla 24: Ablandamiento de agua con cal.

Experimentos con Ca(OH) ₂ y FeCl ₃ (Febrero) (todo rango de pH)									
Nº experimento	pH final	dureza cálcica (ml de edta 0,01 M)	dureza cálcica (mg/l CaCO ₃)	dureza total (ml de edta 0,01 M)	dureza total (mg/l CaCO ₃)	Alcalinidad (mg/l de CaCO ₃)	sólidos en suspensión (mg/l)	conductividad (µs/cm)	pH antes de decarbonatación
1	8,3	16,2	324	23	460	100	0	650	8,5
2	8,5	14,8	296	22,1	442	65	0	680	9
3	8,6	12,8	256	18,8	376	20	0	700	9,65
4	8,7	12,5	250	18,5	370	5	0	615	9,6
5	9,2	11,2	224	17,5	350	0	0	590	10,15
6	9,7	12,2	244	17,5	350	0	0	600	10,5
7	9,8	12,6	252	17,6	352	0	0	650	10,7
8	10,2	15,5	310	17,8	356	0	0	650	11
9	11,2	21,3	426	22,2	444	0	0	-	12

Experimentos con Ca(OH) ₂ Mayo todo rango de pH										
Nº experimento	pH final	Concentración de cal (g/l)	dureza cálcica (ml de edta 0,01 M)	dureza cálcica (mg/l CaCO ₃)	dureza total (ml de edta 0,01 M)	dureza total (mg/l CaCO ₃)	Alcalinidad (mg/l de CaCO ₃)	sólidos en suspensión (mg/l)	conductividad (µs/cm)	pH antes de decarbonatación
1	8,0	0,07	12,1	242	16	320	65	0	560	8,35
2	8,1	0,11	10,5	210	14,6	292	30	0	538	8,6
3	8,3	0,14	8,6	172	12,8	256	5	0	473	8,9
4	8,6	0,18	7,5	150	11,7	234	0	0	445	9,23

iv. Proceso de ablandamiento con cal + carbonato sódico

Tabla 25: Ablandamiento de agua con cal + carbonato sódico

Experimentos febrero con $\text{Ca}(\text{OH})_2$, Na_2CO_3 y FeCl_3 (prueba dosis carbonato sódico)										
Nº experimento	pH final	dureza cálcica (ml de edta 0,01 M añadidos)	dureza cálcica (mg/l CaCO_3)	dureza total (ml de edta 0,01 M añadidos)	dureza total (mg/l CaCO_3)	Alcalinidad (mg/l de CaCO_3)	Na_2CO_3 añadido (ml)	Concentración de Na_2CO_3 (g/l)	conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	pH antes de descarbonatació
1	10,7	8,3	166	10	200	0	1	0,17	-	10,7
2	10,2	2	40	5,5	110	30	2	0,33	-	10,6
3	10,8	1,1	22	3,2	64	155	3	0,50	-	10,75
4	10,5	0,4	8	4	80	325	5	0,83	-	10,55
5	10,6	0,3	6	3	60	360	10	1,67	-	10,65
6	11	0,1	2	3	60	255	30	5,00	-	11

Experimentos febrero con Ca(OH) ₂ , Na ₂ CO ₃ y FeCl ₃ (optimización dosis carbonato sódico)											
Nº experimento	pH final	dureza cálcica (ml de edta 0,01 M añadidos)	dureza cálcica (mg/l CaCO ₃)	dureza total (ml de edta 0,01 M añadidos)	dureza total (mg/l CaCO ₃)	Alcalinidad (mg/l de CaCO ₃)	Na ₂ CO ₃ añadido (ml)	Concentración de Na ₂ CO ₃ (g/l)	conductividad (µs/cm)	pH antes de descarbonatación	Volumen de fangos (ml/l)
13	10,8	6,5	130	11	220	25	0,8	0,13	699	10,82	
14	10,8	4,7	94	9	180	40	1,1	0,18	667	10,8	
15	10,8	4,2	84	8,6	172	40	1,2	0,20	650	10,8	
16	10,4	3,5	70	8,6	172	35	1,3	0,22	703	10,4	
17	10,4	2,8	56	8	160	40	1,4	0,23	675	10,6	
18	10,2	2,2	44	7,5	150	30	1,5	0,25	685	10,3	
7	10,2	2,5	50	7,4	148	25	1,5	0,25	760	10,5	3
8	10,2	1,6	32	6,2	124	45	1,8	0,30	810	10,5	2
9	10,2	1,4	28	5,4	108	40	2,1	0,35	920	10,5	-
10	10,2	2	40	5,8	116	35	2,4	0,40	850	10,65	4,5
Prueba floculante (1ppm)	10	2,5	50	7,5	150	0	1,8	0,30	750	10,5	-
Prueba floculante (1ppm)	10	1,4	28	5,9	118	50	2,2	0,37	865	10,5	3

Experimentos mayo con Ca(OH)_2 , Na_2CO_3 y FeCl_3 (optimización dosis carbonato sódico)										
Nº experimento	pH final	dureza cálcica (ml de edta 0,01 M añadidos)	dureza cálcica (mg/l CaCO_3)	dureza total (ml de edta 0,01 M añadidos)	dureza total (mg/l CaCO_3)	Alcalinidad (mg/l de CaCO_3)	Na_2CO_3 añadido (ml)	Concentración de Na_2CO_3 (g/l)	conductividad ($\mu\text{s/cm}$)	pH antes de descarbonatació
13	8	6	120	8,9	178	0	0,8	0,13	483	9
14	8,5	3,7	74	7,6	152	5	1,1	0,18	503	9,4
15	9,3	1,5	30	5,2	104	30	1,2	0,20	560	9,75
16	9,5	1,1	22	4,7	94	80	1,3	0,22	670	9,78
17	10	0,5	10	3,8	76	150	1,4	0,23	800	10,21

