



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Auditoría energética y estudio de mejora de la eficiencia energética del aire comprimido de una empresa del sector de la impresión desde el equipamiento hasta el control de los mismos.

Autor

Joaquín Bernad Fernández

Director

José María Agudo Valiente

DECLARACIÓN DE
AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D^a. Joaquín Bernad Fernández

con nº de DNI 29.097.074-G en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)
Grado en Ingeniería Electrónica y Automática, (Título del Trabajo)

Auditoría energética y estudio de mejora de la eficiencia energética del aire comprimido de una empresa del sector de la impresión desde el equipamiento hasta el control de los mismos.

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 21 de Noviembre de 2016

Fdo: Joaquín Bernad Fernández

RESUMEN EJECUTIVO

En el presente Trabajo Fin de Grado se ha realizado una auditoría completa de las instalaciones de aire comprimido y vacío de un cliente del sector de la impresión industrial en papel. El fin de dicha auditoría ha sido encontrar puntos de mejora de las instalaciones actuales así como la realización de un análisis de la demanda de aire para determinar los potenciales ahorros energéticos que se podían alcanzar.

De las visitas previas a las salas de equipamiento del cliente se llegó a las siguientes conclusiones:

- Prácticamente todos los equipos eran muy antiguos y necesitaban de un mantenimiento demasiado frecuente (no solo preventivo si no correctivo).
- Los equipos existentes no eran eficientes y además carecían de un sistema de regulación de los compresores adecuado, lo que hacía que la instalación fuera bastante ineficiente.
- El tratamiento de aire era deficiente para la especificación de las máquinas de imprenta y eso generaba pequeñas reparaciones en las máquinas de imprenta.

Tras la comprobación del equipamiento se procedió a medir los equipos para determinar cual era la demanda de aire y como trabajaban los equipos. Se instalaron los equipos de medición para obtener lecturas de caudal y potencia consumida. Con los resultados obtenidos se hicieron varias simulaciones para encontrar que configuración era la que mejor se adaptaba a las necesidades de la planta. Se trataba de confeccionar una solución a medida para conseguir que la instalación fuera lo más eficiente posible. En esta planta la eficiencia era de gran importancia ya que la planta estaba en marcha prácticamente todos los días del año, aunque con ciertas fluctuaciones.

Finalmente, con los equipos ya seleccionados se presentaron unos cálculos justificativos de los ahorros potenciales estimados en cada una de las líneas. Ahorros que podrían llegar a 191.914 €. Obviamente se realizaron diferentes presentaciones de producto para mostrar al cliente las diferencias existentes entre los diferentes equipos del mercado y que es lo que hacía que unos prevalecieran sobre otros en cuanto a rendimiento energético se refería y a la calidad de los equipos en sí.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Objetivo.....	2
1.2. Alcance.....	3
1.3. Fases y acciones.....	4
2. HISTORIA DEL AIRE COMPRIMIDO.....	4
3. ANÁLISIS DE LA DEMANDA DE AIRE.....	5
3.1. Situación inicial.....	6
3.1.1. Compresores. Línea de 7,5 bar(g).....	6
3.1.2. Línea de vacío y Línea 2 bar(g).....	7
3.2. Procedimiento del análisis.....	8
3.2.1. Procedimiento Línea 7,5 bar(g)	8
3.2.2. Procedimiento Línea 2 bar(g)	11
3.2.3. Procedimiento Línea de Vacío.....	12
3.3. Resultado del análisis Línea 7,5 bar(g)	12
3.4. Propuesta de mejora y ahorro energético.....	14
3.4.1. Propuesta y ahorros Línea 7,5 bar(g).....	14
• Ahorro energético por la sustitución de los compresores actuales.....	14
• Cálculo ahorros por utilización del controlador maestro SAM.....	16
• La recuperación de calor.....	16
• Ahorro energético recuperación de calor calentando agua.....	18
• Ahorro energético recuperación de calor por aire caliente.....	19
• Ahorro energético por la sustitución del secador actual.....	20
3.4.2. Propuesta y ahorros Línea 2 bar(g)	23
• Ahorro energético por la sustitución de los compresores actuales.....	23
• Ahorro energético por la recuperación de calor calentando agua.....	24
• Ahorro energético por la recuperación de calor por aire caliente.....	25
• Ahorro energético por la utilización de un secador de masa térmica.....	26
3.4.3. Propuesta y ahorros Línea de Vacío.....	27
• Ahorro energético por la sustitución de las bombas actuales.....	27
• Ahorro energético por la recuperación de calor calentando agua.....	28
• Ahorro energético por la recuperación de calor por aire caliente.....	29
4. CONCLUSIONES.....	30
5. BIBLIOGRAFÍA.....	32
ANEXO 1. Gráfica de caudal	
ANEXO 2. Gráfica de potencia consumida	
ANEXO 3. Gráfica de potencia específica	
ANEXO 4. Planos línea 7,5 bar(g)	

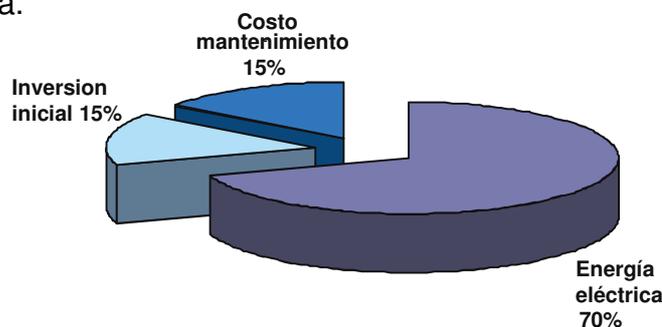
1. INTRODUCCIÓN

El aire comprimido es la segunda energía más utilizada en la industria después de la energía eléctrica. El hecho de que las herramientas y actuadores neumáticos sean sencillas, robustas y baratas, así como la fácil y segura conducción del aire comprimido, hacen del aire comprimido algo fundamental en la industria. No es extraño encontrar procesos críticos que dependen del aire comprimido, es por eso que cada vez más, se está tomando conciencia del aire comprimido y de los costes asociados al mismo. No obstante, el aire comprimido no es una energía barata de generar y es por eso que los costes del aire comprimido son muy a tener en cuenta en las empresas.

Las necesidades de capital en relación con el aire comprimido son fundamentalmente:

- Inversión inicial
- Costos de mantenimiento
- Consumo de energía eléctrica

Como se puede apreciar en la figura 1, a través de diferentes estudios que se han realizado, se ha determinado que en 10 años de funcionamiento de una instalación de aire comprimido, el 70% de los costes totales de generación de aire comprimido corresponde al consumo de energía eléctrica, el resto a la inversión inicial y a los costos de mantenimiento del equipo; de ahí la importancia de reducir el consumo de energía eléctrica.



*Figura 1. Estimación costes aire comprimido en 10 años de operación.
Fuente: Elaboración propia*

Existen multitud de variables que afectan de manera directa el consumo de energía del sistema de generación de aire comprimido. A continuación pasamos a enumerar las más comunes en la industria.

- *Tipo de control de los compresores (Dual, Modulación o Velocidad Variable)*
- *Temperatura de operación elevada*
- *Presión de operación superior a los requerimientos*
- *Eficiencia de los compresores*
- *Mal uso del aire comprimido*
- *Caídas de presión altas en el diseño de los equipos de tratamiento*
- *Malas prácticas de mantenimiento (filtros saturados, ventilación insuficiente, etc.)*
- *Diámetros de tuberías inadecuados*
- *Fugas en tubería y puntos de uso*
- *Problemas de diseño de la red de tubería basados en la demanda de la planta, presiones, distancias, accesorios y bajantes entre otros*

1.1. OBJETIVO

El objetivo de este proyecto ha sufrido algún cambio desde su origen. El contacto principal con el cliente fue para la instalación de un controlador de sala para conseguir una mejor optimización de los equipos existentes. Cuando se realizó la primera visita para ver que equipos se trataban, revisar los manuales de mantenimiento, comprobar señales en el cuadro eléctrico, etc... se le indicó al cliente que la sala de compresores principal era muy mejorable. El propio cliente informó que últimamente estaban sufriendo más averías, lo cual era evidente por las manchas de aceite en el suelo y en el interior de algunos de los compresores, incluso habían tenido problemas en alguna aplicación al encontrarse humedad en el aire comprimido.

Así pues, el objetivo final del proyecto se convirtió en una auditoría energética completa de todas las instalaciones de generación de aire comprimido y vacío del cliente. La auditoría se realizó en una planta industrial dentro del ramo de las imprentas industriales. La empresa en la que se realizó la auditoría es una importante empresa situada en el área de Barcelona cuya actividad está en el ramo de las imprentas industriales y que tiene en cartera numerosas publicaciones de revistas y semanarios muy conocidas en España.

El cliente tiene una instalación antigua de compresores, bombas de vacío y aire de baja presión, y dependiendo del resultado de la auditoría procedería a la renovación de equipos. Evidentemente, la auditoría no se ha limitado únicamente a intercambiar los equipos actuales por unos más modernos y eficientes si no que se ha procedido a un estudio integral de la planta en lo que a equipos de aire comprimido y vacío se refiere, así como una revisión de la red de aire comprimido. Además se ha llevado a cabo una medición de caudal de la red de aire en la que se ha analizado, no solo el perfil de la demanda de aire, sino también el comportamiento de los compresores. Incluso se revisó la red de aire comprimido para buscar fugas, estrechamientos en la red, trazado de tubería mejorable, caídas de presión en puntos de aplicación respecto a la sala de compresores, etc...

Finalmente, con todos los datos, se procede a una simulación de la demanda de aire respecto a varios sistemas propuestos en el software KESS para encontrar la opción óptima. Del mismo modo se aconseja al cliente los cambios que puede hacer en la instalación de aire comprimido para que la caída de presión sea la menor posible.

1.2. ALCANCE

Con los datos obtenidos en el análisis de los compresores se determinará la potencia específica de todos los compresores (medida en Kw por m³/min), se realizará una valoración de los consumos de aire evaluados (en m³/min) tanto en términos de potencia como de coste, y se realizará una propuesta de instalación. En la instalación se incluirán todos los elementos necesarios a la instalación (depósitos, separadores ciclónicos, líneas de tratamiento de aire, líneas de purga y separadores de condensado) y que permitan mejorar y obtener un suministro de aire comprimido con

un menor costo energético. Todo esto, satisfaciendo los requerimientos de demanda, presión y calidad del aire de las aplicaciones del cliente.

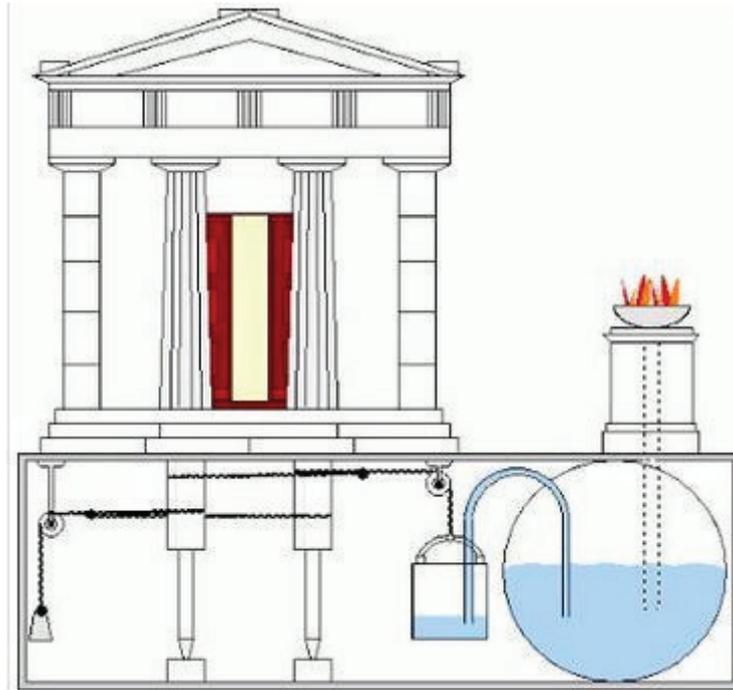
1.3. FASES Y ACCIONES

Como en todo Análisis de Demanda de Aire (ADA), lo primero es colocar los diferentes aparatos de medición en los equipos. Con los aparatos de medición colocados individualmente en cada compresor, podremos conocer el comportamiento individual de cada uno, y además, el comportamiento global de la instalación de aire comprimido. Una vez recogidos los datos medidos se procede a realizar el estudio de dichos datos y realizar simulaciones de cuál sería el comportamiento de diferentes estaciones de aire comprimido. Tras la elección de los compresores, se calcula el tratamiento de aire correspondiente y se calculan los posibles ahorros energéticos que se producen con el nuevo tratamiento de aire respecto al anterior.

En las líneas de aire en las que no se han podido instalar aparatos de medición, se han realizado cálculos aproximados de acuerdo con el cliente.

2. HISTORIA DEL AIRE COMPRIMIDO

El primer compresor de la historia ha sido el propio ser humano, que utilizaba su propio aliento para agrandar las llamas. Se dice que los antiguos herreros gritaban al fuego para avivar el fuego. Como el aliento del ser humano no tiene una gran potencia y además lleva dióxido de carbono, se requerían muchos gritos para poder trabajar los metales. De ahí que la invención del fuelle fue un adelanto extraordinario. Por otro lado, una de las aplicaciones más antiguas y curiosas del aire comprimido es la del mecanismo de aperturas de las puertas del templo de Alejandría, inventado por Herón en el siglo I d.c. (ver figura 2).



*Figura 2. Esquema del funcionamiento de apertura del templo de Alejandría.
Fuente: www.mundocompresor.com*

El mecanismo funcionaba de la siguiente manera:

Cuando se encendía el pebetero, el calor se transfería a la cámara inferior donde había un recipiente de agua. El aire del recipiente se calentaba aumentando de presión empujando el agua a un segundo recipiente. Este segundo recipiente, estaba colgado de unas poleas que a su vez movían unos cilindros que estaban unidos a las puertas del templo, de modo que cuando el segundo recipiente se llenaba de agua, descendía y hacía girar los cilindros que, al mismo tiempo abrían las puertas del templo.

Ya en la historia más moderna, en el siglo XIX, con la revolución industrial, se inventa el compresor de pistón. Y durante el siglo XX otros tipos de compresores entre los que destaca el compresor de tornillo que es el más extendido actualmente en la industria.

3. ANÁLISIS DE LA DEMANDA DE AIRE

En este apartado se procede a describir todos los pasos dados desde la colocación de los aparatos de medición hasta la propuesta de equipos final.

3.1. SITUACIÓN INICIAL

3.1.1. Compresores. Línea de 7,5 bar(g)

La auditoría de la línea de aire comprimido a 7,5 bar(g) se realizó sobre los cuatro compresores que se detallan en la Tabla 1.

Marca	Modelo	Potencia nominal en kW	Entrega en m ³ /min	Presión de trabajo bar
Atlas Copco	GA 90 FF	90	14,09	10
Worthington	RLR 180 FC	132	24	8
Worthington	RLR 180	132	24	8
Worthington	RLR 180	132	24	8

Tabla 1. Compresores de la línea de 7,5 bar.

El estado de la sala era muy sucio, pero lo que realmente llamaba la atención era que tanto en la cercanía de los compresores como en el interior de los mismos se apreciaban restos de aceite de averías recientes. Interesante fue también ver como había unas pegatinas con las fechas de los intervalos de mantenimiento, indicando que los mantenimientos se venían realizando cada 2.000 horas de trabajo. Un punto más donde ahorrar, ya que los intervalos de mantenimiento de los compresores KAESER son más largos.

El tratamiento de aire constaba de una batería de filtros y un secador frigorífico muy antiguo de la marca SABROE y refrigerado por agua. Lamentablemente las chapas de características de secador y filtros eran ilegibles y el cliente no disponía de los manuales, con lo que la única información de la que se pudo disponer sobre el tratamiento de aire está en la Tabla 2

Marca	Modelo	Caudal agua refrig. en m ³ /h	Potencia nominal en kW	Caudal secado m ³ /min	Presión de trabajo bar
Sabroe	CT83/S	14	Desconocida	Desconocida	10

Tabla 2. Secador frigorífico de la línea de 7,5 bar.

El tratamiento de aire se antojaba insuficiente ya que el cliente se quejaba de encontrar agua en algunos actuadores. Esto ocurría en verano especialmente, y es indicativo de que el secador frigorífico está saturado y no es capaz de realizar un secado efectivo.

3.1.2. Línea de vacío y Línea 2 bar(g)

En este apartado nos encontramos con una mezcla de equipos bastante interesante. Por un lado tenemos una bomba de vacío cuyas características están en la Tabla 3.

Marca	Potencia nominal en kW	Entrega en m ³ /min	Presión de trabajo mbar(a)
MPR	37	16,67	200

Tabla 3. Bombas de vacío.

La bomba de vacío se instaló para dar apoyo al lado de aspiración de los equipos de Compresión/Vacío de la marca BETICO. Estos equipos (ver Tabla 4) son dos compresores de pistón que por el lado de aspiración crean un vacío de 200 mbar(a) y por el lado de descarga entregan una presión de 2 bar(g). Estos equipos son muy antiguos con unos costes de mantenimiento muy altos. Pero más importante aún es la pérdida de caudal que habrá tenido el compresor debido al desgaste interno del pistón. El cliente no ha notado dicha pérdida de caudal, porque la bomba de vacío MPR cubre gran parte del caudal de vacío demandado.

Marca	Modelo	Caudal agua refrig. en m ³ /min	Pot nominal en kW	Presión entrada mbar(a)	Presión salida bar(g)	Caudal m ³ /min
Betico	LK1JJ	4,3	45	200	2	7,2
Betico	LK1JJ	4,3	45	200	2	7,2

Tabla 4. Equipos de compresión y vacío.

3.2. PROCEDIMIENTO DEL ANÁLISIS

3.2.1. Procedimiento Línea 7,5 bar(g)

Para la realización del análisis de consumo de aire comprimido, se instalaron dos ADA (modelo ADA10/2) propiedad de KAESER Compresores. El modo de control de los compresores objeto del estudio es control Dual (Carga-Vacío), excepto por un compresor que está controlado por un convertidor de frecuencia. La medición de caudal se ha realizado mediante un método indirecto. Para conocer el caudal entregado por los compresores con control dual se colocó un opto-acoplador en la señal de la válvula de descarga del compresor, de modo que podemos saber cuando el compresor está entregando aire al sistema.

En la figura 3, hay una foto con los elementos que componen el juego para la medición de equipos de funcionamiento dual. Dicho juego se compone de un registrador de datos, cuatro optoacopladores, un transductor de presión, un transformador de alimentación, dos cables de 10m y dos cables de 5m.



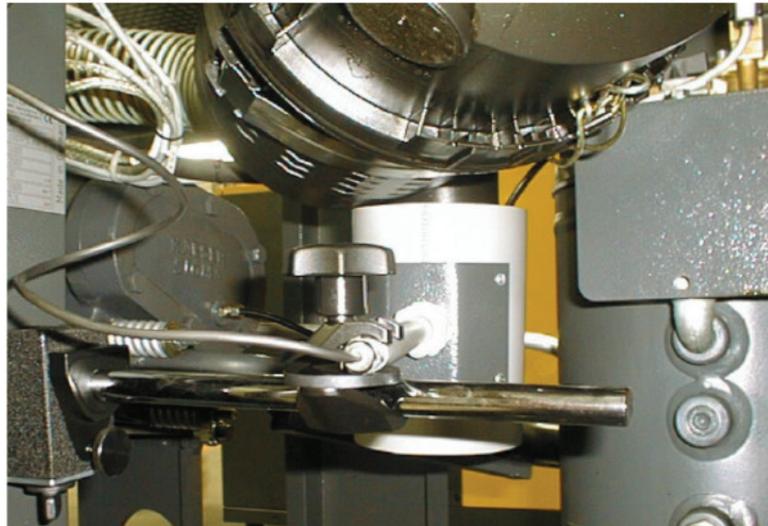
*Figura 3. Equipamiento ADA 10/2.
Fuente: KAESER Compresores*

Para la medición de caudal del compresor con variador de frecuencia, se instaló un equipo como el de la figura 4. Este equipo está compuesto por un anemómetro y un transductor de revoluciones por minuto. El anemómetro (ver figura 5) se coloca a la entrada de la admisión de aire para conocer, en relación al caudal máximo, cuanto caudal está entregando el compresor.



*Figura 4. Equipamiento MC para compresores de caudal variable.
Fuente: KAESER Compresores*

A continuación se muestra una imagen de cómo se conecta el anemómetro en la aspiración del compresor. Como se ha dicho se trata de una medición indirecta, es decir que se mide el caudal generado, ni siquiera el aspirado. Se trata de conocer qué porcentaje de caudal está entregando el compresor con respecto a su máximo (que es cuando el convertidor de frecuencia esté alimentando al motor a la frecuencia máxima). Después por software se obtendrá el caudal generado por el compresor.



*Figura 5. Colocación anemómetro en admisión del compresor.
Fuente: KAESER Compresores*

Si los métodos de medición de caudal han sido indirectos, pese a ello son tremendamente efectivos, en el caso de la potencia consumida por los compresores se realizó la medición mediante un vatímetro, que ha proporcionado una lectura de consumo de potencia real de cada uno de los compresores. La medición de consumo eléctrico del vatímetro ha sido mediante la instalación de 2 toroides en dos de las tres fases de alimentación del compresor (la tercera es calculada), y tomando la tensión de las tres fases.

En las figuras 6 y 7 vemos el aparato de medición y un esquema de colocación.



*Figura 6. Equipamiento medición potencia consumida.
Fuente: KAESER Compresores*

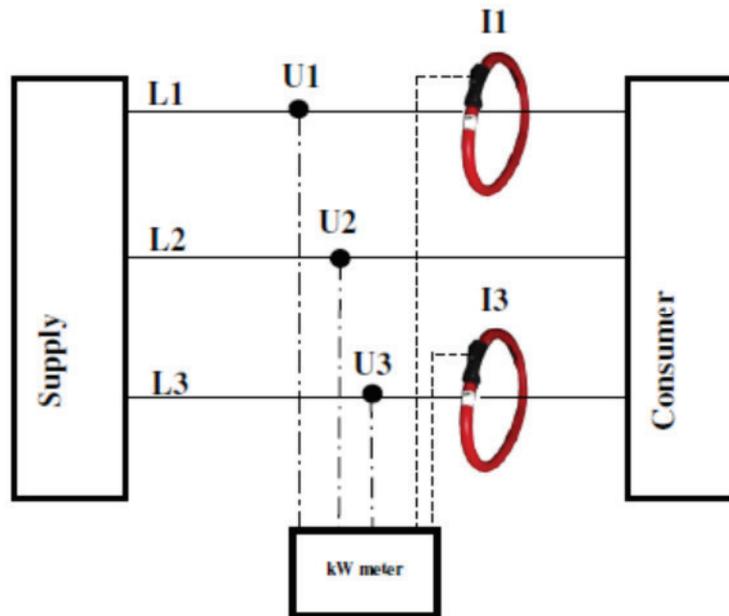


Figura 7. Esquema conexión vatímetro.
Fuente: KAESER Compresores

Todas las señales analógicas y digitales se han registrado en un logger para su posterior descarga y tratamiento en el *Software ADA* (desarrollado por KAESER), con el fin de analizar el comportamiento de la demanda de la planta y conocer el consumo eléctrico de la instalación. La muestra de datos se ha realizado sobre una semana de trabajo, que se ha considerado como una semana tipo. Todos los datos registrados en esa semana y las posteriores simulaciones se extrapolarán al número de semanas anuales en las que la planta está en marcha.

3.2.2. Procedimiento Línea 2 bar(g)

Debido a la peculiaridad de los equipos utilizados para la generación de 2 bar(g), recordemos que se trata de equipos que se utilizan también para hacer vacío en la admisión y por tanto se hace muy complicado saber cuando están funcionando si realmente lo hacen porque hay que generar más vacío, o si es necesaria más presión en el lado de 2 bar(g). Si además, tenemos en cuenta que los compresores de pistón pierden capacidad debido al rozamiento de los segmentos del pistón contra el interior de la camisa del pistón, hacen que, para poder hacer una medición precisa se necesitaran aparatosos y carísimos equipos de medición, además de tener que parar la producción para su instalación. El cliente estuvo de acuerdo en hacer una estimación cubriendo el caudal original de los compresores alimentando la línea a 2 bar(g), es decir quería el mismo caudal instalado.

3.2.3. Procedimiento Línea de Vacío

Debido a la misma problemática que para la línea de 2 bar(g), el cliente decidió seguir con la misma capacidad instalada original en la línea de vacío.

3.3. RESULTADO DEL ANÁLISIS LÍNEA 7,5 bar(g)

En los compresores de la línea de 7,5 bar(g) se han conectado diferentes aparatos de medida. Los datos que se obtienen sirven como base para simulación y de diferentes sistemas de aire comprimido para encontrar el que mejor se ajuste al perfil de demanda del cliente y cumpla con las exigencias de cliente respecto al espacio utilizado, el tener un compresor de seguridad y por supuesto, la mayor eficiencia posible de la instalación junto con unos bajos costes de mantenimiento.

En el ANEXO 1 se encuentran las gráficas de caudal obtenidas de la medición, mientras que en el ANEXO 2, aparecen las gráficas de potencia consumida. Finalmente, en el ANEXO 3 están las gráficas de potencia específica.

Gracias a la utilización del programa de KAESER Compresores, *KAESER Energy Saving System (KESS)* y tomando como semana tipo la elegida por el cliente. Se ha procedido al estudio exhaustivo del perfil de la demanda, tratando de analizar las fluctuaciones de la demanda, cual es caudal fijo mínimo, etc..

Finalmente, cuando se han definido los diferentes “posibles” sistemas de aire comprimido, se ha realizado la simulación en el programa KESS. El programa KESS simula cual sería el comportamiento de las instalaciones propuestas para cubrir exactamente la demanda medida. Es decir, si un compresor tiene que estar en carga o en vacío, o si debe de girar a un determinado número de revoluciones, en el caso de un compresor con convertidor de frecuencia. Evidentemente KESS tiene los datos relevantes de los compresores de la simulación. Estos datos son: Caudal entregado, potencia consumida en carga, potencia consumida en vacío, curvas de caudal/potencia consumida de los compresores con convertidor de frecuencia, etc... En la figura 8 se puede ver una captura de pantalla del programa KESS.

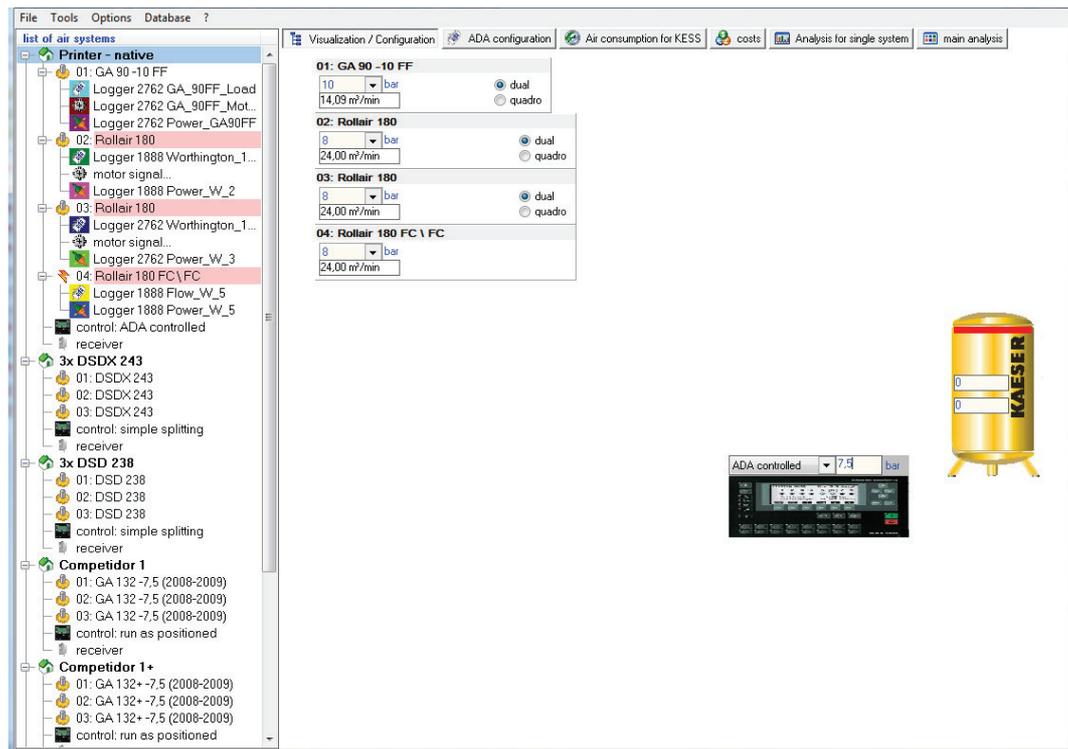


Figura 8. Captura de pantalla Programa KESS.
Fuente: KAESER Compresores

Con todos los datos antes mencionados, KESS calcula el consumo energético en kWh de las instalaciones simuladas a lo largo del tiempo estipulado. Llegados a este punto, se introdujo en el programa el coste de la energía eléctrica, en este caso 0,09 €/kWh (el coste de la energía eléctrica fue facilitado por el cliente y hace referencia al coste medio de la planta). Finalmente, se obtuvo de la simulación cuánto dinero se podría ahorrar anualmente con cada una de las instalaciones propuestas. En una reunión con él cliente se le expusieron los diferentes sistemas, con sus respectivos costes de inversión y mantenimiento.

Para la elaboración de esta simulación se ha tomado la semana de trabajo comprendida entre los días 16 y 23 de Marzo de 2016, como semana tipo. Se ha considerado que la planta opera 52 semanas al año de acuerdo a las gráficas obtenidas con los equipos de medición detallados anteriormente. Así pues, los costes energéticos de la instalación actual son de 299.041,1 € anuales.

3.4. PROPUESTA DE MEJORA Y AHORRO ENERGÉTICO

3.4.1. Propuesta y ahorros Línea 7,5 bar(g)

- **Ahorro energético por la sustitución de los compresores actuales**

Tras realizar la simulación en el programa KESS, la configuración de compresores más eficiente para cubrir la demanda de 7,5 bar(g) de la planta fue la compuesta por los siguientes compresores (uno de los cuales sería de seguridad):

Marca	Modelo	Potencia nominal en kW	Entrega en m ³ /min	Presión de trabajo bar
KAESER	DSDX 243	132	23,9	8,5
KAESER	DSDX 243	132	23,9	8,5
KAESER	DSDX 243	132	23,9	8,5
KAESER	DSDX 243	132	23,9	8,5

Tabla 5. Compresores propuestos por KAESER para la línea de 7,5 bar(g).

Tomando como base la medición de caudal realizada en la auditoría, se ha realizado una simulación de una instalación con los compresores DSDX 243, siendo controlados por un controlador maestro SIGMA AIR MANAGER (SAM) 4/4 para cubrir el perfil de demanda obtenido en la auditoría. El resultado del consumo eléctrico se ha comparado con los consumos eléctricos obtenidos en la auditoría, conociendo así el ahorro en consumo eléctrico con la propuesta KAESER.

En el cálculo de la simulación, no solo se ha tenido en cuenta que los compresores elegidos en la simulación son más modernos y eficientes, si no que se ha tenido en cuenta el sistema de control de los mismos. En la instalación actual, los compresores estaban controlados en cascada (ver figura 9. Columna 1). Este control se basa en el ajuste individual de la presión de trabajo de cada uno de los compresores, de manera que las presiones de ajuste para la parada y el arranque de los mismos se solapan entre ellos para evitar que arranquen y paren todos de golpe. Con este control en cascada, los compresores siguen una secuencia de arranque y parada, “en cascada”.

Las desventajas de este tipo de control son:

- Gran descompensación del número de horas de trabajo de los compresores. Ni aunque se cambiaran las consignas de presión de cada uno de los compresores cada semana, por ejemplo, sería efectivo. Esto contribuye a un envejecimiento desigual de los compresores y a una mala planificación de los trabajos de mantenimiento, contribuyendo a gastos innecesarios.
- El aumento del consumo eléctrico de la instalación. En el aire comprimido hay una máxima, y es que, por cada 1 bar de incremento de presión, la potencia consumida se incrementa en un 6%. Con el controlador en cascada, el rango de regulación de la presión es muy grande (por el propio ajuste de las presiones individuales de cada equipo), con lo que la presión del sistema es siempre superior a la presión óptima demandada, lo que equivale a unos costos energéticos más elevados.

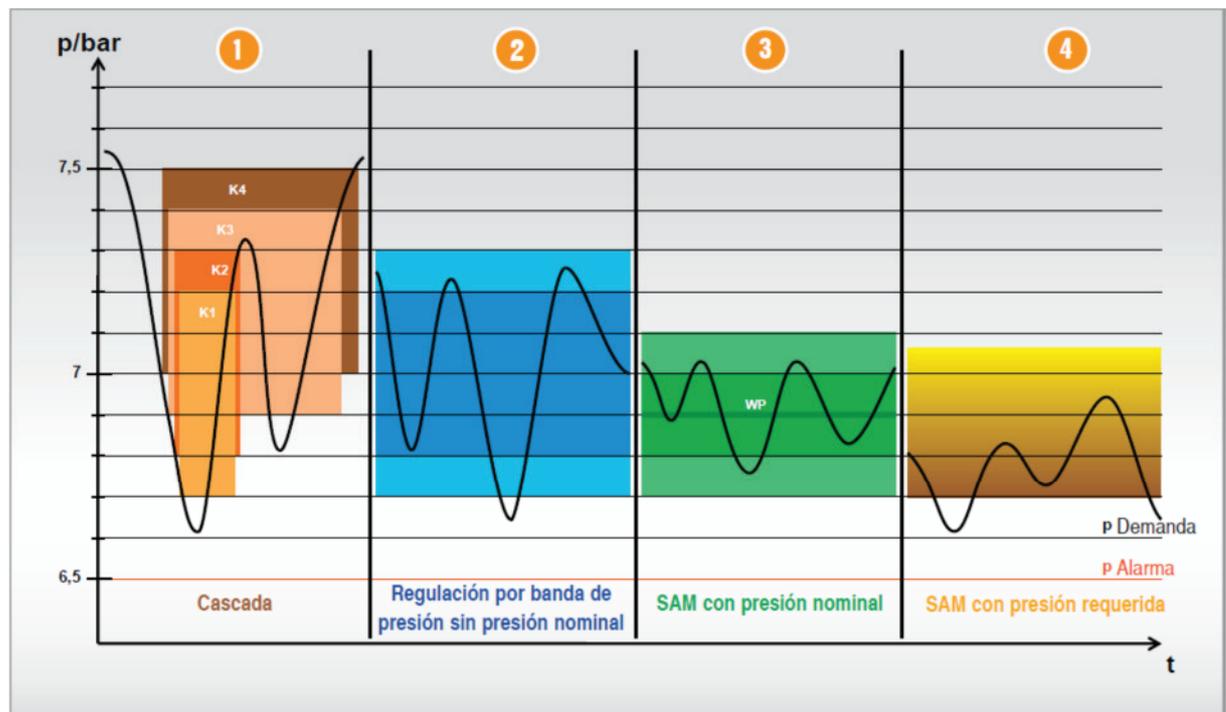


Figura 9: Distintas variantes de regulación de estaciones de compresores.

Fuente: KAESER Compresores

Esto se soluciona con un controlados maestro. El controlador maestro toma un único punto de presión como referencia para todos los compresores y en función de la presión conecta o desconecta los compresores que controla. No obstante, hay diversos tipo de regulación dentro de los controladores maestros.

En el proyecto que nos ocupa, al cliente se le ha ofertado el último y más innovador sistema de control de KAESER. A medida que los sistemas de control son mejores, la presión media de la instalación disminuye y por tanto, la factura de la electricidad (Ver figura 9, columnas 2, 3 y 4). A continuación hay un pequeño cálculo de lo que supondría el ahorro en energía eléctrica al cliente, solo por la disminución de la presión media de trabajo utilizando el controlador SAM.

- **Cálculo ahorros por utilización del controlador maestro SAM**

Según lo que se ha observado, la presión de trabajo se podría reducir en la menos 0,8 bar con el uso de SAM. Como consecuencia de la reducción de la presión media, y teniendo en cuenta que, por cada 1 bar de reducción de presión el ahorro que se consigue en consumo eléctrico es del 6%, se puede deducir un 4,8% por la reducción de la banda de regulación de 0,6 bar al instalar un SAM. Teniendo en cuenta para el cálculo que se tienen 3 compresores trabajando al 80% durante 8.000 h/año, el ahorro sería de:

$$3 \times 155,57 \text{ kW} \times 3,6\% \times 80\% \times 8.000 \text{ horas/año} \times 0,09 \text{ EUR/kWh} = 12.904 \text{ EUR/año}$$

Los ahorros energéticos que se obtienen de la simulación de la instalación de compresores de la línea de 7,5 bar(g) es de: **34.615,08 €/año**.

- **La recuperación de calor**

Posibilidades de la recuperación del calor

En vista del encarecimiento continuo de todas las formas de energía, queda claro que el ahorro energético no es ya solo una cuestión ecológica, sino también un factor económico importantísimo. En este sentido, los fabricantes de compresores ofrecen distintas posibilidades, como por ejemplo sistemas para la recuperación del calor que generan los compresores de tornillo.

Es un hecho que el 100 % de la energía absorbida por un compresor se convierte en calor. El aire se carga en el compresor de un potencial energético a través de la compresión. Esa energía es aprovechable por la relajación a presión atmosférica, enfriamiento y derivación del calor al ambiente.

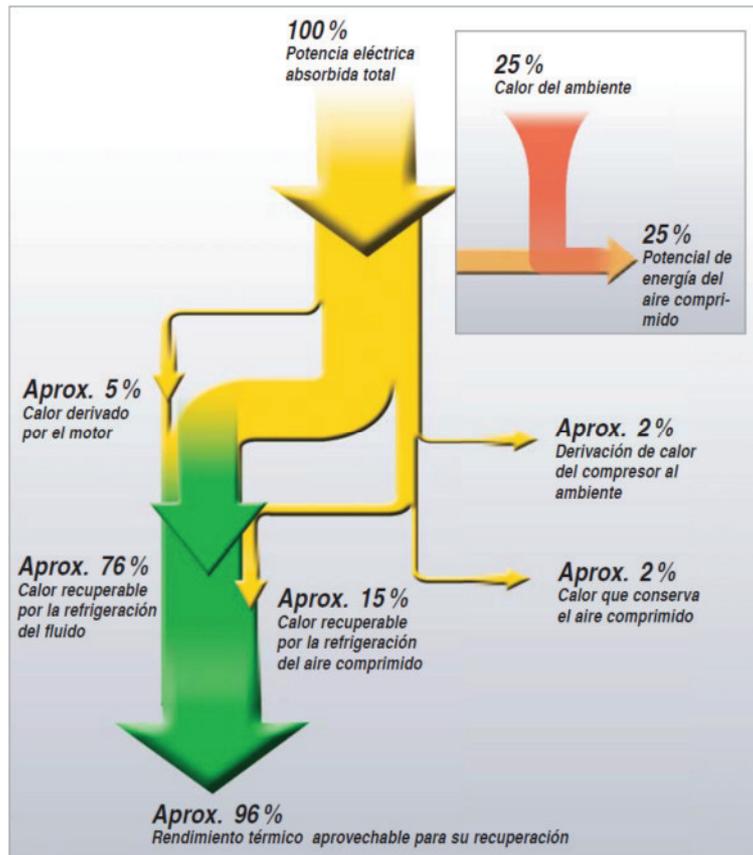


Figura 10. Diagrama de flujo de calor.

Fuente: KAESER Compresores

Hasta un 96 % de calor aprovechable

La mayor parte de la energía absorbida por el compresor y aprovechable en forma de calor, el 76 % pasa al medio refrigerante en los compresores con inyección de aceite, un 15 % se transmite al aire comprimido y hasta un 5 % son las pérdidas de calor del motor eléctrico. En el caso de motores encapsulados refrigerados por aceite es posible recuperar incluso el calor de estas pérdidas por medio de una refrigeración adecuada. Hasta un 96 % de la energía que consume el compresor puede recuperarse, por tanto, en forma de calor. Solamente el 2 % de la energía se pierde por irradiación al exterior, y un 2 % permanece en el aire comprimido (ver figura 10).

Posibilidades de la recuperación del calor

Los usuarios que deseen una producción de aire comprimido aún más económica pueden elegir una de las variantes siguientes para la recuperación del calor:

a) Calefacción por aire caliente

La opción más sencilla consiste en aprovechar directamente el aire caliente que sale del sistema de refrigeración del compresor para calefacción, y es factible tanto en máquinas refrigeradas por aire como por fluido. El calor derivado se conduce por un sistema de canales hasta las estancias que se quiera dotar de calefacción.

Naturalmente, este aire caliente puede utilizarse también para otros fines, como por ejemplo para procesos de secado, cortinas de calefacción en entradas abiertas de edificios o para precalentar aire de combustión. Si no se necesita el calor, una escotilla manual o automática desviará la trayectoria del aire caliente hacia el exterior.

Un cierre regulado termostáticamente permite dosificar el aire caliente de manera exacta para que la temperatura deseada se mantenga constante. Con esta variante se aprovecha el 96 % de la potencia eléctrica absorbida por el compresor de tornillo. Además, merece la pena incluso en el caso de compresores pequeños, ya que un compresor de 7,5 kW produce durante su funcionamiento calor suficiente como para calentar una casa unifamiliar.

b) Calefacción por agua

Instalando un intercambiador de calor en el circuito de fluido, tanto en compresores de tornillo refrigerados por aire como por agua, es posible producir agua caliente para fines diversos. Lo ideal es instalar un intercambiador de calor de placas o uno de seguridad dependiendo de si el agua caliente va a utilizarse para circuitos de calefacción, duchas del personal o procesos de limpieza de la producción. Estos intercambiadores permiten calentar el agua hasta una temperatura máxima de 70 °C. El resto de aplicaciones de esta variante de recuperación del calor se amortizan con compresores a partir de 7,5 kW en un plazo de dos años. Para ello, sin embargo, la planificación del sistema debe ser correcta.

- **Ahorro energético recuperación de calor calentando agua**

El ahorro que se obtendría por la utilización de intercambiadores de calor para calentar agua es de: **8,71 €** por cada hora de carga de 1 compresor. Ver cálculos en la figura 11.

Ahorros del sistema de recuperación de calor por agua caliente

Compresor de tornillo refrigerado por aire, modelo DSDX 243

Potencia en el eje del Motor (7,5 bar):	137,4 kW	Energía Utilizable en agua caliente	
Eficiencia del motor:	0,958	= 72 % del consumo total de energía (ver diagrama de flujo)	
Periodo utilización:	1 hora	= 0,72 x 143.42 kW = 103,26 kW	
Periodo de carga del compresor:	1 hora	Ahorro:	
Precio gasoil calefacción:	0,75 €/litro	$\frac{\text{Energía utilizable} \times \text{tiempo en carga} \times \text{Precio gasoil calentador}}{\text{Calor esp. Gasoil} \times \text{eficiencia del calentador}}$	
Calor específico gasoil:	35,5 MJ/l = 9,87 kWh/l (1 MJ = 0,278 kWh)	=	$\frac{103,26 \text{ kW} \times 1 \text{ h} \times \text{€}0,75 / \text{l}}{9,87 \text{ kWh/l} \times 0,9}$
Eficiencia de la caldera:	0,9	=	8,71€ por 1 hora en carga
Consumo total de energía:	= $\frac{\text{Pot. Eje compresor}}{\text{Eficiencia del motor}}$		
	= $\frac{137,4 \text{ kW}}{0,958} = 143,42 \text{ kW}$		

Figura 11. Cálculos ahorros calentando agua de un compresor DSDX 243.

Se ha supuesto un uso de 24 h/día durante 120 días al año (4 meses) y 3 compresores en funcionamiento, el ahorro estimado sería: 8,71 €/h x 24 h/día x 120 días x 3 compresores = **75.254 €/año**.

- **Ahorro energético recuperación de calor por aire caliente**

Los compresores utilizan un cierto caudal de aire para refrigerarse, aun cuando en este caso, la mayor parte del calor generado va a ser aprovechado para calentar agua, todavía se tiene un 22% de energía que es evacuada por el moto-ventilador del compresor, este caudal de aire caliente, puede ser empleado para caldear estancias contiguas a la sala de compresores. El ahorro que se obtiene por la utilización de este aire caliente es de: **2,66 €** por cada hora de carga de 1 compresor. Ver cálculos en la figura 12.

Se supone un uso de 24 h/día durante 120 días al año (4 meses) y 3 compresores en funcionamiento, el ahorro estimado sería: 2,66 €/h x 24 h/día x 120 días x 3 compresores = **22.982 €/año**.

Ahorros del sistema de recuperación de calor por aire caliente

Compresor de tornillo refrigerado por aire, modelo DSDX 243

Potencia en el eje del Motor (7,5 bar):	137,4 kW	Energía Utilizable en aire caliente	= 22 % del consumo total de energía (ver diagrama de flujo)
Eficiencia del motor:	0,958		= 0,22 x 143,42 kW = 31,55 kW
Periodo utilización:	1 hora	Ahorro:	
Periodo de carga del compresor:	1 hora		$\frac{\text{Energía utilizable} \times \text{tiempo en carga} \times \text{Precio gasoil calentador}}{\text{Calor esp. Gasoil} \times \text{eficiencia del calentador}}$
Precio gasoil calefacción:	0,75 €/litro		= $\frac{31,55 \text{ kW} \times 8000 \text{ h} \times \text{€}0,75 / \text{l}}{9,87 \text{ kWh/l} \times 0,9}$
Calor específico gasoil:	35,5 MJ/l = 9,87 kWh/l (1 MJ = 0,278 kWh)		= 2,66 € por 1 hora en carga
Eficiencia de la caldera:	0,9		
Consumo total de energía:	= $\frac{\text{Pot. Eje compresor}}{\text{Eficiencia del motor}}$		
	= $\frac{137,4 \text{ kW}}{0,958} = 143,42 \text{ kW}$		

Figura 12. Cálculos ahorros utilizando el aire caliente de un compresor DSDX 243.

- Ahorro energético por la sustitución del secador actual**

Para alcanzar un punto de rocío de +3°C en la instalación propuesta, el tratamiento de aire tiene que estar formado por los siguientes secadores frigoríficos. Ver tabla 6.

Marca	Modelo	Potencia nominal en kW	Caudal secado m ³ /min	Presión de trabajo bar
KAESER	TI 521	6,7	52,5	16
KAESER	TI 521	6,7	52,5	16
KAESER	TI 521	6,7	52,5	16

Tabla 6. Secadores propuestos por KAESER para la línea de 7,5 bar(g).

Para demostrar la capacidad de ahorro de la serie Energy Saving Dryers de KAESER. Se puede comparar un secador KAESER TI 521, secador con compresor frigorífico de caudal variable, contra el mismo secador, si tuviera una válvula de by-pass de gas caliente (secador de expansión directa). En la figura 13 hay comparativa entre los secadores KAESER con sistema de ahorro de energía y secadores de expansión directa. En esta comparativa se puede ver como el secador KAESER cuando la demanda es 0, consume un 10% del consumo máximo, mientras que un secador de expansión directa consume el 90% de su consumo máximo, incluso cuando por el no hay paso de aire comprimido.

El secador ha sido elegido para el peor de los casos, que es un pico de generación de aire comprimido en verano, teniendo en cuenta los factores de corrección adecuados. Por lo tanto el secador va a estar sobre dimensionado en los meses más fríos y templados del año. Por otro lado, la instalación cuenta con un secador de seguridad, teniendo en cuenta que los secadores hay que encenderlos entre 30 minutos y 1 hora antes para que adquieran la temperatura de trabajo, es muy recomendable el mantenerlos encendidos todo el año, para tener seguridad inmediata en caso de paro de uno de los secadores. Con todos estos datos, se puede suponer que cada uno de los 3 secadores propuestos va a estar trabajando de media anual al 50% de su capacidad, por lo que en el caso del secador con sistema de ahorro de energía, el consumo sería del 55% del nominal mientras que el regulado por la válvula de by-pass de gas caliente sería del 95% aproximadamente.

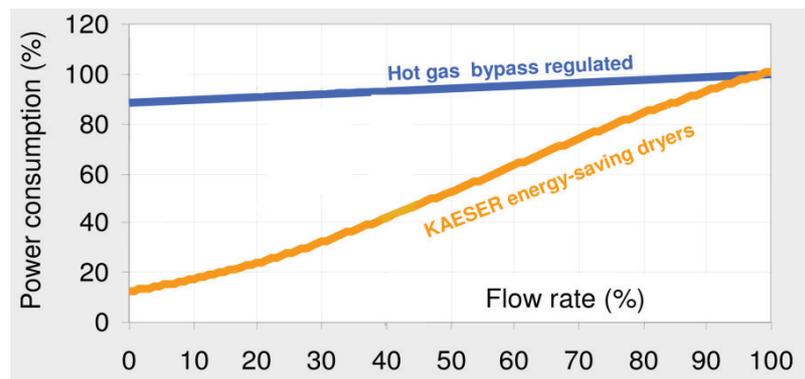


Figura 13. Curvas potencia/caudal de dos sistemas tipos de secadores frigoríficos.
Fuente: KAESER Compresores

Consumo secador TI 521 (sistema ahorro energía):

$$8.000h/año \times 6,7 \text{ kW} \times 0,55 \times 0,09 \text{ €/kWh} = 2.653,2 \text{ €/año}$$

Consumo secador TI 521 (regulación válvula by-pass de gas caliente):

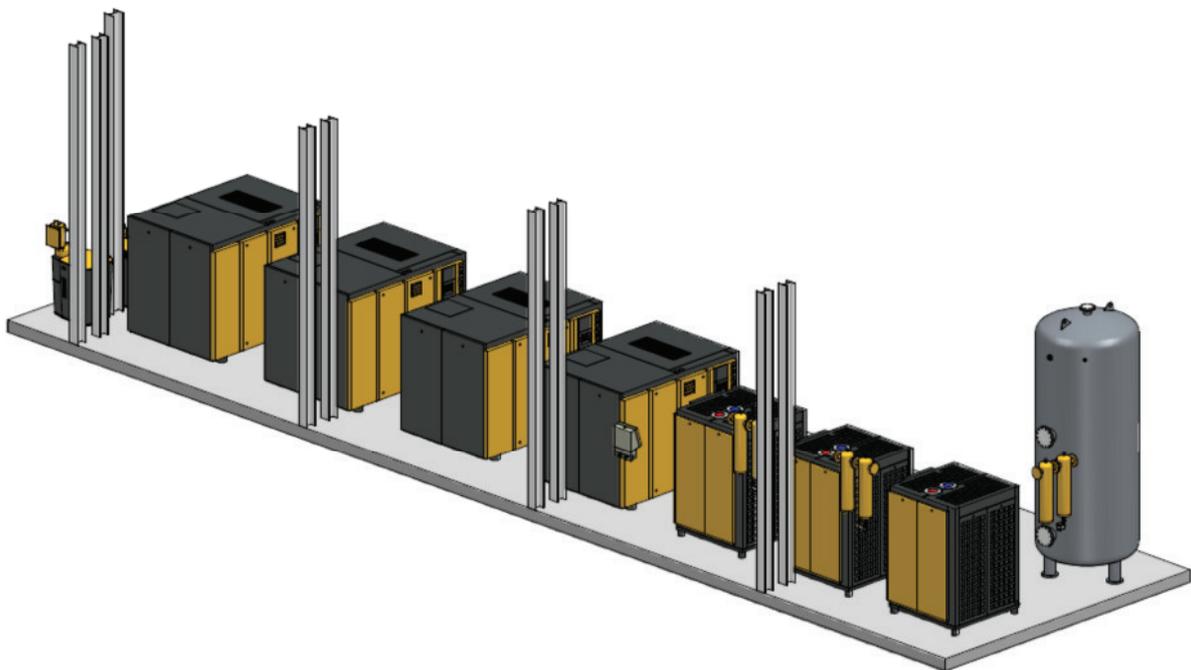
$$8.000h/año \times 6,7 \text{ kW} \times 0,95 \times 0,09 \text{ €/kWh} = 4.582,8 \text{ €/año}$$

El ahorro con el secador KAESER es de 1.929 €/año, por cada secador, en total el ahorro sería de: **5.789 €/año.**

El secador existente CT 83/S, marca SABROE, es refrigerado por agua. El caudal de agua de refrigeración del secador es de 14 m³/h. El coste estimado para el agua de refrigeración utilizando torres de refrigeración, es de 0,08 €/m³. Es coste del agua de refrigeración incluye: consumo eléctrico de bombas de agua, consumo de la torre de refrigeración, tratamiento del agua de refrigeración y rellenado de agua al circuito de refrigeración. Teniendo en cuenta 8.000 h de trabajo anuales el ahorro que se produce es:

$$14 \text{ m}^3/\text{h} \times 8.000 \text{ h/año} \times 0,08 \text{ €/m}^3 = \mathbf{8.960 \text{ €/año}}$$

En la figura 14, hay un plano isométrico de la propuesta de equipos para la línea de 7,5 bar(g).



*Figura 14. Plano isométrico de la propuesta para la línea 7,5 bar(g).
Fuente: KAESER Compresores*

3.4.2. Propuesta y ahorros Línea 2 bar(g)

- **Ahorro energético por la sustitución de los compresores actuales**

Durante la auditoría, había en funcionamiento 2 equipos Betico LK1JJ de 45 kW. Con los datos de los que se dispone sobre una máquina similar de 55 kW, se estima que el caudal que entrega el compresor Betico LK1JJ de 45 kW a la presión de 2 bar(g) es de 7,2 m³/min. Los principales equipos de KAESER que se proponen para esta instalación son: 3 compresores CSD 82 diseño de baja presión, de 45 KW (uno de ellos en stand-by) y 3 líneas de tratamiento de aire comprimido, cada una de ellas compuesta de secador frigorífico y sistema de filtrado de carbón activo. De modo que la calidad de aire alcanzada será muy superior a la actual, lo que contribuirá a un mejor funcionamiento de los equipos que estén conectados a esta línea de aire comprimido.

Compresores

Marca	Modelo	Potencia nominal en kW	Entrega en m ³ /min	Presión de trabajo bar
KAESER	CSD 82	45	8,3	3,5
KAESER	CSD 82	45	8,3	3,5
KAESER	CSD 82	45	8,3	3,5

Tabla 7. Compresores propuestos por KAESER para la línea de 3,5 bar(g).

Secadores

Marca	Modelo	Potencia nominal en kW	Caudal secado m ³ /min	Presión de trabajo bar
KAESER	TE 141	1,6	14,3	16
KAESER	TE 141	1,6	14,3	16
KAESER	TE 141	1,6	14,3	16

Tabla 8. Secadores propuestos por KAESER para la línea de 3,5 bar(g).

Desafortunadamente no había datos suficientes para cuantificar los ahorros energéticos en este apartado. Desafortunadamente no se conoce exactamente el caudal generado por el compresor de baja presión, además hay que tener en cuenta la pérdida de caudal típica de los compresores de pistón a consecuencia del desgaste

de los elementos que componen el cabezal compresor. Con toda seguridad, en el momento de la auditoría el caudal que actualmente entregan los compresores es notablemente inferior al que se ha tenido en cuenta y por lo tanto la eficiencia del compresor también sería notablemente inferior. Por otro lado, uno de los principales costes asociados a los compresores de pistón es el del mantenimiento, ya que reemplazar las piezas desgastadas para mantener la eficiencia del equipo supone un gran coste económico.

El cabezal compresor de un compresor de tornillo, no sufre desgaste, y por lo tanto el caudal entregado no varía en el tiempo, lo que hace que la eficiencia del compresor de tornillo, sea siempre la misma, con unos costes de mantenimiento inferiores. Esto ha hecho que en la industria, los compresores de tornillo hayan desplazado a los compresores de pistón. Debido a este desgaste, se ha estimado que, con los años de uso, el caudal podría ser entre un 10 y un 15% inferior. Los compresores Betico LK1JJ también son refrigerados por agua, el caudal de agua de refrigeración estimado es de 1,57 m³/h. Como con la utilización del sistema KAESER, se suprimiría el agua de refrigeración de los 2 equipos Betico LK1JJ. Utilizando el dato de 0,08 €/m³ se puede estimar el ahorro en:

$$2 \times 4,3 \text{ m}^3/\text{h} \times 8.000 \text{ h/año} \times 0,08 \text{ €/m}^3 = \mathbf{5,504 \text{ €/año}}$$

- **Ahorro energético por la recuperación de calor calentando agua**

El ahorro obtenido por la utilización de intercambiadores de calor para calentar agua es de: **2,15 €** por cada hora de carga de 2 compresores. Ver cálculos en la figura 14. Se supone un uso de 24 h/día durante 120 días al año (4 meses) y 2 compresores en funcionamiento, el ahorro estimado sería: 2,15 €/h x 24 h/día x 120 días x 2 compresor = **12.384 €/año.**

Ahorros del sistema de recuperación de calor por agua caliente

Compresor de tornillo refrigerado por aire, modelo CSD 82

Potencia en el eje del Motor (7,5 bar):	33,4 kW	Energía Utilizable en agua caliente	
Eficiencia del motor:	0,944	= 72 % del consumo total de energía (ver diagrama de flujo)	
Periodo utilización:	1 hora	= 0,72 x 35,38 kW = 25,47 kW	
Periodo de carga del compresor:	1 hora	Ahorro:	
Precio gasoil calefacción:	0,75 €/litro	$\frac{\text{Energía utilizable x tiempo en carga x Precio gasoil calentador}}{\text{Calor esp. Gasoil x eficiencia del calentador}}$	
Calor específico gasoil:	35,5 MJ/l = 9,87 kWh/l (1 MJ = 0,278 kWh)	=	$\frac{25,47 \text{ kW} \times 1 \text{ h} \times \text{€}0,75 / \text{l}}{9,87 \text{ kWh/l} \times 0,9}$
Eficiencia de la caldera:	0,9	=	2,15 € por 1 hora en carga
Consumo total de energía:	= $\frac{\text{Pot. Eje compresor}}{\text{Eficiencia del motor}}$ = $\frac{33,4 \text{ kW}}{0,944} = 35,38 \text{ kW}$		

Figura 15. Cálculos ahorros calentando agua de un compresor CSD 82.

- **Ahorro energético por la recuperación de calor por aire caliente**

Los compresores utilizan un cierto caudal de aire para refrigerarse, aun cuando en este caso, la mayor parte del calor generado va a ser aprovechado para calentar agua, todavía se tiene un 22% de energía que es evacuada por el moto-ventilador del compresor, este caudal de aire caliente, puede ser empleado para caldear estancias contiguas a la sala de compresores. El ahorro obtenido por la utilización de este aire caliente es de: **0,65 €** por cada hora de carga de 2 compresores. Ver cálculos en la figura 15.

Ahorros del sistema de recuperación de calor por aire caliente

Compresor de tornillo refrigerado por aire, modelo CSD 82

Potencia en el eje del Motor (3,5 bar):	33,4 kW	Energía Utilizable en aire caliente	
Eficiencia del motor:	0,944	= 22 % del consumo total de energía (ver diagrama de flujo)	
Periodo utilización:	1 hora	= 0,22 x 35,38 kW = 7,78 kW	
Periodo de carga del compresor:	1 hora	Ahorro:	
Precio gasoil calefacción:	0,75 €/litro	$\frac{\text{Energía utilizable} \times \text{tiempo en carga} \times \text{Precio gasoil calentador}}{\text{Calor esp. Gasoil} \times \text{eficiencia del calentador}}$	
Calor específico gasoil:	35,5 MJ/l = 9,87 kWh/l (1 MJ = 0,278 kWh)	= $\frac{7,78 \text{ kW} \times 1 \text{ h} \times \text{€}0,75 / \text{l}}{9,87 \text{ kWh/l} \times 0,9}$	
Eficiencia de la caldera:	0,9	= 0,65 € por 1 hora en carga	
Consumo total de energía:	= $\frac{\text{Pot. Eje compresor}}{\text{Eficiencia del motor}}$		
	= $\frac{33,4 \text{ kW}}{0,944} = 35,38 \text{ kW}$		

Figura 16. Cálculos ahorros utilizando el aire caliente de un compresor CSD 82.

Se supone un uso de 24 h/día durante 120 días al año (4 meses) y 2 compresores en funcionamiento, el ahorro estimado sería: 0,65 €/h x 24 h/día x 120 días x 2 compresores = **1.872 €/año**.

- **Ahorro energético por la utilización de un secador de masa térmica**

Para demostrar la capacidad de ahorro de la serie Energy Saving Dryers de KAESER. Se va a comparar un secador KAESER TE 141 (14,3 m³/min), secador SECOTEC, de masa térmica, contra el mismo secador, si tuviera una válvula de by-pass de gas caliente (secador de expansión directa). En el ejemplo anterior ya se ha visto la gráfica de consumos respecto a caudales parciales de los secadores de expansión directa. En la figura 17 se muestra el rendimiento de los compresores de la serie SECOTEC frente a cargas parciales.

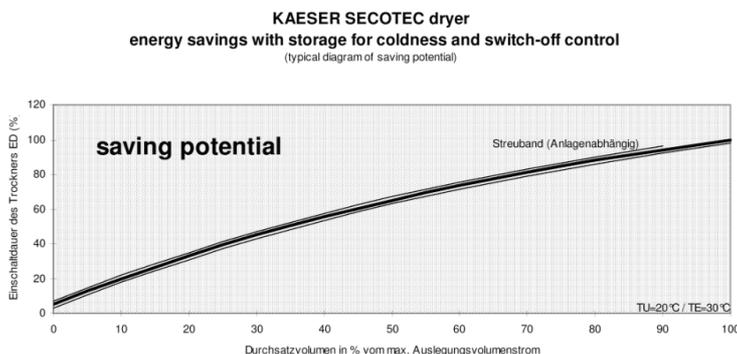


Figura 17. Curva potencia/caudal secador SECOTEC de KAESER.
Fuente: KAESER Compresores

En la figura 17 se observa como el secador KAESER cuando la demanda es 0, consume un 5% del consumo máximo, mientras que un secador de expansión directa consume el 90% de su consumo máximo, incluso cuando por el no hay paso de aire comprimido.

El secador ha sido elegido para el peor de los casos, que es un pico de generación de aire comprimido en verano, teniendo en cuenta los factores de corrección adecuados. Por lo tanto el secador va a estar sobre dimensionado en los meses más fríos y templados del año. Por otro lado, la instalación dispone de un secador de seguridad, teniendo en cuenta que los secadores hay que encenderlos entre 30 minutos y 1 hora antes para que adquieran la temperatura de trabajo, es muy recomendable el mantenerlos encendidos todo el año, para tener seguridad inmediata en caso de paro de uno de los secadores. Con todos estos datos, se puede suponer que cada uno de los 2 secadores propuestos va a estar trabajando de media anual al 50% de su capacidad, por lo que en el caso del secador SECOTEC, el consumo será del 65% del nominal mientras que el regulado por la válvula de by-pass de gas caliente será del 95% aproximadamente.

- Consumo secador TE 141 (sistema ahorro energía):

$$8.000h/año \times 1,45 \text{ kW} \times 0,65 \times 0,09 \text{ €/kWh} = 678,6 \text{ €/año}$$

- Consumo secador TE 141 (regulación válvula by-pass de gas caliente):

$$8.000h/año \times 1,45 \text{ kW} \times 0,95 \times 0,09 \text{ €/kWh} = 991,8 \text{ €/año}$$

El ahorro con el secador KAESER es de 313,2 €/año, por cada secador, en total el ahorro sería de: **939,6 €/año.**

3.4.3. Propuesta y ahorros Línea de Vacío

- **Ahorro energético por la sustitución de las bombas actuales**

Para la instalación de vacío, la propuesta está basada en un diseño con 3 bombas de vacío KAESER modelo CSV150 de 30 kW (de los cuales están previstos 2 en funcionamiento y 1 en stand-by). Ver tabla 9. Las bombas de vacío de KAESER son sistemas de vacío de accionamiento por tornillo lubricado, y disponen de una alta eficiencia energética. El conjunto de las bombas de vacío se gestionará a través de

un controlador maestro SAM (basado en un PC industrial), que permitirá la regulación por nivel de caída de presión gestionando el funcionamiento de las bombas.

Bombas de Vacío

Marca	Modelo	Potencia nominal en kW	Entrega en m ³ /min	Presión de trabajo mbar(a)
KAESER	CSV 150	30	14,4	200
KAESER	CSV 150	30	14,4	200
KAESER	CSV 150	30	14,4	200

Tabla 9. Bombas de vacío propuestas por KAESER para la línea de vacío.

Para la instalación propuesta de bombas de vacío, se considera una utilización al 50% en vacío, por lo que los 90 kW nominales se reparten de igual manera para vacío y para baja presión con 45kW cada uno de los consumos. En el caso del vacío se debe añadir además la bomba de vacío MPR de 37 kW, por lo que se puede considerar una potencia instalada de baja presión de 45kW + 37kW = 82kW.

Los ahorros reales son difícilmente cuantificables debido a la imposibilidad de conocer los datos reales de las máquinas Betico. En ese caso, el ahorro se puede estimar así: (Potencia instalada actual – Potencia instalada solución KAESER) x 80% en carga x 8.000 horas trabajo/año x precio energía eléctrica

$$(82kW - 30kW) \times 80\% \times 8.000 \text{ horas/año} \times 0,09 \text{ EUR/kWh} = 12.672 \text{ €/año.}$$

- **Ahorro energético por la recuperación de calor calentando agua**

El ahorro que se obtiene por la utilización de intercambiadores de calor para calentar agua es de: **1,46 €** por cada hora de carga de 2 bombas de vacío. Ver cálculos en la figura 18.

Ahorros del sistema de recuperación de calor por agua caliente

Bomba de vacío refrigerada por aire, modelo CSV 150

Potencia en el eje del Motor (7,5 bar):	22,7 kW	Energía Utilizable en agua caliente	
Eficiencia del motor:	0,944	= 72 % del consumo total de energía (ver diagrama de flujo)	
Periodo utilización:	1 hora	= 0,72 x 24,14 kW = 17,38 kW	
Periodo de carga del compresor:	1 hora	Ahorro:	
Precio gasoil calefacción:	0,75 €/litro	$\frac{\text{Energía utilizable x tiempo en carga x Precio gasoil calentador}}{\text{Calor esp. Gasoil x eficiencia del calentador}}$	
Calor específico gasoil:	35,5 MJ/l = 9,87 kWh/l (1 MJ = 0,278 kWh)	=	$\frac{17,38 \text{ kW} \times 1 \text{ h} \times \text{€}0,75 / \text{l}}{9,87 \text{ kWh/l} \times 0,9}$
Eficiencia de la caldera:	0,9	=	1,46 € por 1 hora en carga
Consumo total de energía:	= $\frac{\text{Pot. Eje compresor}}{\text{Eficiencia del motor}}$		
	= $\frac{22,7 \text{ kW}}{0,944} = 24,14 \text{ kW}$		

Figura 18. Cálculos ahorros calentando agua de una bomba de vacío ASV 150.

Se supone un uso de 24 h/día durante 120 días al año (4 meses) y 2 bombas de vacío en funcionamiento, el ahorro estimado sería: 1,46 €/h x 24 h/día x 120 días x 2 bombas de vacío = **8.409 €/año**.

- **Ahorro energético por la recuperación de calor por aire caliente**

Las bombas de vacío utilizan un cierto caudal de aire para refrigerarse, aun cuando en este caso, la mayor parte del calor generado va a ser aprovechado para calentar agua, todavía tenemos un 22% de energía que es evacuada por el moto-ventilador del compresor, este caudal de aire caliente, puede ser empleado para caldear estancias contiguas a la sala de compresores. El ahorro obtenido por la utilización de este aire caliente es de **0,44 €** por cada hora de carga de 2 bombas de vacío. Ver cálculos en la figura 18.

Ahorros del sistema de recuperación de calor por aire caliente

Bomba de vacío refrigerada por aire, modelo CSV 150

Potencia en el eje del Motor (7,5 bar):	22,7 kW	Energía Utilizable en agua caliente	
Eficiencia del motor:	0,944	= 22 % del consumo total de energía	(ver diagrama de flujo)
Periodo utilización:	1 hora	= 0,22 x 24,14 kW = 5,31 kW	
Periodo de carga del compresor:	1 hora	Ahorro:	
Precio gasoil calefacción:	0,75 €/litro	$\frac{\text{Energía utilizable} \times \text{tiempo en carga} \times \text{Precio gasoil calentador}}{\text{Calor esp. Gasoil} \times \text{eficiencia del calentador}}$	
Calor específico gasoil:	35,5 MJ/l = 9,87 kWh/l (1 MJ = 0,278 kWh)	=	$\frac{5,31 \text{ kW} \times 1 \text{ h} \times \text{€}0,75 / \text{l}}{9,87 \text{ kWh/l} \times 0,9}$
Eficiencia de la caldera:	0,9	=	0,44 € por 1 hora en carga
Consumo total de energía:	= $\frac{\text{Pot. Eje compresor}}{\text{Eficiencia del motor}}$		
	= $\frac{22,7 \text{ kW}}{0,944} = 24,14 \text{ kW}$		

Figura 19. Cálculos ahorros utilizando el aire caliente de una bomba de vacío ASV 150.

Se supone un uso de 24 h/día durante 120 días al año (4 meses) y 2 bombas de vacío en funcionamiento, el ahorro estimado sería: 0,44 €/h x 24 h/día x 120 días x 2 bombas de vacío = **2.534 €/año**.

4. CONCLUSIONES

Después de varias visitas a la planta, un gran número de e-mails e incontables llamadas de teléfono para realizar las mediciones, aclarar puntos para avanzar en la auditoría, explicaciones y presentaciones de los equipos, etc... se ha podido concluir el estudio. Tras esta auditoría y posterior análisis de los datos obtenidos, ha quedado claro que las instalaciones de aire comprimido y vacío tienen mucho donde mejorar, tanto en la calidad de aire usado como en la eficiencia del sistema. El cliente se ha dado cuenta del gran potencial de mejora, no solo por la instalación de más modernos y eficientes equipos, sino que además puede ahorrar mucho dinero en pequeñas paradas por averías producidas por la mala calidad del aire comprimido.

Además, gracias a la auditoría han salido a la luz puntos de mejora de la eficiencia que de los que el cliente era desconocedor, como cambiar equipos refrigerados por agua por equipos refrigerados por aire, y sobre todo el aprovechamiento del calor

generado en la compresión. Como se puede comprobar en la auditoría el cliente puede ahorrar mucho dinero por el aprovechamiento del agua caliente para calefacción e incluso del aire caliente que expulsan los equipos por su refrigeración para el calentamiento de estancias contiguas, simplemente por no tirar el aire caliente al exterior en invierno. Por todo esto es por lo que se aconseja siempre a los clientes el poder visitar la sala de compresores para poder hacer una evaluación completa del sistema y ver todos los posibles puntos de mejora.

A continuación hay una tabla resumen en la que se encuentran todos los ahorros calculados en el estudio (ver tabla 10). Como se puede comprobar el grueso de los ahorros potenciales se encuentran en la línea de 7,5 bar(g) como cabía esperar, ya que es la línea con más potencia instalada. Los ahorros potenciales son de 147.600,08 €/año, mientras que la línea de 2 bar(g) y la línea de vacío son de 20.699,60 y 23.615 €/año respectivamente.

	Ahorro €/año
Línea 7,5 bar(g)	
Ahorro en consumo de compresores KAESER (SAM incluido)	34.615,08 €
Ahorro recuperación de calor agua caliente (4 meses de uso anual)	75.254,00 €
Ahorro recuperación de calor aire caliente (4 meses de uso anual)	22.982,00 €
Ahorro utilización secadores de masa térmica	5.789,00 €
Ahorro agua refrigeración secador SABROE	8.960,00 €
Línea 2 bar(g)	
Ahorro agua refrigeración compresores BETICO	5.504,00 €
Ahorro recuperación de calor agua caliente (4 meses de uso anual)	12.384,00 €
Ahorro recuperación de calor aire caliente (4 meses de uso anual)	1.872,00 €
Ahorro utilización secadores de masa térmica	939,60 €

Línea de vacío	
Ahorro utilización bombas de vacío KAESER	12.672,00 €
Ahorro recuperación de calor agua caliente (4 meses de uso anual)	8.409,00 €
Ahorro recuperación de calor aire caliente (4 meses de uso anual)	2.534,00 €
TOTAL	191.914,68 €

Tabla 10. Resumen de la capacidad de ahorro con la propuesta de KAESER.

5. BIBLIOGRAFÍA

La bibliografía utilizada, así como todas las imágenes utilizadas han sido obtenidas de material de páginas web, material de formación, catálogos y programas propiedad de KAESER Compresores, como el catálogo “Técnica del aire comprimido” propiedad de KAESER Compresores.

Las webs visitadas has sido:

www.kaeser.es (consulta octubre 2016)

<http://airecomprimidokaeser.com/index.php/2016/02/05/historia-de-los-compresores-de-aire/>
(consulta octubre 2016)

www.mundocompresor.com (consulta octubre 2016)

<https://marcelocassani.wordpress.com/2015/07/28/historia/> (consulta octubre 2016)