

Proyecto Fin de Grado
Grado en Ingeniería Química.

Evaluación de sistemas de compresión térmica para la reducción de consumo energético en secadero de mineral

Autor: Miguel Ruz Sánchez

Tutor: David Velázquez

**Dep. Energía y Combustibles
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2018



Proyecto Fin de Máster
Energía Térmica

Evaluación de sistemas de compresión térmica para la reducción de consumo energético en secadero de mineral

Autor: Miguel Ruz Sánchez

Tutor: David Velázquez

Dep. Energía térmica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2019

Proyecto Fin de Carrera: Evaluación de sistemas de compresión térmica para la reducción de consumo energético en secadero de mineral

Autor: Miguel Ruz Sánchez

Tutor: David Velázquez

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

Resumen

El presente proyecto son dos estudios, en el primero se estudia cambiar una tecnología de laminación de vapor por la de termocompresores para obtener un caudal de vapor a una presión determinada. El segundo estudio es sobre utilizar las redes neuronales para obtener una herramienta de medida, en este caso de un caudal de vapor medido erróneamente por controladores.

Para ello se han desarrollado herramientas de cálculo y se han evaluado los costes del primer estudio en un horizonte cercano.

Índice

Resumen.....	7
1. Bases del primer caso.....	10
2. Fundamentos de las tecnologías	11
2.1. Proceso de termocompresión (TVR)	11
2.1.1. Tipos de termocompresores.	12
3. Cálculos del caso	15
3.1. Termocompresión del vapor (TVR).....	15
4. Ahorros	22
1. Bases del segundo caso.	25
2. Fundamentos de las tecnologías.	25
2.1. Aspen Hysys.....	25
2.2. Redes Neuronales.....	27
2.2.1. Aprendizaje de las Redes Neuronales.....	28
2.2.1.1. Aprendizaje no supervisado.....	28
2.2.1.2. Aprendizaje supervisado.....	29
3. Tratamiento de Datos.....	30
4. Cálculos.....	32
4.1. Cálculos mediante expresión analítica.....	32
4.2. Cálculos red neuronal.....	47
5. Conclusión.....	58
Referencias.....	59

1. Bases del primer caso

Para el primer caso se tiene una fábrica que para obtener su producto necesita una producción de vapor a unas presiones determinadas, esta producción de vapor se realiza mediante un proceso de laminación de vapor de alta presión, hasta las presiones de 10, 14 y 18 bar para una producción de 30, 60 y 90 t/h. Este proceso de laminación se realiza mediante una válvula de control.

Para poder realizar esto de una manera más eficiente y económica se va a realizar el estudio para cambiar el proceso de laminación de vapor por termocompresores para obtener el caudal de vapor deseado. Además también se consigue utilizar una corriente de baja presión que no se utilizaba anteriormente.

En este estudio se necesita saber que caudales de vapor se requieren en cada caso. Para ello se realiza un estudio de los caudales más utilizados a esas presiones y se obtiene que los caudales necesarios de vapor son 8, 10 y 12.4 t/j para las presiones de 10, 14 y 18 bares respectivamente.

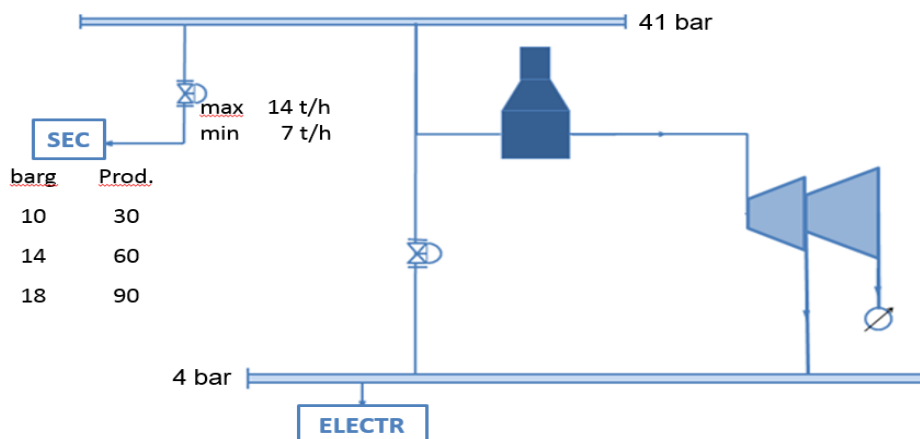


Ilustración 1. Diagrama de la situación actual del caso.

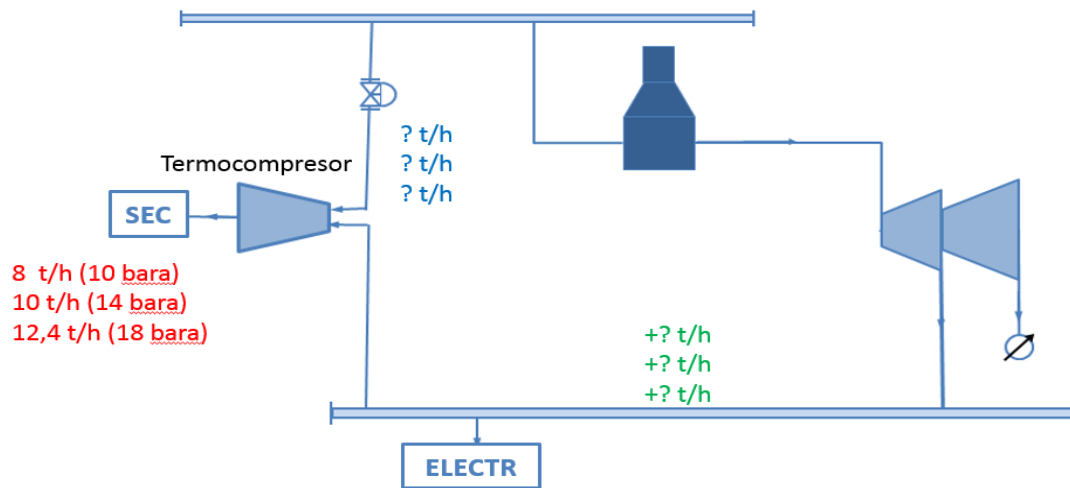


Ilustración 2. Diagrama del estudio del caso.

2. Fundamentos de las tecnologías

2.1. Proceso de termocompresión (TVR)

El elemento clave de la recompresión térmica de vapor es el **eyector**. Este componente es de amplia aplicación en la industria en todos aquellos procesos en los que se requiere arrastrar o comprimir una corriente fluida sin utilizar un compresor o una bomba de aspiración. Ejemplos de estas aplicaciones pueden ser procesos tales como la purga de condensados o procesos en instalaciones frigoríficas. En todos estos casos la utilización de eyectores presenta como ventajas su bajo coste y su larga vida de operación, que es prácticamente indefinida.

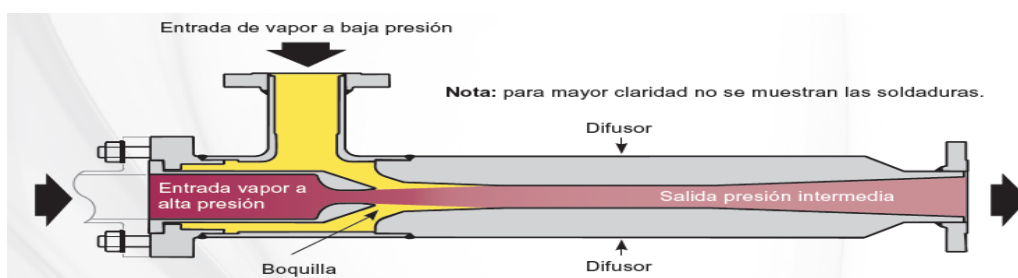


Ilustración 3. Termocompresor simple

Un eyector (Ilustración 14) es un dispositivo que utiliza la cantidad de movimiento y la energía cinética de una corriente de fluido vivo o motriz para arrastrar o comprimir una segunda corriente fluida.

El fluido que llega a más alta presión ejerce de fluido motriz, que al pasar a través de una boquilla transforma su presión en alta velocidad. El segundo fluido entra en la zona de succión. Ambas corrientes se mezclan en un punto de baja presión. Tras la mezcla, la corriente avanza por la boquilla, en la que se transforma la velocidad de la corriente en presión, resultando una corriente situada entre la corriente de mayor y menor presión. Se puede realizar un cálculo aproximado de un eyector aplicando los siguientes criterios:

- 1) El fluido de mayor presión se expande isentrópicamente en la boquilla, con lo que la energía debida a la presión del fluido se transforma en energía cinética.
- 2) Ambos fluidos se mezclan a la presión de entrada de la corriente de menor presión.
- 3) La mezcla de los dos fluidos entra al difusor en el que la energía cinética se transforma en presión con una eficiencia de entre 65 y el 95%. A menor velocidad de entrada al difusor y mayor tamaño del mismo, tenemos una mayor eficiencia.
- 4) El ratio de compresión suele estar comprendido entre valores de 1,05 a 3.

2.1.1. Tipos de termocompresores.

Los principales tipos de termocompresores son los siguientes:

- 1) Etapa simple: este eyector no tiene partes móviles y es el de construcción más sencilla. Ideal para presiones moderadas. Este modelo es el representado en la Ilustración 14.

- 2) Eyector con actuador: es un modelo más complejo que el anterior, ya que el actuador regula la entrada de vapor vivo al eyector y con éste se consigue una mayor capacidad de regulación de la carga. Un esquema de este equipo sería el siguiente:

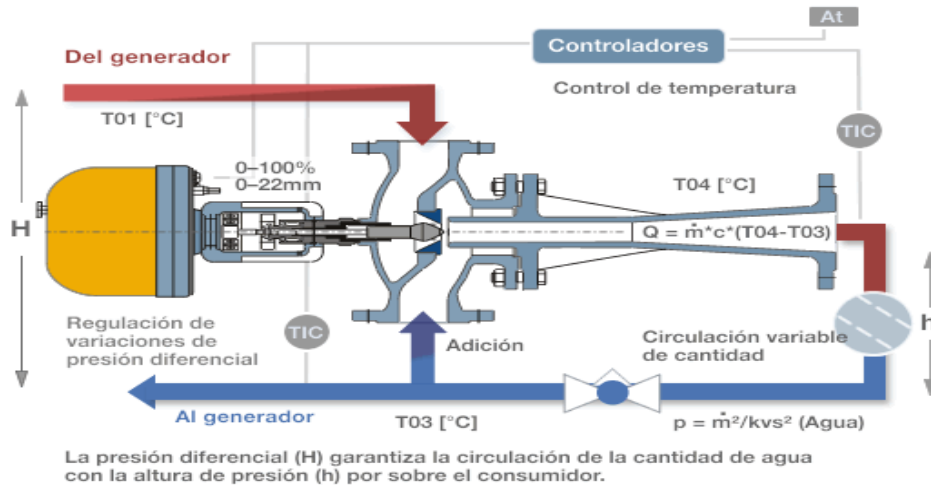


Ilustración 4. Termocompresor con actuador

- 3) Eyector de boquilla múltiple: este eyector tiene un tamaño mayor a los anteriores. Puede trabajar con un vapor vivo a menor presión que los anteriores y generalmente es el equipo de mayor eficiencia de los tres. Suelen tener un recubrimiento externo por el que pasa vapor para evitar la formación de hielo o agua en el interior del mismo. La siguiente imagen viene a representar este tipo de equipos:



Ilustración 5. Termocompresor de boquilla múltiple

Como aplicaciones típicas de la termocompresión se pueden citar los procesos de destilación y evaporación en los que se necesita que el vapor termocomprimido tenga una temperatura superior entre 10 y 20 K que el producto a evaporar. Sin embargo hay que observar que las posibles aplicaciones están limitadas por el hecho de que los productos a comprimir se mezclan con el vapor motriz. En el caso de la destilación se realiza la recompresión térmica de los vapores de cabeza de una columna de destilación si se tiene vapor motriz, tal como ocurre en el caso de la recompresión mecánica de vapor. Para ello se comprime el vapor de agua de alta presión; lo que en procesos de destilación solamente es aceptable en el caso en que el destilado también contenga agua.

En el caso de aplicaciones en procesos de evaporación la termocompresión es mucho más atractiva, ya que en la evaporación de agua para la concentración o el secado de un producto no hay problemas entre la mezcla del agua y el vapor a alta presión si el solvente a retirar es agua. En evaporadores de múltiple efecto el vapor de agua se puede recomprimir mediante un eyector utilizando vapor de alta o media presión con el fin de reutilizar los vahos procedentes de la primera etapa.

La capacidad de un eyector se puede controlar hasta un cierto grado mediante la reducción de presión o estrangulamiento del vapor motriz, o bien utilizando una tobera de área variable. Se puede también cubrir un amplio intervalo de capacidades asociando eyectores, o bien conectando y desconectando los eyectores individuales, si hay variación de carga.

En aplicaciones en las que se ha implantado un eyector para aprovechar los vahos de un proceso, se puede alcanzar un COP de 2, pero típicamente se sitúa entre valores de 1,1 y 1,5 para saltos de temperaturas pequeños entre el foco frío y el foco caliente.

La tecnología de recompresión térmica permite disminuir la cantidad de vapor específico consumido en un valor cercano al 50% dependiendo de las condiciones del proceso. Esta tecnología es relativamente simple de diseñar, ya que sólo se consume vapor motriz y no tiene partes móviles.

La limitación principal de la compresión térmica de vapor es su falta de flexibilidad para trabajar con distintas cargas. A causa fundamentalmente del limitado rango de operación de un eyector de una cierta capacidad.

En determinadas condiciones tales como una temperatura de ebullición no muy alta y una presión no inferior a la presión atmosférica, la compresión mecánica del vapor es la mejor y la opción más económica.

3. Cálculos del caso

3.1. Termocompresión del vapor (TVR).

En este apartado se resolverá el evaporador de múltiple efecto combinado con un eyector de vapor. Este eyector se ha diseñado a partir de datos de un fabricante de eyectores, KADANT. Este fabricante proporciona en su catálogo información para que el usuario pueda ver qué eyector es el necesario para según qué aplicación. En este proyecto se diseñará los eyectores de vapor para las presiones requeridas. A continuación, se muestran los parámetros de diseño de los mismos:

<i>Parámetros operativos</i>			
Pd	Presión vapor de descarga	10,00	bara
Pm	Presión vapor motriz	41,00	bara
Ps	Presión vapor de succión	5,50	bara
<i>Ratios calculados</i>			
E	Raño de expansión (Pm / Ps)	7,45	
C	Raño de compresión (Pd / Ps)	1,82	

Tabla 1. Datos termocompresor 1

<i>Parámetros operativos</i>			
Pd	Presión vapor de descarga	14,00	bara
Pm	Presión vapor motriz	41,00	bara
Ps	Presión vapor de succión	5,50	bara
<i>Ratios calculados</i>			
E	Raño de expansión (Pm / Ps)	7,45	
C	Raño de compresión (Pd / Ps)	2,55	

Tabla 2. Datos termocompresor 2

Parámetros operativos		
Pd	Presión vapor de descarga	18,00 bara
Pm	Presión vapor motriz	41,00 bara
Ps	Presión vapor de succión	5,50 bara
Ratios calculados		
E	Raño de expansión (Pm / Ps)	7,45
C	Raño de compresión (Pd / Ps)	3,27

Tabla 3. Datos termocompresor 3

Se ha tenido en cuenta en el diseño del eyector de vapor los siguientes parámetros recomendados por el fabricante:

- El ratio de compresión máximo (C) es de 1,8
- El ratio de expansión mínimo es de 1,4 y el máximo es de 20

Como se ve no se puede utilizar un solo termocompresor en ninguno de los casos por lo que se pasara a calcular los termocompresores necesarios, para ello el ratio de compresión requerido se eleva a uno entre el número de termocompresores requeridos hasta obtener un ratio de compresión menos de 1,8.

$$(\text{ratio de compresión})^{\frac{1}{(\text{numero de termocompresores})}}$$

Con lo que para los casos de 10 y 14 bar se necesitaran dos termocompresores y para el caso de 18 bares se necesitan 3.

A continuación se mostraran los cálculos para el termocompresor de 10 bares como ejemplo.

Termocompresor TC1			
Parámetros operativos			
Pm	Presión vapor motriz	41,00	bara
Ps	Presión vapor de succión	5,50	bara
Pd	Presión vapor de descarga	7,42	bara
Ratios calculados			
E	Ratio de expansión (Pm / Ps)	7,45	
C	Ratio de compresión (Pd / Ps)	1,35	

Termocompresor TC2			
Parámetros operativos			
Pm	Presión vapor motriz	41,00	bara
Ps	Presión vapor de succión	7,42	bara
Pd	Presión vapor de descarga	10,00	bara
Ratios calculados			
E	Ratio de expansión (Pm / Ps)	5,53	
C	Ratio de compresión (Pd / Ps)	1,35	

Tabla 4. Datos termocompresor caso 1

Para este caso la presión de descarga es obtenida mediante la presión de succión por el ratio de compresión:

$$P_s * C = P_d$$

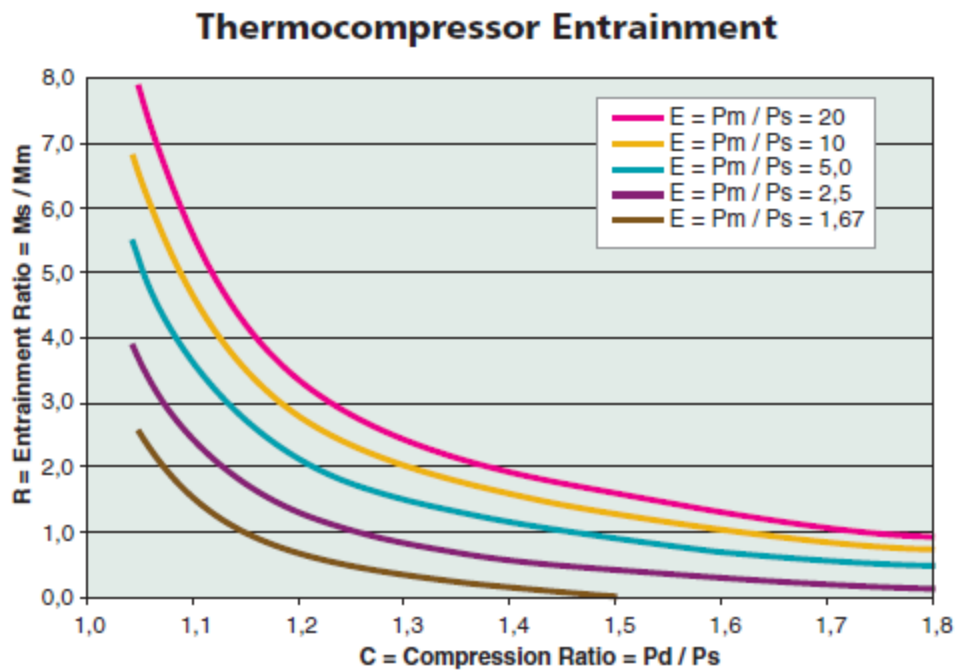


Ilustración 1. Gráfico comportamiento eyector KADANT

A partir de la gráfica anterior se obtiene R , la relación entre el vapor motriz, M_m y el vapor succionado, M_s que el eyector nos permite trabajar. Existen varias curvas en función del ratio de expansión que se tenga en el proceso. En nuestro caso, para los valores de $E = 7,42$ y $E = 5,53$ no existen curvas, por lo tanto se tiene que interpolar un valor entre las dos curvas más próximas.

Se ha realizado el ajuste mediante una herramienta informática de las gráficas, siendo el resultado el que aparece a continuación:

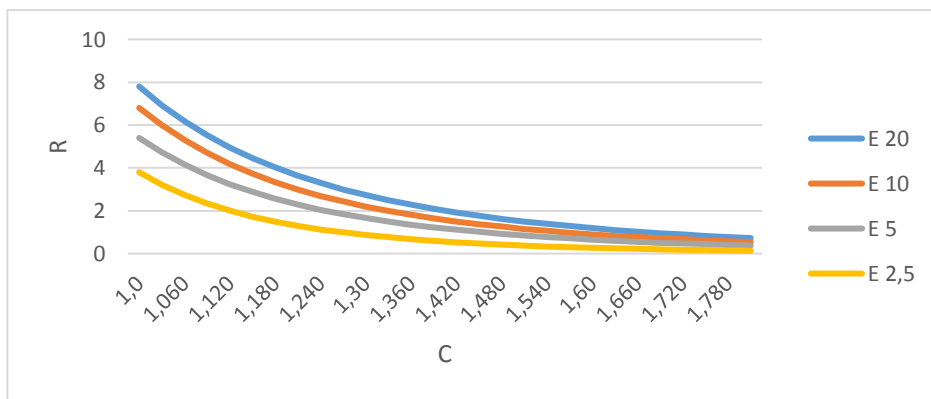


Ilustración 2. Gráfico extrapolado de curvas de KADANT

Las ecuaciones que corresponden con cada una de las líneas representadas en la gráfica son:

$$E = 20 ; R = 7,8 * C^{-4}$$

$$E = 10; R = 6,8 * C^{-4,3}$$

$$E = 5; R = 5,4 * C^{-4,5}$$

$$E = 2,5; R = 3,8 * C^{-5,4}$$

Como se observa, la tendencia en el comportamiento de las curvas es similar en todos los casos. Esto ha permitido implementar una secuencia de cálculo que permite interpolar los valores deseados.

$$E = 7.4 \quad E = 5.5$$

$$\frac{E_{10} - E_{7.4}}{R_{10} - R_{7.4}} = \frac{E_{7.4} - E_5}{R_{7.4} - R_5} \rightarrow R = 1.64 \quad \frac{E_{10} - E_{5.5}}{R_{10} - R_{5.5}} = \frac{E_{5.5} - E_5}{R_{5.5} - R_5} \rightarrow R = 1.46$$

Una vez obtenido R y sabiendo el valor del caudal de descarga podemos obtener el caudal de vapor motriz y el de succión, sabiendo que el de descarga es la suma de ambos y que el motriz es el de succión entre el ratio de arrastre.

M_m ; Masa vapor motriz M_s ; Masa de vapor succionada

M_d ; Masa de vapor descargada R ; Ratio de arrastre

$$M_d = M_m + M_s \quad R = \frac{M_s}{M_m}$$

Los termocompresores están dentro de estos parámetros límites marcados por el fabricante. El resultado del cálculo del eyector es el mostrado en la tabla contigua:

Termocompresor TC1			
Parámetros operativos			
Pm	Presión vapor motriz	41,00	bara
Ps	Presión vapor de succión	5,50	bara
Pd	Presión vapor de descarga	7,42	bara
Ms	Caudal vapor de succión	2,95	t/h
Ratios calculados			
E	Ratio de expansión (Pm / Ps)	7,45	
C	Ratio de compresión (Pd / Ps)	1,35	
Ratios determinados por diagrama			
R	Ratio de arrastre	1,64	
Vapor motriz y vapor de descarga (cálculo)			
Mm	Caudal vapor motriz (Ms / R)	1,80	t/h
Md	Caudal vapor de descarga (Mm + Ms)	4,74	t/h
Tamaño del termocompresor (determinado por tabla fabricante Kadant)			
3 pulgadas			
Termocompresor TC2			
Parámetros operativos			
Pm	Presión vapor motriz	41,00	bara
Ps	Presión vapor de succión	7,42	bara
Pd	Presión vapor de descarga	10,00	bara
Ms	Caudal vapor de succión	4,74	t/h
Ratios calculados			
E	Ratio de expansión (Pm / Ps)	5,53	
C	Ratio de compresión (Pd / Ps)	1,35	
Ratios determinados por diagrama			
R	Ratio de arrastre	1,46	
Vapor motriz y vapor de descarga (cálculo)			
Mm	Caudal vapor motriz (Ms / R)	3,26	t/h
Md	Caudal vapor de descarga (Mm + Ms)	8,00	t/h
Tamaño del termocompresor (determinado por tabla fabricante Kadant)			
3 pulgadas			

Tabla 5. Resultados termocompresor caso 1

Termocompresor TC1			
Parámetros operativos			
Pd	Presión vapor de descarga	8,77	bara
Pm	Presión vapor motriz	41,00	bara
Ps	Presión vapor de succión	5,50	bara
Ms	Caudal vapor de succión	1,670	t/h
Ratios calculados			
E	Ratio de expansión (Pm / Ps)	7,45	
C	Ratio de compresión (Pd / Ps)	1,60	
Ratios determinados por diagrama			
R	Ratio de arrastre	0,78	
Vapor motriz y vapor de descarga (cálculo)			
Mm	Caudal vapor motriz (Ms / R)	2,131	t/h
Md	Caudal vapor de descarga (Mm + Ms)	3,800	t/h
Tamaño del termocompresor (determinado por tabla fabricante Kadant)			
3 pulgadas			
Termocompresor TC2			
Parámetros operativos			
Pd	Presión vapor de descarga	14,00	bara
Pm	Presión vapor motriz	41,00	bara
Ps	Presión vapor de succión	8,77	bara
Ms	Caudal vapor de succión	3,800	t/h
Ratios calculados			
E	Ratio de expansión (Pm / Ps)	4,67	
C	Ratio de compresión (Pd / Ps)	1,60	
Ratios determinados por diagrama			
R	Ratio de arrastre	0,61	
Vapor motriz y vapor de descarga (cálculo)			
Mm	Caudal vapor motriz (Ms / R)	6,200	t/h
Md	Caudal vapor de descarga (Mm + Ms)	10,000	t/h
Tamaño del termocompresor (determinado por tabla fabricante Kadant)			
3 pulgadas			

Tabla 6. Resultados termocompresor caso 1

Termocompresor TC1			
Parámetros operativos			
Pd	Presión vapor de descarga	8,17	bara
Pm	Presión vapor motriz	41,00	bara
Ps	Presión vapor de succión	5,50	bara
Ms	Caudal vapor de succión	1,16	t/h
Ratios calculados			
E	Ratio de expansión (Pm / Ps)	7,45	
C	Ratio de compresión (Pd / Ps)	1,48	
Ratios determinados por diagrama			
R	Ratio de arrastre	1,07	
Vapor motriz y vapor de descarga (cálculo)			
Mm	Caudal vapor motriz (Ms / R)	1,08	t/h
Md	Caudal vapor de descarga (Mm + Ms)	2,25	t/h
Tamaño del termocompresor (determinado por tabla fabricante Kadant)			
3 pulgadas			
Termocompresor TC2			
Parámetros operativos			
Pd	Presión vapor de descarga	12,12	bara
Pm	Presión vapor motriz	41,00	bara
Ps	Presión vapor de succión	8,17	bara
Ms	Caudal vapor de succión	2,248	t/h
Ratios calculados			
E	Ratio de expansión (Pm / Ps)	5,02	
C	Ratio de compresión (Pd / Ps)	1,48	
Ratios determinados por diagrama			
R	Ratio de arrastre	0,91	
Vapor motriz y vapor de descarga (cálculo)			
Mm	Caudal vapor motriz (Ms / R)	2,462	t/h
Md	Caudal vapor de descarga (Mm + Ms)	4,710	t/h
Tamaño del termocompresor (determinado por tabla fabricante Kadant)			
3 pulgadas			
Termocompresor TC3			
Parámetros operativos			
Pd	Presión vapor de descarga	18,00	bara
Pm	Presión vapor motriz	41,00	bara
Ps	Presión vapor de succión	12,12	bara
Ms	Caudal vapor de succión	4,710	t/h
Ratios calculados			
E	Ratio de expansión (Pm / Ps)	3,38	
C	Ratio de compresión (Pd / Ps)	1,48	
Ratios determinados por diagrama			
R	Ratio de arrastre	0,61	
Vapor motriz y vapor de descarga (cálculo)			
Mm	Caudal vapor motriz (Ms / R)	7,690	t/h
Md	Caudal vapor de descarga (Mm + Ms)	12,400	t/h
Tamaño del termocompresor (determinado por tabla fabricante Kadant)			
3 pulgadas			

Tabla 7. Resultados termocompresor caso 1

Caudal (t/h)	Presion (bar)	Ratio comp.	Vapor motriz (t/h)	Vapor succión (t/h)	Produccion (t/h)
8	10	1,82	5,1	2,9	30
10	14	2,55	8,3	1,7	60
12,4	18	3,30	11,2	1,2	90

Tabla 8. Resumen termocompresores.

4. Ahorros

Para calcular los ahorros se sabe que el caudal que pasa por la turbina esta entre 15 y 20 t/h. Una vez que sabemos esto necesitamos saber la potencia producida por la turbina y para ello utilizamos unas tablas de vapor. Con varios puntos representamos el caudal frente a la potencia para obtener una ecuación para posteriormente poder calcular el aumento de potencia en cada caso de variación de caudal.

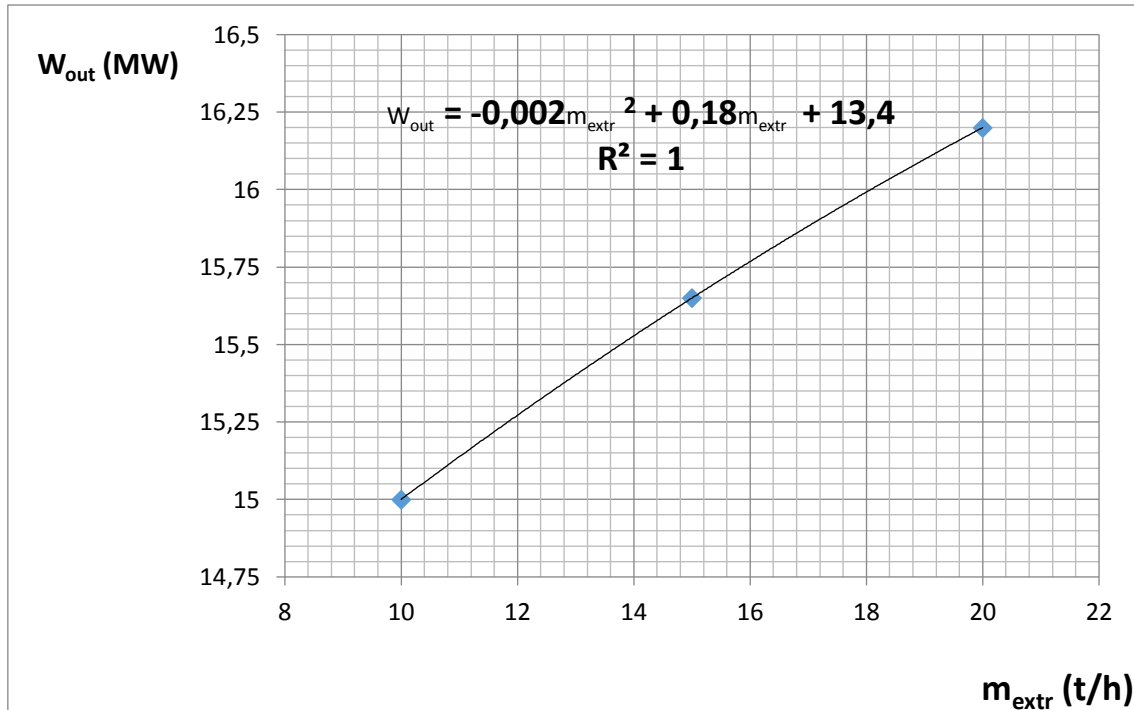


Ilustración 6. Gráfico cálculos del caudal.

Una vez obtenido esto necesitamos estudiar cada uno de los casos de los termocompresores con el caudal mínimo y el máximo viendo la variación en el caudal y potencia de ambos.

	mext inicial	dmext	dW
caso 1a	15	1,2	0,14
caso 1b	15	1,7	0,20
caso 1c	15	2,9	0,33
caso 2a	20	1,2	0,12
caso 2b	20	1,7	0,16
caso 2c	20	2,9	0,27

Tabla 9. Datos ahorro

Con los datos de potencia sabiendo que la planta opera 8.000 h/año y que el coste del MW/h es de 70,0€ se podría calcular el ahorro sin embargo también debemos de saber cuánto tiempo se opera a cada presión. Por lo que la empresa nos facilitó los datos de operación de dos días y haciendo un estudio se obtiene que el 39% del tiempo se opera a 10 bares, el 43% a 14 bares y el 18% a 18 bares. Con todo esto se calcula el ahorro anual medio.

Evaluación de sistemas de compresión térmica para la reducción de consumo energético en secadero de mineral

	mext inicial	dmext	dW	Ahorro anual
caso 1a	15	1,2	0,14	79.027,20 €
caso 1b	15	1,7	0,20	111.003,20 €
caso 1c	15	2,9	0,33	185.460,80 €
caso 2a	20	1,2	0,12	65.587,20 €
caso 2b	20	1,7	0,16	91.963,20 €
caso 2c	20	2,9	0,27	152.980,80 €
			Ahorro anual medio	122.649,18 €

Tabla 10. Ahorro anual medio.

1. Bases del segundo caso.

Para el segundo caso se va a estudiar un controlador de caudal, el cual da error en su medida. Se va a desarrollar una aplicación que tratará de corregir el error mediante el uso de diferentes herramientas como: Excel, el simulador Aspen Hysy y el uso de Redes Neuronales.

2. Fundamentos de las tecnologías.

2.1. Aspen Hysys.

HYSYS fue concebido y creado por primera vez por la compañía canadiense Hyprotech, fundada por investigadores de la Universidad de Calgary.

El volumen de referencia de HYSYS versión 1.1 se publicó en 1996. En mayo de 2002, AspenTech adquirió Hyprotech, incluido HYSYS. Tras un fallo de 2004 de la Comisión Federal de Comercio de los Estados Unidos, AspenTech se vio obligada a vender sus activos de Hyprotech, incluido el código fuente de HYSYS, que finalmente se los vendió a Honeywell.

Honeywell también pudo contratar a varios desarrolladores de HYSYS, en última instancia movilizándolo para producir UniSim. El acuerdo de desinversión especificaba que AspenTech retendría los derechos de comercialización y desarrollaría la mayoría de los productos Hyprotech (incluido HYSYS) sin royalties. A finales de 2016, AspenTech continúa produciendo HYSYS.

Aspen HYSYS (o simplemente HYSYS) es un simulador de procesos químicos que se utiliza para modelar matemáticamente procesos químicos, desde operaciones unitarias a plantas químicas completas y refinerías.

HYSYS puede realizar muchos de los cálculos básicos de ingeniería química, incluidos los relacionados con el balance de masa, el balance de energía, el equilibrio de líquido-vapor, la transferencia de calor, la transferencia de masa, la cinética química, el fraccionamiento y la caída de presión.

HYSYS se usa ampliamente en la industria y el mundo académico para la simulación dinámica y de estado estable, el diseño de procesos, el modelado de rendimiento y la optimización.

Evaluación de sistemas de compresión térmica para la reducción de consumo energético en secadero de mineral

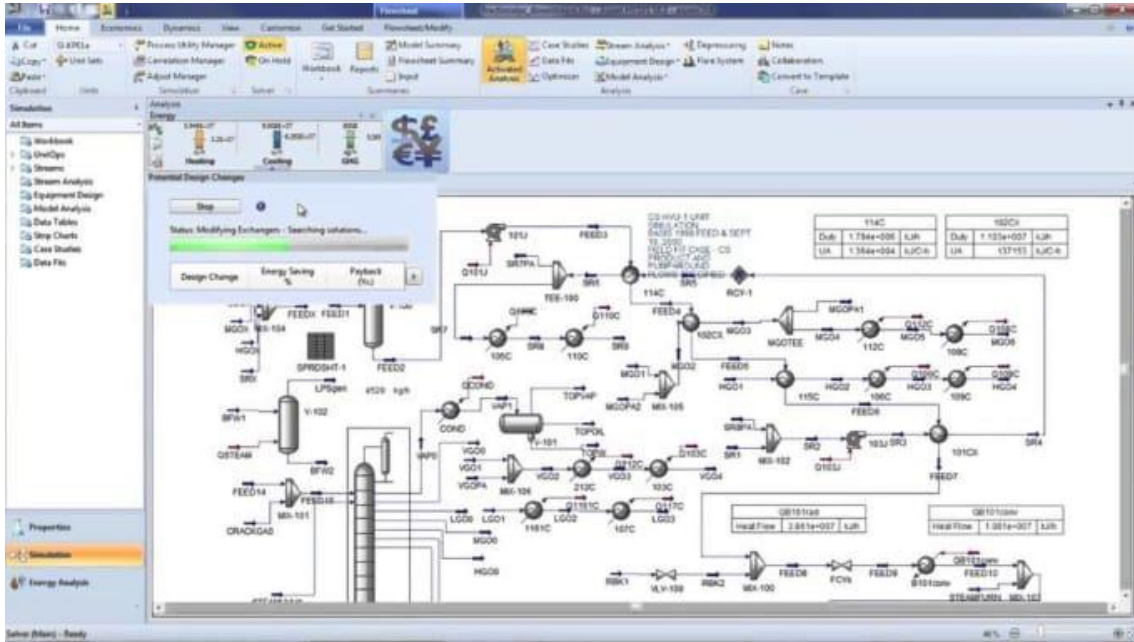


Ilustración 7. Imagen del programa HYSYS.

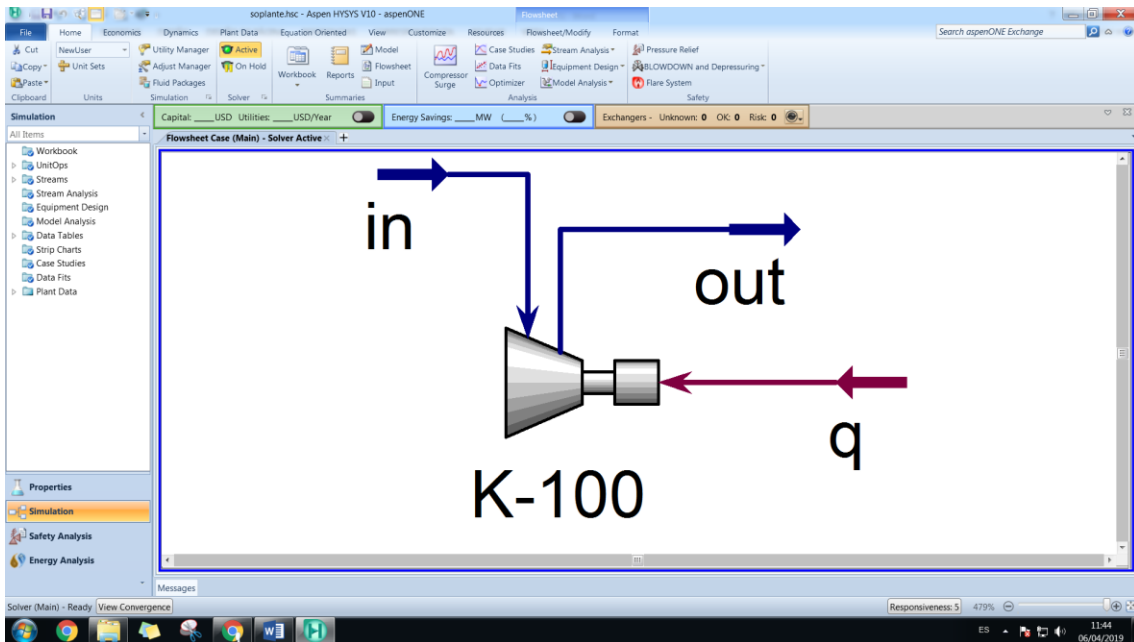


Ilustración 8. Imagen del programa HYSYS.

2.2 Redes Neuronales.

Warren McCulloch y Walter Pitts (1943) crearon un modelo informático para redes neuronales, que se llama lógica umbral, que se basa en las matemáticas y procesos computacionales. Este modelo señaló el camino para que la investigación de redes neuronales se dividiera en dos enfoques distintos. Un enfoque se centró en los procesos biológicos en el cerebro y el otro se centró en la aplicación de redes neuronales para la inteligencia artificial.

Las redes neuronales artificiales (también conocidas como sistemas conexionistas) son un modelo computacional vagamente inspirado en el comportamiento observado en su homólogo biológico. Consiste en un conjunto de unidades, llamadas neuronas artificiales, conectadas entre sí para transmitir "señales". La información de entrada atraviesa la red neuronal (donde se somete a diversas operaciones) produciendo unos valores de salida.

El objetivo de la red neuronal es resolver los problemas de la misma manera que el cerebro humano, aunque las redes neuronales son más abstractas. Las redes neuronales actuales suelen contener desde unos miles a unos pocos millones de unidades neuronales.

Las redes neuronales se han utilizado para resolver una amplia variedad de tareas, como la visión por computador y el reconocimiento de voz, que son difíciles de solucionar usando la ordinaria programación basada en reglas.

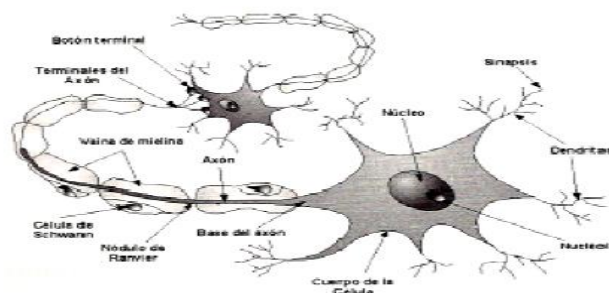


Ilustración 9. Red neuronal biológica.

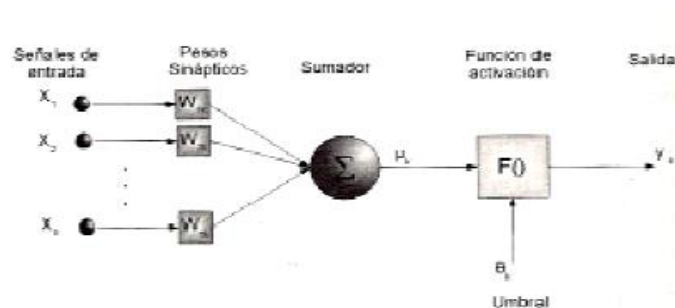


Ilustración 10. Red neuronal artificial.

2.2.1 Aprendizaje de las Redes Neuronales.

2.2.1.1 Aprendizaje no supervisado.

En este tipo de aprendizaje sólo se proporcionan datos de entrada. Es la propia red neuronal la encargada de auto-organizarse en función de algún tipo de estructura existente en los datos de entrada.

Este aprendizaje se caracteriza por descubrir modelos o características a partir de los datos de entrada. Existen dos métodos para el aprendizaje no supervisado de las RNA:

- Aprendizaje de Hebb: se utiliza para llevar a cabo proyecciones o compresiones óptimas de conjuntos de datos.
- Aprendizaje competitivo: utilizado para agrupar conjuntos de datos.

En caso de hacer uso del aprendizaje de Hebb, es necesario tomar medidas para que los pesos no crezcan de manera exagerada (red con realimentación negativa). Este tipo de método se usa para la búsqueda de proyecciones exploratorias (EPP) capacitando a la red para identificar un componente dentro de un conjunto.

En el aprendizaje competitivo se pretende encontrar una neurona ganadora y actualizar los pesos para hacer que ésta tenga más probabilidad de éxito cuando una entrada similar se presenta a la red. En cuanto a este método de aprendizaje cabe destacar variantes:

- Learnig Vector Quantisation: LVQ
- Adaptive Resonance Theory (Modelos ART)
- Mapas auto-organizativos (Redes de Kohonen) ó Self Organizing maps, SOM

2.2.1.2 Aprendizaje supervisado.

Se proporciona a la red un conjunto de datos de entradas y la respuesta correcta. De esta forma, se compara el valor real (target) con el valor proporcionado por la propia red, haciendo que los pesos de cada variable de entrada se ajusten para obtener el mejor resultado

Son los cambios en estos pesos los que van dando lugar al aprendizaje de la RNA. El algoritmo de aprendizaje es el siguiente:

1. La red comienza en un estado aleatorio. Los pesos entre neuronas poseen valores pequeños y aleatorios (entre -1 y 1).
2. Seleccionar vectores de entrada, X^P , a partir del conjunto de ejemplos de entrenamiento.
3. Si $O_P = t^P$, siendo t^P el target.
4. Si no 3, cambio de pesos: $\Delta w_i = \eta X_i^P (t_P - O_P)$, siendo η el coeficiente de aprendizaje.

A veces se utilizan varias capas para el aprendizaje cuando se hacen uso de capas intermedias no estando su número limitado. Hay que tener en cuenta que cuanto mayor sea el número de capas intermedias mayor tiempo de entrenamiento será requerido para el aprendizaje de la neurona.

Tareas que recaen dentro del paradigma de aprendizaje supervisado son el reconocimiento de patrones (también conocido como clasificación) y regresión (también conocido como aproximación de función). El paradigma de aprendizaje supervisado es aplicable también a los datos secuenciales (por ejemplo, reconocimiento del habla, del manuscrito, y de gestos). Esto se puede considerar como una forma de aprendizaje con un "maestro", en la forma de una función que proporciona información continua sobre la calidad de las soluciones obtenidas hasta el momento.

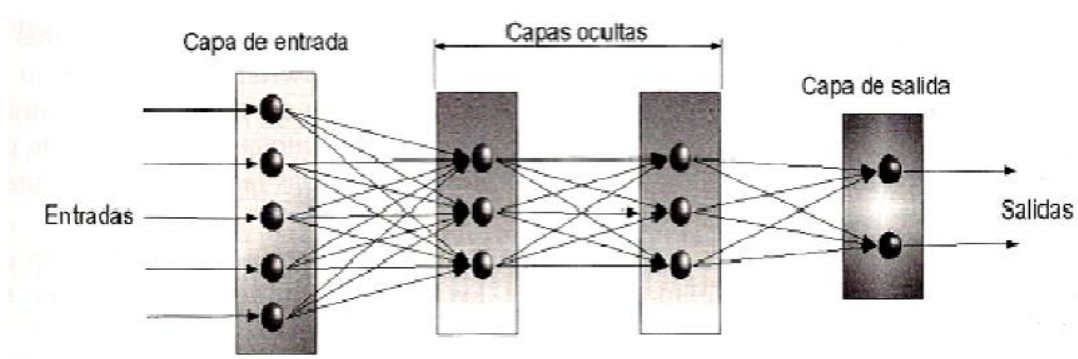


Ilustración 11. Red neuronal artificial, aprendizaje supervisado.

3. Tratamiento de Datos.

Una vez se reciben los datos del compresor donde se recogen los datos de un día y medio con una arrancada y parada del equipo, realizando en primer lugar un tratamiento de datos para quedarnos en régimen permanente eliminando arrancada, parada y transitorio. Una vez que tenemos los datos en régimen permanente se realiza un estudio de estos para ver en que rango donde más se trabaja, obteniéndose las siguientes gráficas.

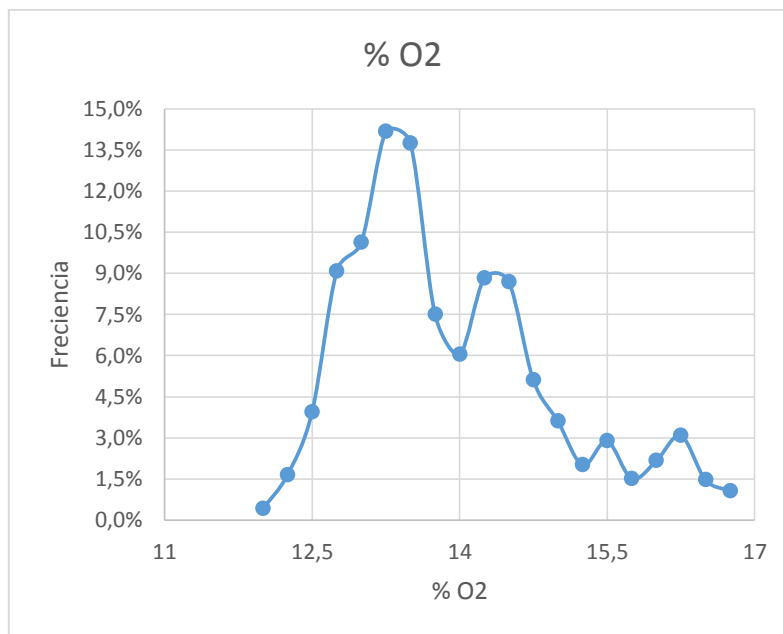


Grafico 1. Variación porcentaje de oxígeno.

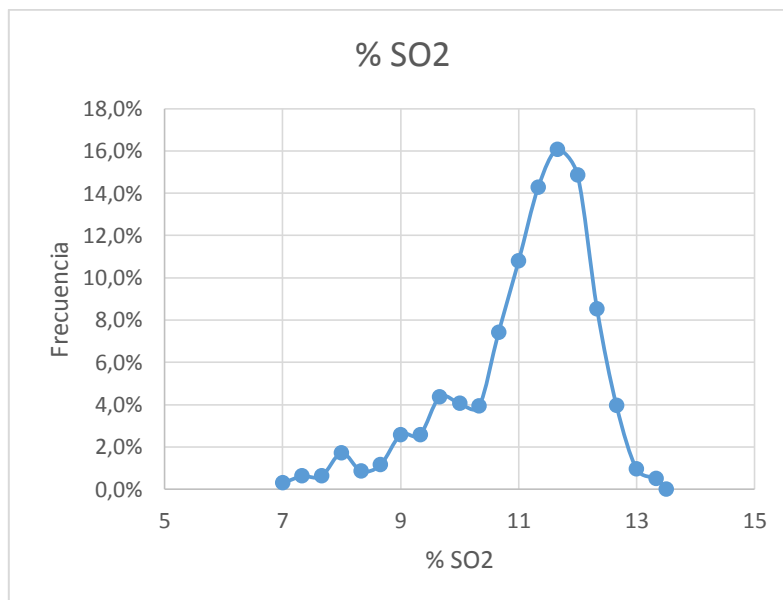


Grafico 2. Variación porcentaje de dióxido de azufre.

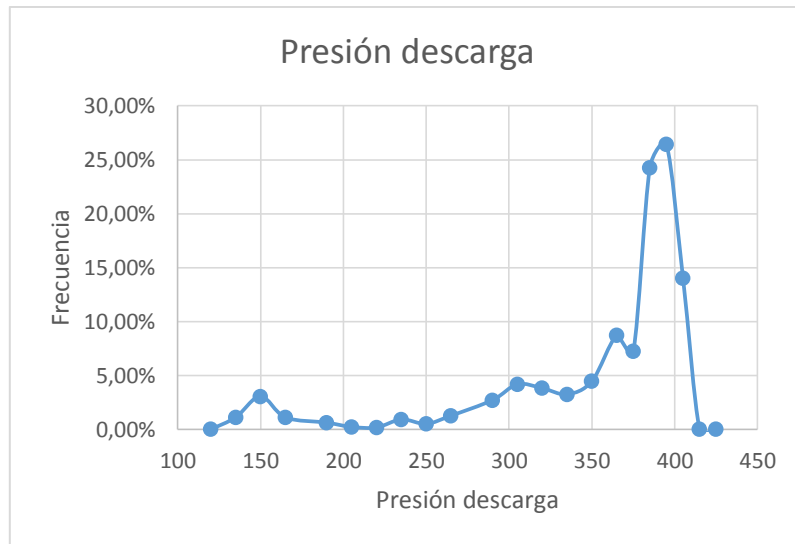


Grafico 3. Variación presión.

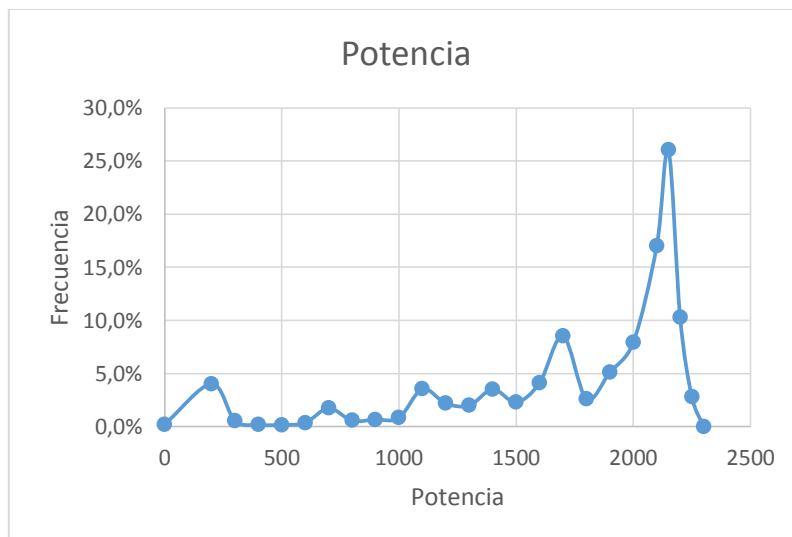


Grafico 4. Variación potencia.

Una vez visto el que rango en el que fluctúan los principales datos de entrada para la simulación y para calcular los seleccionamos el criterio de potencia entre 1700 kW y 2350 kW. Fijado este criterio utilizamos datos al azar de entre éstos para realizar la simulación en Hysys y posteriormente los cálculos del caudal así como el rendimiento del compresor.

4. Cálculos.

4.1 Cálculos mediante expresión analítica.

A continuación se exponen las expresiones que se han utilizado para calcular el caudal:

$$G = \frac{w * H_p}{n_p} \rightarrow w = \frac{G * n_p}{H_p}$$

Donde:

G es la potencia, medida en kW.

H_p es la entalpia politropica de la compresión, se mide en kJ/kg.

n_p es el rendimiento politropico.

W es el caudal, se mide en kg/s.

$$H_p = \frac{ZRT \left(\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{(n-1)}{n}} - 1 \right)}{\frac{(n-1)}{n}}$$

Donde:

Z es el factor de compresión.

R es la contante de gases ideales se mide en kJ/kg*K.

T es temperatura, se mide en K.

P es la presión, se mide en Pa.

n es el exponente politropico.

$$n = \frac{\text{Ln} \left(\frac{P_2}{P_1} \right)}{\text{Ln} \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)}$$

Con estas fórmulas podemos obtener el caudal. Así que para el estudio se realizan 96 simulaciones y aquí se presentan los datos obtenidos.

Evaluación de sistemas de compresión térmica para la reducción de consumo energético en secadero de mineral

Fecha	% SO2	% O2	Pin (kPa)	Tin (Cº)	Pout (kPa)	Tout (Cº)	Potencia (kw)	Exp poli	Hp (KJs/Kg)	w hysy (Kg/s)	rend hysy	w calc (Kg/s)	rend Excel	error W
24/09/2018 14:07:00	11,32	13,95	101,3	47,06	128,11	89,97	1152,78	1,741	20,658	28,18	56,40%	30,24	56,64%	7,3%
24/09/2018 14:09:32	11,06	13,45	101,3	46,06	127,49	72,14	1168,39	1,566	19,996	47,25	78,94%	45,03	80,55%	4,7%
24/09/2018 14:12:22	9,84	14,54	101,3	48,06	128,60	90,26	1175,41	2,107	21,329	29,27	52,42%	29,87	56,64%	2,0%
24/09/2018 14:18:34	9,62	13,69	101,3	47,07	129,56	93,30	1205,19	2,051	21,937	27,13	49,72%	29,40	55,93%	8,4%
24/09/2018 14:22:28	11,49	13,45	101,3	46,06	128,35	72,14	1210,02	1,476	20,506	48,66	80,58%	45,48	80,55%	6,5%
24/09/2018 14:34:42	9,63	14,29	101,3	48,06	129,83	91,86	1219,42	2,081	22,220	28,97	52,76%	29,61	56,38%	2,2%
24/09/2018 14:48:30	11,11	13,95	101,3	46,06	130,26	81,91	1227,51	1,493	21,860	35,88	65,40%	37,75	70,25%	5,2%
24/09/2018 14:48:58	11,26	13,29	101,3	48,07	129,23	88,79	1231,40	1,904	21,661	31,52	55,50%	34,71	63,80%	10,1%
24/09/2018 15:27:38	10,50	14,20	101,3	47,06	130,11	94,88	1259,49	2,274	22,475	27,40	48,94%	29,82	55,61%	8,8%
24/09/2018 15:36:46	11,26	13,29	101,3	48,07	129,23	88,79	1275,47	1,860	21,627	32,73	55,50%	36,00	63,80%	10,0%
24/09/2018 15:37:48	11,06	13,83	101,3	48,07	129,23	90,39	1277,04	2,055	21,764	31,48	53,50%	31,87	56,76%	1,2%
24/09/2018 15:56:16	10,85	13,07	101,3	48,07	129,96	93,65	1297,79	2,156	22,366	29,68	51,10%	31,06	55,95%	4,7%
24/09/2018 16:01:18	11,26	13,55	101,3	48,07	129,23	88,79	1312,34	1,981	21,716	33,67	55,49%	36,89	63,80%	9,6%
24/09/2018 16:24:52	11,72	13,58	101,3	46,06	130,26	78,69	1320,55	1,598	21,984	42,31	71,44%	42,24	73,49%	0,2%

Evaluación de sistemas de compresión térmica para la reducción de consumo energético en secadero de mineral

24/09/2018 16:43:12	11,26	13,29	101,3	48,07	129,23	88,79	1354,97	2,055	21,764	34,74	55,66%	38,00	63,80%	9,4%
24/09/2018 16:43:30	10,85	12,81	101,3	48,07	129,96	95,32	1358,23	2,242	22,416	30,05	49,41%	32,19	55,54%	7,1%
24/09/2018 16:54:12	10,70	14,20	101,3	47,06	130,74	96,51	1390,64	2,319	22,968	29,26	48,30%	32,06	55,35%	9,6%
24/09/2018 16:58:10	10,25	13,52	101,3	48,06	130,51	93,46	1400,11	1,990	22,653	32,13	52,15%	33,20	56,15%	3,3%
24/09/2018 17:19:46	11,26	13,55	101,3	48,07	129,85	88,79	1439,99	1,939	22,135	36,90	56,73%	39,70	63,80%	7,6%
24/09/2018 17:21:28	11,93	13,77	101,3	47,70	131,79	94,10	1450,46	2,109	23,647	32,25	52,28%	32,97	56,19%	2,2%
24/09/2018 17:51:02	10,45	13,06	101,3	48,07	132,12	96,94	1481,24	2,110	23,917	31,82	52,45%	32,87	55,49%	3,3%
24/09/2018 17:53:54	10,44	14,11	101,3	48,07	130,58	95,27	1500,05	2,197	22,844	33,18	50,39%	35,00	55,73%	5,5%
24/09/2018 17:54:02	11,02	12,99	101,3	45,06	133,11	91,85	1501,74	2,025	24,341	33,50	54,16%	33,66	57,05%	0,5%
24/09/2018 17:54:04	11,02	12,99	101,3	45,06	133,11	91,85	1501,74	2,013	24,331	33,44	56,56%	33,68	57,05%	0,7%
24/09/2018 18:00:18	11,52	13,52	101,3	47,70	132,53	95,71	1510,71	2,089	24,174	32,92	52,49%	33,41	55,90%	1,5%
24/09/2018 18:07:34	11,26	13,55	101,3	48,07	131,11	88,79	1523,12	1,877	23,001	38,96	58,83%	40,40	63,80%	3,7%
24/09/2018 18:12:28	11,29	12,44	101,3	48,06	132,43	96,69	1530,02	2,129	24,157	32,78	51,67%	33,70	55,64%	2,8%
24/09/2018 18:36:10	10,70	13,94	101,3	46,83	133,38	99,80	1546,44	2,259	24,853	30,51	48,92%	32,71	54,98%	7,2%
24/09/2018 18:39:00	11,44	12,49	101,3	45,06	133,74	91,85	1559,55	1,986	24,760	34,75	55,11%	34,45	57,18%	0,9%

Evaluación de sistemas de compresión térmica para la reducción de consumo energético en secadero de mineral

24/09/2018 19:06:10	11,05	12,83	101,3	48,07	131,97	93,66	1568,07	2,020	23,743	35,82	54,20%	35,64	56,42%	0,5%
24/09/2018 19:16:14	11,52	13,52	101,3	47,70	133,85	95,71	1579,23	1,918	24,983	34,57	54,90%	33,94	56,14%	1,8%
24/09/2018 19:18:34	11,76	12,80	101,3	48,07	132,58	96,90	1586,76	2,126	24,266	33,91	51,76%	34,79	55,64%	2,6%
24/09/2018 19:35:46	10,82	13,24	101,3	45,06	133,11	91,85	1609,14	2,014	24,332	35,79	54,22%	36,13	57,13%	0,9%
24/09/2018 19:44:06	10,74	14,09	101,3	48,07	134,45	101,77	1624,56	2,211	25,692	31,53	49,86%	33,07	54,69%	4,9%
24/09/2018 19:53:16	9,60	14,79	101,3	46,23	135,00	91,85	1629,07	1,865	25,629	37,05	58,37%	34,90	57,42%	5,8%
24/09/2018 20:04:30	10,74	14,09	101,3	48,07	134,45	101,77	1652,65	2,211	25,692	32,11	49,86%	33,65	54,71%	4,8%
24/09/2018 20:09:38	11,11	13,68	101,3	46,73	133,98	101,41	1660,42	1,990	25,069	31,59	48,27%	34,66	54,74%	9,7%
24/09/2018 20:16:16	11,84	12,75	101,3	45,06	135,25	91,85	1672,40	1,902	25,748	37,36	57,48%	35,70	57,49%	4,5%
24/09/2018 20:21:16	11,80	13,04	101,3	48,07	134,76	101,74	1680,74	2,192	25,905	32,66	50,31%	33,98	54,78%	4,0%
24/09/2018 20:37:32	11,44	12,49	101,3	45,06	133,74	91,85	1702,24	1,986	24,760	37,27	55,11%	37,65	57,29%	1,0%
24/09/2018 20:41:04	10,85	13,31	101,3	48,07	134,78	98,55	1709,26	1,774	25,518	34,34	57,36%	35,61	55,62%	3,7%
24/09/2018 20:45:16	11,43	13,28	101,3	45,06	135,87	91,85	1715,28	1,880	26,160	38,19	58,37%	36,11	57,61%	5,5%
24/09/2018 20:51:38	11,49	12,93	101,3	48,06	135,01	99,92	1725,81	2,101	26,007	34,69	52,23%	35,09	55,31%	1,1%
24/09/2018 20:59:48	11,70	12,64	101,3	48,06	135,01	99,92	1737,60	2,101	26,007	34,89	52,22%	35,33	55,32%	1,3%

Evaluación de sistemas de compresión térmica para la reducción de consumo energético en secadero de mineral

24/09/2018 21:02:10	11,49	12,93	101,3	48,06	135,61	99,92	1740,48	2,068	26,415	35,08	53,01%	34,90	55,41%	0,5%
24/09/2018 21:10:52	10,51	12,98	101,3	44,68	137,26	94,02	1754,15	1,914	27,144	37,21	57,53%	35,35	57,23%	5,0%
24/09/2018 21:13:42	11,15	12,98	101,3	44,68	137,26	94,02	1760,05	1,914	27,144	37,41	57,51%	35,47	57,24%	5,2%
24/09/2018 21:39:40	11,90	13,20	101,3	47,87	135,55	99,92	1768,13	2,065	26,355	35,41	52,90%	35,54	55,42%	0,4%
24/09/2018 21:50:32	11,70	13,20	101,3	47,43	135,55	101,52	1775,66	2,143	26,389	34,23	50,92%	35,39	55,02%	3,4%
24/09/2018 22:18:24	11,90	12,46	101,3	48,06	135,60	98,29	1793,02	2,006	26,345	37,25	54,61%	36,34	55,87%	2,5%
24/09/2018 22:37:44	11,90	13,20	101,3	48,03	135,55	99,92	1803,62	2,065	26,368	36,34	53,09%	36,25	55,45%	0,3%
24/09/2018 22:51:10	11,59	13,05	101,3	48,07	134,59	98,50	1810,14	2,067	25,676	37,52	53,02%	37,51	55,67%	0,0%
24/09/2018 23:15:40	11,90	13,20	101,3	47,92	135,55	99,92	1818,04	2,065	26,359	36,44	52,94%	36,55	55,46%	0,3%
24/09/2018 23:25:08	11,59	13,05	101,3	48,07	134,59	98,50	1825,12	2,067	25,676	37,72	53,02%	37,82	55,69%	0,3%
24/09/2018 23:37:10	11,90	13,20	101,3	47,67	135,55	99,92	1830,14	2,077	26,350	36,67	52,67%	36,81	55,47%	0,4%
24/09/2018 23:50:48	11,90	13,20	101,3	48,04	135,55	99,92	1840,61	2,065	26,369	37,13	53,07%	37,00	55,48%	0,3%
25/09/2018 0:10:08	11,90	12,50	101,3	48,06	135,60	98,29	1849,32	2,006	26,345	38,29	54,61%	37,50	55,91%	2,1%
25/09/2018 1:01:18	11,90	12,49	101,3	48,06	135,60	98,29	1860,86	2,006	26,345	38,71	54,61%	37,74	55,91%	2,5%
25/09/2018 1:29:20	10,86	13,50	101,3	46,07	138,29	91,67	1870,83	1,754	27,771	43,16	63,53%	39,44	61,28%	8,6%

Evaluación de sistemas de compresión térmica para la reducción de consumo energético en secadero de mineral

25/09/2018 2:17:34	11,69	12,94	101,3	48,06	136,26	99,92	1892,02	2,029	26,841	37,92	53,99%	37,45	55,62%	1,2%
25/09/2018 2:31:00	11,70	13,20	101,3	47,51	135,55	99,92	1900,98	2,077	26,337	38,32	53,05%	38,28	55,52%	0,1%
25/09/2018 2:46:12	11,06	14,25	101,3	46,07	137,67	91,67	1914,21	1,777	27,373	43,85	62,66%	40,93	61,28%	6,7%
25/09/2018 3:12:26	12,00	13,05	101,3	48,07	135,91	98,50	1941,49	2,002	26,567	40,21	54,82%	39,06	55,96%	2,9%
25/09/2018 3:14:16	11,65	12,63	101,3	45,68	139,55	97,35	1952,77	1,888	28,795	39,54	58,24%	36,80	56,82%	6,9%
25/09/2018 3:18:28	11,51	12,73	101,3	45,68	138,17	97,26	1961,05	1,941	27,898	39,75	56,43%	38,03	56,64%	4,3%
25/09/2018 3:27:26	11,25	14,37	101,3	47,70	139,21	98,98	1973,27	2,136	29,025	40,20	54,67%	36,59	56,36%	9,0%
25/09/2018 3:29:32	11,11	13,15	101,3	46,47	138,61	101,41	1980,42	2,026	28,374	37,74	53,88%	37,10	55,66%	1,7%
25/09/2018 3:38:44	11,51	12,73	101,3	45,68	138,17	97,26	1997,66	1,941	27,898	40,38	54,46%	38,75	56,67%	4,0%
25/09/2018 3:50:04	11,49	12,72	101,3	45,68	140,04	100,47	2009,82	1,974	29,244	38,20	55,59%	36,84	56,13%	3,6%
25/09/2018 3:53:34	11,87	13,06	101,3	47,70	138,60	100,60	2017,97	1,958	28,398	39,75	55,96%	37,92	55,89%	4,6%
25/09/2018 3:57:30	12,31	12,75	101,3	45,68	138,80	98,86	2026,19	1,970	28,371	39,78	55,67%	38,43	56,37%	3,4%
25/09/2018 3:58:14	11,01	14,50	101,3	46,69	139,65	102,08	2033,27	1,993	29,088	38,33	54,81%	37,17	55,69%	3,0%
25/09/2018 4:22:22	11,69	12,62	101,3	45,68	138,80	98,86	2057,03	1,970	28,371	40,37	55,67%	39,03	56,39%	3,3%
25/09/2018 4:52:22	11,13	14,18	101,3	46,68	138,43	97,31	2067,50	1,897	28,111	42,62	57,92%	39,84	56,74%	6,5%

Evaluación de sistemas de compresión térmica para la reducción de consumo energético en secadero de mineral

25/09/2018 5:02:40	11,94	12,56	101,3	48,07	138,93	101,83	2074,21	1,971	28,679	40,24	55,51%	38,43	55,67%	4,5%
25/09/2018 5:49:04	11,45	13,06	101,3	49,08	139,18	100,19	2088,38	1,859	28,804	42,52	58,57%	38,84	56,13%	8,6%
25/09/2018 5:58:04	11,65	14,12	101,3	47,70	138,46	98,98	2093,27	1,909	28,237	42,68	57,49%	39,86	56,33%	6,6%
25/09/2018 6:21:16	11,32	12,85	101,3	47,70	139,07	97,34	2105,25	1,834	28,570	44,32	60,14%	39,99	56,86%	9,8%
25/09/2018 6:49:20	11,50	13,20	101,3	47,06	139,33	103,13	2112,21	2,040	28,947	39,33	53,73%	38,61	55,44%	1,8%
25/09/2018 8:42:30	11,90	12,91	101,3	46,69	139,65	102,08	2135,84	1,993	29,088	40,22	54,81%	39,07	55,76%	2,9%
25/09/2018 9:12:54	11,62	13,54	101,3	45,68	139,65	102,08	2143,05	2,035	29,045	39,69	53,76%	39,26	55,77%	1,1%
25/09/2018 12:03:48	10,08	14,66	101,3	46,69	140,25	102,08	2167,06	1,969	29,478	40,80	55,54%	39,19	55,88%	3,9%
25/09/2018 13:47:10	10,69	14,62	101,3	46,69	140,96	102,07	2175,65	1,942	29,935	40,97	56,39%	38,83	55,99%	5,2%
25/09/2018 15:13:44	12,23	13,29	101,3	46,69	139,65	102,08	2187,00	1,993	29,088	41,16	54,81%	40,02	55,80%	2,8%
25/09/2018 17:44:40	10,75	14,59	101,3	45,68	140,28	102,08	2200,10	2,010	29,455	40,80	54,48%	39,83	55,90%	2,4%
25/09/2018 19:54:56	11,74	13,43	101,3	46,69	139,67	103,68	2210,76	2,048	29,162	40,54	53,37%	40,08	55,42%	1,1%
25/09/2018 20:36:02	11,18	13,91	101,3	45,68	139,12	94,08	2214,08	1,818	28,400	47,83	61,21%	44,06	59,24%	7,9%
25/09/2018 22:18:12	11,54	12,63	101,3	46,06	140,79	96,56	2220,54	1,812	29,577	45,98	61,06%	41,12	57,42%	10,6%
25/09/2018 23:42:02	9,80	14,86	101,3	45,68	140,94	102,08	2226,25	1,979	29,878	41,17	55,31%	39,82	56,02%	3,3%

Evaluación de sistemas de compresión térmica para la reducción de consumo energético en secadero de mineral

26/09/2018 5:12:46	10,62	14,56	101,3	45,68	140,92	103,68	2246,56	2,038	29,940	40,39	53,77%	39,82	55,64%	1,4%
26/09/2018 5:54:30	9,67	13,05	101,3	46,07	141,03	101,83	2250,07	1,956	29,946	42,18	55,91%	40,21	56,12%	4,7%
26/09/2018 8:18:28	11,08	13,45	101,3	47,06	140,69	103,13	2263,93	1,977	29,828	42,12	55,42%	40,36	55,75%	4,2%
26/09/2018 8:54:12	12,20	12,05	101,3	48,07	140,74	103,43	2269,26	1,957	29,935	42,59	56,12%	40,26	55,69%	5,5%
26/09/2018 10:29:32	11,54	12,63	101,3	46,06	140,16	96,56	2291,89	1,829	29,168	47,42	60,26%	42,98	57,37%	9,4%
26/09/2018 10:41:36	11,87	13,06	101,3	47,70	138,69	100,60	2299,79	1,953	28,457	45,28	56,09%	43,23	56,10%	4,5%
26/09/2018 10:41:50	10,48	12,55	101,3	46,07	141,03	101,83	2300,05	1,964	29,957	43,02	55,91%	41,11	56,15%	4,4%

Evaluación de sistemas de compresión térmica para la reducción de consumo energético en secadero de mineral

Fecha	% SO2	% O2	Pin (kPa)	Tin (Cº)	Pout (kPa)	Tout (Cº)	Potencia (kw)	Exp poli	Hp(KJs/Kg)	w hysy(Kg/s)	rend hysy	w calc (Kg/s)	rend Excel	error W
24/09/2018 4:07:00	11,32	13,95	101,3	47,06	128,11	89,97	1152,78	1,741	20,658	28,18	56,40%	30,24	56,64%	7,3%
24/09/2018 4:09:32	11,06	13,45	101,3	46,06	127,49	72,14	1168,39	1,566	19,996	47,25	78,94%	45,03	80,55%	4,7%
24/09/2018 4:12:22	9,84	14,54	101,3	48,06	128,60	90,26	1175,41	2,107	21,329	29,27	52,42%	29,87	56,64%	2,0%
24/09/2018 4:18:34	9,62	13,69	101,3	47,07	129,56	93,30	1205,19	2,051	21,937	27,13	49,72%	29,40	55,93%	8,4%
24/09/2018 4:22:28	11,49	13,45	101,3	46,06	128,35	72,14	1210,02	1,476	20,506	48,66	80,58%	45,48	80,55%	6,5%
24/09/2018 4:34:42	9,63	14,29	101,3	48,06	129,83	91,86	1219,42	2,081	22,220	28,97	52,76%	29,61	56,38%	2,2%
24/09/2018 4:48:30	11,11	13,95	101,3	46,06	130,26	81,91	1227,51	1,493	21,860	35,88	65,40%	37,75	70,25%	5,2%
24/09/2018 4:48:58	11,26	13,29	101,3	48,07	129,23	88,79	1231,40	1,904	21,661	31,52	55,50%	34,71	63,80%	10,1%
24/09/2018 5:27:38	10,50	14,20	101,3	47,06	130,11	94,88	1259,49	2,274	22,475	27,40	48,94%	29,82	55,61%	8,8%
24/09/2018 5:36:46	11,26	13,29	101,3	48,07	129,23	88,79	1275,47	1,860	21,627	32,73	55,50%	36,00	63,80%	10,0%
24/09/2018 5:37:48	11,06	13,83	101,3	48,07	129,23	90,39	1277,04	2,055	21,764	31,48	53,50%	31,87	56,76%	1,2%
24/09/2018 5:56:16	10,85	13,07	101,3	48,07	129,96	93,65	1297,79	2,156	22,366	29,68	51,10%	31,06	55,95%	4,7%
24/09/2018 6:01:18	11,26	13,55	101,3	48,07	129,23	88,79	1312,34	1,981	21,716	33,67	55,49%	36,89	63,80%	9,6%
24/09/2018 6:24:52	11,72	13,58	101,3	46,06	130,26	78,69	1320,55	1,598	21,984	42,31	71,44%	42,24	73,49%	0,2%

Evaluación de sistemas de compresión térmica para la reducción de consumo energético en secadero de mineral

24/09/2018 6:43:12	11,26	13,29	101,3	48,07	129,23	88,79	1354,97	2,055	21,764	34,74	55,66%	38,00	63,80%	9,4%
24/09/2018 6:43:30	10,85	12,81	101,3	48,07	129,96	95,32	1358,23	2,242	22,416	30,05	49,41%	32,19	55,54%	7,1%
24/09/2018 6:54:12	10,70	14,20	101,3	47,06	130,74	96,51	1390,64	2,319	22,968	29,26	48,30%	32,06	55,35%	9,6%
24/09/2018 6:58:10	10,25	13,52	101,3	48,06	130,51	93,46	1400,11	1,990	22,653	32,13	52,15%	33,20	56,15%	3,3%
24/09/2018 7:19:46	11,26	13,55	101,3	48,07	129,85	88,79	1439,99	1,939	22,135	36,90	56,73%	39,70	63,80%	7,6%
24/09/2018 7:21:28	11,93	13,77	101,3	47,70	131,79	94,10	1450,46	2,109	23,647	32,25	52,28%	32,97	56,19%	2,2%
24/09/2018 7:51:02	10,45	13,06	101,3	48,07	132,12	96,94	1481,24	2,110	23,917	31,82	52,45%	32,87	55,49%	3,3%
24/09/2018 7:53:54	10,44	14,11	101,3	48,07	130,58	95,27	1500,05	2,197	22,844	33,18	50,39%	35,00	55,73%	5,5%
24/09/2018 7:54:02	11,02	12,99	101,3	45,06	133,11	91,85	1501,74	2,025	24,341	33,50	54,16%	33,66	57,05%	0,5%
24/09/2018 7:54:04	11,02	12,99	101,3	45,06	133,11	91,85	1501,74	2,013	24,331	33,44	56,56%	33,68	57,05%	0,7%
24/09/2018 8:00:18	11,52	13,52	101,3	47,70	132,53	95,71	1510,71	2,089	24,174	32,92	52,49%	33,41	55,90%	1,5%
24/09/2018 8:07:34	11,26	13,55	101,3	48,07	131,11	88,79	1523,12	1,877	23,001	38,96	58,83%	40,40	63,80%	3,7%
24/09/2018 8:12:28	11,29	12,44	101,3	48,06	132,43	96,69	1530,02	2,129	24,157	32,78	51,67%	33,70	55,64%	2,8%
24/09/2018 8:36:10	10,70	13,94	101,3	46,83	133,38	99,80	1546,44	2,259	24,853	30,51	48,92%	32,71	54,98%	7,2%
24/09/2018 8:39:00	11,44	12,49	101,3	45,06	133,74	91,85	1559,55	1,986	24,760	34,75	55,11%	34,45	57,18%	0,9%

Evaluación de sistemas de compresión térmica para la reducción de consumo energético en secadero de mineral

24/09/2018 9:06:10	11,05	12,83	101,3	48,07	131,97	93,66	1568,07	2,020	23,743	35,82	54,20%	35,64	56,42%	0,5%
24/09/2018 9:16:14	11,52	13,52	101,3	47,70	133,85	95,71	1579,23	1,918	24,983	34,57	54,90%	33,94	56,14%	1,8%
24/09/2018 9:18:34	11,76	12,80	101,3	48,07	132,58	96,90	1586,76	2,126	24,266	33,91	51,76%	34,79	55,64%	2,6%
24/09/2018 9:35:46	10,82	13,24	101,3	45,06	133,11	91,85	1609,14	2,014	24,332	35,79	54,22%	36,13	57,13%	0,9%
24/09/2018 9:44:06	10,74	14,09	101,3	48,07	134,45	101,77	1624,56	2,211	25,692	31,53	49,86%	33,07	54,69%	4,9%
24/09/2018 9:53:16	9,60	14,79	101,3	46,23	135,00	91,85	1629,07	1,865	25,629	37,05	58,37%	34,90	57,42%	5,8%
24/09/2018 0:04:30	10,74	14,09	101,3	48,07	134,45	101,77	1652,65	2,211	25,692	32,11	49,86%	33,65	54,71%	4,8%
24/09/2018 0:09:38	11,11	13,68	101,3	46,73	133,98	101,41	1660,42	1,990	25,069	31,59	48,27%	34,66	54,74%	9,7%
24/09/2018 0:16:16	11,84	12,75	101,3	45,06	135,25	91,85	1672,40	1,902	25,748	37,36	57,48%	35,70	57,49%	4,5%
24/09/2018 0:21:16	11,80	13,04	101,3	48,07	134,76	101,74	1680,74	2,192	25,905	32,66	50,31%	33,98	54,78%	4,0%
24/09/2018 0:37:32	11,44	12,49	101,3	45,06	133,74	91,85	1702,24	1,986	24,760	37,27	55,11%	37,65	57,29%	1,0%
24/09/2018 0:41:04	10,85	13,31	101,3	48,07	134,78	98,55	1709,26	1,774	25,518	34,34	57,36%	35,61	55,62%	3,7%
24/09/2018 0:45:16	11,43	13,28	101,3	45,06	135,87	91,85	1715,28	1,880	26,160	38,19	58,37%	36,11	57,61%	5,5%
24/09/2018 0:51:38	11,49	12,93	101,3	48,06	135,01	99,92	1725,81	2,101	26,007	34,69	52,23%	35,09	55,31%	1,1%
24/09/2018 0:59:48	11,70	12,64	101,3	48,06	135,01	99,92	1737,60	2,101	26,007	34,89	52,22%	35,33	55,32%	1,3%

Evaluación de sistemas de compresión térmica para la reducción de consumo energético en secadero de mineral

24/09/2018 1:02:10	11,49	12,93	101,3	48,06	135,61	99,92	1740,48	2,068	26,415	35,08	53,01%	34,90	55,41%	0,5%
24/09/2018 1:10:52	10,51	12,98	101,3	44,68	137,26	94,02	1754,15	1,914	27,144	37,21	57,53%	35,35	57,23%	5,0%
24/09/2018 1:13:42	11,15	12,98	101,3	44,68	137,26	94,02	1760,05	1,914	27,144	37,41	57,51%	35,47	57,24%	5,2%
24/09/2018 1:39:40	11,90	13,20	101,3	47,87	135,55	99,92	1768,13	2,065	26,355	35,41	52,90%	35,54	55,42%	0,4%
24/09/2018 1:50:32	11,70	13,20	101,3	47,43	135,55	101,52	1775,66	2,143	26,389	34,23	50,92%	35,39	55,02%	3,4%
24/09/2018 2:18:24	11,90	12,46	101,3	48,06	135,60	98,29	1793,02	2,006	26,345	37,25	54,61%	36,34	55,87%	2,5%
24/09/2018 2:37:44	11,90	13,20	101,3	48,03	135,55	99,92	1803,62	2,065	26,368	36,34	53,09%	36,25	55,45%	0,3%
24/09/2018 2:51:10	11,59	13,05	101,3	48,07	134,59	98,50	1810,14	2,067	25,676	37,52	53,02%	37,51	55,67%	0,0%
24/09/2018 3:15:40	11,90	13,20	101,3	47,92	135,55	99,92	1818,04	2,065	26,359	36,44	52,94%	36,55	55,46%	0,3%
24/09/2018 3:25:08	11,59	13,05	101,3	48,07	134,59	98,50	1825,12	2,067	25,676	37,72	53,02%	37,82	55,69%	0,3%
24/09/2018 3:37:10	11,90	13,20	101,3	47,67	135,55	99,92	1830,14	2,077	26,350	36,67	52,67%	36,81	55,47%	0,4%
24/09/2018 3:50:48	11,90	13,20	101,3	48,04	135,55	99,92	1840,61	2,065	26,369	37,13	53,07%	37,00	55,48%	0,3%
25/09/2018 0:10:08	11,90	12,50	101,3	48,06	135,60	98,29	1849,32	2,006	26,345	38,29	54,61%	37,50	55,91%	2,1%
25/09/2018 1:01:18	11,90	12,49	101,3	48,06	135,60	98,29	1860,86	2,006	26,345	38,71	54,61%	37,74	55,91%	2,5%
25/09/2018 1:29:20	10,86	13,50	101,3	46,07	138,29	91,67	1870,83	1,754	27,771	43,16	63,53%	39,44	61,28%	8,6%

Evaluación de sistemas de compresión térmica para la reducción de consumo energético en secadero de mineral

25/09/2018 2:17:34	11,69	12,94	101,3	48,06	136,26	99,92	1892,02	2,029	26,841	37,92	53,99%	37,45	55,62%	1,2%
25/09/2018 2:31:00	11,70	13,20	101,3	47,51	135,55	99,92	1900,98	2,077	26,337	38,32	53,05%	38,28	55,52%	0,1%
25/09/2018 2:46:12	11,06	14,25	101,3	46,07	137,67	91,67	1914,21	1,777	27,373	43,85	62,66%	40,93	61,28%	6,7%
25/09/2018 3:12:26	12,00	13,05	101,3	48,07	135,91	98,50	1941,49	2,002	26,567	40,21	54,82%	39,06	55,96%	2,9%
25/09/2018 3:14:16	11,65	12,63	101,3	45,68	139,55	97,35	1952,77	1,888	28,795	39,54	58,24%	36,80	56,82%	6,9%
25/09/2018 3:18:28	11,51	12,73	101,3	45,68	138,17	97,26	1961,05	1,941	27,898	39,75	56,43%	38,03	56,64%	4,3%
25/09/2018 3:27:26	11,25	14,37	101,3	47,70	139,21	98,98	1973,27	2,136	29,025	40,20	54,67%	36,59	56,36%	9,0%
25/09/2018 3:29:32	11,11	13,15	101,3	46,47	138,61	101,41	1980,42	2,026	28,374	37,74	53,88%	37,10	55,66%	1,7%
25/09/2018 3:38:44	11,51	12,73	101,3	45,68	138,17	97,26	1997,66	1,941	27,898	40,38	54,46%	38,75	56,67%	4,0%
25/09/2018 3:50:04	11,49	12,72	101,3	45,68	140,04	100,47	2009,82	1,974	29,244	38,20	55,59%	36,84	56,13%	3,6%
25/09/2018 3:53:34	11,87	13,06	101,3	47,70	138,60	100,60	2017,97	1,958	28,398	39,75	55,96%	37,92	55,89%	4,6%
25/09/2018 3:57:30	12,31	12,75	101,3	45,68	138,80	98,86	2026,19	1,970	28,371	39,78	55,67%	38,43	56,37%	3,4%
25/09/2018 3:58:14	11,01	14,50	101,3	46,69	139,65	102,08	2033,27	1,993	29,088	38,33	54,81%	37,17	55,69%	3,0%
25/09/2018 4:22:22	11,69	12,62	101,3	45,68	138,80	98,86	2057,03	1,970	28,371	40,37	55,67%	39,03	56,39%	3,3%
25/09/2018 4:52:22	11,13	14,18	101,3	46,68	138,43	97,31	2067,50	1,897	28,111	42,62	57,92%	39,84	56,74%	6,5%

Evaluación de sistemas de compresión térmica para la reducción de consumo energético en secadero de mineral

25/09/2018 5:02:40	11,94	12,56	101,3	48,07	138,93	101,83	2074,21	1,971	28,679	40,24	55,51%	38,43	55,67%	4,5%
25/09/2018 5:49:04	11,45	13,06	101,3	49,08	139,18	100,19	2088,38	1,859	28,804	42,52	58,57%	38,84	56,13%	8,6%
25/09/2018 5:58:04	11,65	14,12	101,3	47,70	138,46	98,98	2093,27	1,909	28,237	42,68	57,49%	39,86	56,33%	6,6%
25/09/2018 6:21:16	11,32	12,85	101,3	47,70	139,07	97,34	2105,25	1,834	28,570	44,32	60,14%	39,99	56,86%	9,8%
25/09/2018 6:49:20	11,50	13,20	101,3	47,06	139,33	103,13	2112,21	2,040	28,947	39,33	53,73%	38,61	55,44%	1,8%
25/09/2018 8:42:30	11,90	12,91	101,3	46,69	139,65	102,08	2135,84	1,993	29,088	40,22	54,81%	39,07	55,76%	2,9%
25/09/2018 9:12:54	11,62	13,54	101,3	45,68	139,65	102,08	2143,05	2,035	29,045	39,69	53,76%	39,26	55,77%	1,1%
25/09/2018 2:03:48	10,08	14,66	101,3	46,69	140,25	102,08	2167,06	1,969	29,478	40,80	55,54%	39,19	55,88%	3,9%
25/09/2018 3:47:10	10,69	14,62	101,3	46,69	140,96	102,07	2175,65	1,942	29,935	40,97	56,39%	38,83	55,99%	5,2%
25/09/2018 5:13:44	12,23	13,29	101,3	46,69	139,65	102,08	2187,00	1,993	29,088	41,16	54,81%	40,02	55,80%	2,8%
25/09/2018 7:44:40	10,75	14,59	101,3	45,68	140,28	102,08	2200,10	2,010	29,455	40,80	54,48%	39,83	55,90%	2,4%
25/09/2018 9:54:56	11,74	13,43	101,3	46,69	139,67	103,68	2210,76	2,048	29,162	40,54	53,37%	40,08	55,42%	1,1%
25/09/2018 0:36:02	11,18	13,91	101,3	45,68	139,12	94,08	2214,08	1,818	28,400	47,83	61,21%	44,06	59,24%	7,9%
25/09/2018 2:18:12	11,54	12,63	101,3	46,06	140,79	96,56	2220,54	1,812	29,577	45,98	61,06%	41,12	57,42%	10,6%
25/09/2018 3:42:02	9,80	14,86	101,3	45,68	140,94	102,08	2226,25	1,979	29,878	41,17	55,31%	39,82	56,02%	3,3%

Evaluación de sistemas de compresión térmica para la reducción de consumo energético en secadero de mineral

26/09/2018 5:12:46	10,62	14,56	101,3	45,68	140,92	103,68	2246,56	2,038	29,940	40,39	53,77%	39,82	55,64%	1,4%
26/09/2018 5:54:30	9,67	13,05	101,3	46,07	141,03	101,83	2250,07	1,956	29,946	42,18	55,91%	40,21	56,12%	4,7%
26/09/2018 8:18:28	11,08	13,45	101,3	47,06	140,69	103,13	2263,93	1,977	29,828	42,12	55,42%	40,36	55,75%	4,2%
26/09/2018 8:54:12	12,20	12,05	101,3	48,07	140,74	103,43	2269,26	1,957	29,935	42,59	56,12%	40,26	55,69%	5,5%
26/09/2018 0:29:32	11,54	12,63	101,3	46,06	140,16	96,56	2291,89	1,829	29,168	47,42	60,26%	42,98	57,37%	9,4%
26/09/2018 0:41:36	11,87	13,06	101,3	47,70	138,69	100,60	2299,79	1,953	28,457	45,28	56,09%	43,23	56,10%	4,5%
26/09/2018 0:41:50	10,48	12,55	101,3	46,07	141,03	101,83	2300,05	1,964	29,957	43,02	55,91%	41,11	56,15%	4,4%

Grafico 5. Variación error caudal.

4.2 Cálculos red neuronal.

Para los cálculos de la red neuronal solo necesitamos los datos de entrada y la simulación en Hysys para ver los errores. Los datos de entrada para la red son: porcentaje de oxígeno y dióxido de azufre, temperatura de entrada y salida, presión de salida y, finalmente, potencia. Con estos datos la red neuronal calcula el caudal y rendimiento del compresor. Para esta ocasión se simularon 100 datos, esta vez sin ningún criterio para seleccionarlos.

Fecha	% SO2	% O2	Tin (Cº)	Pout (mbar)	Tout (Cº)	Potencia (kw)	W hysy	Rend hysy	Rend Matlab	W calculado	Erron W	Error Rend
Max	12,47	15,09	49,08	403,49	103,68	2300,05	48,66	81%	81%	48,85	4,3%	4,4%
Media	11,25	13,38	47,04	341,34	96,28	1770,83	37,39	55%	55%	37,19	1,5%	1,6%
Min	9,26	12,05	44,68	261,45	72,14	1099,92	24,15	48%	48%	23,98	0,0%	0,0%
25/09/2018 20:36:02	9,26	15,09	46,07	301,56	83,57	1099,9	24,15	53,47%	54,17%	23,98	0,7%	1,3%
25/09/2018 13:47:10	11,32	13,95	47,06	268,15	89,97	1152,78	28,18	52,80%	51,54%	28,76	2,1%	2,4%
25/09/2018 0:10:08	9,84	14,54	48,06	272,99	90,26	1175,41	29,27	52,42%	52,30%	28,82	1,5%	0,2%

Evaluación de sistemas de compresión térmica para la reducción de consumo energético en secadero de mineral

25/09/2018 23:42:02	11,53	13,45	47,06	261,45	88,35	1180,68	30,27	51,76%	52,00%	30,06	0,7%	0,5%
24/09/2018 18:00:18	9,62	13,69	47,07	282,63	93,30	1205,19	27,13	49,72%	49,49%	27,19	0,2%	0,5%
24/09/2018 22:37:44	11,49	13,45	46,06	270,49	72,14	1210,02	48,66	80,58%	80,90%	47,74	1,9%	0,4%
24/09/2018 21:13:42	9,63	14,29	48,06	285,29	91,86	1219,42	28,97	52,76%	53,19%	29,19	0,8%	0,8%
24/09/2018 19:16:14	11,11	13,95	46,06	289,59	81,91	1227,51	35,88	65,40%	64,15%	36,02	0,4%	1,9%
24/09/2018 16:54:12	11,26	13,29	48,07	279,32	88,79	1231,40	31,52	55,50%	53,86%	30,62	2,9%	3,0%
25/09/2018 8:42:30	10,50	14,20	47,06	288,11	94,88	1259,49	27,40	48,94%	49,88%	27,95	2,0%	1,9%
24/09/2018 14:07:00	11,26	13,29	48,07	279,32	88,79	1275,47	32,73	55,50%	53,39%	31,49	3,8%	3,8%
24/09/2018 17:54:02	11,06	13,83	48,07	279,32	90,39	1277,04	31,48	53,50%	52,19%	30,62	2,7%	2,4%
24/09/2018 19:44:06	10,85	13,07	48,07	286,62	93,65	1297,79	29,68	51,10%	49,87%	28,94	2,5%	2,4%

Evaluación de sistemas de compresión térmica para la reducción de consumo energético en secadero de mineral

24/09/2018 14:12:22	11,26	13,55	48,07	279,32	88,79	1312,34	33,67	55,49%	53,71%	32,46	3,6%	3,2%
24/09/2018 16:43:12	11,72	13,58	46,06	289,59	78,69	1320,55	46,54	77,44%	77,40%	46,49	0,1%	0,1%
24/09/2018 17:54:04	11,26	13,29	48,07	279,32	88,79	1354,97	34,74	55,66%	53,41%	33,25	4,3%	4,0%
25/09/2018 19:54:56	10,85	12,81	48,07	286,62	95,32	1358,23	30,05	49,41%	50,72%	30,73	2,3%	2,7%
24/09/2018 23:37:10	10,70	14,20	47,06	294,45	96,51	1390,64	29,26	48,30%	47,57%	28,80	1,6%	1,5%
24/09/2018 20:09:38	10,25	13,52	48,06	292,07	93,46	1400,11	32,13	52,15%	50,71%	31,34	2,5%	2,8%
25/09/2018 2:31:00	11,26	13,55	48,07	285,47	88,79	1439,99	36,90	56,73%	57,41%	37,35	1,2%	1,2%
25/09/2018 2:46:12	11,93	13,77	47,70	304,85	94,10	1450,46	32,25	52,28%	51,86%	31,81	1,4%	0,8%
25/09/2018 3:53:34	10,45	13,06	48,07	308,16	96,94	1481,24	31,82	52,45%	52,19%	32,32	1,6%	0,5%
24/09/2018 15:37:48	11,44	14,11	48,07	292,76	95,27	1500,05	33,18	50,39%	48,85%	32,08	3,3%	3,1%

Evaluación de sistemas de compresión térmica para la reducción de consumo energético en secadero de mineral

24/09/2018 23:25:08	11,02	12,99	45,06	318,08	91,85	1501,74	33,50	54,16%	54,82%	33,82	1,0%	1,2%
24/09/2018 18:36:10	11,52	13,52	47,70	312,29	95,71	1510,71	32,92	52,49%	51,29%	32,05	2,6%	2,3%
24/09/2018 20:59:48	11,26	13,55	48,07	298,10	88,79	1523,12	38,96	58,83%	57,48%	38,06	2,3%	2,3%
24/09/2018 18:07:34	11,29	12,44	48,06	311,26	95,69	1530,02	32,78	51,67%	50,37%	31,90	2,7%	2,5%
24/09/2018 20:41:04	10,70	13,94	46,83	320,84	99,80	1546,44	30,51	48,92%	47,87%	29,79	2,4%	2,1%
25/09/2018 22:18:12	11,44	12,49	45,06	324,40	91,85	1559,55	34,75	55,11%	56,43%	35,54	2,3%	2,4%
24/09/2018 21:39:40	11,05	12,83	48,07	306,71	93,66	1568,07	35,82	54,20%	53,19%	35,13	1,9%	1,9%
24/09/2018 17:19:46	11,52	13,52	47,70	325,52	95,71	1579,23	34,57	54,90%	53,13%	33,59	2,8%	3,2%
24/09/2018 23:15:40	11,76	12,80	48,07	312,79	96,90	1586,76	33,23	50,76%	49,94%	32,66	1,7%	1,6%
24/09/2018 14:22:28	10,82	13,24	45,06	318,08	91,85	1609,14	35,79	54,22%	52,19%	34,51	3,6%	3,7%

Evaluación de sistemas de compresión térmica para la reducción de consumo energético en secadero de mineral

26/09/2018 10:41:50	10,74	14,09	48,07	331,46	101,77	1624,56	31,53	49,86%	49,58%	31,35	0,6%	0,6%
26/09/2018 8:18:28	9,60	14,79	46,23	337,03	91,85	1629,07	37,05	58,37%	57,90%	36,80	0,7%	0,8%
25/09/2018 1:29:20	10,74	14,09	48,07	331,46	101,77	1652,65	32,11	49,86%	49,20%	31,65	1,4%	1,3%
26/09/2018 5:54:30	11,11	13,68	46,73	326,85	101,41	1660,42	31,91	48,27%	49,39%	32,71	2,5%	2,3%
26/09/2018 8:54:12	11,84	12,75	45,06	339,48	91,85	1672,40	37,36	57,48%	59,00%	38,32	2,6%	2,6%
25/09/2018 6:21:16	11,80	13,04	48,07	334,59	101,74	1680,74	32,66	50,31%	51,34%	33,31	2,0%	2,0%
24/09/2018 16:43:30	11,44	12,49	45,06	324,40	91,85	1702,24	37,27	55,11%	52,66%	36,20	2,9%	4,4%
25/09/2018 1:01:18	10,85	13,31	48,07	334,83	98,55	1709,26	34,34	52,36%	51,85%	34,73	1,1%	1,0%
25/09/2018 4:22:22	11,43	13,28	45,06	345,68	91,85	1715,28	38,19	58,37%	59,24%	38,84	1,7%	1,5%
25/09/2018 5:58:04	11,49	12,93	48,06	337,05	99,92	1725,81	34,69	52,23%	51,66%	34,28	1,2%	1,1%

Evaluación de sistemas de compresión térmica para la reducción de consumo energético en secadero de mineral

25/09/2018 3:18:28	11,70	12,64	48,06	337,05	99,92	1737,60	34,89	52,22%	51,55%	34,44	1,3%	1,3%
25/09/2018 3:57:30	11,49	12,93	48,06	343,11	99,92	1740,48	35,08	53,01%	52,57%	34,64	1,3%	0,8%
25/09/2018 15:13:44	10,51	12,98	44,68	359,63	94,02	1754,15	37,21	57,53%	58,79%	37,99	2,1%	2,2%
24/09/2018 20:45:16	11,15	12,98	44,68	359,63	94,02	1760,05	37,41	57,51%	58,11%	37,68	0,7%	1,0%
24/09/2018 14:09:32	11,90	13,20	47,87	342,54	99,92	1768,13	35,41	52,90%	52,54%	35,25	0,5%	0,7%
25/09/2018 6:49:20	11,70	13,20	47,43	342,54	101,52	1775,66	34,23	50,92%	50,37%	33,89	1,0%	1,1%
24/09/2018 20:51:38	11,90	12,46	48,06	342,96	98,29	1793,02	37,25	54,61%	53,46%	36,38	2,3%	2,1%
25/09/2018 12:03:48	11,90	13,20	48,03	342,54	99,92	1803,62	36,34	53,09%	52,69%	36,04	0,8%	0,8%
24/09/2018 15:27:38	11,59	13,05	48,07	332,87	98,50	1810,14	37,52	53,02%	51,44%	36,26	3,3%	3,0%
25/09/2018 17:44:40	11,90	13,20	47,92	342,54	99,92	1818,04	36,44	52,94%	52,42%	36,16	0,8%	1,0%

Evaluación de sistemas de compresión térmica para la reducción de consumo energético en secadero de mineral

24/09/2018 15:56:16	11,59	13,05	48,07	332,87	98,50	1825,12	37,72	53,02%	51,31%	36,47	3,3%	3,2%
24/09/2018 17:53:54	11,90	13,20	47,67	342,54	99,92	1830,14	36,67	52,67%	52,87%	36,72	0,1%	0,4%
25/09/2018 4:52:22	11,90	13,20	48,04	342,54	99,92	1840,61	37,13	53,07%	52,55%	36,68	1,2%	1,0%
25/09/2018 3:50:04	11,90	12,50	48,06	342,96	98,29	1849,32	38,29	54,61%	53,86%	37,81	1,3%	1,4%
24/09/2018 17:51:02	11,90	12,49	48,06	342,96	98,29	1860,86	38,71	54,61%	53,31%	37,66	2,7%	2,4%
24/09/2018 15:36:46	10,86	13,50	46,07	369,91	91,67	1870,83	43,16	63,53%	63,95%	43,08	0,2%	0,7%
24/09/2018 20:04:30	11,26	13,50	46,07	369,91	91,67	1883,99	43,23	64,25%	64,10%	43,49	0,6%	0,2%
25/09/2018 3:12:26	11,69	12,94	48,06	349,57	99,92	1892,02	37,92	53,99%	53,09%	37,42	1,3%	1,7%
24/09/2018 19:06:10	11,70	13,20	47,51	342,54	99,92	1900,98	38,32	53,05%	51,72%	37,33	2,6%	2,5%
24/09/2018 19:35:46	11,06	14,25	46,07	363,69	91,67	1914,21	43,85	62,66%	63,01%	44,06	0,5%	0,6%

Evaluación de sistemas de compresión térmica para la reducción de consumo energético en secadero de mineral

25/09/2018 2:00:02	11,26	13,50	46,07	369,91	91,67	1920,42	43,85	63,59%	64,18%	44,38	1,2%	0,9%
25/09/2018 9:12:54	12,00	13,05	48,07	346,11	98,50	1941,49	39,81	54,82%	53,96%	39,43	0,9%	1,6%
24/09/2018 17:21:28	11,65	12,63	45,68	382,54	97,35	1952,77	39,54	58,24%	58,35%	39,57	0,1%	0,2%
26/09/2018 5:12:46	11,51	12,73	45,68	368,71	97,26	1961,05	39,75	56,43%	56,17%	39,48	0,7%	0,5%
24/09/2018 20:21:16	11,25	14,37	47,70	379,07	98,98	1973,27	40,20	56,47%	57,71%	39,23	2,4%	2,2%
24/09/2018 18:12:28	11,11	13,15	46,47	373,10	101,41	1980,42	37,74	53,88%	54,20%	37,83	0,2%	0,6%
24/09/2018 14:34:42	11,51	12,73	45,68	368,71	97,26	1997,66	40,38	54,46%	56,17%	40,22	0,4%	3,1%
24/09/2018 21:50:32	11,49	12,72	45,68	387,40	100,47	2009,82	38,20	55,59%	56,02%	38,50	0,8%	0,8%
25/09/2018 4:01:38	11,87	13,06	47,70	373,03	100,60	2017,97	39,75	55,96%	55,25%	39,26	1,2%	1,3%
24/09/2018 22:18:24	12,31	12,75	45,68	374,99	98,86	2026,19	39,78	55,67%	56,15%	40,10	0,8%	0,9%

Evaluación de sistemas de compresión térmica para la reducción de consumo energético en secadero de mineral

26/09/2018 10:10:24	11,01	14,50	46,69	383,51	102,08	2033,27	38,33	54,81%	54,47%	38,08	0,7%	0,6%
25/09/2018 3:29:32	12,47	12,82	47,70	377,89	94,13	2048,26	45,90	64,04%	62,97%	45,32	1,3%	1,7%
24/09/2018 16:58:10	11,69	12,62	45,68	374,99	98,86	2057,03	40,37	55,67%	55,67%	40,36	0,0%	0,0%
24/09/2018 14:18:34	11,13	14,18	46,68	371,26	97,31	2067,50	42,62	57,92%	57,71%	42,44	0,4%	0,4%
24/09/2018 21:10:52	11,94	12,56	48,07	376,31	101,83	2074,21	40,24	55,51%	54,56%	39,46	1,9%	1,7%
24/09/2018 16:24:52	11,45	13,06	49,08	378,83	100,19	2088,38	42,52	58,57%	56,81%	41,19	3,1%	3,0%
25/09/2018 2:17:34	11,65	14,12	47,70	371,58	98,98	2093,27	42,68	57,49%	56,76%	42,08	1,4%	1,3%
24/09/2018 14:13:12	11,32	12,85	47,70	377,73	97,34	2105,25	44,32	60,14%	59,88%	44,12	0,4%	0,4%
24/09/2018 14:48:58	11,50	13,20	47,06	380,26	103,13	2112,21	39,33	53,73%	53,69%	39,18	0,4%	0,1%
24/09/2018 20:37:32	11,90	12,91	46,69	383,51	102,08	2135,84	40,22	54,81%	55,16%	40,50	0,7%	0,6%

Evaluación de sistemas de compresión térmica para la reducción de consumo energético en secadero de mineral

24/09/2018 22:51:10	11,62	13,54	45,68	383,51	102,08	2143,05	39,69	53,76%	54,24%	40,02	0,8%	0,9%
24/09/2018 18:39:00	10,08	14,66	46,69	389,52	102,08	2167,06	40,80	55,54%	55,72%	40,96	0,4%	0,3%
24/09/2018 23:50:48	10,69	14,62	46,69	396,57	102,07	2175,65	40,97	56,39%	56,96%	41,40	1,0%	1,0%
25/09/2018 2:47:54	12,23	13,29	46,69	383,51	102,08	2187,00	41,16	54,81%	55,44%	41,68	1,3%	1,1%
24/09/2018 21:02:10	10,75	14,59	45,68	389,79	102,08	2200,10	40,80	54,48%	55,03%	41,10	0,7%	1,0%
24/09/2018 19:53:16	11,74	13,43	46,69	383,66	103,68	2210,76	40,54	53,37%	53,74%	40,74	0,5%	0,7%
24/09/2018 20:16:16	11,18	13,91	45,68	378,20	94,08	2214,08	47,83	61,21%	61,73%	48,13	0,6%	0,8%
24/09/2018 19:18:34	11,54	12,63	46,06	394,92	96,56	2220,54	45,98	61,06%	59,71%	44,83	2,5%	2,2%
25/09/2018 3:58:14	9,80	14,86	45,68	396,40	102,08	2226,25	42,00	56,31%	57,28%	42,68	1,6%	1,7%
25/09/2018 3:27:26	10,62	14,56	45,68	396,23	103,68	2246,56	40,39	53,77%	54,61%	40,98	1,5%	1,6%

Evaluación de sistemas de compresión térmica para la reducción de consumo energético en secadero de mineral

25/09/2018 5:02:40	9,67	13,05	46,07	397,31	101,83	2250,07	42,18	55,91%	57,11%	42,91	1,7%	2,1%
25/09/2018 3:14:16	11,08	13,45	47,06	393,87	103,13	2263,93	42,12	55,42%	56,26%	42,70	1,4%	1,5%
24/09/2018 16:01:18	12,20	12,05	48,07	394,43	103,43	2269,26	42,59	56,12%	56,10%	42,53	0,1%	0,0%
25/09/2018 3:38:44	10,79	14,62	47,70	403,49	97,34	2283,86	48,12	63,66%	64,64%	48,85	1,5%	1,5%
24/09/2018 14:48:30	11,54	12,63	46,06	388,61	96,56	2291,89	47,42	60,26%	58,24%	45,76	3,5%	3,4%
26/09/2018 10:29:32	11,87	13,06	47,70	373,95	100,60	2299,79	45,28	56,09%	57,61%	46,56	2,8%	2,7%
25/09/2018 5:49:04	10,48	12,55	46,07	397,31	101,83	2300,05	43,02	55,91%	57,08%	43,82	1,9%	2,1%

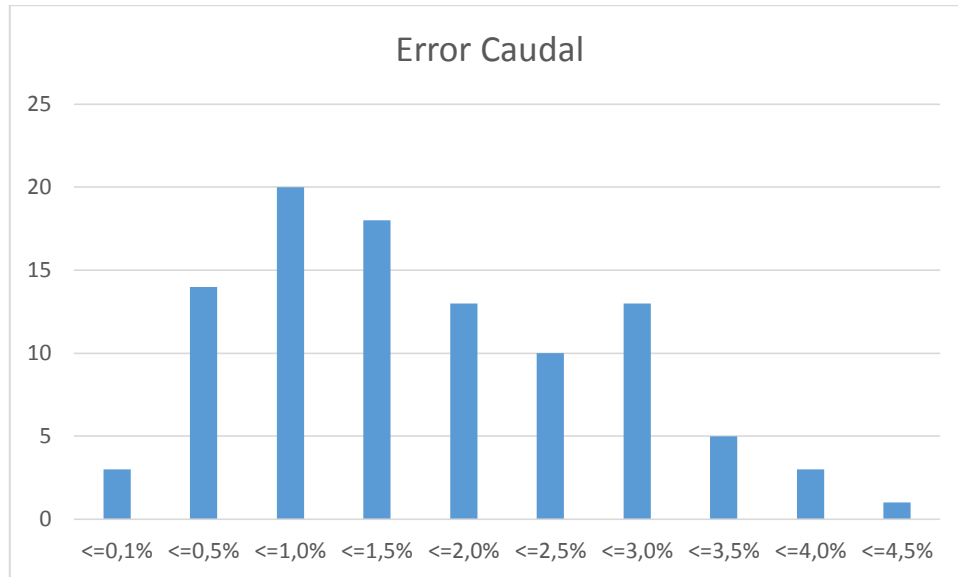


Grafico 6. Variación error caudal.

5. Conclusión.

La primera conclusión que se puede sacar es que para las expresiones analíticas se necesitan demasiados datos y podemos cometer errores a la hora de meter el dato o mientras procedemos con los cálculos, mientras que en la red neuronal solo se necesitan los datos de entrada, que son proporcionados por la empresa.

La segunda conclusión que se puede sacar es que con la red neuronal se obtiene el caudal sin ningún criterio. Incluso se puede obtener resultados en el régimen transitorio así como en las paradas y arrancadas.

La tercera conclusión que se puede sacar es que los errores son bajos. En la presión analítica no son mayores del 10% y en la red neuronal este número se mejora teniendo errores menores al 5%.

Por todo esto se decidió finalmente proponerle a la empresa utilizar una red neuronal para la obtención del caudal. Esta red neuronal se seguirá entrenando con nuevos datos, para obtener un mejor rendimiento.

Referencias.

1. Tema 7: Tipología y Clasificación de Compresores. *Juan F. Coronel Toro* (jfc@us.es, <http://www.jfcoronel.org>)
Profesor Titular de Universidad.
Dpto. Ingeniería Energética, Universidad de Sevilla.
2. Evaporation Technology Using Mechanical Vapour Recompression. Technology and Applications.
3. Cálculo de los compresores:
http://campusvirtual.edu.uy/archivos/mecanica-general/Apuntes/Transparencias_TF_para_IFC_V2007.pdf
4. Termocompresor
Solución de ahorro energético de alta eficiencia. Spirax Sarco
5. Evaporation Technology using Mechanical Vapour Recompression. GEA Process Engineering Division
6. Agencia IDAE. Comparativa procesos de recompresión mecánica y recompresión térmica.
7. A BestPractices SteamTechnical Brief Industrial Heat Pumps for Steam and Fuel Savings U.S. Department of Energy Energy Efficiency and Renewable Energy
8. Thermocompressors Engineered for efficiency. KADANT
9. Compressor calculations. Exxon engineering.
10. Centrifugal compressor. Exxon.
11. Compressor type selections. Exxon.

