

6 DE NOVIEMBRE DE 2020



ENSAYO N°9

COMPORTAMIENTO DEL COMPRESOR DE TORNILLO

ICM 557 LABORATORIO DE MÁQUINAS

DINO ARATA HERRERA
ESCUELA INGENIERÍA MECÁNICA PUCV
Profesores
Cristóbal Galleguillos Ketterer
Tomás Herrera Muñoz

Resumen

El aire comprimido es un recurso sumamente importante en el ámbito industrial para múltiples aplicaciones dentro de las cuales destacan el funcionamiento o accionamiento de maquinarias y herramientas.

Durante este ensayo se realizaron pruebas en un compresor de tornillo Atlas copco con variador de frecuencia incorporado de la escuela de Ingeniería mecánica de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Para el cual se establecen distintas presiones y se observa el comportamiento de los sistemas de control automáticos ante distintas situaciones.

Índice

Resumen.....	1
Introducción	3
Objetivos	4
Procedimientos.....	5
Descripción	6
Tabla de valores medidos	8
Fórmulas	9
Tabla de valores calculados.....	11
Gráficos.....	13
PRP	15
Conclusión	16
Referencias.....	17

Introducción

Durante el ensayo se programan distintas presiones para analizar el comportamiento del compresor de tornillo y sus sistemas automáticos, ante distintas condiciones que simulan su trabajo en la realidad.

Se llevaron a cabo las siguientes acciones:

- El cierre de la válvula de descarga del estanque de baja presión.
- La carga y descarga parcial del estanque.

Para observar el comportamiento de los sistemas de control automático del compresor con regulador de velocidad que lo dirigen, ante distintas situaciones de operación en una empresa.

Objetivos

- Analizar el comportamiento y funcionamiento del compresor de tornillo como máquina de una instalación industrial.
- Determinar la capacidad del compresor en funcionamiento a distintas presiones.

Procedimientos

Se establece la presión requerida en el panel del compresor, inicialmente se observa que indica una presión de cero la cual empieza a subir a medida pasan los segundos de funcionamiento del compresor, se cierra la válvula del estanque de baja presión, luego la presión aumenta hasta llegar a la presión ingresada o requerida. Al llegar a esta presión se disminuye el caudal debido a que la válvula de descarga esta cerrada y se alcanza la presión, el caudal disminuye y debido a los sistemas automáticos el compresor se detiene.

Con la salida cerrada el caudal que marca es de 0%, sin embargo, el compresor sigue funcionando.

Cabe destacar que si no hay un consumo los sistemas automáticos del compresor procederán a detenerlo disminuyendo su velocidad paulatinamente.

Luego, se genera un consumo abriendo la válvula, debido a esto se observó una caída de presión en ese momento, pero al pasar el tiempo empieza automáticamente a alcanzar la presión ingresada inicialmente en el panel y un caudal del 100%. Como el consumo que se generó es bajo, comienza a disminuir la velocidad y el caudal, este último hasta estabilizarse en un 88%.

Se procede a disminuir aun más el consumo, se produce una disminución drástica de caudal hasta un 77% en donde se estabiliza acorde con la presión y consumo.

A continuación, se abre la válvula para simular un máximo consumo posible por la máquina. Se observa inicialmente una caída de presión debido a la apertura de la válvula, para luego subir hasta llegar a la presión ingresada.

Una vez se estabiliza el caudal asociado a cierto consumo y presión, se pueden llevar a cabo las mediciones de:

- Velocidad de rotación del motor.
- Intensidad del motor.
- Temperatura de salida.
- Punto de rocío a presión.
- Temperatura ambiente.
- Humedad (se mide con un hidrómetro, en la entrada de aspiración del compresor).

Es importante medir cuando está estable, regulando la válvula hasta obtener la presión a la cual se requieren hacer las mediciones con un 100% de caudal.

Descripción

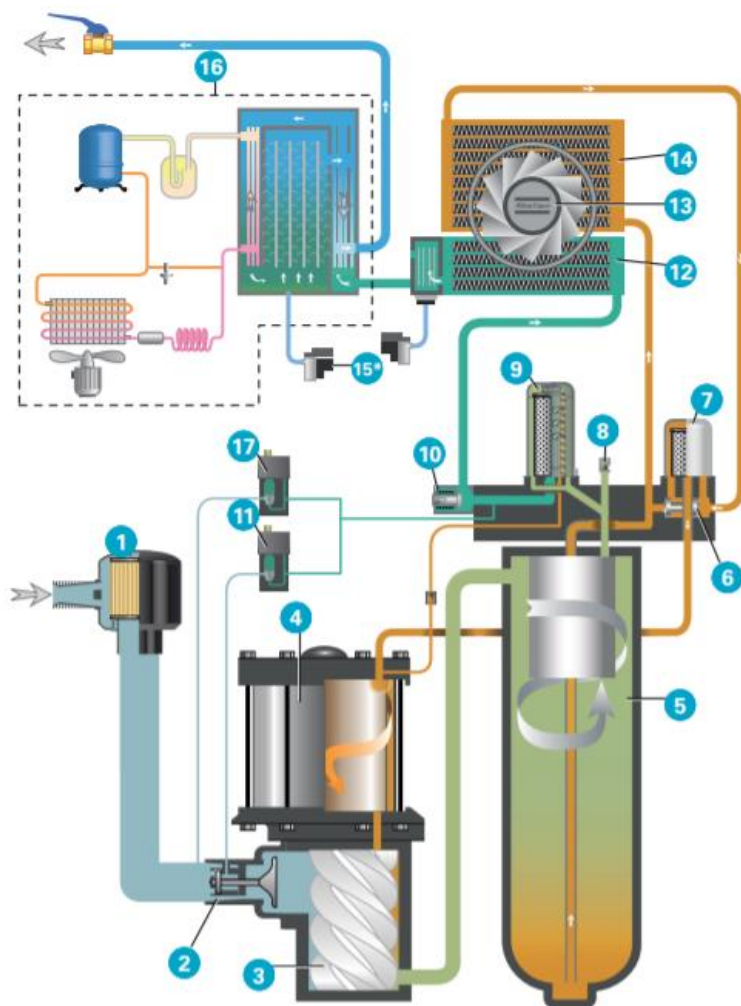


Ilustración 1: esquema instalación compresor de tornillo

- | | | |
|---|---|--------------------------|
| 1 Filtro de aspiración | 10 Válvula de presión mínima | ● Aire comprimido húmedo |
| 2 Válvula centinela | 11 Válvula solenoide | ● Condensado |
| 3 Elemento de tornillo | 12 Refrigerador posterior | ● Aire comprimido seco |
| 4 Motor de imanes permanentes interiores (PM) | 13 Ventilador | ● Aire de aspiración |
| 5 Depósito separador de aire/aceite | 14 Refrigerador de aceite | ● Mezcla de aire/aceite |
| 6 Válvula de derivación termostática | 15 Purgador electrónico (* montado en el refrigerador posterior en los modelos sin secador) | ● Aceite |
| 7 Filtro de aceite | 16 Secador (opción Full-Feature) | |
| 8 Válvula de seguridad | 17 Ciclo de prevención de condensado | |
| 9 Separador de aceite | | |

Ilustración 2: especificaciones de la instalación.

El compresor de tornillo es marca atlas copco modelo GA 7 VSD FF, el termino VSD significa que posee un variador de frecuencia incorporado, el cual permite el control de la capacidad por la variación de velocidad de rotación.

- No posee válvulas.
- Velocidad máxima de rotación: 4350[rpm].
- Transmisión mediante correas.
- Factor de potencia motor eléctrico: 0,9[-].
- Corriente límite: 17[A].
- Rango de presiones: [5,5-12,7] [bar].
- Presión nominal: 7[bar].

En el panel del compresor se pueden extraer las mediciones de la velocidad rotacional del motor, temperatura ambiente, temperatura de la descarga, punto de rocío, corriente y caudal (es entregado en porcentaje para obtener una medida de cuanto se aprovecha el trabajo del compresor). Posee un estanque de acumulación propio (lugar donde se mide la presión de descarga), estanque de baja presión y dos filtros.

- Motor de imanes permanentes con altísima eficiencia, diseño compacto y adaptable para refrigeración óptima con aceite.
- Compresor de accionamiento directo.
- Ventilador innovador basado en tecnologías vanguardistas y bajos niveles sonoros.
- Filtros/ separadores de aceites de mantenimiento sencillo.
- Purgador de agua electrónico sin pérdidas.
- Controlador Elektronikon.
- Armario VSD
- Válvula centinela sin supresor de aspiración, sin pérdidas por venteo y sin necesidad de mantenimiento.

Ventajas compresor de tornillo:

- ❖ Al tener menos piezas que otros tipos de compresores, es de simple mantenimiento.
- ❖ Larga vida útil.
- ❖ Se puede trabajar a grandes velocidades.
- ❖ La operación es estable, con vibraciones pequeñas.
- ❖ Flujo de aire constante.
- ❖ Sistemas automáticos.

Desventajas compresor de tornillo:

- ❖ Ruido del compresor en funcionamiento es elevado.
- ❖ Alta exigencia de lubricación.

Tabla de valores medidos

Tabla 1

COMPRESOR DE TORNILLO										
P.Des	Veloc.	Temp	Hum. Amb.	Temp	Punto	Temp.	Pres.	Corriente	Caudal	Pres.
		Amb		Desc.	Rocío	EBP	EBP			Atm
p _d	n	t _{amb}	H _{amb}	t _{desc}	PRP	t _{EBP}	D h	I	Q	P _{atm}
[bar]	[rpm]	[°C]	%	[°C]	[°C]	[°C]	[mm _{ca}]	[A]	[%]	[mm _{Hg}]
5,5	4315	18	59,4	73	4	20	476	17	98	759,5
6	4350	19	58,9	73	4	20	484	16	100	759,5
7	4350	18	58,6	75	4	21	464	17	100	759,5
8	4176	18	58,9	76	4	21,5	406	17	100	759,5
9	3984	19	58,9	77	4	21	348	17	100	759,5

COMPRESOR DE TORNILLO										
P.Des	Veloc.	Temp	Hum. Amb.	Temp	Punto	Temp.	Pres.	Corriente	Caudal	Pres.
		Amb		Desc.	Rocío	EBP	EBP			Atm
p _d	n	t _{amb}	H _{amb}	t _{desc}	PRP	t _{EBP}	Dh	I	Q	P _{atm}
[bar]	[rpm]	[K]	%	[°C]	[°C]	[K]	[cm agua]	[A]	[%]	cm agua
5,5	4315	291	59,4	346	4	293	47,6	17	98	1032,5
6	4350	292	58,9	346	4	293	48,4	16	100	1032,5
7	4350	291	58,6	348	4	294	46,4	17	100	1032,5
8	4176	291	58,9	349	4	294,5	40,6	17	100	1032,5
9	3984	292	58,9	350	4	294	34,8	17	100	1032,5

Tabla 2 (tabla 1 con conversión de unidades)

Fórmulas

Fórmula para obtener el caudal de aire libre [m³/h]

$$(1) V = 8,62 \cdot \alpha \cdot S \cdot T_a \cdot \sqrt{\frac{H}{T \cdot P_a}}$$

α : corresponde al valor del coeficiente de caudal del diafragma cuyo valor es $\alpha=0,600$.

S: sección del orificio del diafragma en [cm²], diámetro del orificio de 22[mm].

T_a : temperatura absoluta de aspiración del compresor [K].

T: temperatura absoluta del estanque de baja presión [K].

H: presión en el manómetro diferencial.

P_a : presión barométrica.

- Según la norma ANSI/AMCA 210-99 y ANSI/ASHRAE 51-99 establecen como condiciones estándar al aire a una temperatura de 293,15[K], una presión de 101,325[Pa] y una humedad relativa del 50[%].
- Según el fabricante que se rige por la norma ISO 1217, se establecen una temperatura de 293,15[K], presión de 1[bar] y humedad relativa de 0[%].
- Por lo tanto, a la hora de comparar los resultados obtenidos para el caudal con los datos del fabricante, se debe tener en consideración, que al realizar el ensayo experimentalmente, probablemente no estaban las condiciones establecidas por el fabricante, por este motivo se deben aplicar las siguientes correcciones a los valores que obtenemos para caudal.

Formula que corrige el caudal con respecto:

- a la presión y la temperatura:

$$q_{NxRh} = q_x \cdot \frac{T_N}{T_x} \cdot \frac{P_x}{P_N}$$

- a la humedad relativa del aire:

$$q_{Nx} = q_{NxRh} \left(1 - \frac{xRh * P_S}{P_{atm}} \right)$$

- la velocidad de rotación del compresor:

$$q_N = q_{Nx} \frac{n}{n_x}$$

q_{NxRh} : caudal corregido por presión y temperatura

q_x : caudal calculado con la formula (1)

T_N : temperatura nominal

T_x : temperatura absoluta

P_N : presión nominal

P_x : presión absoluta

xRh : humedad medida mediante el hidrómetro

P_S : presión de saturación

n : velocidad de rotación del compresor

n_x : velocidad medida

Tabla de valores calculados

Tabla 3

Tamb	Ps [kpa]
18	2,0859
19	2,2125
18	2,0859
18	2,0859
19	2,2125

- La tabla 3 contiene la presión de saturación para las temperaturas ambientes registradas, extraídas de las tablas del libre Cengel de termodinámica e interpoladas linealmente.

Tabla 4

α	S	V	qNxRh	qNx	qN
0,60	3,8	71,73	72,6621877	71,772429	72,3545924
-	-	72,58	73,5220379	72,575147	72,575147
-	-	70,70	71,3747202	70,5124976	70,5124976
-	-	66,08	66,5949799	65,7863791	68,5274783
-	-	61,44	62,0247343	61,2259172	66,8505873

- En la tabla 4 se presentan los valores calculados para el caudal mediante la fórmula (1) y las correspondientes correcciones mediante presión, temperatura, humedad relativa y velocidad de rotación del compresor.

Tabla 5

datos del fabricante	
Presión[bar]	caudal máximo[m ³ /h]
5,5	78,8
7	78,1
9,5	64,8
12,5	51,12

- Estos valores fueron extraídos del catalogo del compresor sobre las especificaciones técnicas del GA 7VSD+.

Para el cálculo del caudal máximo según las presiones, se requiere de una interpolación lineal en la tabla 5, para obtener el caudal correspondiente a las presiones de 6 [bar], 8[bar] y 9 [bar].

Tabla 6

tabla 5 con interpolación	
presión	caudal máx
5,5	78,8
6	78,57
7	78,1
8	72,78
9	67,46
9,5	64,8
12,5	51,12

Tabla 7 valores calculados

P descarga	caudal		velocidad
Pd	Q		n
[bar]	[m³/h]	[%]	[rpm]
5,5	71,73	91,0258917	4315
6	72,58	92,372665	4350
7	70,70	90,5223426	4350
8	66,08	90,7882844	4176
9	61,44	91,0711825	3984

Gráficos

- Grafico del caudal corregido en función de la presión de descarga:

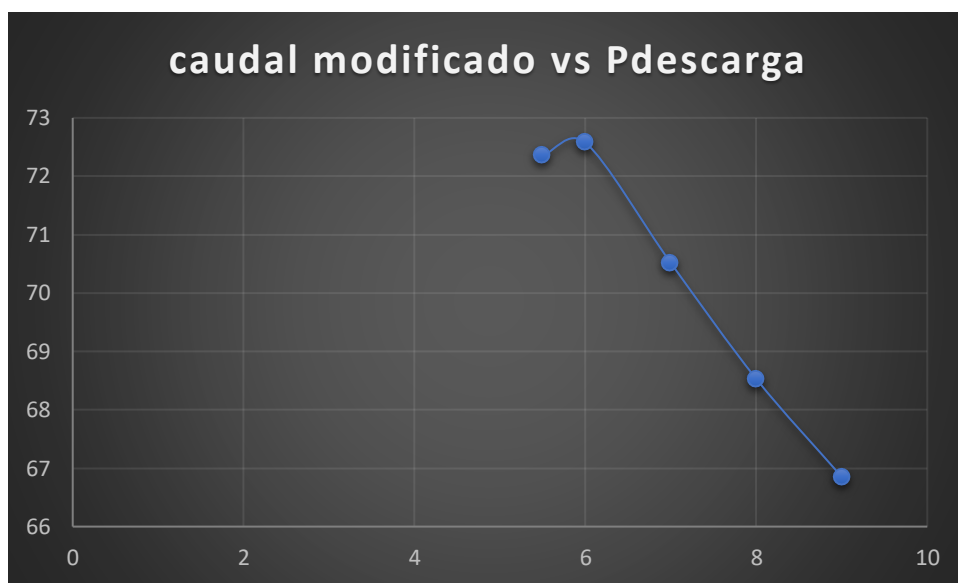


Ilustración 3 gráfico caudal modificado v/s presión de descarga

- Compare los valores obtenidos con los que señala el fabricante:
 - ❖ La línea de tendencia naranja corresponde a los valores de caudal máximo entregados por el fabricante.
 - ❖ La línea de tendencia azul corresponde a los valores obtenidos y modificados por presión, temperatura, humedad relativa y velocidad de rotación del compresor.

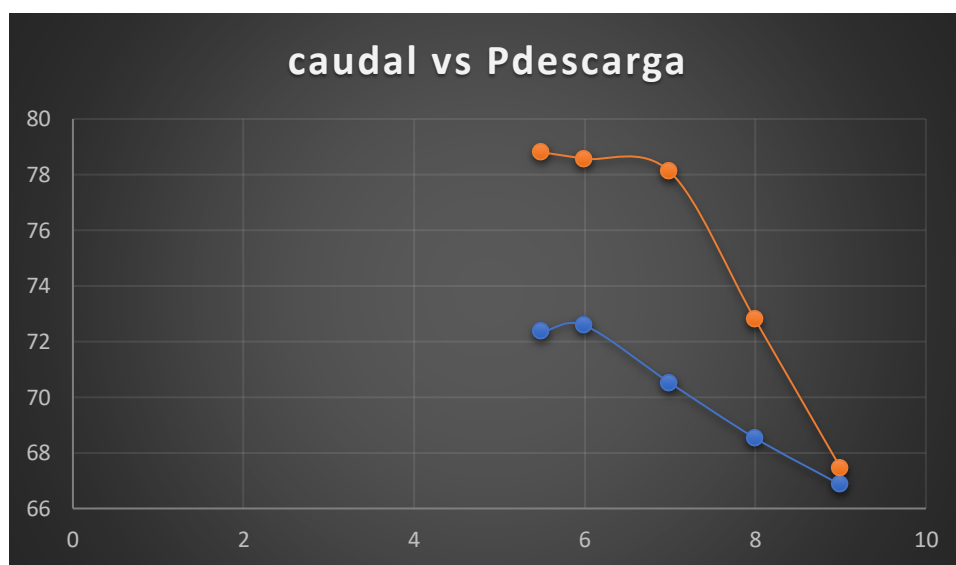


Ilustración 4 gráfico comparativo de valores del fabricante y valores obtenidos

- ¿Los valores están en el rango que corresponde?

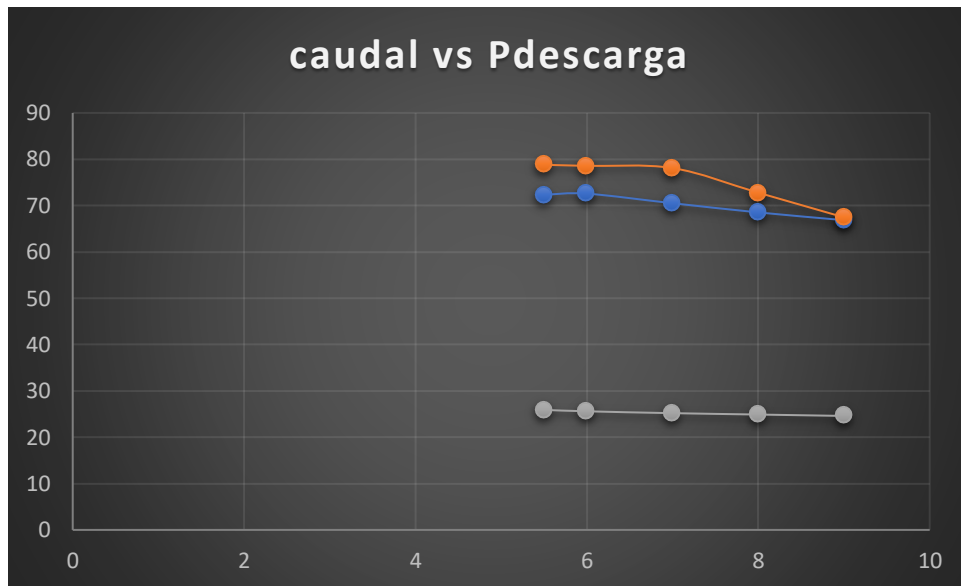


Ilustración 5 gráfico comparativo de caudal máximo, mínimo y calculado

- ❖ En el gráfico de la ilustración 5 se puede ver la línea de tendencia naranja que corresponde al caudal máximo entregado por el fabricante, la línea gris la cual corresponde al caudal mínimo entregado por el fabricante y finalmente la línea de tendencia azul que corresponde a los datos obtenidos y modificados.
- ❖ Por lo tanto, es notorio que nuestros datos obtenidos están dentro del rango correspondiente al catálogo.
- ❖ Es importante hacer las correcciones realizadas al valor del caudal, a modo de establecer las mismas condiciones a las que se tomaron las medidas del fabricante, sin las correcciones, al realizar la comparativa con el catálogo obtendríamos resultados no representativos.

PRP

¿qué significa el punto de rocío?

- El punto de rocío a presión es la temperatura a la cual el vapor de agua comienza su condensación, pero sujeto a una mayor presión.
- Se le llama a presión debido a que se mide en un punto donde la presión es más elevada que la presión atmosférica (un gas bajo presión).
- Al cambiar la presión de un gas, se está alterando la temperatura del punto de rocío del gas.
- El punto de rocío nos indica la temperatura saturación a partir de la cual el agua de la red de aire comprimido empieza a condensarse.

Calcule el contenido de humedad del aire que entra y que sale del compresor.

[c°]	[c°]	[%]	[gr _{agua} /Kg _{as}]	[gr _{agua} /kg _{as}]	[m _{agua} /m ³ _{as}]	[gr _{agua} /kg _{as}]
punta rocío	T amb	Humedad amb	masa agua sat	humedad entra	Masa agua sale	Humedad sale
4	18	0,594	12,88	7,65	0,96	0,1189
4	19	0,589	13,72	8,08	0,9	0,1036
4	18	0,586	12,88	7,55	0,85	0,0858
4	18	0,589	12,88	7,59	0,75	0,0674
4	19	0,589	13,72	8,08	0,63	0,0511

Conclusión

El aire comprimido es un recurso sumamente primordial en las industrias, debido a que tiene un rol fundamental para la operación de maquinarias, herramientas y distintas aplicaciones que proporcionan a la empresa obtener su producto final.

Dentro de este marco es conveniente realizar la correcta selección de los equipos de aire comprimido o compresores, debido a que el consumo eléctrico representa gran parte de la inversión generada, elegir un compresor con alto rendimiento acorde a las necesidades y considerar una posible expansión a futuro pueden generar que se aprovechen mejor los recursos.

Los sistemas de control automático hacen al compresor de tornillo una alternativa muy confiable para las industrias, de fácil manipulación y mantención para sus operarios. Es un equipo que cuenta con grandes rendimientos por lo que proporciona excelente eficiencia.

Se determinó la capacidad del compresor en funcionamiento a distintas presiones, los resultados fueron corregidos para poder disponer de las mismas condiciones de ensayo establecidas por el fabricante y decretar una comparación representativa con el catálogo.

Los resultados que se obtuvieron están dentro del rango mínimo-máximo entregados en el catálogo del fabricante para el compresor de tornillo Atlas Copco GA7 VSD. Lo cual nos indica un correcto cálculo de los valores y un correcto funcionamiento del compresor.

Referencias

- [1] <https://www.mundocompresor.com/articulos-tecnicos/como-funciona-compresor-tornillo-lubricado>
- [2] <https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/Dew-point-compressed-air-Application-note-B210991ES-B-LOW.pdf>
- [3] Termodinámica, Yunus Cengel.
- [4] Compresores de tornillo rotativos con inyección de aceite, catalogo compresor Atlas Copco.
- [5] Apuntes laboratorio de máquinas térmicas comportamiento del compresor de tornillo, Tomas Herrera.