

# Informe N°7: Laboratorio de Máquinas: Balance Térmico del compresor

Lucas Villalobos Burgos <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Escuela de Ingeniería Mecánica

Pontificia Universidad Católica de Valparaíso

cristobal.galleguillos@pucv.cl

21 de noviembre de 2020

## 1. Introducción y Objetivos

El presente informe trae consigo el cálculo con posterior análisis de datos experimentales para un compresor y su balance térmico, por lo que el estudio del proceso del compresor será con un enfoque en la refrigeración del mismo y las distintas eficiencias que lo rodean.

**Objetivo General:** Analizar como se distribuye la energía en el equipo, partiendo desde la energía eléctrica hasta la útil en el aire comprimido.

**Objetivos Específicos:** Evaluar los rendimientos del equipo, y las implicancias que cada uno tiene en el rendimiento global.

## 2. Desarrollo

### 2.1. Tabla de Valores Medidos

A continuación, se muestran los valores usados, a parte de los que se mostrarán en el anexo, y valores con sus respectivas transformaciones dimensionales.

	Compresor						Estanque de baja presión		Agua de refrigeración			Motor Eléctrico							
	Presión	Velocid	Temperatura						Temperatura		tiempo	Tensión	Corrientes				Potencia		
	Pd	n	tecbp	tsebp	tecap	tecap	tebp	ΔP	tea	tse	10 l	V	I1	I2	I3	Itotal	W1	W2	
	[kp/cm2]	[rpm]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[mmca]	[bar]	[°C]	[°C]	[s]	[V]	[A]	[A]	[A]	[A]	[kW]	[kW]
1	7,0	499,0	20	49	26	89	34,5	488	0,0488	18	25	77	372	17,4	15,4	14,6	15,8	6,55	3,36
2	7,1	500,0	20	50	26,5	90,5	36	496	0,0496	18	25	76	373	17,3	15,3	14,5	15,7	6,62	3,4
3	7,2	498,5	20	50	26,5	90,5	37	510	0,051	18	25	75	372	17,6	15,3	14,5	15,8	6,65	3,35

Patm.			P interm		
[mmca]	[mmHg]	[bar]	[cmca]	[mmHg]	[bar]
10294	756,9	1,028397	2684,34126	1973,78034	2,68176676
10294	756,9	1,028397	2703,44713	1987,82877	2,70085431
10294	756,9	1,028397	2722,41892	2001,77862	2,71980791

### 2.2. Fórmulas

Las fórmulas usadas responden en gran medida a las de los informes anteriores, por lo que solo se limitará a mostrar las que no han sido estudiadas o mostradas con anterioridad.

### Potencia del eje del motor

$$N_{motor} = N_{elec} \cdot \eta_{motor} [kW]$$

### Potencia del eje del compresor

$$N_{compresor} = N_{motor} \cdot \eta_{trans} [kW]$$

Donde:

$\eta_{trans}$  Rendimiento de la transmisión que debe estimar

### Pérdidas del motor

$$N_{perd\ motor} = N_{elect} - N_{motor} [kW]$$

### Pérdidas mecánicas

$$N_{mec} = N_{compresor} - N_i [kW]$$

### Pérdidas de la transmisión

$$N_{trans} = N_{motor} - N_{compresor} [kW]$$

### Calor de refrigeración

$$Q_{Total} = \frac{\dot{m}_{agua} c (t_S - t_E)}{1000} [kW]$$

Donde:

$\dot{m}_{agua}$  Flujo másico de agua [kg/s]

c Calor específico del agua [J/kg°C]

### Flujo másico de agua

$$\dot{m}_{agua} = \frac{V_{agua} \rho_{agua}}{60} [kg/s]$$

### Calor del sistema de refrigeración intermedia

$$Q_{SRI} = \frac{\dot{m}_{aire} c_p (t_{SCBP} - t_{ECAP})}{1000} [kW]$$

### Flujo másico de aire

$$\dot{m}_{aire} = \frac{V \rho_{aire}}{3600} [kg/s]$$

### Calor rechazado por cilindros

$$Q_{cil} = Q_{Total} - Q_{SRI} [kW]$$

### Potencia útil del aire

$$N_{U\ aire} = \frac{\dot{m}_{aire}(c_p - c_v)(t_{SCAP} - t_{ECBP})}{1000} [kW]$$

**Rendimiento mecánico**

$$\eta_{mec} = \frac{N_i}{N_{compresor}} 100 [\%]$$

**Rendimiento sistema de compresión**

$$\eta_{global\ SC} = \frac{N_{U\ aire}}{N_{elec}} 100 [\%]$$

**Rendimiento del Compresor**

$$\eta_{compresor} = \frac{N_{U\ aire}}{N_{compresor}} 100 [\%]$$

### 3. Tabla de valores calculados

Los valores calculados se adjuntan a continuación:

	N elec	Rend motor	N eje motor	N per. motor	N eje compr	Ni CBP	Ni CAP	Ni	N per. Mec	Rend mec	N trans	Perdida trans	Q total	Q SRI	Q Cil Extraído	N U aire
	[kW]	%	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]	%	[kW]	%	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]
1	9,91	85	8,4235	1,4865	7,58115	2,70752	2,91572	5,62325	1,9579	74,174	0,84235	10	3,80545	0,543021	3,2624332	0,366
2	10,02	85	8,517	1,503	7,6653	2,22522	3,24897	5,47419	2,19111	71,4152	0,8517	10	3,85553	0,557997	3,2975295	0,36809
3	10	85	8,5	1,5	7,65	2,21854	2,80784	5,02639	2,62361	65,7044	0,85	10	3,90693	0,564904	3,3420293	0,36581

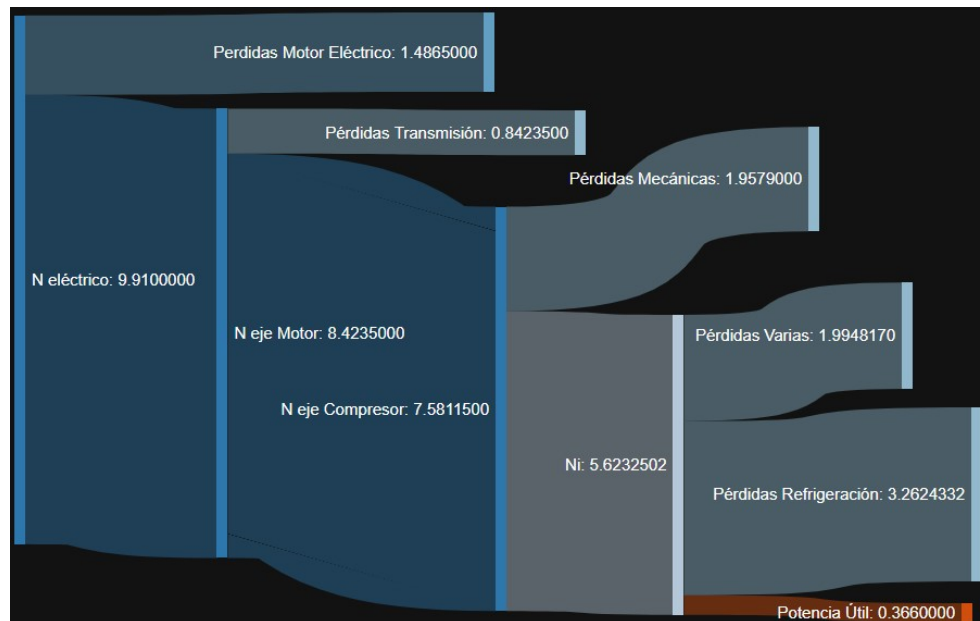
Rend gl SC	Rend compr	Capacidad	PMI CBP	PMI CAP	Caudal Agua	Flujo Más Agua	Flujo Más Aire
%	%	[m3/hr]	[kp/cm2]		[l/min]	[kg/s]	[kg/s]
3,6932	4,82771	71,5445246	48,1818	50	7,79220779	0,12987013	0,02339903
3,67353	4,802	71,95337405	43,6364	52,72727	7,89473684	0,13157895	0,02353275
3,65806	4,78178	72,84406047	43,6364	49,09091	8	0,13333333	0,02382405

	N elec	N motor	N per. motor	N compr	Ni CBP	Ni CAP	Ni	N per. Mec	Q total	Q SRI	Q Cil Extraído	N U aire
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	100	85	15	76,5	27,3211	29,422	56,7431	19,7569	38,4001	5,47953	32,92062	3,6932
2	100	85	15	76,5	22,2078	32,4249	55,2391	22,1101	38,9054	5,63064	33,27477	3,7143
3	100	85	15	76,5	22,1854	28,0784	50,7203	26,4744	39,4242	5,70034	33,72381	3,69129

\*\*Rend. motor y perd. trans asumidas

## 4. Gráficos

### 4.1. Hacer un gráfico Sankey en que se muestre claramente la distribución de energía. En hoja nueva y completa.



#### ¿El rendimiento global del sistema de compresión que comentario le sugiere?

El rendimiento global del sistema de compresión es esperable, un 4 % de rendimiento es lo que se indica debido a las pérdidas mecánicas, del motor, transmisión, entre otras, por lo que se entiende que la energía útil sea baja, así que se puede concluir que el proceso de compresión es altamente ineficiente.

#### ¿El rendimiento global del compresor que comentario le sugiere?

Si bien el proceso de compresión es ineficiente, eso no significa que el rendimiento mecánico lo sea, ya que como se vio, hay varias pérdidas involucradas y que escapan netamente del rendimiento individual del compresor, el cual recibe 70 % aproximadamente de la energía que genera el motor (según los diagramas de potencia indicada), aunque después el compresor solo logre transformar el 5 % de esa energía en trabajo sobre el aire. Esto nos indica que el compresor, aún contando con un sistema de refrigeración, este no logra extraer toda la energía interna (aunque el calor liberado por los cilindros es casi un 70 % del calor total de la refrigeración y es una buena parte de las pérdidas de energía presentes en la compresión) y además no es poca la cantidad que se desperdicia por transformarse en energía interna, por lo que eso explica las altas pérdidas por el sistema de refrigeración y que explica el rendimiento global bajo que alcanza el compresor.

#### ¿Qué efecto produce el rendimiento considerado para la transmisión?

El efecto de producir torque y que este no sea bien aprovechado por el eje motriz de la máquina no es tan alto como otras pérdidas (ejemplo, la pérdida del sistema de refrigeración) si forma parte de un 10 % que no es para tomar a la ligera, y que además es una pérdida que siempre va a estar presente en la transmisión de potencia, producto de las altas velocidades y de como la rigidez del material y las vibraciones propias del sistema dinámico evitan que se aproveche de buena manera.

#### ¿Como sugiere Ud. determinar el rendimiento de la transmisión?

Se puede estimar por medio de cálculos de fricción y de tensado, asumir directamente como una pérdida de correa, la cual suele tener un rango de valor del 5 al 10 % de pérdida, o realizar un ensayo con el motor, las poleas y la correa, y el eje libre (en donde debe ir el compresor), realizando una data o medición de las velocidades y efectuando el seguimiento correspondiente de potencia y torque a través del tiempo. Con la diferencia generada se debería estimar el rendimiento de la transmisión, permitiendo asegurar un correcto análisis de la potencia disponible.

### **¿Que comentario le sugiere el calor total de refrigeración y sus componentes?**

El calor total viene siendo el calor existente en el sistema (en el agua, o sea el disponible para extraer pero que está limitado debido a que el agua lleva su propia energía interna, por lo que la energía no puede bajar de eso), el calor del sistema de refrigeración es producto del calor residuo que lleva el aire entre etapas del compresor y el calor extraído al cilindro responde a la resta entre estos dos. El hecho de que el calor total sea el calor posible para extraer nos indica la magnitud de la energía disponible, de 3,8 [kW] lo que, en su mayoría (3,2 [kW]) es calor interno, una gran pérdida de energía que se traduce en mas de un 30 % de la energía total suministrada por el motor. A pesar de la alta pérdida, no es una tan considerable como si se comparara con las pérdidas de otros compresores, los cuales llegan hasta el 50 % de pérdida. Esto se explica por una buena refrigeración, ya que alcanzando temperaturas de aire que, en comparación a la entrada del CBP, difieren solo en 5 °C, lo que se podría explicar con los números como una buena diferencia de temperatura, óptima para el proceso de compresión que se realiza pero que en el global, solo represente una mejora en 1 o 2 % de ese rendimiento a lo mucho.

### **¿Dónde está incluido el calor retirado por el aceite?**

El calor retirado por el aceite es parte del sistema de refrigeración, por lo que ese calor se refleja en la energía perdida por el cilindro, debido a que el agua y el aceite refrigeran en conjunto al aire.

## **5. Conclusión**

Al analizar las eficiencias y los rendimientos, especialmente los globales, del compresor, se puede esclarecer que el proceso de compresión es altamente ineficiente, con una tendencia a tener grandes pérdidas o pérdidas principales en cuanto al sistema de refrigeración, no el sistema en sí sino que a través de la energía perdida en forma de calor, y sumado a otros tipos de pérdidas del tipo mecánicas, eje y carcasa, eléctricas o del rotor, las del sistema de transmisión como lo es las correas en nuestro caso, y pérdidas varias como lo puede ser en la refrigeración con aceite, la falta de lubricación en los elementos móviles, fricción innecesaria y otras no consideradas, pero que su efecto repercute en la potencia útil final, son buenos ejemplos de porqué este proceso es problemático y que mejorar su eficiencia es una tarea que puede llegar a ser desafiante y desalentadora debido a la naturaleza misma de la compresión, que mediante un análisis de balance térmico o termodinámico y con la ley de los gases nos muestran numéricamente esa dificultad existente de mejorar el proceso.

## 6. Anexo

Valores asumidos y obtenidos mediante tablas (cp y cv), por parte de fórmulas (para la capacidad) y otros valores como densidades y constante elástica del resorte para los diagramas indicados.

C esp aire	1,009	[J/g°C]
C esp agua	4,186	[J/g°C]
Dens Agua	1000	[kg/m <sup>3</sup> ]
Dens Aire	1,1774	[kg/m <sup>3</sup> ]
Kresorte	6	[kp/cm <sup>2</sup> ]/[mm]
alfa	0,6	
S	3,80132711	[cm <sup>2</sup> ]
cp	1,005	[J/kg °C]
cv	0,718	[J/kg °C]

Datos del compresor recíproco.

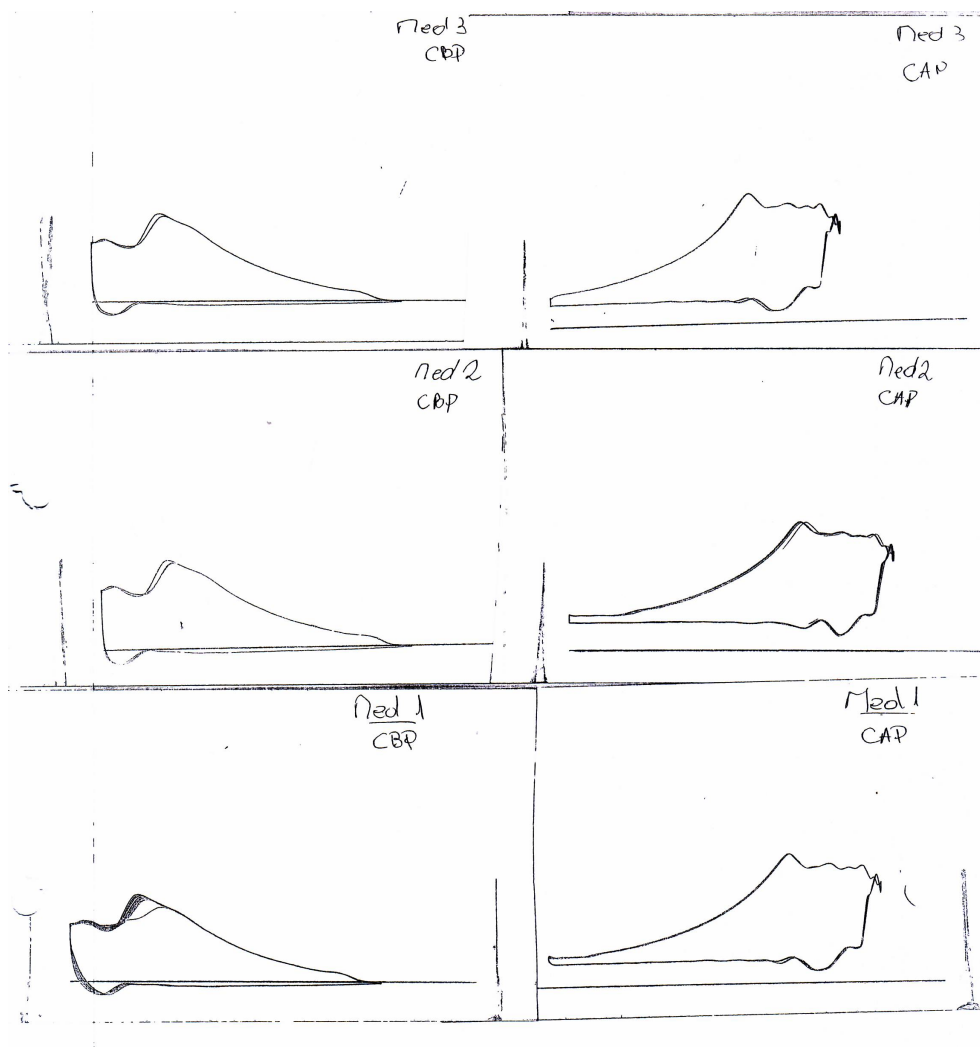
Diámetro CBP	170,0 [mm]
Diámetro CAP	110,0 [mm]
Carrera	130,0 [mm]
Volumen espacio muerto CBP	170,0 [cm <sup>3</sup> ]
Volumen espacio muerto CAP	94,0 [cm <sup>3</sup> ]
Velocidad nominal	600,0 [rpm]
Caudal de aire nominal	1,5 [m <sup>3</sup> /min]
Presión nominal	7,0 [kp/cm <sup>2</sup> ]
Volumen del estanque de acumulación	585,3 [l]

Datos de los diagramas indicados que, para los efectos de cálculo, se tomarán en cuenta la primera fila de valores.

DIAGRAMAS INDICADOS		
CBP	CAP	CBP y CAP
Área	Área	L <sub>d</sub>
[cm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>2</sup> ]	[mm]
5,3	5,5	66
4,8	5,8	66
4,8	5,4	66

Este es correcto los diagramas están enteros

Diagramas indicados de ambas etapas a las presiones definidas.



## Referencias

- [1] Compresores y ventiladores, Pedro Fernández Díez, Universidad de Cantabria
- [2] Turbomáquinas, Ramiro Mége Thierry, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
- [3] <https://www.turbomachinerymag.com/centrifugal-vs-reciprocating-compressor>