



PONTIFICIA UNIVERSIDAD  
**CATOLICA**  
DE VALPARAISO



# Balance Termico del Compresor.

*Ensayo N°3*

*Laboratorio de Máquinas*  
*ICM 557-02*

## Integrantes

---

Alvaro Ignacio Jeldres Barrera  
Felipe Alberto Schiappacasse A.  
Matias Ignacio Opazo Almonacid

Profesor Ramiro Mege T.  
Fecha de Ensayo: 20/12/2018  
Fecha de Entrega: 27/12/2018

---

---

# Índice

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| Introducción                | 2  |
| Objetivos                   | 3  |
| Trabajo de Laboratorio      | 4  |
| Tablas de Valores Medidos   | 5  |
| Tabla de Valores Calculados | 8  |
| Gráficos y análisis         | 12 |
| Conclusión                  | 16 |
| Bibliografía                | 17 |

---

## Introducción

---

Mediante el siguiente ensayo se busca estudiar el comportamiento energético que se experimenta en un sistema de compresión de aire.

Buscaremos estudiar los requerimientos desde la entrada de energía en el motor, hasta la obtención del aire comprimido. Para ello calcularemos las pérdidas producidas y la compararemos con la energía eléctrica que le proveemos al motor.

---

## Objetivos

---

- a. Analizar como se distribuye la energía en el equipo,partiendo desde la energía eléctrica hasta la útil en el aire comprimido.

---

## Trabajo de Laboratorio

---

- a. Instalar y preparar los instrumentos para medir: temperaturas, potencia indicada y la eléctrica, tensión y corriente, flujos de aire y agua.
  - b. Poner en marcha el compresor, regular la presión de descarga a 7 [kp/cm<sup>2</sup>] y esperar un tiempo para que se estabilice su operación.
- Tomar las siguientes mediciones:
    - Presión de descarga [kp/cm<sup>2</sup>].
    - Velocidad del compresor [rpm].
    - Temperatura de aspiración y de descarga de ambos cilindros [°C].
    - Diagramas indicados para cada cilindro.
    - Temperatura del estanque de baja presión [°C].
    - Presión en el estanque de baja presión [cm<sub>ca</sub>].
    - Temperaturas de entrada y salida del agua de refrigeración [°C].
    - Tiempo en llenarse el recipiente de volumen conocido [s].
    - Tensión y corriente eléctrica [V] y [A] respectivamente.
    - Potencia eléctrica, método de los dos Wattmetros [kW].
  - Sin modificar la condiciones de operación, repetir tres veces las lecturas, a intervalos de 10 [min] aproximadamente. (La presión atmosférica [mmHg], se mide al inicio del ensayo).

## Tablas de Valores Medidos

| Motor                 |     |                |                |                |                |                |
|-----------------------|-----|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| pd                    | V   | I <sub>1</sub> | I <sub>2</sub> | I <sub>3</sub> | W <sub>1</sub> | W <sub>2</sub> |
| [kp/cm <sup>2</sup> ] | [V] | [A]            | [A]            | [A]            | [kW]           | [kW]           |
| 7,1                   | 377 | 16,4           | 16,2           | 17,2           | 3,4            | 6,6            |
| 7,2                   | 377 | 16,3           | 16,4           | 17,3           | 3,21           | 6,5            |
| 7,25                  | 373 | 16,3           | 16,6           | 17,2           | 3,22           | 6,56           |

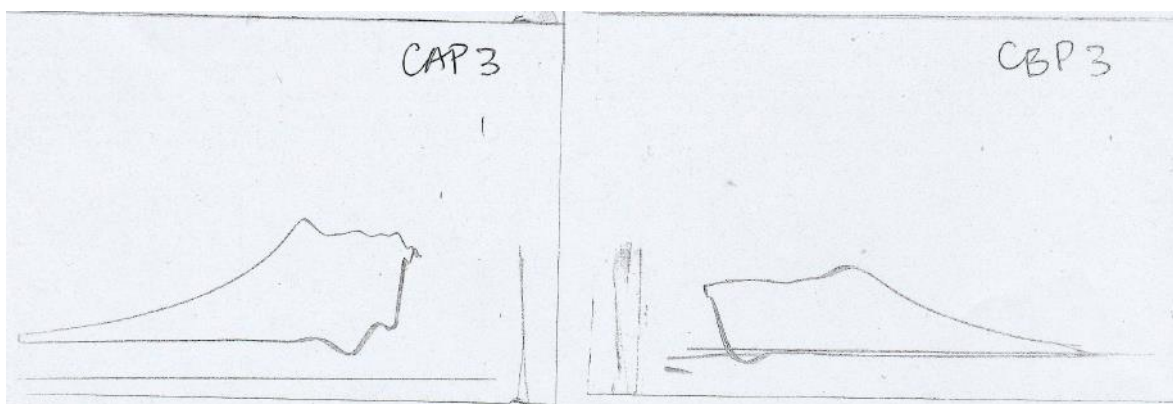
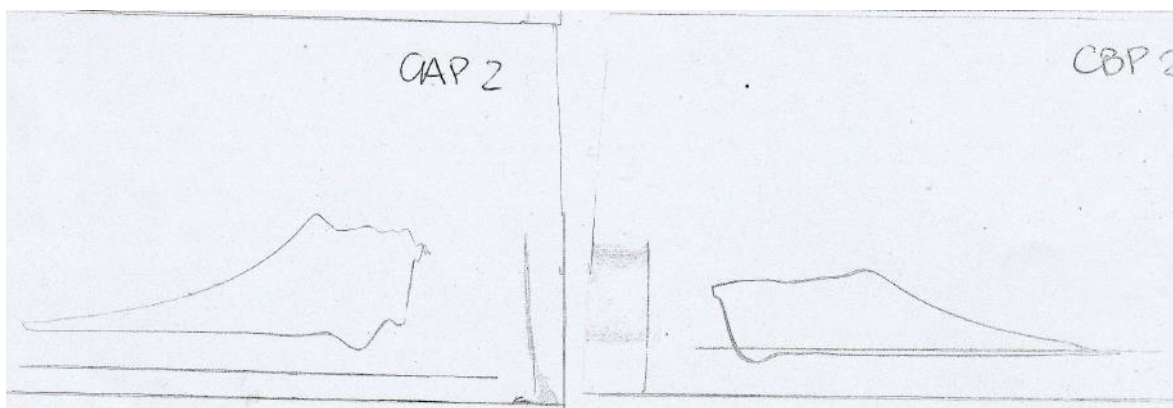
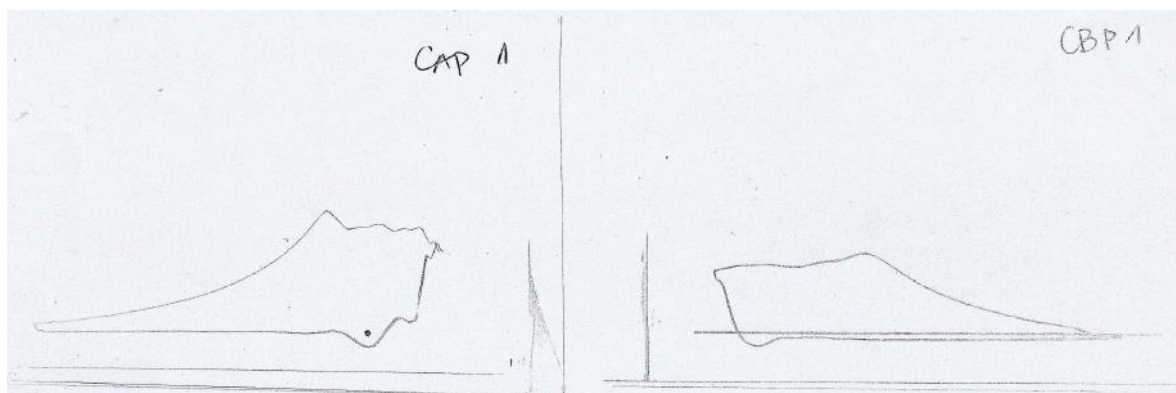
| Compresor             |       |             |      |      |      |
|-----------------------|-------|-------------|------|------|------|
| pd                    | n     | Temperatura |      |      |      |
|                       |       | EBP         | SBP  | EAP  | SAP  |
| [kp/cm <sup>2</sup> ] | [rpm] | [°C]        | [°C] | [°C] | [°C] |
| 7,1                   | 499   | 19          | 50   | 27   | 89   |
| 7,2                   | 499   | 19          | 50   | 27,5 | 92   |
| 7,25                  | 498,8 | 19          | 49   | 27,5 | 92   |

| Agua                  |             |      |        |
|-----------------------|-------------|------|--------|
| pd                    | Temperatura |      | tiempo |
|                       | te          | ts   | τ      |
| [kp/cm <sup>2</sup> ] | [°C]        | [°C] | [seg]  |
| 7,1                   | 20          | 27   | 78     |
| 7,2                   | 20          | 27   | 78     |
| 7,25                  | 20          | 27   | 78     |

| Estanque BP           |      |        |
|-----------------------|------|--------|
| pd                    | t.   | p      |
|                       | t    | H      |
| [kp/cm <sup>2</sup> ] | [°C] | [mmca] |
| 7,1                   | 34   | 520    |
| 7,2                   | 37   | 525    |
| 7,25                  | 38   | 532    |

| Atmosfera |
|-----------|
| Pa        |
| [mmHg]    |
| 758,7     |

Además, durante el ensayo obtuvimos los siguientes diagramas indicados, correspondientes a los cilindros de baja y alta presión:



Inicialmente, la idea principal era utilizar el *Indicador de Presión Mecánico* para medir el área y largo indicado de los diagramas, pero debido al mal estado en el que se encuentra el instrumento, utilizamos las herramientas de medición digital que nos ofrece el programa *Adobe Acrobat Reader* y obtuvimos los siguientes valores:

| pd<br>[kp/cm <sup>2</sup> ] | A <sub>DICBP</sub><br>[mm <sup>2</sup> ] | L <sub>DICBP</sub><br>[mm] | A <sub>DICAP</sub><br>[mm <sup>2</sup> ] | L <sub>DICAP</sub><br>[mm] |
|-----------------------------|--|----------------------------|--|----------------------------|
| 7,1                         | 571,99                                   | 70,56                      | 659,46                                   | 70,14                      |
| 7,2                         | 577,82                                   | 70,44                      | 666,61                                   | 69,91                      |
| 7,25                        | 581,58                                   | 70,08                      | 669,28                                   | 68,67                      |



---

## Tabla de Valores Calculados

---

Para obtener los datos necesarios para el análisis, utilizaremos las siguientes formulas:

Capacidad estanque de baja presión ( $V_{aire}$ ):

$$V_{aire} = 8.62 * 0.6 * S * T_a \sqrt{\frac{H}{T * P_a}}$$

V = Capacidad, caudal de aire libre [m<sup>3</sup>/h].

$\alpha = 0,6$  Coeficiente de caudal del diafragma.

S = Sección del orificio del diafragma en [cm<sup>2</sup>].

T<sub>a</sub> = Temperatura absoluta de aspiración del compresor [K].

T = Temperatura absoluta del estanque de baja presión [K].

H = Presión en el manómetro diferencial [cm<sub>agua</sub>].

P<sub>a</sub> = Presión barométrica [cm<sub>agua</sub>].

Presión media indicada ( $Pmi_{CXP}$ ):

$$Pmi_{CXP} = \frac{A_{DICXP}}{L_{DICXP}} * K_{Resorte\ CXP}$$

A<sub>DICXP</sub> = Área diagrama indicado del cilindro que corresponda [cm<sup>2</sup>].

L<sub>DICXP</sub> = Largo Diagrama indicado del cilindro que corresponda [cm].

K<sub>DICXP</sub> = Constante resorte indicador de diagramas del cilindro que corresponda [kp/cm<sup>2</sup>].

Potencia Indicada ( $N_{i_{CXP}}$ ):

$$N_{i_{CXP}} = \frac{P_{mi_{CXP}} * A_{CXP} * L * n * 9,80665}{60 * 1000} [kW]$$

$A_{CXP}$  = Área del cilindro que corresponda [ $cm^2$ ].

$L$  = Carrera del compresor [m].

$n$  = Velocidad de rotación [rpm].

Corriente media (I):

$$I = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3} [A]$$

Potencia Eléctrica ( $N_{elec}$ ):

$$N_{elec} = W_1 + W_2 [kW]$$

Caudal de Agua ( $V_{agua}$ ):

$$V_{agua} = \frac{10}{\tau} * 60 \left[ \frac{l}{min} \right]$$

Calor transferido (Q):

$$Q = \rho * V_{agua} * c * (t_s - t_e)$$

Potencia eje motor ( $N_{motor}$ ):

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

Potencia eje compresor ( $N_{compresor}$ ):

$$N_{compresor} = N_{motor} * \eta_{transmisión} [kW]$$

Pérdidas motor ( $N_{\text{pérd. motor}}$ ):

$$N_{\text{perd. motor}} = N_{\text{elec}} - N_{\text{motor}} [kW]$$

Perdidas mecánicas ( $N_{\text{perd. mec}}$ ):

$$N_{\text{perd.mec}} = N_{\text{compresor}} - N_i [kW]$$

Perdidas de transmisión ( $T_{\text{transmisión}}$ ):

$$N_{\text{trasnmición}} = N_{\text{motor}} - N_{\text{compresor}} [kW]$$

Calor de refrigeración ( $T_{\text{otal}}$ ):

$$Q_{\text{total}} = \frac{m_{\text{agua}} * c * (t_s - t_e)}{1000} [kW]$$

Flujo másico de agua ( $m_{\text{agua}}$ ):

$$m_{\text{agua}} = \frac{V_{\text{agua}} * \rho_{\text{agua}}}{60} \left[ \frac{kg}{s} \right]$$

Calor sistema refrigeración intermedia ( $Q_{\text{SRI}}$ ):

$$Q_{\text{SRI}} = \frac{m_{\text{aire}} * C_p (t_{\text{SBP}} - t_{\text{EAP}})}{1000} [kW]$$

Flujo másico de aire ( $m_{\text{aire}}$ ):

$$m_{\text{aire}} = \frac{V * \rho_{\text{aire}}}{3600} \left[ \frac{kg}{s} \right]$$

Calor rechazado por cilindros ( $Q_{\text{Cil}}$ ):

$$Q_{\text{Cil}} = Q_{\text{total}} - Q_{\text{SRI}} [kW]$$

Potencia Útil del aire ( $N_{U \text{ Aire}}$ ):

$$N_{U \text{ Aire}} = \frac{m_{\text{aire}} (C_p - C_v) (t_{\text{SAP}} - t_{\text{SBP}})}{1000} [kW]$$

Rendimiento mecánico ( $\eta_{mec}$ ):

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

Rendimiento sistema de compresión ( $\eta_{gl\ sc}$ ):

$$\eta_{gl\ sc} = \frac{N_{U\ Aire}}{N_{Elec}} * 100 [\%]$$

Rendimiento del compresor ( $\eta_{compresor}$ ):

$$\eta_{compresor} = \frac{N_{U\ Aire}}{N_{compresor}} * 100$$

Resumen:

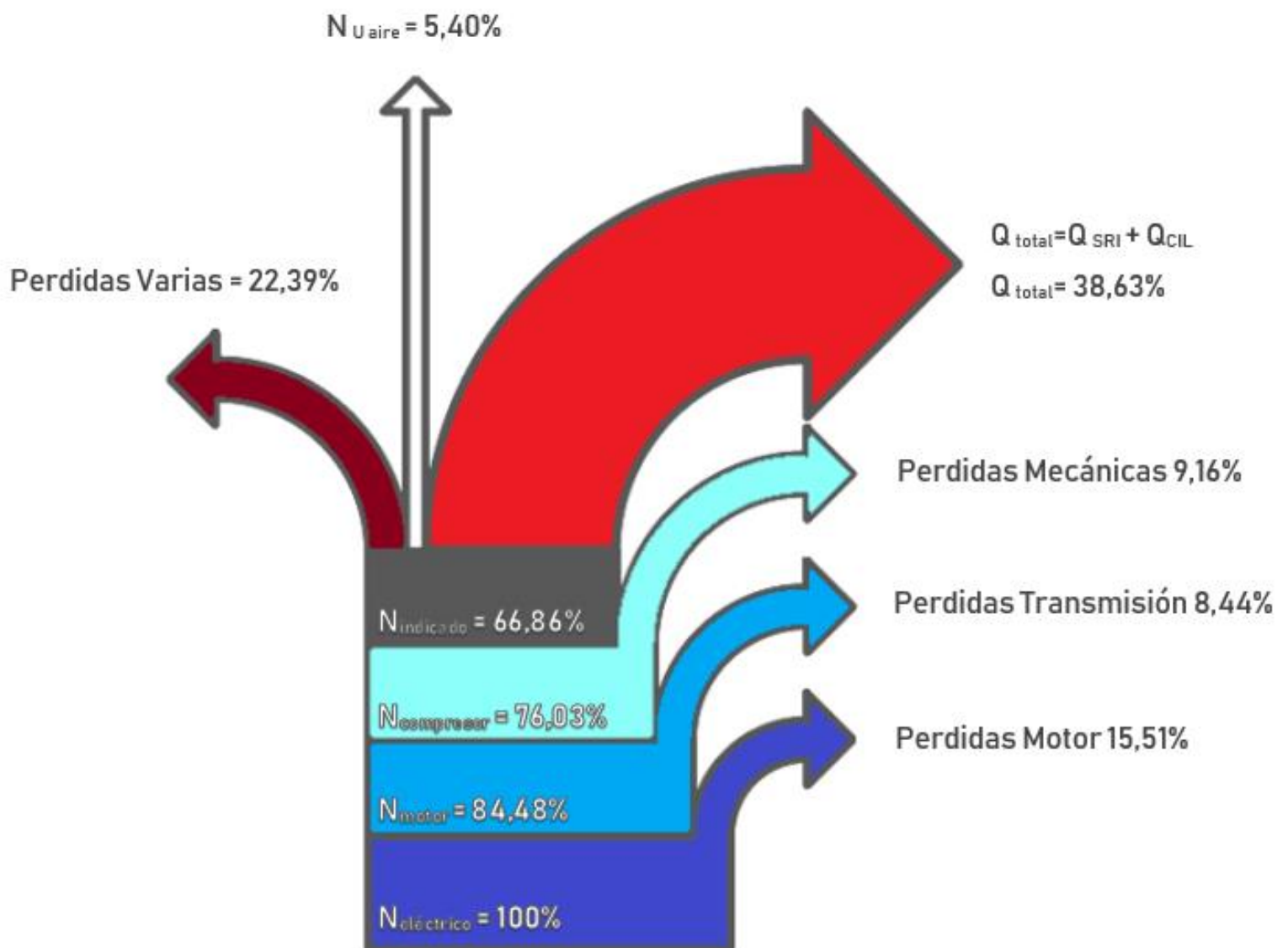
| N <sub>elec</sub><br>[kW] | $\eta_{motor}$<br>[%] | N <sub>motor</sub><br>[kW] | N <sub>perd. motor</sub><br>[kW] | N <sub>compresor</sub><br>[kW] | N <sub>transmisión</sub><br>[kW] | N <sub>iCBP</sub><br>[kW] | N <sub>iCAP</sub><br>[kW] | N <sub>i</sub><br>[kW] | N <sub>perd. Mec</sub><br>[kW] | $\eta_{mecanico}$<br>[%] | $\eta_{transmision}$<br>[%] | Q <sub>Total</sub><br>[kW] | Q <sub>SRI</sub><br>[kW] | Q <sub>cil</sub><br>[kW] | N <sub>U aire</sub><br>[kW] | $\eta_{glSC}$<br>[%] | $\eta_{compr}$<br>[%] |
|---------------------------|-----------------------|----------------------------|----------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------|--------------------------------|--------------------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|----------------------|-----------------------|
| 10                        | 84,4690               | 8,4469                     | 1,5531                           | 7,6022                         | 0,8447                           | 3,2515                    | 3,1578                    | 6,4093                 | 1,1929                         | 84,3085                  | 90                          | 3,7513                     | 0,5795                   | 3,1717                   | 0,5037                      | 5,0370               | 6,6257                |
| 9,71                      | 84,4840               | 8,2034                     | 1,5066                           | 7,3831                         | 0,8203                           | 3,2902                    | 3,2026                    | 6,4928                 | 0,8903                         | 87,9417                  | 90                          | 3,7513                     | 0,5669                   | 3,1844                   | 0,5253                      | 5,4094               | 7,1143                |
| 9,78                      | 84,4804               | 8,2622                     | 1,5178                           | 7,4360                         | 0,8262                           | 3,3273                    | 3,2722                    | 6,5994                 | 0,8365                         | 88,7504                  | 90                          | 3,7513                     | 0,5444                   | 3,2068                   | 0,5279                      | 5,3977               | 7,0992                |

| N <sub>elec</sub><br>[%] | N <sub>motor</sub><br>[%] | N <sub>perd. motor</sub><br>[%] | N <sub>transmisión</sub><br>[%] | N <sub>compresor</sub><br>[%] | N <sub>iCBP</sub><br>[%] | N <sub>iCAP</sub><br>[%] | N <sub>i</sub><br>[%] | N <sub>perd. Mec</sub><br>[%] | Q <sub>Total</sub><br>[%] | Q <sub>SRI</sub><br>[%] | Q <sub>cil</sub><br>[%] | N <sub>U aire</sub><br>[%] |
|--------------------------|---------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|-------------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------|
| 100                      | 84,4690                   | 15,5310                         | 8,4469                          | 76,0221                       | 32,5147                  | 31,5784                  | 64,0931               | 11,9290                       | 37,5128                   | 5,7955                  | 31,7174                 | 5,0370                     |
| 100                      | 84,4840                   | 15,5160                         | 8,4484                          | 76,0356                       | 33,8847                  | 32,9823                  | 66,8670               | 9,1686                        | 38,6332                   | 5,8384                  | 32,7948                 | 5,4094                     |
| 100                      | 84,4804                   | 15,5196                         | 8,4480                          | 76,0324                       | 34,0214                  | 33,4576                  | 67,4790               | 8,5533                        | 38,3567                   | 5,5668                  | 32,7899                 | 5,3977                     |

Para el análisis utilizaremos la segunda medición, ya que en esta es en donde obtenemos el mayor valor para N<sub>U aire</sub>.

## Gráficos y análisis

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



---

**b. ¿El rendimiento global del sistema de compresión que comentario le sugiere?**

El rendimiento global nos habla acerca del comportamiento que existe desde la entrada de energía en el compresor, hasta la obtención del aire comprimido. Este valor es pequeño, así como lo observamos durante el ensayo, donde alcanzamos un 5,40%, lo que nos indica que gran parte de la energía que entregamos al motor eléctrico que mueve el compresor, se utiliza para sostener el proceso que conlleva comprimir aire. En conclusión, el sistema de compresión de aire es ineficiente.

**c. ¿El rendimiento global de compresor que comentario le sugiere?**

En sí, este valor nos indica las pérdidas mecánicas que hay en el compresor. Este rendimiento alcanza un valor de 7,11%, lo que se considera un valor bajo, lo que nos sugiere una apropiada lubricación de las partes mecánicas con movimiento relativo; además, como este rendimiento se define como la relación entre la potencia útil del compresor y la potencia que llega al eje del compresor, si pudiéramos saber con exactitud el valor de la potencia perdida en el sistema de transmisión, nuestro rendimiento de compresión podría sufrir leves cambios en su valor.

---

**d. ¿Qué efecto produce el rendimiento considerado para la transmisión?**

Como inicialmente no podemos cuantificar el torque en el eje del compresor, implementamos un valor de rendimiento en el sistema de transmisión para así poder estimar las pérdidas que se producen debido al roce de la polea y correa, sin dejar atrás que utilizamos una correa tipo V, la cual va montada en una polea con ranura (motor) y en una polea plana (compresor). Si pudiéramos medir el torque, sabríamos de manera exacta cuanto es la cantidad de potencia que se pierde en este sistema. Como hablamos de balance térmico, tener esta información nos permitiría estudiar esto y buscar una alternativa que nos disminuya la perdida, con el fin de aprovechar de mejor manera la energía que le entregamos inicialmente al motor eléctrico.

**e. ¿Cómo sugiere Ud. determinar el rendimiento de la transmisión?**

Un método por el cual se podría determinar dicho rendimiento, sería el empleo de un torquímetro, o sea, una herramienta de precisión que nos permite conocer el torque aplicado, mediante la medición de la deformación angular del eje; una vez tenemos conocimiento de este valor, además de la ya medida velocidad de rotación, estamos en condiciones de calcular la potencia del eje del compresor, la que podríamos comparar con la potencia del eje del motor y así saber el rendimiento de la transmisión.

---

**f. ¿Qué comentario le sugiere el calor total de refrigeración y sus componentes?**

Según se nos ha indicado con anterioridad, y como pudimos corroborar con este ensayo, la refrigeración cumple un rol importante en el proceso de compresión, siendo por este concepto, donde se presentan las mayores pérdidas de potencia.

Las pérdidas por calor debiesen bordear el 50%, sin embargo, en este ensayo, estos valores son menores al 40%, lo que se explica debido a que la temperatura de entrada al compresor, es decir, la temperatura ambiente (19°C), era menor a la temperatura de entrada del agua (20°C), por lo tanto, el calor extraído por el agua es más bajo de lo esperado, no pudiendo realizar la refrigeración de una manera eficiente.

Cabe señalar que, de no ser por la refrigeración, todo el proceso sería imposible de llevar a cabo, pues las partes mecánicas del compresor se someterían a un calor superior al que sus materiales pueden soportar, generando graves fallas en el sistema.

**g. ¿Dónde está incluido el calor retirado por el aceite?**

Durante la operación, las funciones que desempeña el aceite lubricante son múltiples. Una de ellas es reducir fricción y desgaste, a la misma vez que disipa el calor producido por este mismo efecto.

Esto nos lleva a decir que el sistema pierde parte de la energía suministrada al inicio para poder eliminar este calor.

Como se puede ver en el diagrama Sankey, también se considera un porcentaje de pérdidas varias. Según lo comentado por el profesor, previo a la realización del ensayo, este valor considera el calor que se pierde por convección desde el compresor y el calor que arrastra el aceite producto de la fricción y desgaste que este mismo intenta reducir.



---

## Conclusión

---

Luego de analizar los datos obtenidos, y sin considerar que teníamos un conocimiento aproximado de los valores esperados para los cálculos, podemos decir que un sistema de compresión, visto desde el punto energético, es bastante ineficiente, lo que también nos hace darnos cuenta de los requerimientos que conlleva un proceso de estas características. Además, pudimos apreciar y cuantificar las pérdidas producidas, lo que nos ayuda a saber y entender como es el funcionamiento adecuado para obtener aire comprimido en un compresor reciproco.

---

## Bibliografía

---

“Turbomáquinas” – *Ramiro Mège*.

“Apuntes Ensayo N°3” – *Ramiro Mège*.