

Informe 05 Laboratorio de máquinas:

Ensayo Compresor Recíproco

Felipe Eduardo Trujillo Preuss
Escuela de Ingeniería Mecánica
felipe.trujillo.p@mail.pucv.cl

30 de Octubre de 2020

1. Introducción

En este informe se ejecuta un análisis exhaustivo del comportamiento de un compresor recíproco ante la variación de su presión de descarga.

A partir de los instrumentos disponibles, se miden magnitudes referidas a las temperaturas de aspiración y descarga para cada cilindro (alta y baja presión), temperatura en el estanque de baja presión, temperatura de ingreso y salida para el agua de refrigeración acoplado al tiempo que demora en completar 10 litros y variables del motor eléctrico (tensión, corrientes, potencia).

Con los datos disponibles se procede a calcular parámetros como el caudal de agua y aire libre, calor transferido en la refrigeración, presiones nominales, rendimiento volumétrico, potencia indicada y relación de compresión de cada cilindro. Aquellos mencionados se comparan con respecto a la presión de descarga correspondiente, con el objetivo de analizar el comportamiento a distintas condiciones de operación y establecer correlaciones.



Figura 1. Compresor recíproco

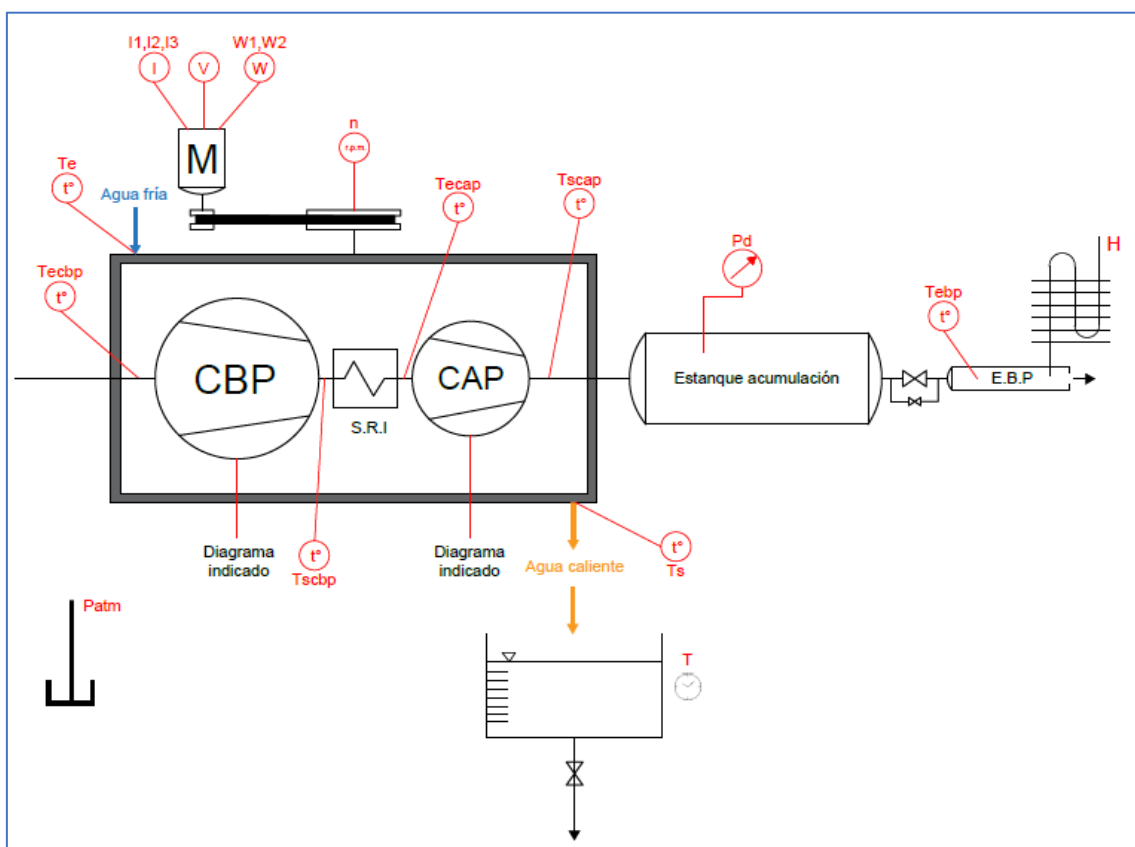


Figura 2. Instalación de compresor recíproco

2. Tabla de valores medidos

| DATOS MEDIDOS | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|-----------------------|-------|-------------|------|------|------|-------|--------|-------|------|------|-------|------|------|------|------|------|--------|
| | Compresor | | | | | | E. BP | | Agua | | | MOTOR | | | | | | At |
| | Pd | n | Temperatura | | | | t. | p | Temp. | | tie. | V | I1 | I2 | I3 | W1 | W2 | Patm. |
| | | | EBP | SBP | EAP | SAP | t | H | tE | ts | τ | | | | | | | |
| | [kp/cm ²] | [rpm] | [°C] | [°C] | [°C] | [°C] | [°C] | [mmca] | [°C] | [°C] | [s] | [V] | [A] | [A] | [A] | [kW] | [kW] | [mmHg] |
| 1 | 7,0 | 499,3 | 23 | 48 | 27 | 89 | 39 | 514 | 18 | 26,5 | 78 | 375 | 17,2 | 15,9 | 16 | 6,53 | 3,28 | 760,1 |
| 2 | 6,0 | 498,7 | 23 | 49 | 27 | 87 | 40 | 544 | 19 | 26,5 | 75 | 375 | 16,5 | 15,3 | 15,4 | 6,53 | 3,06 | 760,1 |
| 3 | 4,9 | 500,8 | 23 | 49 | 27 | 77 | 41 | 532 | 19 | 26,5 | 77 | 376 | 15,2 | 13,9 | 13,8 | 5,73 | 2,7 | 760,1 |
| 4 | 3,9 | 503,0 | 23 | 50 | 27 | 67 | 40 | 552 | 19 | 26,5 | 76 | 376 | 14,1 | 13,2 | 13,1 | 5,33 | 2,6 | 760,1 |
| 5 | 2,8 | 503,4 | 24 | 56 | 27 | 56 | 39 | 562 | 19 | 26,5 | 76 | 376 | 13,2 | 12,6 | 12,1 | 5 | 2,4 | 760,1 |
| 6 | 1,8 | 505,2 | 24 | 56 | 27 | 42 | 37 | 576 | 19 | 26,5 | 74 | 376 | 11,9 | 11,4 | 11 | 4,69 | 2,12 | 760,1 |
| 7 | 1,0 | 507,0 | 23 | 54 | 27 | 31 | 39 | 584 | 19 | 26,5 | 77 | 376 | 10,4 | 9,9 | 9,5 | 4,1 | 1,64 | 760,1 |

Tabla 1. Valores medidos en el ensayo

3. Fórmulas

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

ESTANQUE DE BAJA PRESIÓN

\dot{V} : Capacidad, caudal de aire libre [m^3/h].

α : 0,600 (coeficiente de caudal del diafragma).

S : Sección del orificio del diafragma, el diámetro del orificio es 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 [cm_{agua}].

P_a : Presión barométrica [cm_{agua}].

$$Clc = \frac{\pi \cdot D_{CBP}^2 \cdot L \cdot z}{4}$$

Clc : Cilindrada [m^3]

D_{CBP} : Diámetro cilindro de baja presión [m]

L : carrera [m]

$$Dl = Clc \cdot n$$

Dl : Desplazamiento por minuto [m^3/min]

n : Velocidad rotacional [rpm]

$$\eta_r = \frac{V}{60 \cdot Dl} \cdot 100$$

η_r : Rendimiento volumétrico real

$$\eta_{VC} = \left(1 - C \left(r^{\left(\frac{1}{k} \right)} - 1 \right) \right) \cdot 100$$

η_{VC} : Rendimiento volumétrico convencional

r : Relación de compresión [-]

$$C = \frac{\text{Volumen espacio Muerto}_{CBP}}{Cl}$$

C : Porcentaje de espacio muerto [-]

$$\eta_{VCI} = \frac{l_{\text{Capacidad}}}{l_{Cl}} \cdot 100$$

η_{VCI} : Rendimiento volumétrico convencional indicado

$$P_{mi} = \frac{A_{DICXP}}{L_{DICXP}} \cdot K_{\text{Resorte CXP}}$$

P_{mi} : Presión media indicada [kp/cm^2]

A_{DICXP} : Área Diagrama Indicado del cilindro que corresponda [cm^2]

L_{DICXP} : Largo diagrama indicado del cilindro que corresponda [cm]

K_{DICXP} : Constante resorte indicador de diagramas del cilindro que corresponda.
[(Kp/cm^2)/(mm)]

$$N_{iCXP} = \frac{P_{miCXP} \cdot A_{CXP} \cdot L \cdot n \cdot 9,80665}{60 \cdot 1000}$$

N_{iCXP} : Potencia indicada [kW]

A_{CXP} : Área del cilindro que corresponda [cm^2]

L : Carrera del compresor [m]

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

I : Corriente media [A]

$$N_{\text{Elec}} = W_1 + W_2$$

N_{Elec} : Potencia eléctrica [kW]

$$V_{\text{agua}} = \frac{10}{\tau} \cdot 60$$

V_{agua} : Caudal de agua $\left[\frac{l}{min}\right]$

$$Q = \rho \cdot V_{\text{agua}} \cdot c \cdot (t_s - t_E)$$

Q : Caudal de agua [kcal/min]

ρ : Densidad del agua [kg/m³]

c : Calor específico del agua [kcal/kg.K] o [J/kg.K]

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

Tabla 2. Características del compresor

4. Tabla de valores calculados

| VALORES CALCULADOS | | | | | | | | |
|--------------------|---------|---------|----------|-------------|-------------|--------------|---------|---------|
| Pd | Cl | DI | V | η_{VR} | η_{VC} | η_{VCI} | PMICBP | PMICAP |
| kp/cm2 | m3 | m3 | m3/h | % | % | % | kp/cm2 | kp/cm2 |
| 7 | 0,00295 | 1,47330 | 73,47798 | 83,12148 | 90,12547 | 84,36326 | 2,35909 | 5,05909 |
| 6 | 0,00295 | 1,47153 | 75,47102 | 85,47882 | 91,17414 | 86,35491 | 2,23045 | 4,64727 |
| 4,9 | 0,00295 | 1,47773 | 74,51504 | 84,04217 | 88,83940 | 85,24314 | 2,25182 | 4,06364 |
| 3,9 | 0,00295 | 1,48422 | 76,02393 | 85,36896 | 91,48009 | 86,21558 | 2,14682 | 3,37182 |
| 2,8 | 0,00295 | 1,48540 | 77,09186 | 86,49938 | 89,92942 | 87,02962 | 2,22409 | 2,42182 |
| 1,8 | 0,00295 | 1,49071 | 78,29753 | 87,53916 | 92,60479 | 88,34349 | 2,15727 | 1,28545 |
| 1 | 0,00295 | 1,49603 | 78,32169 | 87,25529 | 91,36373 | 88,31671 | 2,00227 | 0,46091 |

Tabla 3. Valores calculados en el ensayo, parte 1

| VALORES CALCULADOS | | | | | | | | |
|--------------------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|----------|
| ADICBP | ADICAP | NiCBP | NiCAP | Ni | I | Nelec | Vagua | Q |
| m2 | m2 | kW | kW | kW | A | kW | l/min | kcal/min |
| 0,00052 | 0,00056 | 3,09893 | 4,98684 | 8,08577 | 16,36667 | 9,81000 | 7,69231 | 65,38462 |
| 0,00049 | 0,00051 | 3,15974 | 4,51733 | 7,67707 | 15,73333 | 9,59000 | 8,00000 | 64,00000 |
| 0,00050 | 0,00045 | 3,08704 | 3,93285 | 7,01989 | 14,30000 | 8,43000 | 7,79221 | 62,33766 |
| 0,00047 | 0,00037 | 3,08366 | 3,33660 | 6,42026 | 13,46667 | 7,93000 | 7,89474 | 63,15789 |
| 0,00049 | 0,00027 | 3,16400 | 2,69008 | 5,85408 | 12,63333 | 7,40000 | 7,89474 | 63,15789 |
| 0,00047 | 0,00014 | 3,09902 | 2,19511 | 5,29413 | 11,43333 | 6,81000 | 8,10811 | 64,86486 |
| 0,00044 | 0,00005 | 2,95014 | 2,02517 | 4,97531 | 9,93333 | 5,74000 | 7,79221 | 62,33766 |

Tabla 4. Valores calculados en el ensayo, parte 4

5. Desarrollo y Gráficos

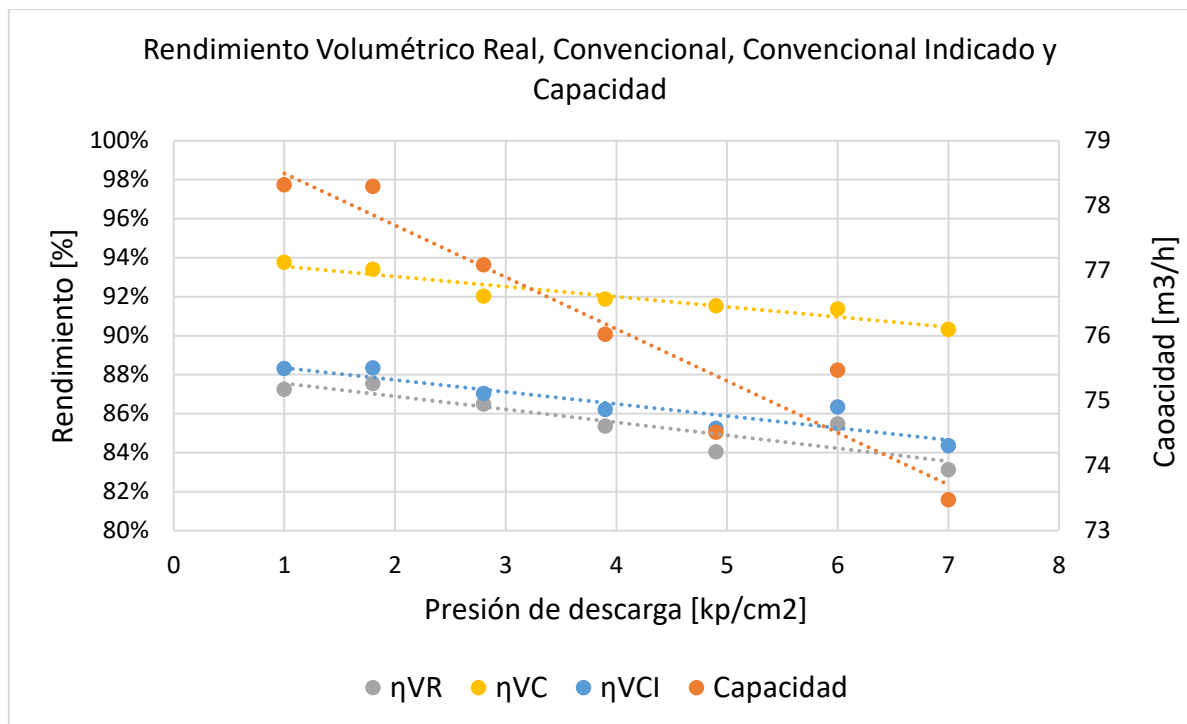


Gráfico 1. Curvas de rendimientos volumétricos y capacidad

[5.1a] ¿La forma de las curvas es la correcta?

Los rendimientos indicados presentan un comportamiento acorde, correspondiente a su decremento a medida que aumenta la presión de descarga. El rendimiento de mayor magnitud es efectivamente el convencional, debido a que no considera roce mecánico, pérdidas de carga, entre otras irreversibilidades, constituyendo el cálculo más teórico. Por otra parte, el rendimiento real es el menor de todos, quedando el rendimiento convencional en medio, ligeramente superior al real, presentando una tendencia y ordenamiento de magnitud correcta.

La presión de descarga y capacidad debieran tener una relación inversamente proporcional, vale decir, con el incremento de la presión la capacidad disminuye, comportamiento que se cumple en el gráfico.

Por el contrario, la relación entre la capacidad y el rendimiento volumétrico es de proporcionalidad directa, vale decir, al decrementar la capacidad efectivamente disminuye el rendimiento.

[5.1b] ¿Los valores del rendimiento volumétrico real están en el rango que le corresponde?

El rendimiento volumétrico real suele oscilar entre 75% y 85%. Ahora bien, se aprecia que los datos calculados superan ligeramente el rango estipulado situándose entre un 83,1% y 87,5% en magnitud.

[5.1c] ¿Cómo explica las diferencias entre el rendimiento volumétrico real y los otros rendimientos?

Para calcular el rendimiento volumétrico real se consideran la mayor cantidad de pérdidas del compresor, asociadas al paso del fluido por los diversos procesos, ya que se mide a partir de los parámetros de salida y la capacidad.

En cambio, los otros dos rendimientos no consideran dichas pérdidas, lo que eleva sus magnitudes considerablemente y deja en evidencia la notable diferencia en el gráfico. Adicionalmente, al rendimiento convencional se le efectúan consideraciones que simplifican su medición y lo constituyen como el cálculo más teórico posible.

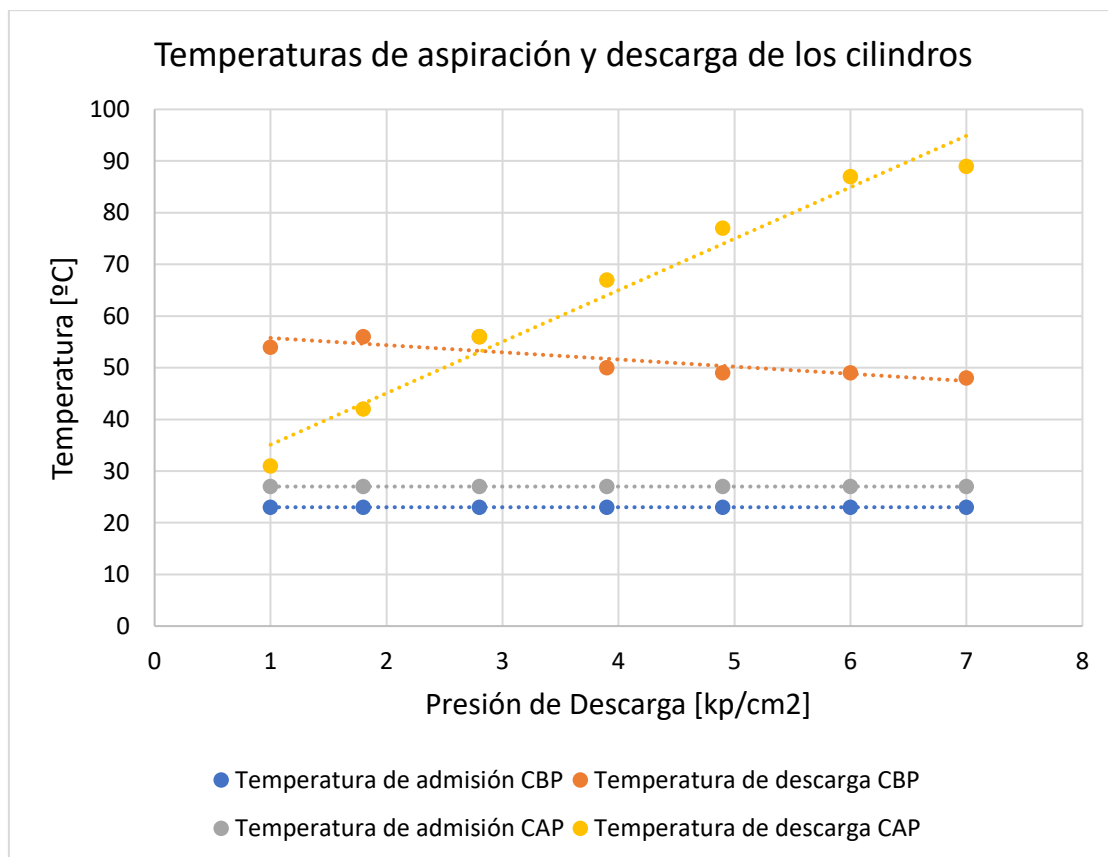


Gráfico 2. Curvas de temperaturas de aspiración y descarga

[5.2a] ¿La posición relativa de las curvas es la correcta? Si es necesario explique.

Efectivamente, ya que las temperaturas de descarga se encuentran superiores en magnitud respecto a las temperaturas de aspiración. Esto se debe a que el proceso de compresión de aire conlleva al aumento de su temperatura.

La temperatura de admisión del CBP corresponde a la temperatura ambiente y la de admisión del CAP es bastante similar, debido al sistema de refrigeración intermedia.

La mayor temperatura de todas corresponde a la de descarga del CAP, ya que se alcanza el valor de presión más elevado. Ahora bien, la intersección entre esta temperatura y la de descarga del CBP se produce a una presión de aproximadamente 2,8 [kp/cm²]. Este comportamiento se debe a...

[5.2b] ¿Los valores están en el rango que le corresponde?

Si, ya que antes del proceso de compresión se presentan las temperaturas similares a la temperatura ambiente y posteriormente a dicho proceso se encuentran temperaturas superiores. Adicionalmente, cuando al aire sale del CBP, se dirige a un sistema de refrigeración intermedia, donde se disminuye su temperatura, previamente al ingreso hacia el CAP, donde posteriormente la temperatura aumenta producto de la compresión.

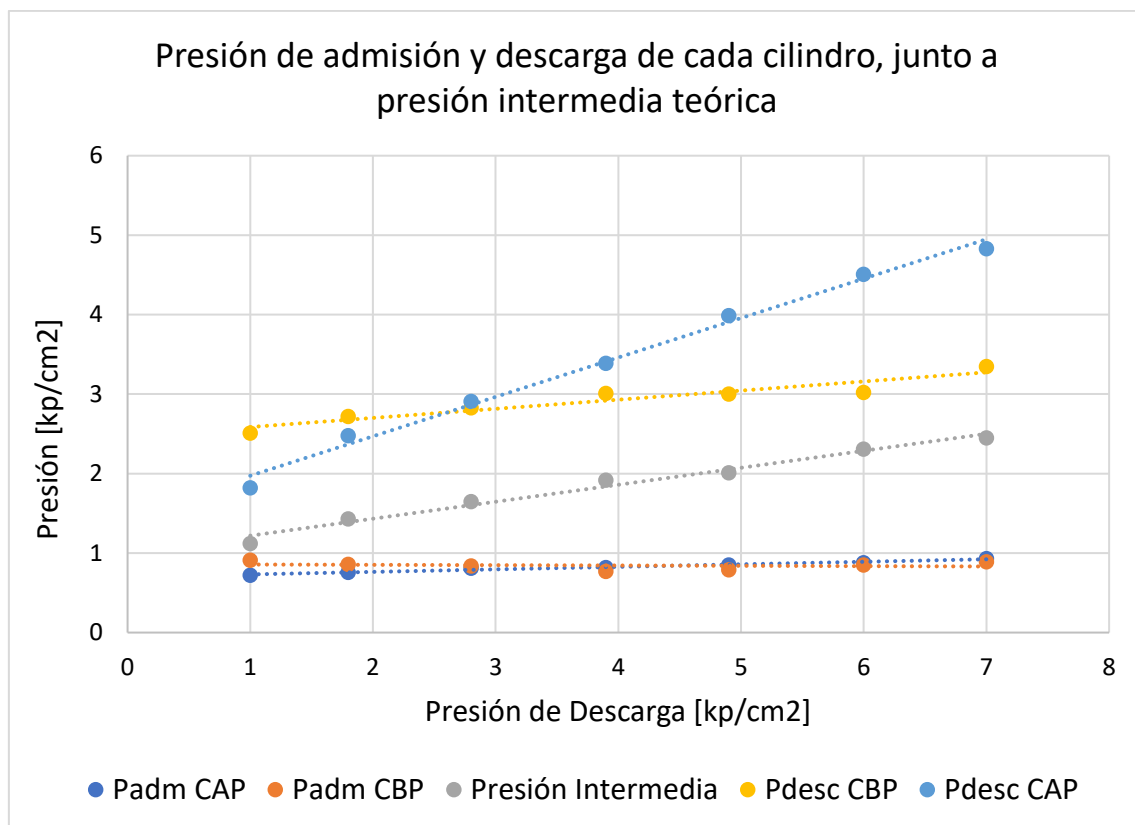


Gráfico 3. Curvas de presiones de admisión y descarga de cada cilindro

[5.3a] ¿La posición relativa de las curvas es la correcta? Si es necesario explique.

Efectivamente. La presión de aspiración del CBP tiene una magnitud un poco menor a la presión atmosférica, debido a la generación de succión (vacío). Posteriormente, en el mismo cilindro, la presión de descarga es superior, validando la primera etapa de compresión.

En el CAP, la presión de aspiración es menor a la presión de descarga del CBP, debido a las pérdidas de carga producidas en el sistema de refrigeración intermedio y caídas de presión en el flujo. Con respecto a la descarga en este cilindro, presenta los máximos valores alcanzados.

La presión intermedia teórica debería mantenerse casi constante, ya que teóricamente la relación de compresión entre ambos cilindros debería ser constante, pero no se cumple en los datos calculados.

[5.3b] ¿Los valores están en el rango que le corresponde?

En general, sí. Ahora bien, los valores de presión de descarga del cilindro de alta presión se desvían del rango. Este comportamiento puede explicarse por las mediciones manuales de las presiones en la salida del estanque de alta presión obtenidas a partir de los diagramas indicados, induciendo errores.

Dejando aquello de lado, las otras curvas poseen un correcto comportamiento, ya que la presión en la descarga del CBP seguida de la presión de aspiración del CAP poseen valores similares a la presión intermedia teórica y la presión de admisión del CBP es ligeramente menor a la atmosférica.

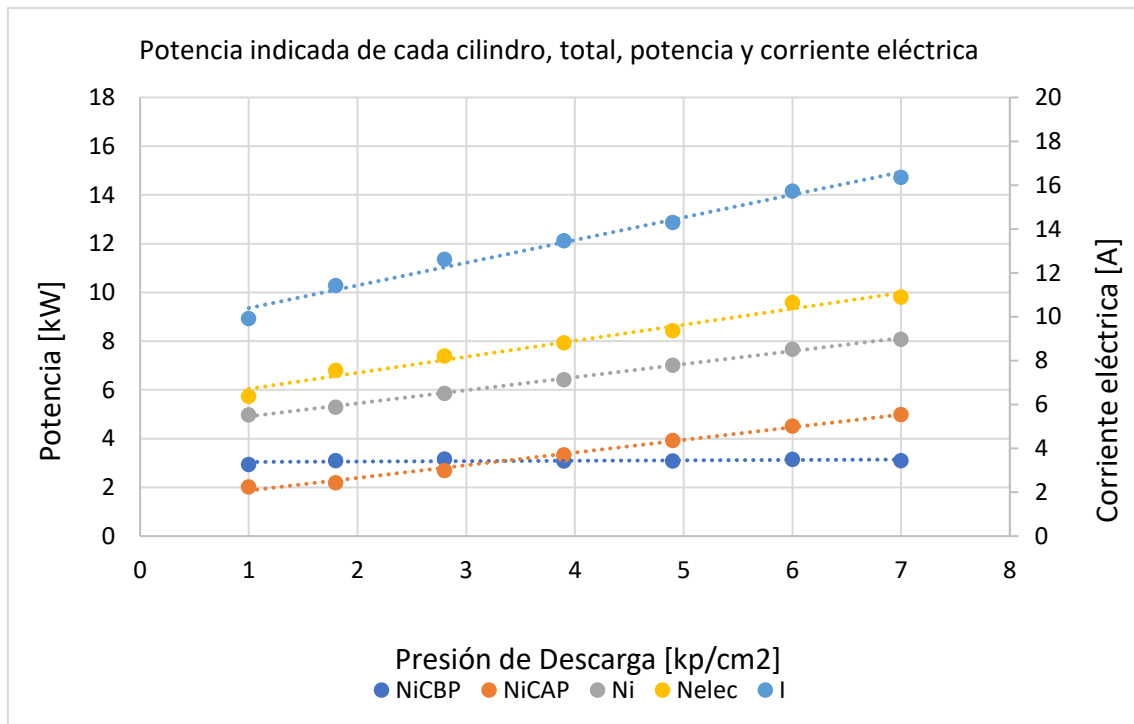


Gráfico 4. Curvas de potencias y corriente eléctrica

[5.4a] ¿La posición relativa de las curvas es la correcta? Si es necesario explique.

Con respecto a las potencias indicadas, la del CBP casi no posee variación, en cambio, para el CAP la potencia incrementa progresivamente. Estas variables son dependientes del área del diagrama indicado y existe una correlación directa entre el comportamiento de estas curvas y sus respectivos diagramas. La suma de ambas potencias indicadas resulta en una curva de comportamiento similar a la del CAP.

En general, la potencia eléctrica crece a medida que aumentan las exigencias del sistema asociado a su sollicitación, el motor eleva las condiciones de operación conllevando a una mayor potencia requerida. A su vez, incrementa el consumo y la corriente eléctrica que se encuentra circulando por el motor.

Efectivamente se comprueba que el comportamiento es el correcto.

[5.4b] ¿Los valores están en el rango que le corresponde?

Si, ya que la potencia indicada es menor que la potencia eléctrica que suministra el motor. La corriente y potencia eléctrica presentan sus magnitudes más altas a las presiones de descarga superiores, lo cual constituye un comportamiento correcto.

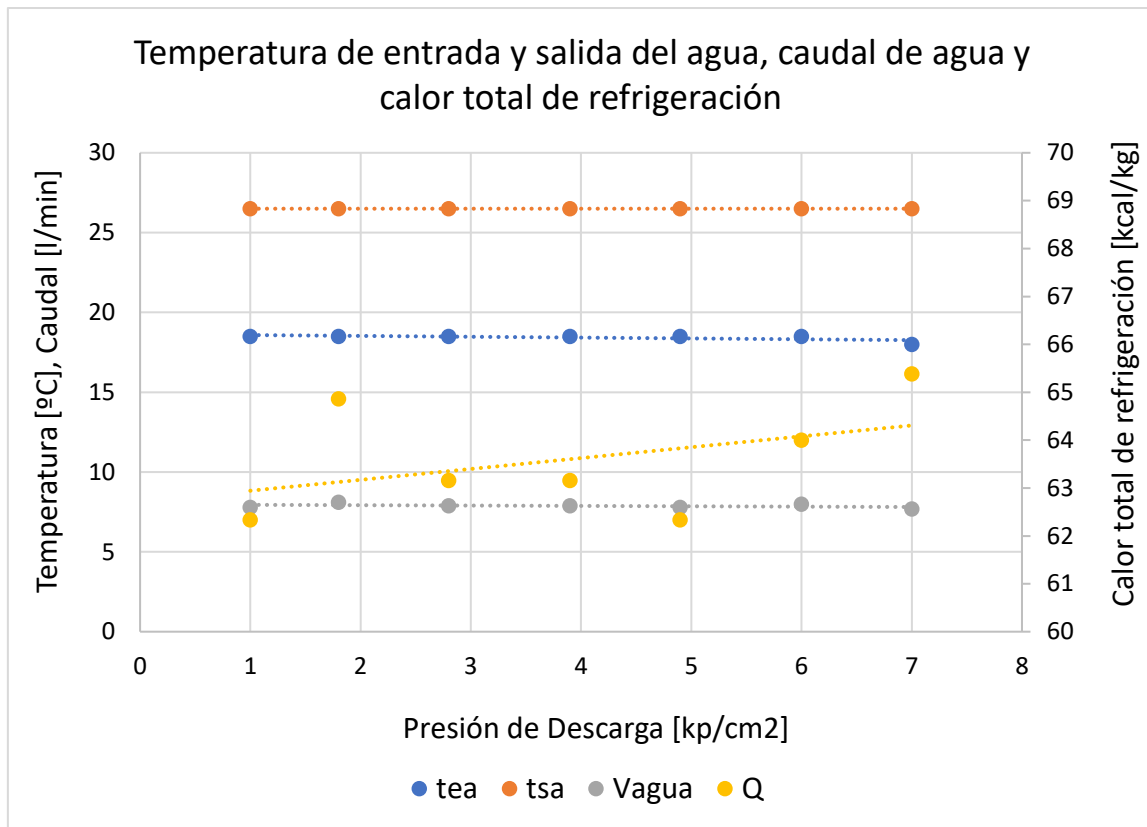


Gráfico 5. Curvas de temperaturas del agua, caudal y calor

[5.5a] ¿La posición relativa de las curvas es la correcta? Si es necesario explique.

Las curvas de temperatura poseen una tendencia relativamente constante, comportamiento acorde a lo esperado. Respecto al caudal de agua, se justifica su comportamiento constante por su función de retiro de calor a medida que se genera en el sistema.

El calor generado depende de la densidad y el calor específico del agua, los cuales para este ensayo se consideraron constantes. Se aprecian ciertas desviaciones de los valores entre sí, no obstante, al notar la escala de los datos se puede afirmar que la diferencia encontrada no es considerable.

[5.5b] ¿Los valores están en el rango que le corresponde?

La temperatura de salida del estanque siempre es mayor a la entrada, considerando que el agua absorbe el calor generado durante la compresión del aire. Por ello los valores relacionados a la temperatura y caudal se encuentran en rangos acordes. Los únicos datos que se encuentran fuera de la tendencia correcta corresponden al calor transferido.

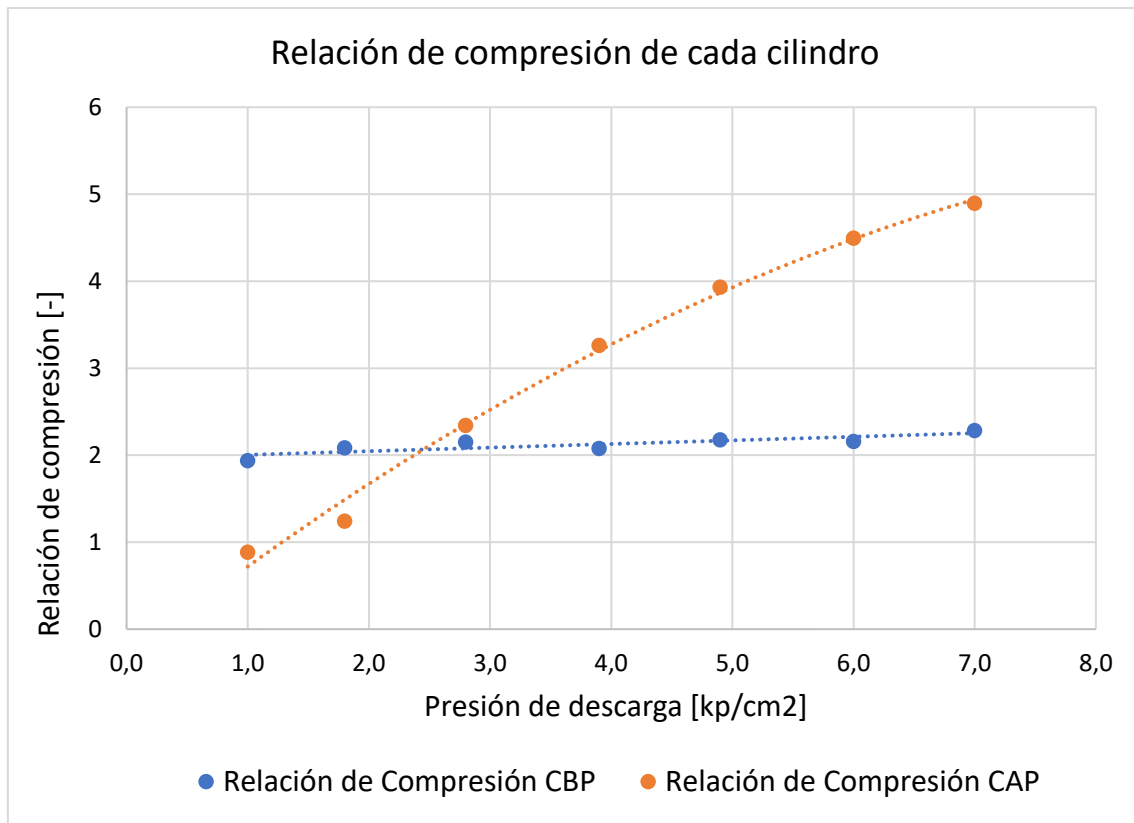


Gráfico 6. Curvas de relación de compresión para CBP y CAP

[5.6a] ¿La posición relativa de las curvas es la correcta? Si es necesario explique.

Cuando el compresor trabaja a presiones cercanas a la atmosférica, el CAP comprime una cantidad pequeña de aire proveniente del CBP, por lo tanto, la relación de compresión es similar en magnitud a la unidad. Cuando aumenta la presión de descarga del compresor, el CAP trabaja a un mayor régimen, generando su aumento en la relación de compresión.

Con respecto al CBP, se encuentra trabajando en el mismo régimen de operación siempre, ya que debe comprimir el aire de la atmósfera a una misma presión de descarga que tiende a ser $2 \left[\frac{kp}{cm^2} \right]$, por ello sus relaciones de compresión varían poco.

[5.6b] ¿Los valores están en el rango que le corresponde?

Un compresor de dos etapas con una presión de descarga de 7 [bar] debería lograr una relación de compresión teórica entre 2,8 y 3. En el ensayo presentado se alcanza un valor de 5 para las mismas condiciones de descarga.

La existencia de esta discordia se presenta debido a que las mediciones realizadas en la descarga se realizaron de manera manual, por lo que se produce un “delay” en el tiempo, vale decir, no se efectuó en el instante adecuado y aquello acarrea ciertos errores casi inevitables. A pesar de todo eso, en general, el comportamiento y los valores calculados se encuentran dentro del rango esperado.

6. Conclusión

De manera efectiva se logró comprender cómo a diferentes condiciones de operación relativas a la presión de descarga afectan directamente al rendimiento volumétrico del compresor. Adicionalmente, la verificación del comportamiento real del compresor a través de los parámetros calculados, por ejemplo, la presencia de valores de presión por debajo de la atmosférica en la admisión del CBP, que demuestra el fenómeno de succión (vacío).

En general, la experiencia permitió aplicar los criterios ingenieriles provenientes del estudio de la termodinámica y mecánica de fluidos en los datos calculados, a modo de verificación y modelamiento del comportamiento físico de ciertas variables. Esto contrasta con la típica práctica de ceñirse a las ecuaciones entregadas y calcular de lleno.