

TERMODINÀMICA

PRÀCTIQUES DE LABORATORI

GRAU EN ENGINYERIA EN VEHICLES AEROESPACIALS (Pla 2010) 2^{on} A
GRAU EN ENGINYERIA EN TECNOLOGIES AEROESPACIALS (Pla 2010) 2^{on} A
GRAU EN ENGINYERIA EN TECNOLOGIES INDUSTRIALS (Pla 2010) 2^{on} B

UNITAT DE TERMODINÀMICA I FÍSICO-QUÍMICA ETSEIAT

Departament de Màquines i Motors Tèrmics

**ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIES INDUSTRIAL I AERONÀUTICA
DE TERRASSA**

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

PRÀCTIQUES DE LABORATORI DE TERMODINÀMICA

GRAU EN ENGINYERIA EN VEHICLES AEROESPACIALS (Pla 2010) 2^{on} A
GRAU EN ENGINYERIA EN TECNOLOGIES AEROESPACIALS (Pla 2010) 2^{on} A
GRAU EN ENGINYERIA EN TECNOLOGIES INDUSTRIALS (Pla 2010) 2^{on} B

P.Colomer, Y.Calventus, F. Román, J.M. Hutchinson, J.Rigola, S. Montserrat

Laboratori de Termodinàmica i Físico-química
Departament de Màquines i Motors Tèrmics

PRÀCTIQUES DE LABORATORI DE TERMODINÀMICA

GRAU EN ENGINYERIA EN VEHICLES AEROESPACIALS (Pla 2010) 2^{on} A
GRAU EN ENGINYERIA EN TECNOLOGIES AEROESPACIALS (Pla 2010) 2^{on} A
GRAU EN ENGINYERIA EN TECNOLOGIES INDUSTRIALS (Pla 2010) 2^{on} B

6^a Edició, 2016

P.Colomer, Y.Calventus, F.Román, J. M. Hutchinson, J.Rigola, S.Montserrat

Editat per U.D.I. Termodinàmica i Físico-química E.T.S.E.I.A.T. Terrassa (U.P.C.)

INDEX

Pràctica 1.- CALOR DE DISSOLUCIÓ	pag. 7
Pràctica 2.- DETERMINACIÓ DE LA CALOR DE NEUTRALITZACIÓ PER CALORIMETRIA	pag. 11
Pràctica 3.- DETERMINACIÓ DE LA POTÈNCIA CALORÍFICA DE GASOS MITJANÇANT EL JUNKERS DE GASOS	pag. 15
Pràctica 4.- PRESSIÓ DE VALOR DE LÍQUIDS. DETERMINACIÓ DE LA CALOR LATENT DE VAPORITZACIÓ	pag. 23
Pràctica 5.- MESURA DE LA CALOR ESPECÍFICA D'UN LÍQUID. MÈTODE DE LA CORBA DE REFREDAMENT	pag. 29
Pràctica 6.- LLEI DE BOYLE-MARIOTTE. DETERMINACIÓ DEL COEFICIENT DE COMPRESSIBILITAT ISOTERMIC κ D'UN LIQUID	pag. 36
Pràctica 7.- DETERMINACIÓ DE L'EXPONENT DE L'ADIABÀTICA γ D'UN GAS MITJANÇANT EL MÈTODE DE CLEMENT-DESORMES	pag. 44
Pràctica 8.- DETERMINACIÓ DEL COEFICIENT ADIABÀTIC D'UN GAS. MÈTODE DE RÜCKHARDT	pag. 49
Pràctica 9.- EFECTE JOULE-THOMSON	pag. 53
Pràctica 10.- ESTUDI DEL COMPORTAMENT P _v T D'UN FLUID PUR	pag. 61
Pràctica 11.- BOMBA DE CALOR (I)	pag. 69
Pràctica 12.- PRESSIÓ DE VAPOR DE L'AIGUA A TEMPERATURES INFERIORS A 100°C. DETERMINACIÓ DE LA CALOR LATENT DE VAPORITZACIÓ	pag. 77
Pràctica 13.- BOMBA DE CALOR R-134a – H ₂ O	pag. 85
APÈNDIX : TAULES I DIAGRAMES	pag. 96

PRÀCTICA 1

CALOR DE DISSOLUCIÓ

1. OBJECTIU DE LA PRÀCTICA I ASPECTES TEÒRICS

L'objectiu d'aquesta pràctica és la determinació de l'efecte tèrmic al dissoldre determinades sals en aigua, mitjançant un mètode calorimètric.

La calor de dissolució que es mesurarà es la “calor integral de dissolució”, que es la calor absorbida o despresada quan es dissol 1 mol de solut en una quantitat de dissolvent adequada per obtenir una determinada dilució. Per exemple, al dissoldre 1 mol de KI en 200 mols d'aigua (dilució 1:200) la calor integral de dissolució és $\Delta H_S = +5.11$ kcal/mol solut a 18°C, és a dir, que s'absorbeixen 5.11 kcal per cada mol de solut dissolt quan la dilució és 1:200.

Prèviament a la determinació de la calor integral de dissolució d'una sal, s'ha de calcular la capacitat calorífica mitja del sistema calorimètric, o el que és el mateix, la quantitat de calor necessària per variar en 1°C la temperatura del sistema (vas Dewar, termòmetre, agitador i dissolució).

En aquest experiment es seguirà un procediment adiabàtic utilitzant un vas Dewar aïllat tèrmicament de l'exterior. El calorímetre funciona proper a la temperatura ambient, per tant les pèrdues o guanys de calor són menyspreables i es pot considerar com un sistema adiabàtic.

2. MÈTODE EXPERIMENTAL

2.1. Determinació de la capacitat calorífica del sistema.

Col·loqueu en el vas Dewar 500 ml d'aigua destil·lada, a temperatura pròxima als 20°C. Llegiu la temperatura a intervals de 1 minut fins que s'estabilitzi la lectura. Per aquestes mesures utilitzeu un termòmetre de precisió $\pm 0.1^\circ\text{C}$.

Peseu la quantitat de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (Massa molecular: 248,2) necessària per què la dilució sigui 1:400. Efectueu la pesada apreciada fins cg.

Introduir la mostra pesada de tiosulfat sòdic en el vas Dewar i agitar la mescla.

Anoteu la temperatura cada 30 segons fins que s'estabilitzi. Representeu gràficament la temperatura amb el temps per a determinar la temperatura final. Repetiu la mesura.

En aquesta pràctica, la precisió correcta en les mesures de temperatura i de massa haurien d'ésser respectivament de $\pm 0.01^\circ\text{C}$ i de $\pm 1\text{mg}$. Tot i així, per realitzar aquesta pràctica en el reduït temps de 2 hores, la precisió de les mesures es redueix a $\pm 0.1^\circ\text{C}$ i $\pm 1\text{cg}$.

2.2. Càlcul de la capacitat calorífica.

La calor integral de dissolució de la substància utilitzada es troba tabulada en un llibre de taules de propietats físiques de les substàncies. En el “Handbook of Chemistry, Lange” trobem el següent valor pel $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$:

$$\Delta H_S = 11.37 \text{ kcal/mol de solut (Dilució 1:400)}$$

La capacitat calorífica del sistema es pot determinar mitjançant la següent expressió:

$$C = -\frac{w \cdot \Delta H_S}{M \cdot \Delta T} \quad [1]$$

on:

w = massa de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$

M = massa molecular

C = capacitat calorífica

$\Delta T = T_{\text{final}} - T_{\text{inicial}}$

2.3. Determinació de la calor integral de dissolució d'una sal.

Poseu 500 ml d'aigua destil·lada en el calorímetre i procediu com en l'apartat 2.1. per a l'estabilització de la temperatura.

Peseu la quantitat de substància necessària per a obtenir la dilució que s'indica. Introduïu la sal en el vas Dewar. Agiteu i anoteu la temperatura cada 30 segons fins que s'estabilitzi. Representeu gràficament la temperatura davant del temps per a determinar la temperatura final.

Repetiu la mesura.

Les sals i dilucions que es poden utilitzar en aquest apartat són:

NH_4Cl (Dilució 1:200)

CaCl_2 (Dilució 1:300)

El càlcul de la calor integral de dissolució es realitzarà de forma similar a la indicada en l'apartat 2.2., però coneixent ara la capacitat calorífica del sistema.

3. BIBLIOGRAFIA.

- “Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química”, J.M. Smith y H.C. Van Ness. McGraw-Hill, 2ª ed. Española, 1998. Capítulo 13.
- “Principios de los Procesos Químicos” Tomo I. O.A.Hougen, K.M. Watson y R.A. Ragatz. Ed. Reverté, 1964. Capítulo 9 (Terموquímica de las disoluciones).
- “Manual de Laboratorio de Química Física”, H:D: Crockford y J.W. Nowell. Ed. Alhambra, 1961.

DEPARTAMENT DE MÀQUINES I MOTORS TÈRMICS

PRÀCTIQUES DE TERMODINÀMICA I FÍSICO-QUÍMICA

Nom i Cognoms:

Grup:

Data: Qualificació:

PRÀCTICA 1. CALOR DE DISSOLUCIÓ

Recordeu que amb aquests informes s'avalua la competència genèrica: "Ús solvent dels recursos de la informació" en el nivell 2. Heu citar les referències, tal com us indiquen en les sessions de la Biblioteca.

RESULTATS

1. Determinació de la capacitat calorífica.

Volum d'aigua del calorímetre :ml
Massa de sal :g
Temperatura inicial aigua :°C
Temperatura final aigua :°C
 ΔT :°C

Capacitat calorífica calculada :

2. Determinació de la calor integral de dissolució.

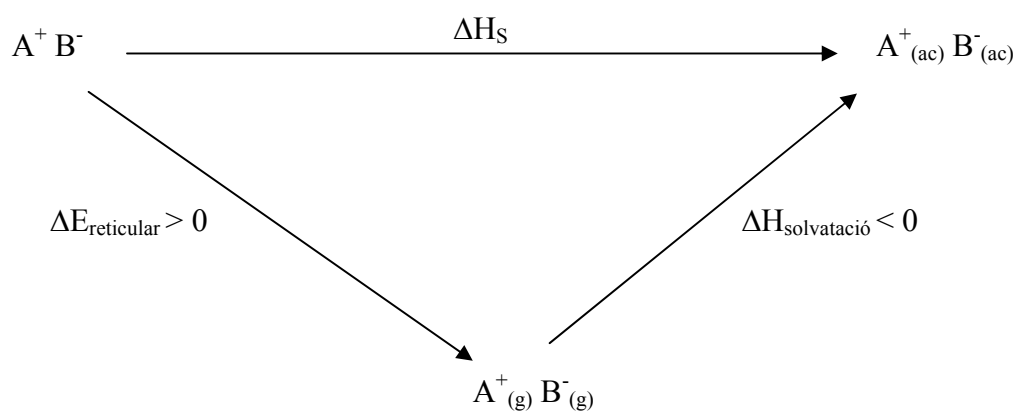
Nom de la sal utilitzada:
Dilució:
Volum d'aigua del calorímetre :ml
Massa de sal :g
Temperatura inicial aigua :°C
Temperatura final aigua :°C
 ΔT :°C

ΔH_s :

QÜESTIONARI

1. Deduïu l'expressió que permet el càlcul de la capacitat calorífica del sistema.
2. Les calors integrals de dissolució, de les diferents sals utilitzades en la pràctica, s'han obtingut en unes determinades dilucions, per què s'ha d'especificar la dilució que s'ha utilitzat?
Si la dilució fos menor, obtindríem el mateix valor de la calor integral de dissolució?

3. Per a les dues sals utilitzades, compareu els resultats obtinguts de la calor de dissolució i deduïu a què es pot atribuir el seu diferent comportament tèrmic. Justifiqueu-ho mitjançant el cicle de Born-Haber aplicat al procés de dissolució de substàncies iòniques.



4. A partir dels valors de $\Delta E_{\text{reticular}}$ obtinguts a taules i dels valors de la calor de dissolució calculats en l'experiència, determineu l'entalpia de solvatació, $\Delta H_{\text{solvatació}}$, en cada cas i confirmeu la resposta de l'apartat anterior.

Dades de l'energia reticular:

CaCl₂ : 2223 kJ/mol

NH₄Cl : 650 kJ/mol

PRÀCTICA 2

DETERMINACIÓ DE LA CALOR DE NEUTRALITZACIÓ PER CALORIMETRIA

1. OBJECTIU DE LA PRÀCTICA I ASPECTES TEÒRICS

L'objectiu d'aquest experiment és estudiar la quantitat de calor despresa quan es neutralitza una base forta (hidròxid sòdic) amb un àcid fort.

Les determinacions experimentals indiquen que en el procés de neutralització de 1 mol d'un àcid fort, en dissolució diluïda a 25°C, es desprenen unes 13700 calories (57.27 kJ). En aquest procés, l'únic canvi químic que es dona és la reacció entre els ions hidroni i els ions hidròxil per formar aigua. La reacció es la mateixa, qualsevol que sigui l'àcid o la base. Aquesta quantitat de calor s'anomena *calor de neutralització*.

Si s'empren dissolucions de concentracions moderades, s'obté amb freqüència un valor més alt per la calor de neutralització. Aquest és el resultat de les forces iòniques i d'altres efectes que intervenen en la neutralització a concentracions moderades. Si s'empren àcids o bases que estan parcialment ionitzats la quantitat de calor despresa pot ser menor que 13 700 cal. a causa de l'absorció de calor efectuada durant la dissociació de l'àcid o base dèbils. Per exemple, la neutralització del HCN pel NaOH només desprèn 2.9 kcal. Per tant, al interpretar la magnitud de la calor despresa en un procés de neutralització, s'ha de parar atenció a les concentracions de les dissolucions de l'àcid i de la base, així com a la naturalesa química de l'àcid i de la base i a la temperatura a la qual es fa la mesura.

En aquest experiment es neutralitzen 0.08 equivalents de base amb 0.08 equivalents d'àcid en un volum total de 500 ml. Per tant, la dissolució salina restant serà 0.16N.

Com en tots els experiments calorimètrics, s'ha de conèixer prèviament la capacitat calorífica del sistema, constituïda pel propi calorímetre i la dissolució. La capacitat calorífica és la quantitat de calor necessària per canviar la temperatura del sistema en 1°C. En aquest experiment la capacitat calorífica es determinarà introduint dins el sistema una quantitat mesurada d'aigua gelada a una temperatura coneguda.

El mètode que es segueix és un procediment adiabàtic, ja que el calorímetre està construït de tal manera, i funciona tan pròxim a la temperatura ambient, que els intercanvis de calor amb l'ambient són menyspreables.

2. MÈTODE EXPERIMENTAL

2.1. Determinació de la capacitat calorífica del sistema calorimètric.

El calorímetre consisteix en un vas Dewar, amb un agitador i un termòmetre calibrat d'una precisió de $\pm 0.1^\circ\text{C}$.

Poseu 450 ml d'aigua destil·lada, a temperatura ambient, dintre del vas Dewar. Agiteu moderadament l'aigua, i realitzeu lectures de la temperatura fins que arribi a un valor constant. Anoteu aquesta temperatura. A continuació, introduïu en el Dewar 50 ml d'aigua gelada. L'aigua gelada es prendrà d'una proveta, prèviament refredada en una mescla d'aigua i gel. Anoteu la temperatura de l'aigua gelada. Agiteu l'aigua en el calorímetre i llegiu la temperatura a intervals de temps fins que a obtenir un valor constant.

Repetiu el procés. Calculeu la capacitat calorífica obtinguda en ambdós casos i trobeu el valor mig.

2.2 Determinació de la calor de neutralització.

Buideu el vas Dewar i col·loqueu-hi a l'interior 400 ml de NaOH 0.2 N, deixant establir la temperatura. Anoteu aquesta temperatura.

A continuació, afegir 100 ml de la dissolució de HCl 0.8 N. S'ha de procurar que la seva temperatura abans de l'addició sigui pròxima a la temperatura de la dissolució de NaOH dins del calorímetre. Anoteu la temperatura final.

Per procedir correctament, s'haurà d'efectuar la determinació per duplicat.

Repetiu el procediment amb una dissolució d'àcid fosfòric 0.8 N.

3. TRACTAMENT DE DADES

3.1. Càlcul de la capacitat calorífica del calorímetre.

Es suposa que la capacitat calorífica del sistema calorimètric ple d'aigua és la mateixa que la capacitat del sistema calorimètric quan conté les dissolucions de l'àcid i de la base. També es suposa que el procés és adiabàtic, pel que la calor absorbida per l'aigua gelada juntament amb la calor cedida pel propi calorímetre i els 450 ml d'aigua ha de ser zero ja que el sistema no transfereix calor a l'exterior. Llavors, essent C' la capacitat calorífica del vas Dewar (juntament amb el termòmetre i l'agitador) i els 450 ml d'aigua, T i T' les temperatures inicials de l'aigua gelada i de l'aigua en el calorímetre respectivament i T'' la temperatura final, resulta:

$$C' \cdot (T'' - T') + 50 \cdot (T'' - T) = 0 \quad [1]$$

No obstant, per obtenir la capacitat calorífica del sistema amb un volum total de 500 ml de dissolució, haurà d'afegir-se 50 calories/grau a C' , per tant:

$$C = C' + 50 \quad [2]$$

3.2. Determinació de la calor de neutralització.

La calor de neutralització expressada en forma d'increment d'entalpia per equivalent d'àcid o de base pot determinar-se mitjançant la següent equació:

$$\Delta H = -\frac{C \cdot \Delta T}{0.08}$$

on ΔT és l'augment de temperatura experimentat en la neutralització de 0.08 equivalents de base amb 0.08 equivalents d'àcid.

4. **BIBLIOGRAFIA**

- “Fisicoquímica”, Daniels F. I Alberty R.A. Ed. CECSA, cap.4.
- “Manual de Laboratorio de Química Física”, H:D: Crockford y J.W. Nowell. Ed. Alhambra, 1961.

DEPARTAMENT DE MÀQUINES I MOTORS TÈRMICS

PRÀCTIQUES DE TERMODINÀMICA I FÍSICO-QUÍMICA

Nom i Cognoms:

Grup:

Data: Qualificació:

PRÀCTICA 2. DETERMINACIÓ DE LA CALOR DE NEUTRALITZACIÓ PER CALORIMETRIA

Recordeu que amb aquests informes s'avalua la competència genèrica: "Ús solvent dels recursos de la informació" en el nivell 2. Heu citar les referències, tal com us indiquen en les sessions de la Biblioteca.

RESULTATS

1. Determinació de la capacitat calorífica del sistema calorimètric.

Temperatura vas Dewar :°C

Temperatura aigua gelada :°C

Temperatura final mescla :°C

Capacitat calorífica calculada :

2. Determinació de la calor de neutralització.

a) Solució de base emprada: Concentració:

Volum de solució base :ml

Temperatura inicial :°C

b) Solució d'àcid emprada : Concentració:

Volum de solució àcid :ml

Temperatura final mescla:°C

Calor de neutralització calculat:

QÜESTIONARI

1. Per què la calor de neutralització d'una base forta amb un àcid fort és de 13,70 kcal, independent del catió de la base i de l'anió de l'àcid?

2. Compareu els resultats obtinguts en la neutralització de NaOH amb HCl i amb H₃PO₄.

2.1. Indiqueu si hi ha variacions notables en els valors de la calor de neutralització en els diferents àcids.

2.2. Justifiqueu aquestes variacions, si hi són, així com les desviacions respecte el valor donat de la calor de neutralització, entre base i àcid forts, de 13,7 kcal.

PRÀCTICA 3

DETERMINACIÓ DE LA POTÈNCIA CALORÍFICA DE GASOS MITJANÇANT EL JUNKERS DE GASOS.

1. OBJECTIU DE LA PRÀCTICA

El Junkers de gasos és un calorímetre per determinar la potencia o poder calorífic de combustibles gasosos. Un corrent continu de gas es crema i la calor és absorbida en un intercanviador per un corrent ininterromput d'aigua. La potencia calorífica del gas és la quantitat de calor que desprèn al cremar-se a temperatura i pressió constants. Es determinarà a partir de la quantitat i augment de la temperatura de l'aigua que, durant la combustió d'una quantitat determinada de gas, ha passat per l'aparell.

Suposarem que el Junkers de gasos és adiabàtic i que els gasos de combustió surten a la temperatura ambient. En aquestes condicions, si considerem que H es la potencia calorífica del combustible en kcal/m³, G la quantitat de gas cremat en el calorímetre durant un cert temps, W la quantitat d'aigua en litres que passa durant el mateix interval de temps pel calorímetre, Δt la diferència de temperatura de l'aigua a l'entrada i a la sortida del calorímetre i C_p la capacitat calorífica de l'aigua en cal/g.°C, es trobarà que:

$$H \cdot G = W \cdot C_p \cdot \Delta t \quad [1]$$

i per tant

$$H = \frac{W}{G} \cdot \Delta t \quad [2]$$

ja que $C_p = 1 \text{ cal/g.}^\circ\text{C}$.

Per tant, serà fonamental determinar la quantitat d'aigua i de gas per unitat de temps i les temperatures de l'aigua a l'entrada i la sortida del calorímetre.

2. JUNKERS DE GASOS

El Junkers de gasos consta dels següents elements:

- a) Calorímetre pròpiament dit.
- b) Mesurador de gasos o gasòmetre.
- c) Regulador de la pressió relativa del gas.
- d) Humidificador de l'aire de combustió.

En el calorímetre pròpiament dit, és on es produeixen la combustió i l'intercanvi de calor amb el corrent d'aigua. Els diferents components són:

- a) Cremador de gas.
- b) Intercanviador amb corrent continu d'aigua.

- c) Termòmetres per a la mesura de la temperatura de l'aigua a l'entrada i la sortida del calorímetre (1/10°C).
- d) Clau per controlar i regular el flux d'aigua pel calorímetre.
- e) Clau per poder desviar la corrent de sortida, bé fins el desguàs o bé fins el matràs de mesura.
- f) Termòmetre per mesurar la temperatura dels gasos de sortida de la combustió.
- g) Vas de precipitats per recollir l'aigua de condensació.
- h) Sobreeixidor per distribuir el corrent d'aigua de l'entrada per una part al calorímetre i per l'altre fins l'humidificador de l'aire de combustió.

El mesurador de gas, calibrat, va connectat a l'entrada de gas. La precisió és de 0.2 litres.

El gas arriba a l'experiment procedent de la xarxa de distribució, i la seva pressió és lleugerament superior a la de l'ambient. Considerarem que la pressió relativa del gas és de 80 mm de columna d'aigua. L'aire necessari per a la combustió entra en l'humidificador, que és alimentat per una part de l'aigua desviada al sobreeixidor. El pas de l'aire per l'humidificador fa que ingressi al cremador amb un grau d'humitat constant (saturació).

3. PART EXPERIMENTAL

A continuació s'indica la metodologia per la determinació de les potències calorífiques superior i inferior del gas del laboratori.

3.1. Posada en funcionament.

Obriu les claus d'entrada i de sortida del mesurador de gas. Enceneu el cremador. Connecteu l'aigua gradualment, comprovant que surt pel tub de desguàs i que una part de la mateixa passa per l'humidificador (s'hi observa el degoteig continu).

Quan el flux d'aigua sigui uniforme i la flama sigui l'adequada, col·loqueu el cremador en el calorímetre adaptant-lo a la ranura corresponent. Comproveu que la flama no s'ha apagat, observant com la temperatura de l'aigua de sortida va augmentant. En cas contrari, tanqueu la clau del gas i aviseu al professor. Espereu que el degoteig d'aigua de condensació, que surt d'un conducte situat en la part posterior del calorímetre, sigui uniforme.

Deixeu funcionar el sistema durant un interval de temps, fins que arribi al règim estacionari, comprovant que el mesurador registra el pas de gas pel mateix, que el cabal d'aigua de refrigeració és uniforme, que la flama és adequada, que els termòmetres estan estabilitzats i que l'humidificador funciona correctament.

3.2. Mesura de l'aigua de condensació.

Una vegada fetes les comprovacions anteriors, es procedirà a determinar l'aigua de condensació recollida durant la combustió d'un volum determinat de gas (en el nostre cas prendrem 40 litres de gas).

Quan el mesurador indiqui un valor exacte es col·locarà el vas de recollida de l'aigua de condensació, prèviament tarat, en el conducte de sortida de la mateixa i es recollirà l'aigua produïda durant la combustió dels 40 litres de gas ($g = 40$ litres). Durant aquest període,

anoteu cada 5 litres de gas consumit els valors dels següents paràmetres en una taula de resultats i determineu el valor mig de cada un d'ells.

- a) La temperatura del gas a la sortida de la combustió t_{gas} .
- b) La temperatura d'entrada de l'aigua al calorímetre t_e .
- c) La temperatura de sortida de l'aigua al calorímetre t_s .

Com hem dit, suposem que la pressió relativa p del gas és de 80 mm de columna d'aigua. Consumits els 40 litres de gas, retireu el vas i determineu mitjançant pesada la quantitat d'aigua en grams w recollida. Anoteu-la en la taula de resultats.

3.3. Mesura del cabal d'aigua de refrigeració.

Es determinarà la quantitat d'aigua de refrigeració W que ha passat pel calorímetre durant la combustió de 5 litres de gas ($G = 5$ litres).

Quan el mesurador indiqui un valor exacte, gireu la clau de commutació de forma que l'aigua de refrigeració es desvia cap un recipient, prèviament tarat, on es recollirà. Quan pel mesurador de gas hagin passat exactament 5 litres de gas, torneu a commutar la clau, deixant-la en la posició original, amb lo que l'aigua de refrigeració fluirà fins el desguàs. Determineu mitjançant pesada la quantitat d'aigua en grams W recollida i anoteu-la.

3.4. Part final.

Realitzades totes les mesures, traieu el cremador del calorímetre, tanqueu la clau d'entrada del gas i, finalment, tanqueu la clau d'entrada de l'aigua.

4. CÀLCULS

- a) Determinació de la pressió de vapor de l'aigua S a la temperatura t del comptador de gas. S'utilitzarà per això la taula corresponent. (Taula 2).
- b) Determinació de la pressió baromètrica P_1 en mm de columna de Hg a partir de la pressió relativa p en mm de columna d'aigua:

$$P_1 = p \cdot 0.0735 = 80 \times 0.0735 = 5.88 \text{ mm columna mercuri}$$

- c) Reducció de la pressió atmosfèrica b a 0°C : b_0 . Es realitzarà a partir de la taula de reducció (Taula 1), utilitzant per això la temperatura de la sala t_r i la pressió atmosfèrica b , interpolant si és necessari:

$$b_0 = b - \text{valor taules} \quad [3]$$

- d) Determinació del factor F (factor de conversió de la potencia calorífica a les condicions normals (0°C , 760 mm Hg, sec). Es determinarà a partir de l'equació:

$$F = \frac{760}{273} \cdot \frac{273 + t}{b_0 + P_1 - S} \quad [4]$$

e) Determinació de la calor d'evaporació de l'aigua de condensació r :

$$r = \frac{0.54 \cdot w \cdot 1000}{g} \quad (\text{kcal/m}^3) \quad [5]$$

on 0.54 és la calor d'evaporació en kcal de 1 gram d'aigua condensada; r és la calor d'evaporació de l'aigua al cremar-se 1 m³ de gas i w és el pes en grams de l'aigua de condensació recollida al cremar-se 40 litres de gas (g).

f) Determinació de Δt :

$$\Delta t = t_s - t_e \quad [6]$$

essent t_s i t_e les temperatures mitges de sortida i entrada, respectivament, de l'aigua de refrigeració.

g) Determinació de la potència calorífica superior H_s :

$$H_s = \frac{W \cdot \Delta t}{G} \quad (\text{kcal/m}^3) \quad [7]$$

on W és el pes en grams de l'aigua de refrigeració recollida al cremar-se 5 litres de gas ($G = 5$ litres) i Δt la diferència de temperatures anteriorment calculada.

h) Determinació de la potència calorífica inferior H_i :

$$H_i = H_s - r \quad (\text{kcal/m}^3) \quad [8]$$

i) Reducció de les potències calorífiques inferior i superior trobades a les condicions normals (0°C, 760 mm Hg, sec):

$$\text{Potència calorífica superior reduïda} = H_s \cdot F \quad (\text{kcal/m}^3)$$

$$\text{Potència calorífica inferior reduïda} = H_i \cdot F \quad (\text{kcal/m}^3)$$

Taula 1. Reducció de la pressió baromètrica **b**, a la temperatura de la sala **t_r**, a 0°C **b₀**

$$b_0 = b - \text{valor taula}$$

t _r (°C)	Presión barométrica en mm Hg										
	680	690	700	710	720	730	740	750	760	770	780
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	0.11	0.11	0.11	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.13	0.13
2	0.22	0.23	0.23	0.23	0.24	0.24	0.24	0.25	0.25	0.25	0.25
3	0.33	0.34	0.34	0.35	0.35	0.36	0.36	0.37	0.37	0.38	0.38
4	0.44	0.45	0.46	0.46	0.47	0.48	0.48	0.49	0.50	0.50	0.51
5	0.56	0.56	0.57	0.58	0.59	0.60	0.60	0.61	0.62	0.63	0.64
6	0.67	0.68	0.69	0.70	0.71	0.71	0.72	0.73	0.74	0.75	0.76
7	0.78	0.79	0.80	0.81	0.82	0.83	0.85	0.86	0.87	0.88	0.89
8	0.89	0.90	0.91	0.93	0.94	0.95	0.97	0.98	0.99	1.01	1.02
9	1.00	1.01	1.03	1.04	1.06	1.07	1.09	1.1	1.12	1.13	1.15
10	1.11	1.13	1.14	1.16	1.17	1.19	1.21	1.22	1.24	1.26	1.27
11	1.22	1.24	1.26	1.27	1.29	1.31	1.33	1.35	1.36	1.38	1.40
12	1.33	1.35	1.37	1.39	1.41	1.43	1.45	1.47	1.49	1.51	1.53
13	1.44	1.46	1.48	1.50	1.53	1.55	1.57	1.59	1.61	1.63	1.65
14	1.55	1.57	1.60	1.62	1.64	1.67	1.69	1.71	1.73	1.76	1.78
15	1.66	1.69	1.71	1.74	1.76	1.78	1.81	1.83	1.86	1.88	1.91
16	1.77	1.80	1.82	1.85	1.88	1.90	1.93	1.96	1.98	2.01	2.03
17	1.88	1.91	1.94	1.97	1.99	2.02	2.05	2.08	2.10	2.13	2.16
18	1.99	2.02	2.05	2.08	2.11	2.14	2.17	2.20	2.23	2.26	2.29
19	2.10	2.13	2.17	2.20	2.23	2.26	2.29	2.32	2.35	2.38	2.41
20	2.21	2.25	2.28	2.31	2.34	2.38	2.41	2.44	2.47	2.51	2.54
21	2.32	0.36	2.39	2.43	2.46	2.50	2.53	2.56	2.60	2.63	2.67
22	2.43	0.47	2.51	2.54	2.58	2.61	2.65	2.69	2.72	2.76	2.79
23	2.54	0.58	2.62	2.66	2.69	2.73	2.77	2.81	2.84	2.88	2.92
24	2.66	2.69	2.73	2.77	2.81	2.85	2.89	2.93	2.97	3.01	3.05
25	2.27	2.81	2.85	2.89	2.93	2.97	3.01	3.05	3.09	3.13	3.17

Taula 2. Pressió de vapor de l'aigua **S** a la temperatura **t** del comptador de gas.

t (°C)	S (mm Hg)	t (°C)	S (mm Hg)	t (°C)	S (mm Hg)
0	4.60	10	9.17	20	17.39
1	4.94	11	9.79	21	18.50
2	5.30	12	10.46	22	19.66
3	5.69	13	11.16	23	20.89
4	6.10	14	11.91	24	22.18
5	6.53	15	12.70	25	23.55
6	7.00	16	13.54	26	24.99
7	7.50	17	14.42	27	26.51
8	8.02	18	15.36	28	28.10
9	8.57	19	16.35	29	29.78

DEPARTAMENT DE MÀQUINES I MOTORS TÈRMICS

PRÀCTIQUES DE TERMODINÀMICA I FÍSICO-QUÍMICA

Nom i Cognoms:

Grup:

Data: Qualificació:

PRÀCTICA 3. DETERMINACIÓ DE LA POTÈNCIA CALORÍFICA DE GASOS MITJANÇANT EL JUNKERS DE GASOS.

Recordeu que amb aquests informes s'avalua la competència genèrica: "Ús solvent dels recursos de la informació" en el nivell 2. Heu citar les referències, tal com us indiquen en les sessions de la Biblioteca.

RESULTATS

1. Dades generals prèvies.

Gas utilitzat:
Temperatura sala t_r :°C
Pressió atmosfèrica b :mm Hg
Pressió atmosfèrica reduïda a 0°C b_0 :mm Hg

2. Dades experimentals.

Pressió comptador de gas p_1 :mm Hg
Temperatura comptador de gas t :°C
Temperatura sortida dels gasos t_{gas} :°C
Temperatura entrada aigua al calorímetre t_e :°C
Temperatura sortida aigua del calorímetre t_s :°C

3. Determinació de la potència calorífica superior.

Volum teòric gas cremat G :litres
Cabal aigua de refrigeració W :g
 Δt en el calorímetre :°C
Potència calorífica superior H_s :kcal/m³

4. Determinació de la potència calorífica inferior.

Volum teòric gas cremat g :litres
Quantitat aigua de condensació recollida w :g
Calor evaporació aigua r :kcal/m³
Potència calorífica superior H_i :kcal/m³

5. Potències calorífiques en condicions normals (0°C, 760 mm Hg, sec).

Factor de conversió F:

Potència calorífica superior H_s :kcal/m³

Potència calorífica inferior H_i :kcal/m³

QÜESTIONARI

1. Indiqueu quina és la diferència entre potència calorífica superior i inferior.
2. És absolutament necessari que l'aire entri saturat d'humitat? Justifiqueu la resposta.
3. Si la temperatura de sortida dels gasos de la combustió fos més elevada que la que has obtingut, es podria mesurar la potència calorífica del gas aplicant les equacions descrites en el desenvolupament de la pràctica? Justifiqueu la resposta.

En les dues següents qüestions es tracta de fer càlculs teòrics, i comparar-los després amb els resultats experimentals

4. Sabem que el gas natural està format per una mescla d'hidrocarburs, rica en metà. Llavors, si suposem que treballem amb un gas natural la composició del qual és un 90% en volum de metà i un 10% en età, determineu quin seria el seu poder calorífic teòric i compareu-lo amb el valor experimental heu obtingut. Aquesta comparació us permetrà saber si el gas natural amb el que heu treballat al laboratori té una composició propera a 90% en metà i 10% en età o no.
5. Ara calcularem la fracció de metà i d'età que té el gas natural amb el que heu treballat al laboratori. La calcularem a partir de la quantitat d'aigua de la combustió que heu recollit durant la combustió dels 40 L de gas natural seguint els següents passos:
 - a) Partint de la reacció de combustió pel metà, i suposant que aquest es comporta com un gas ideal a la temperatura i pressió ambient, calcular quina seria la massa d'aigua que es produiria en cremar 40 L de gas metà.
 - b) Partint de la reacció de combustió per l'età, i suposant que aquest es comporta com un gas ideal a la temperatura i pressió ambient, calcular quina seria la massa d'aigua que es produiria en cremar 40 L de gas età.
 - c) Tenint en compte la massa d'aigua que heu recollit en la pràctica i les quantitats d'aigua que produirien les combustions amb metà i età, calcular quina seria la fracció de metà i d'età del gas natural utilitzat al laboratori (suposant que aquest està format per una mescla de només metà i età).

PRÀCTICA 4

PRESSIÓ DE VAPOR DE LÍQUIDS. DETERMINACIÓ DE LA CALOR LATENT DE VAPORITZACIÓ.

1. OBJECTIU DE LA PRÀCTICA

L'objectiu de la pràctica es la mesura de la pressió de vapor d'un líquid mitjançant un mètode dinàmic. De les dades de pressió de vapor i temperatura de l'equilibri de fases líquid-vapor se n'obté la calor latent de vaporització del líquid.

2. ASPECTES TEÒRICS

La pressió de vapor d'un líquid augmenta amb la temperatura. L'equació de Clausius-Clapeyron dona el coeficient de temperatura de la pressió de vapor del líquid:

$$\frac{d \ln P}{dT} = \frac{\Delta H_v}{R \cdot T^2} \quad [1]$$

on ΔH_v és la calor de vaporització del líquid. La integració de l'equació [1], suposant que ΔH_v és constant en l'interval de temperatures d'integració, dona la següent equació:

$$\ln P = -\frac{\Delta H_v}{R \cdot T} + I \quad [2]$$

De manera que la representació gràfica de $\ln P$ enfront $1/T$ proporciona una línia recta la pendent de la qual permet calcular la calor de vaporització.

Per altre banda, existeixen regles empíriques que permeten estimar la calor latent de vaporització, tal és el cas de la regla de Trouton, segons la qual la entropia de vaporització dels líquids anomenats normals (no polars) es de 21 cal/mol·K en el punt normal d'ebullició:

$$\Delta S_v = \frac{\Delta H_v}{T_v^\circ} \approx 21 \text{ cal/mol}\cdot\text{K} \quad [3]$$

on T_v° és la temperatura normal d'ebullició (a 1 atm) del líquid, expressada en K i ΔH_v és l'entalpia normal o calor latent de vaporització.

Els líquids associats per enllaços d'hidrogen (com l'aigua, alcohols, etc.) presenten un ΔS_v superior a 21 cal/mol·K com a conseqüència d'una major associació de molècules en la fase líquida que en la gasosa. No obstant, la regla de Trouton es compleix bé en hidrocarburs, ésters i altres compostos en que no hi ha associacions moleculars fortes.

Una variant de la regla de Trouton és l'equació proposta per Kistyakowsky, que també s'aplica en el punt normal d'ebullició de líquids no polars:

$$\frac{\Delta H_v}{T_v^\circ} = 8.75 + 4.571 \cdot \log T_v^\circ \quad [4]$$

on T_v° és la temperatura normal d'ebullició que també s'expressa en K. Aquesta equació dona bons resultats en una gran varietat de líquids no polars i ofereix una major desviació en els polars.

Una altra regla empírica es la de Ramsay-Young. En les substàncies que es compleix amb la regla de Trouton, la relació entre les temperatures d'ebullició a una determinada pressió és igual a la relació entre temperatures d'ebullició a una altra pressió:

$$\frac{T_A}{T_B} = \frac{T'_A}{T'_B} = \text{constant} \quad [5]$$

essent T_A i T_B les temperatures d'ebullició de les substàncies A i B, respectivament, a la pressió P. Les temperatures d'ebullició T'_A i T'_B són les que corresponen a una altra pressió de treball P'.

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1. Descripció de l'equip experimental.

El mètode consisteix en imposar una pressió determinada al líquid i mesurar la temperatura d'ebullició corresponent. A aquest mètode se l'anomena dinàmic, en contrast amb el mètode estàtic que mesuri la pressió a determinades temperatures.

L'aparell que s'utilitzarà es representa en la figura 1. Consta de les següents parts: matràs A amb el líquid la pressió del qual es mesurarà, proveït de termòmetre i tub capil·lar per ebullició al buit. El calentament del líquid es fa amb una "manta elèctrica". A aquest matràs hi va acoblat un refrigerant per condensar el líquid que bull i evitar que passi a la zona on es practica el buit. Les altres parts que constitueixen l'aparell són: matràs B, la funció del qual es la de flascó regulador de la pressió i el manòmetre C.

El buit en el sistema es fa mitjançant una bomba de buit

3.2. Descripció de la mesura.

A. Preparació del matrau A.

Introduir en el matrau A (matrau de 3 boques), el líquid la pressió de vapor del qual es vol mesurar. S'haurà de procurar que el nivell del líquid cobreixi adequadament les resistències elèctriques de la manta calefactors que entren en funcionament durant l'escalfament.

Col·loqueu adequadament el termòmetre en la boca dreta del matrau (el bulb del qual no s'ha de trobar introduït dins del líquid) i el tub capil·lar en la boca esquerra del matrau. Dins del

matrau, pot introduir-s'hi un tros de porcellana amb la finalitat de que l'ebullició sigui uniforme en tota la massa del líquid.

B. Posada en funcionament del sistema de buit i establiment de la pressió de treball.

En primer lloc, treure el tap de seguretat (1) que connecta el manòmetre amb l'exterior i romandrà obert tot l'experiment. Es connecta la bomba de buit, es tanca la clau 4 i després la 3 i mitjançant una obertura adequada de la clau 3 es pot controlar la pressió interior, el valor de la qual es mesurarà a través del manòmetre, tenint en compte que té un extrem sotmès a la pressió atmosfèrica. La pressió de treball serà:

$$P = P_{\text{atm}} (\text{mm Hg}) - \Delta h (\text{mm Hg}) \quad [6]$$

essent P_{atm} la pressió atmosfèrica exterior llegida en el baròmetre del laboratori i Δh és la diferència d'alçades llegida en el manòmetre.

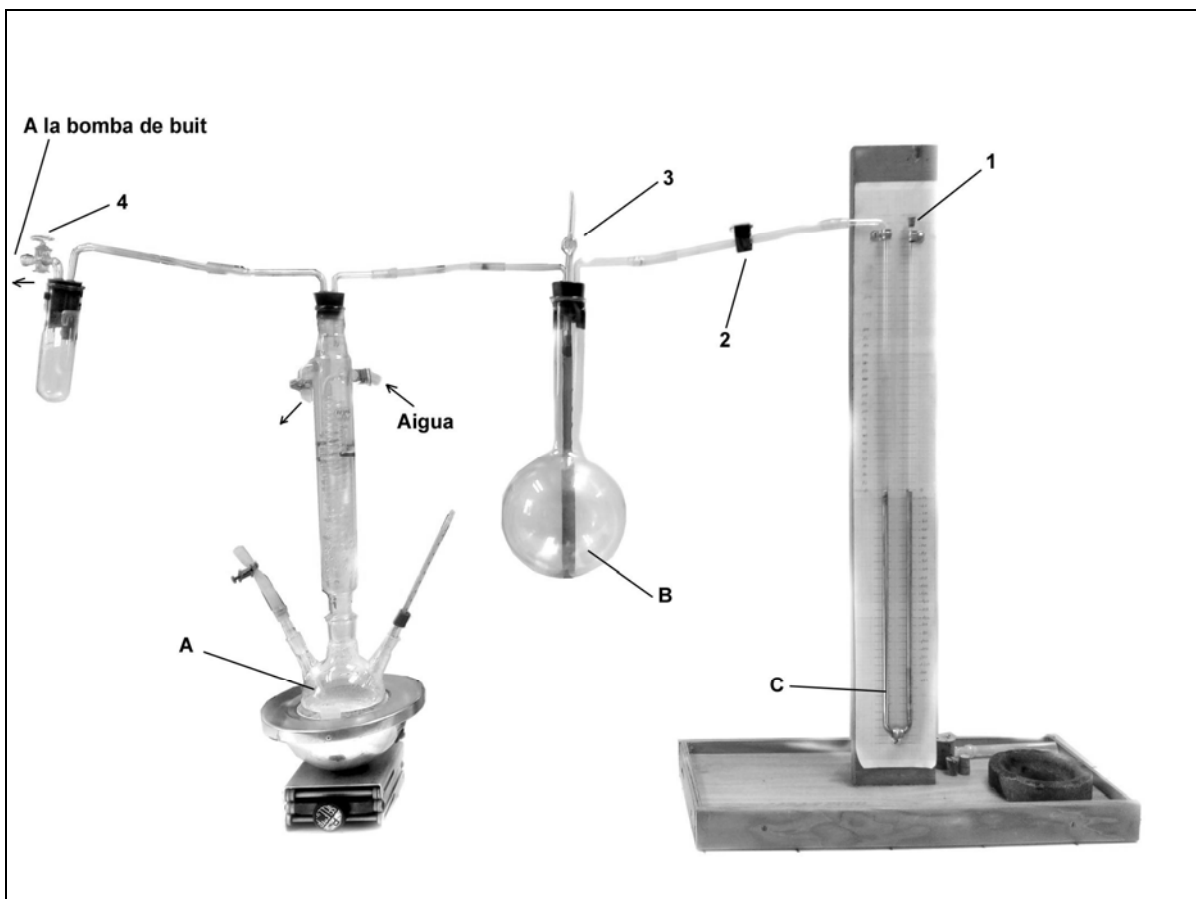


Figura 1. Esquema de la instal·lació

C. Mesura de la temperatura d'ebullició.

Estabilitzada la pressió interior del sistema es procedeix al calentament del líquid, mitjançant la “manta elèctrica” calefactora, fins arribar al punt d'ebullició del líquid.

D. Programació d'experiències.

Per a cada líquid mesureu la temperatura d'ebullició que correspongui a varies pressions de vapor diferents.

En primer lloc s'assajarà amb aigua destil·lada i després amb algun el toluè.

Anoteu els valors experimentals obtinguts per cada líquid en la taula de resultats.

Amb els valors experimentals de la pressió de vapor, a cada temperatura, es calcularà la calor latent de vaporització i es comprovarà la veracitat de les regles empíriques anteriorment indicades.

4. BIBLIOGRAFIA

- “Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química”, J.M. Smith y H.C. Van Ness. McGraw-Hill, 2ª ed. española, 1998.
- “Química Física”. Moore. Tomo I. Ed. Urmo, 1976.
- “Manual de Laboratorio de Química Física”, H:D: Crockford y J.W. Nowell. Ed. Alhambra, 1960. Experimento nº4:”Presión de vapor: Método Dinámico”.

DEPARTAMENT DE MÀQUINES I MOTORS TÈRMICS

PRÀCTIQUES DE TERMODINÀMICA I FÍSICO-QUÍMICA

Nom i Cognoms:

Grup:

Data: Qualificació:

PRÀCTICA 4. PRESSIÓ DE VAPOR DE LÍQUIDS. DETERMINACIÓ DE LA CALOR LATENT DE VAPORITZACIÓ.

Recordeu que amb aquests informes s'avalua la competència genèrica: "Ús solvent dels recursos de la informació" en el nivell 2. Heu citar les referències, tal com us indiquen en les sessions de la Biblioteca.

RESULTATS

1. Efecte de la temperatura sobre la pressió de vapor.

Anotar els resultats experimentals en la següent taula de valors:

SUBSTÀNCIA	Δh manòmetre ()	T ()	P Pressió vapor ()	ln P	1/T

Pressió baromètrica $P_{atm} =$ mm Hg

1.1. Representeu gràficament la pressió de vapor davant la temperatura per a cada una de les substàncies estudiades.

2. Determinació de la calor latent vaporització del líquid.

2.1. Representeu gràficament $\ln P$ davant $1/T$ (on T ha d'estar en K) per a cada líquid.

2.2. Determineu la recta de regressió de $\ln P$ davant de $1/T$ per a cada líquid.

Pendent :
 Ordenada a l'origen: :
 Coeficient de regressió :

Calor latent de vaporització ΔH_v :

2.3. Compareu el valor de la calor latent de vaporització calculat amb el que s'indica en unes taules de propietats físiques de substàncies pures.

2.4. Representeu en el diagrama $\ln P$ vs. $1/T$ el comportament de cada substància segons l'equació d'Antoine i compareu amb els resultats experimentals obtinguts. L'equació d'Antoine és:

$$\ln P = A - \frac{B}{T + C} \quad [7]$$

on P és la pressió de vapor en mm Hg, T la temperatura en Kelvins i A, B i C són constants característiques de cada substància (les unitats de B i C venen donades en Kelvins). El valor d'aquestes constants A, B, C es donaran al Laboratori.

3. Comprovació de les regles de Trouton i de Kistyakowsky.

3.1. Anoteu a la taula els valors estimats de la calor de vaporització mitjançant la regla de Trouton i l'equació de Kistyakowsky. Justifiqueu les possibles desviacions que obtingueu amb aquest càlcul respecte als valors experimentals obtinguts tenint en compte l'estructura molecular de cada substància analitzada (recordeu que T_v és la temperatura normal d'ebullició).

SUBSTÀNCIA	T_v (°C)	ΔH_{vap} (kcal/mol)		
		Experimental	R. Trouton	Eq. Kistyakowsky

3.2. Suposem un líquid A que segueix perfectament el comportament descrit per la regla de Trouton. A més a més, es coneix que a la temperatura de 77°C la seva pressió de vapor és la mateixa que la de l'aigua a 90°C. Quina serà la temperatura d'ebullició normal del líquid A?

PRÀCTICA 5

MESURA DE LA CALOR ESPECÍFICA D'UN LÍQUID. MÈTODE DE LA CORBA DE REFREDAMENT.

1. OBJECTIU DE LA PRÀCTICA.

L'objectiu d'aquesta pràctica és la determinació de la calor específica d'un líquid utilitzant com a mètode la corba de refredament i la llei empírica establerta per Newton.

2. ASPECTES TEÒRICS

La llei de refredament de Newton expressa que quan un cos es troba a una temperatura diferent al medi, i no molt allunyada d'ell, el flux de calor que pot intercanviar (calor intercanviat per unitat de temps) és pràcticament proporcional a la diferència de temperatures existent entre el cos i el medi. Aquesta llei, no obstant, és vàlida únicament si el refredament es realitza mitjançant convecció forçada (amb l'ajuda d'un ventilador en el nostre cas), essent necessari un factor de correcció en cas que la convecció sigui natural.

Aquesta llei pot expressar-se mitjançant l'equació:

$$- \delta Q/dt = A \cdot (T - T_a) \quad [1]$$

on $-\delta Q/dt$ és la quantitat de calor cedida pel cos per unitat de temps, T és la temperatura a un temps t , T_a és la temperatura ambient i A és una constant que depèn de la superfície de intercanvi de calor al cos i de la velocitat de l'aire que arriba al cos, entre d'altres factors.

D'acord amb la llei de refredament, dos cossos de materials diferents, però en les mateixes condicions de refredament (superfície dels cossos, velocitat de l'aire, etc), la velocitat de dissipació de calor serà la mateixa si estan a la mateixa temperatura. En conseqüència, per una temperatura intermèdia T_p entre la temperatura inicial T_0 i la de l'ambient T_a , es complirà:

$$(\delta Q_1/dt)_{T_p} = (\delta Q_2/dt)_{T_p} \quad [2]$$

Cal tenir en compte que el terme de flux calorífic $(\delta Q/dt)_{T_p}$ expressa la velocitat de dissipació de calor del conjunt: calorímetre, accessoris i el líquid que es refreda. La equació [2] serà estrictament vàlida si el refredament de cada líquid es realitza amb el mateix calorímetre i amb el mateix volum de líquid, és a dir, amb la mateixa superfície d'intercanvi de calor.

Si considerem que la quantitat de calor intercanviada δQ pot expressar-se de la forma:

$$\delta Q = m \cdot c \cdot dT \quad [3]$$

essent m la massa i c la capacitat calorífica, l'equació [2] en funció de la disminució de temperatures, de les masses i capacitats calorífiques de cada líquid i de la constant del calorímetre, quedaria de la forma:

$$(m_1 \cdot c_1 + K) \cdot (dT_1/dt)_{T_p} = (m_2 \cdot c_2 + K) \cdot (dT_2/dt)_{T_p} \quad [4]$$

on m_i , c_i i $(dT_i/dt)_{T_p}$ són la massa, capacitat calorífica i variació de la temperatura amb el temps per cada líquid i i K és l'equivalent en aigua del calorímetre.

Mitjançant l'equació [4], si coneixem les corbes de refredament de dos líquids les masses dels quals i capacitats calorífiques són així mateix conegudes i es determina la variació de la temperatura amb el temps per cada un d'ells (pendent de la tangent a la corba de refredament per una mateixa temperatura T_p) podrà calcular-se la constant del calorímetre K . Veure Figura 1.

Així mateix, podrà determinar-se la capacitat calorífica d'un líquid problema si es coneix la seva corba de refredament i la constant K . Per això s'aplicarà la mateixa equació [4] determinant, pel mateix valor de T_p , la pendent de la tangent a la corba de refredament del líquid problema i un dels líquids que s'han pres com a base per la determinació de K .

D'altra banda, de l'equació [1] i de l'equació [3] podrà obtenir-se'n:

$$-m \cdot c \cdot dT = A \cdot (T - T_a) dt \quad [5]$$

$$dT / dt = -A \cdot (T - T_a) / m \cdot c \quad [6]$$

i si considerem que $b = A/m \cdot c$, resulta:

$$dT / dt = -b \cdot (T - T_a) \quad [7]$$

Integrant l'equació [5] resulta:

$$\ln(T - T_a) = -b \cdot t + \text{const.} \quad [8]$$

d'on s'obté:

$$T = T_a + \text{const.} \cdot e^{-bt} \quad [9]$$

Que expressa el valor de la temperatura T del líquid que es refreda per cada temps t .

La representació gràfica de $\ln(T - T_a)$ enfront el temps t , equació [8], permetrà ajustar una recta als valors experimentals obtinguts i obtenir el paràmetre b a partir de la pendent.

La substitució de l'equació [7] en l'equació [4], per dos líquids diferents, condueix a l'equació [11]:

$$(m_1 \cdot c_1 + K) \cdot b_1 = (m_2 \cdot c_2 + K) \cdot b_2 \quad [11]$$

on b_1 i b_2 són les pendents de les rectes d'ajust als valors experimentals dels dos líquids dels quals es coneixen les corbes de refredament.

En base a l'equació anterior, si es coneixen les corbes de refredament de dos líquids determinats, es podrà determinar gràfica o analíticament el valor de les pendents b_1 i b_2 i a partir d'aquí el valor de la constant del calorímetre K. Així mateix, conegut el valor de K i la pendent b_p del líquid problema es determinarà el valor de la capacitat calorífica c_p del líquid problema objectiu de l'assaig.

3. MÈTODE EXPERIMENTAL

El desenvolupament experimental de la pràctica consistirà en obtenir les corbes de refredament de tres líquids, dos d'ells de capacitats calorífiques conegudes per determinar la constant del calorímetre K i la tercera pel líquid problema del qual volem determinar el valor de la capacitat calorífica.

3.1. Determinació de la constant del calorímetre K.

S'utilitzaran per aquesta determinació AIGUA i TOLUÈ.

El procés experimental serà el següent:

- a) Col·locar el tub d'assaig dintre d'un vas de precipitats i pesar el conjunt.
- b) Afegir al tub d'assaig 75 ml del líquid d'assaig.
- c) Pesar el conjunt i obtenir la massa corresponent als 75 ml de líquid.
- d) Introduir el tub d'assaig amb el líquid en un bany d'aigua i escalfar suaument fins arribar a una temperatura d'uns 52-53°C.
- e) Introduir el tub d'assaig en el tub de major diàmetre ja preparat i subjectat verticalment, acoblar bé els dos tubs, tancar el conjunt col·locant adequadament l'agitador i el termòmetre i connectar el ventilador a la potència màxima.
- f) Agitar suaument i observar la temperatura del sistema. En el moment que s'arribi a 50°C anotar a la taula de resultats la temperatura del sistema cada minut, fins arribar als 35°C.
- g) Desmuntar amb cura el sistema i repetir amb l'altre líquid de capacitat calorífica coneguda.
- h) Anotar la temperatura ambient que marca el termòmetre del laboratori.

3.1.1. Càlcul de la constant del calorímetre K.

- a) Representar gràficament per cada líquid, $\ln(T-T_a)$ vs. t i determinar el valor de la pendent de la recta d'ajust corresponent.

- b) Calcular la constant del calorímetre K utilitzant l'equació [8]. Per cada líquid, les masses i les capacitats calorífiques son conegudes. Els valors de les capacitats calorífiques es consideraran constants per aquest interval de temperatura i iguals a:

$$C_p (\text{aigua}) = 0.998 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$$

$$C_p (\text{toluè}) = 0.42 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$$

3.2. Determinació de la capacitat calorífica del líquid problema.

- a) Repetir exactament el mètode experimental ja indicat anteriorment, utilitzant el líquid problema (n-heptà, xilè, ...).
- b) Determinar el valor de la pendent en la representació de $\ln(T-T_a)$ vs. t.
- c) Utilitzant l'equació [8] amb el valor de la constant K determinada anteriorment i els valors de les pendents del líquid problema i les dels líquids de referència, determinar el valor de la capacitat calorífica del líquid problema.
- d) Trobar el valor promig de la capacitat calorífica si s'han utilitzat els dos líquids de referència.

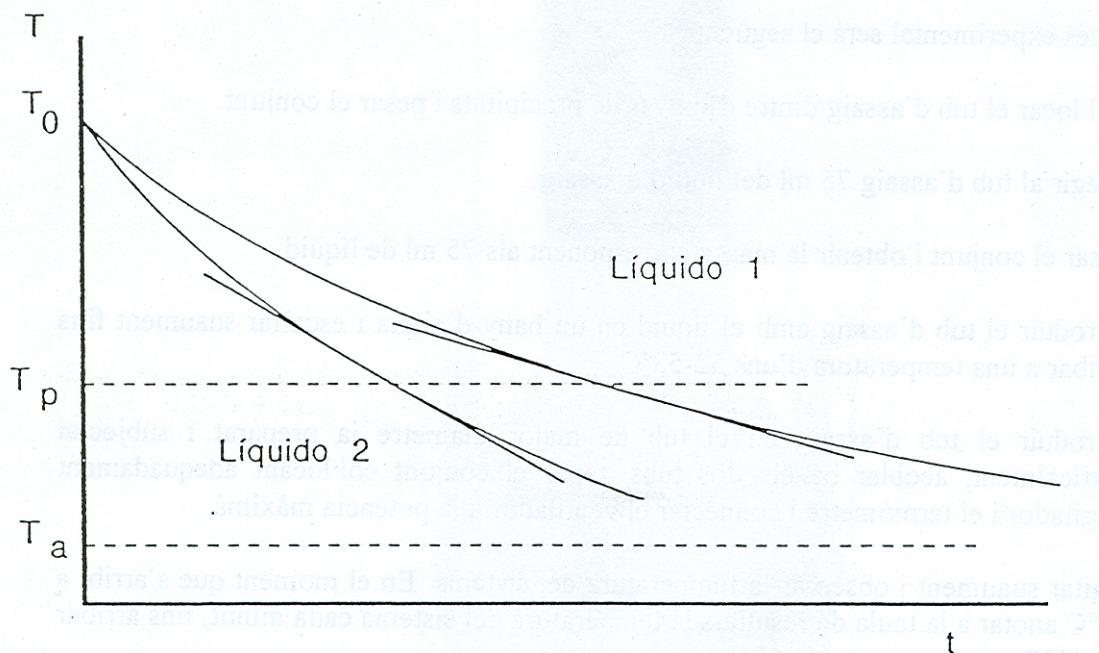


Figura 1. Corbes de refredament de dos líquids diferents.

4. BIBLIOGRAFIA

- "Experiencias de Termodinámica". M.D. Baró, S. Bordes, J.A. Ibañez, J.E. Llebot i S.Suriñach. Departamento de Termología. Universidad Autónoma de Barcelona, 1985.

DEPARTAMENT DE MÀQUINES I MOTORS TÈRMICS

PRÀCTIQUES DE TERMODINÀMICA I FÍSICO-QUÍMICA

Nom i Cognoms:

Grup:

Data: Qualificació:

PRÀCTICA 5. MESURA DE LA CALOR ESPECÍFICA D'UN LÍQUID. MÈTODE DE LA CORBA DE REFREDAMENT.

Recordeu que amb aquests informes s'avalua la competència genèrica: “Ús solvent dels recursos de la informació” en el nivell 2. Heu citar les referències, tal com us indiquen en les sessions de la Biblioteca.

RESULTATS

1. Determinació de la constant del calorímetre K.

Líquid utilitzat: Massa de líquid:g

Temperatura ambient:°C

Taula de resultats

Temps (min)	Temperatura (°C)	Temps (min)	Temperatura (°C)	Temps (min)	Temperatura (°C)

1.2. Representar gràficament la temperatura en funció del temps i obtenir les corbes de refredament del dos líquids utilitzats.

1.3. Representar gràficament $\ln(T-T_a)$ davant el temps t en cada un dels líquids emprats. Ajustar una recta als punts representats i determinar el valor de la pendent d'aquesta.

Líquid:

Pendent de la recta d'ajust :
 Ordenada a l'origen :
 Equació de la recta :

Paràmetre **b**:

Líquid:

Pendent de la recta d'ajust :
 Ordenada a l'origen :
 Equació de la recta :

Paràmetre **b**:

1.4. A partir dels valors dels paràmetres b obtinguts en les representacions anteriors i utilitzant l'equació [8], determinar el valor de la constant del calorímetre K .

K :

2. Determinació de la calor específica del líquid problema.

Líquid utilitzat: Massa de líquid:g

2.1. Representar gràficament la temperatura en funció del temps. Emprar per això la mateixa representació utilitzada pels dos líquids de referència.

Taula de resultats

Temps (min)	Temperatura (°C)	Temps (min)	Temperatura (°C)	Temps (min)	Temperatura (°C)

2.2. Representar gràficament $\ln(T-T_a)$ davant el temps t i determinar el valor de la pendent de la recta d'ajust.

Pendent de la recta d'ajust :
Ordenada a l'origen :
Equació de la recta :

Paràmetre **b**:

2.3. A partir del paràmetre b del líquid problema i del d'un dels dos líquids de referència, determinar el valor de la capacitat calorífica del líquid problema utilitzant l'equació [8].

Líquid problema:
Líquid de referència:

Capacitat calorífica $C =$

Comparar el valor experimental trobat amb el tabulat.

PRÀCTICA 6

LLEI DE BOYLE-MARIOTTE. DETERMINACIÓ DEL COEFICIENT DE COMPRESSIBILITAT ISOTÈRMIC κ D'UN GAS.

1. OBJECTIU DE LA PRÀCTICA

L'objectiu de la pràctica està en la verificació de la llei de Boyle-Mariotte, així com determinar el coeficient de compressibilitat κ d'un gas (aire en el nostre cas).

2. ASPECTES TEÒRICS

Una massa de gas concentrada en un recipient a temperatura constant, manté constant el producte de la seva pressió pel volum. Aquesta llei, que és un cas particular de l'equació dels gasos ideals $P \cdot V = n \cdot R \cdot T$, és coneguda com la llei de Boyle-Mariotte i s'expressa matemàticament com:

$$P \cdot V = \text{constant} \quad [1]$$

Encara que és rigorosament certa en els gasos ideals, els errors són apreciables per a gasos amb comportament real a baixes temperatures i a altes pressions. Així i tot, és suficientment precisa per qualsevol aplicació pràctica a pressió atmosfèrica i temperatures properes a l'ambient.

Si tenim en compte un gas en condicions tals que es compleixi la llei de Boyle-Mariotte, la representació gràfica de la seva evolució isotèrmica en un diagrama P-V condueix a un arc de hipèrbola equilàtera que té per asíptotes els eixos de coordenades. Així mateix, la representació de PV enfront de la pressió P dóna lloc a una línia recta paral·lela a l'eix d'abscisses.

La llei de Charles-Gay-Lussac, un altre cas particular de l'equació dels gasos ideals, s'expressa: a pressió constant el volum d'una determinada massa de gas és directament proporcional a la temperatura absoluta. Matemàticament s'indica mitjançant l'expressió:

$$\frac{V}{T} = \frac{V_0}{T_0} = \text{const.} \quad \text{o bé} \quad V = \text{const} \cdot T \quad [2]$$

on la constant és funció de la pressió i proporcional a la quantitat de gas. Així, per una determinada massa de gas al variar V i T, per a cada valor de P, obtindrem una línia recta en una representació gràfica V-T, essent el pendent funció de la pressió escollida. Com és evident, aquesta llei serà vàlida únicament per a gasos amb comportament ideal.

Combinant les lleis anteriors, es podrà obtenir que a volum constant la pressió d'una determinada massa de gas és directament proporcional a la temperatura. Això s'expressarà com:

$$\frac{P}{T} = \frac{P_0}{T_0} = \text{const} \quad \text{o bé} \quad P = \text{const} \cdot T \quad [3]$$

on aquesta nova constant de proporcionalitat és funció únicament del volum. Així, per cada valor de volum, la representació de P davant T donarà lloc a una línia recta el pendent de la qual serà funció del volum escollit.

La variació d'una variable d'estat davant les altres es podrà expressar mitjançant els coeficients tèrmics: α , β i κ . Aquests coeficients tèrmics es defineixen com:

$$\alpha = \frac{1}{V} \cdot \left(\frac{\delta V}{\delta T} \right)_p \quad \kappa = - \left(\frac{1}{V} \right) \cdot \left(\frac{\delta V}{\delta P} \right)_T \quad \beta = \frac{1}{P} \cdot \left(\frac{\delta P}{\delta T} \right)_V \quad [4]$$

essent α el coeficient d'expansió isobàric, κ el coeficient de compressibilitat isotèrmic i β el coeficient piezomètric.

Els coeficients estan relacionats entre sí per l'expressió: $\alpha = \beta \cdot \kappa \cdot P$, per tant:

$$\left(\frac{\delta V}{\delta T} \right)_p = \alpha \cdot V \quad \left(\frac{\delta V}{\delta P} \right)_T = -\kappa \cdot V \quad \left(\frac{\delta P}{\delta T} \right)_V = \alpha / \kappa \quad [5]$$

3. PART EXPERIMENTAL

3.1. Equip experimental.

L'equip experimental és el que es mostra a la Figura 1. Consisteix en un termostat amb un recipient C on hi ha l'aigua a termostatar, dos recipients A i B que contenen mercuri i que estan units entre sí mitjançant un tub flexible. El recipient A està termostatat, pel que és possible efectuar assaigs a diferents temperatures, el recipient A, a més a més del mercuri, conté una determinada quantitat de gas (aire) en el recinte, la temperatura del qual serà **T** i ocuparà un volum **V** que es determinarà mitjançant l'equació:

$$V = V_0 + 1.02 \cdot m \quad [6]$$

Essent **V₀ = 1.02 ml**, el volum que ocupa el gas a la part superior del recinte A (zona marcada de color marró), **m** l'alçada en cm ocupada pel gas, que es llegeix directament de l'escala graduada (Figura 1), i el factor **1.02** la secció en cm² del recinte.

Per variar la pressió a la que està sotmès el gas del recipient A, s'haurà de desplaçar el recipient B amunt o avall, de forma que s'estableixi un desnivell **h_i** entre les superfícies lliures del Hg d'ambdós recipients, (Figura 1). La pressió del gas serà: **P_i = P₀ + h_i**. On **P₀** és la pressió atmosfèrica en mm de Hg. El volum ocupat pel gas serà **V_i**.

És evident que si els dos recipients estan a temperatures diferents, el recipient A a la temperatura de treball (T) i el recipient B a la temperatura ambient del laboratori (T_a), per avaluar la pressió a la que està sotmesa el gas amb major precisió hauran d'efectuar-se correccions dels nivells de Hg en ambdós recipients. Aquestes correccions s'efectuen com si el Hg d'ambdós recipients estigués a 0°C.

Si h és el desnivell que s'observa entre ambdues branques i l és la part de la branca A del manòmetre sotmesa a la temperatura T del líquid termostatat i anomenem ρ_a , ρ_0 i ρ a les densitats del mercuri a la temperatura ambient, a 0°C i a la temperatura T , respectivament, el desnivell h_0 que s'observaria si tot el mercuri del manòmetre estigués a 0°C , seria:

$$h_0 = (h + l) \cdot \left(\frac{\rho_a}{\rho_0} \right) - l \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right) \quad [7]$$

essent el primer terme la correcció del nivell de la branca B, que està a la temperatura ambient, i el segon terme a la correcció de la branca A, que està a la temperatura T del líquid termostatat.

La pressió a la que està sotmès el gas serà, per tant:

$$P_i = P_0 + (h_0) \rho_0 \quad [8]$$

El valor de la densitat del Hg a diferents temperatures s'indica en la taula situada al final del Manual de Pràctiques.

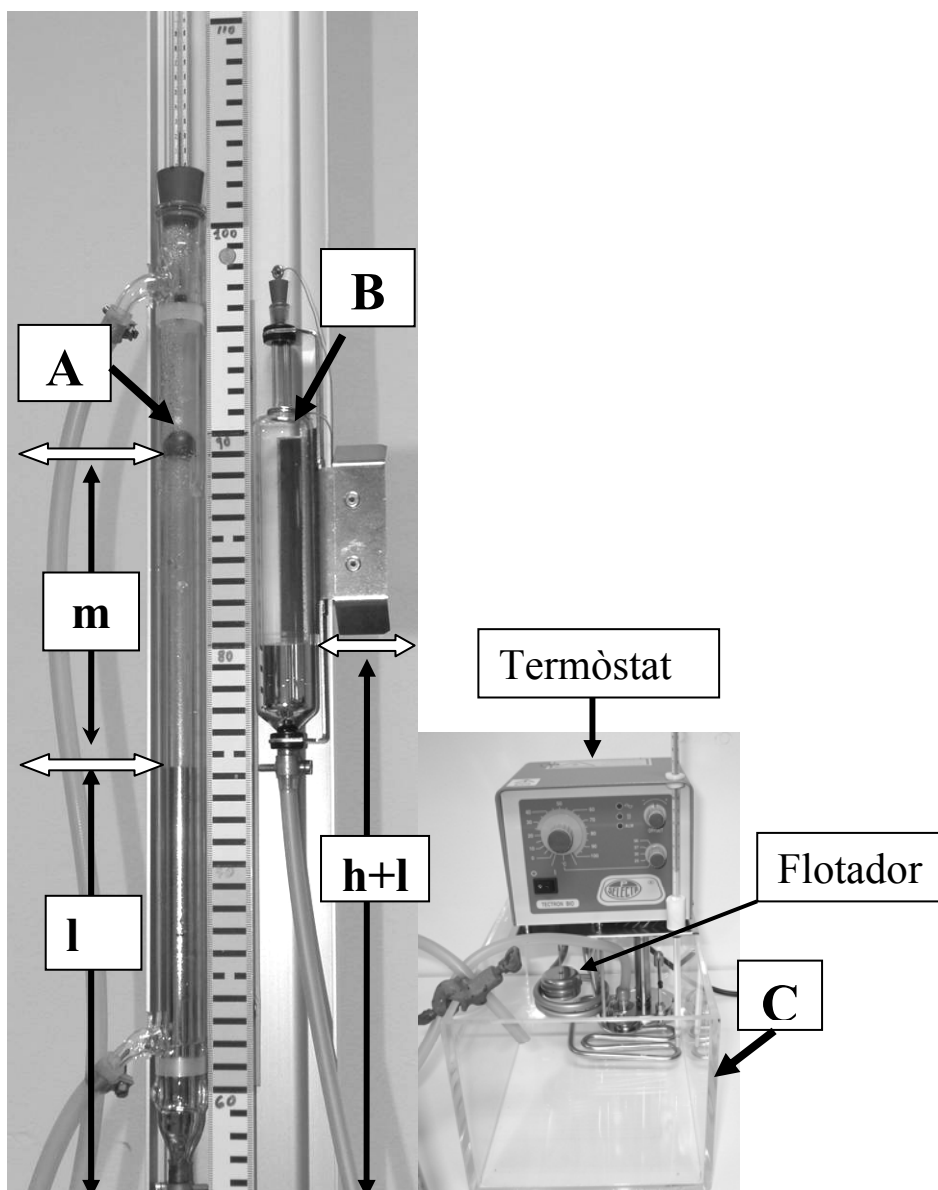


Figura 1. Dispositiu per estudiar el comportament d'un gas.

3.2. Mètode experimental.

3.2.1. Verificació de la llei de Boyle-Mariotte.

- a) Omplir amb aigua el recipient C (Figura 1) de l'equip termostatitzador fins a un nivell per damunt de la zona mitja del flotador
- b) Connectar l'equip termostatitzador i mantenir el recipient a una temperatura molt pròxima a la de l'ambient. Aquesta serà la temperatura inicial de treball.
- c) Treure el tap del reservori de mercuri (recinte B).
- d) Quan el termòmetre del recipient A arribi a una temperatura constant, anotar a la taula de resultats els valors de $h+l$ (alçada del Hg en el recinte B), l (alçada del Hg en el recinte A) i m (altura ocupada pel gas en el recinte A).
- e) Situar el recipient B a diferents alçades per variar la pressió del gas, desplaçant-lo, des de 40 a 110 cm de l'escala graduada, i anotar a la taula de resultats els valors corresponents a m_i , $(h+l)_i$ i l_i , obtinguts al col·locar B en unes 10 posicions diferents.
- f) Repetir la mateixa experiència anterior per a 4 temperatures més. L'experiència es realitzarà quan la temperatura del termòstat estigui ben estabilitzada. La temperatura més alta haurà de ser d'uns 40°C per sobre la temperatura ambient. Anotar els resultats a la taula corresponent.
- g) Comprovar la llei de Boyle-Mariotte. Representar cada isoterma en el diagrama P-V i observar si segueix una hipèrbola equilàtera. Representar el producte PV enfront P, en cada isoterma i observar la constància de PV en el suposat que el comportament del gas sigui ideal.

4. DETERMINACIÓ DEL COEFICIENT TÈRMIC

4.1. Determinació del coeficient de compressibilitat κ .

La determinació del coeficient de compressibilitat isoterm κ , s'efectuarà a partir dels resultats obtinguts per la comprovació de la llei de Boyle-Mariotte, és a dir, de la relació entre la pressió i el volum a temperatura constant.

Pel càlcul del coeficient de compressibilitat isoterm κ podem determinar el valor de $(\delta V/\delta P)_T$ avaluant el pendent en un punt de la corba isoterma en una representació en un diagrama P-V, dividir pel volum corresponent i canviar el signe. Per determinar el valor del pendent podem utilitzar els següents mètodes: a) prendre un parell de punts de la isoterma suficientment pròxims i equidistants del punt considerat i assimilar la derivada al quocient $\Delta V/\Delta P$ i b) calcular la derivada en el punt considerat de la funció $V = f(P)$ ajustada a les dades experimentals.

Repetint el càlcul en diferents punts de la isoterma es podrà analitzar la dependència de κ amb la pressió a partir de la representació gràfica. Així mateix, determinant κ en diferents

isotermes (per una mateixa pressió) es podrà estudiar la influència de la temperatura sobre aquest coeficient en representar gràficament κ enfront T.

5. **BIBLIOGRAFIA**

- “Experiencias de Termodinámica”. M.D. Baró, S. Bordes, J.A. Ibañez, J.E. Llebot i S.Suriñach. Departamento de Termología. Universidad Autónoma de Barcelona, 1985.
- “Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química”, J.M. Smith y H.C. Van Ness. McGraw-Hill, 4ª ed. española, 1990. Capítulo 3.

DEPARTAMENT DE MÀQUINES I MOTORS TÈRMICS

PRÀCTIQUES DE TERMODINÀMICA I FÍSICO-QUÍMICA

Nom i Cognoms:

Grup:

Data: Qualificació:

PRÀCTICA 6. LLEI DE BOYLE-MARIOTTE. DETERMINACIÓ DEL COEFICIENT DE COMPRESSIBILITAT ISOTÈRMIC κ D'UN GAS.

Recordeu que amb aquests informes s'avalua la competència genèrica: "Ús solvent dels recursos de la informació" en el nivell 2. Heu citar les referències, tal com us indiquen en les sessions de la Biblioteca.

1. RESULTATS

Gas utilitzat:

Pressió atmosfèrica P_0 :mm Hg

Temperatura ambient T_{amb} :°C

Volum de gas no mesurable V_0 :ml

1.1. Verificació de la llei de Boyle-Mariotte.

T (°C)	m (cm)	l (mm)	l+h (mm)	V (ml)	h_0 (mm)	P (atm)	P·V (atm·l)

(completar per a cada temperatura d'assaig)

1.1.1. Representar gràficament per a cada temperatura els valors de P enfront V i de P·V enfront P.

1.1.2. Analitzar les isoterms obtingudes i indicar si el gas té o no un comportament ideal.

2. DETERMINACIÓ DEL COEFICIENT TÈRMIC.

2.1. Coeficient de compressibilitat isotèrmic κ .

2.1.1. A partir de la representació de les isoterms en el diagrama P-V, calcular el coeficient de compressibilitat isotèrmic κ a diferents pressions per cada temperatura de treball. El valor del pendent es determinarà aplicant qualsevol dels criteris indicats.

T (°C)	P (atm)	V (ml)	$(\delta P/\delta V)_T$ (atm/ml)	$(\delta V/\delta P)_T$ (ml/atm)	κ (atm ⁻¹)

(completar per a cada temperatura de treball)

2.1.2. Deducir una expressió per a calcular el coeficient κ d'un gas ideal a partir de la seva equació d'estat.

2.1.3. Representar gràficament els valors de κ enfront P i 1/P. Dels resultats obtinguts, analitzar la dependència de κ respecte a la pressió i valorar-la en funció de la conclusió obtinguda en l'apartat 1.1.2.

2.1.4. A partir de les gràfiques de l'apartat anterior, feu una taula indicant per una determinada pressió fixada P, els valors de κ per cada temperatura analitzada.

2.1.5. Representar els valors de κ trobats en l'apartat anterior enfront de la temperatura i analitzar la seva dependència. A la vista de la resposta de l'apartat 2.1.3, valorar el resultat obtingut

Pressió:atm

T (K)	V (ml)	$(\delta V/\delta P)_T$ (ml/atm)	κ (atm ⁻¹)

2.1.6. Valorar quin és l'efecte de la correcció de les densitats del mercuri (equació 7). Si fèssim els càlculs sense aquesta correcció l'error seria gran ?

2.1.7. Busqueu informació sobre les aplicacions pràctiques dels coeficients tèrmics i redacteu-ne una plana.

PRÀCTICA 7

DETERMINACIÓ DE L'EXPONENT DE L'ADIABÀTICA γ D'UN GAS MITJANÇANT EL MÈTODE DE CLEMENT-DESORMES

1. OBJECTIU DE LA PRÀCTICA

L'objectiu de la pràctica és la determinació de l'exponent de l'adiabàtica γ d'un gas o relació entre les capacitats calorífiques a pressió constant, C_p , i a volum constant C_v , és a dir $\gamma = C_p/C_v$.

Si bé existeixen molts mètodes per la seva determinació experimental, en aquesta pràctica s'aplicarà el mètode de Clement i Desormes, que es fonamenta en l'expansió adiabàtica d'un gas i el seu posterior calentament fins la temperatura inicial.

2. ASPECTES TEÒRICS

Suposem un recipient que conté una certa quantitat d'un gas a la temperatura ambient i a la pressió P_1 major que l'atmosfèrica. En un moment determinat es redueix de forma molt ràpida la seva pressió fins a arribar a l'atmosfèrica P_a . Si el procés és molt ràpid, l'intercanvi de calor entre el sistema i el medi ambient es pot considerar menyspreable, pel que la transformació que ha experimentat el gas es pot considerar del tipus adiabàtic. Si considerem que el gas és un gas perfecte i que el sistema ha evolucionat reversiblement, l'equació que relaciona les variables termodinàmiques P i V serà:

$$P_1 \cdot V_1^\gamma = P_a \cdot V_a^\gamma \quad [1]$$

On V_1 és el volum inicial de gas a la pressió P_1 i a la temperatura ambient i V_a és el volum del gas a la pressió P_a aconseguida després de l'expansió adiabàtica.

Durant l'expansió adiabàtica el gas s'ha refredat disminuint la seva temperatura. Al deixar-lo en contacte amb el medi ambient es escalfarà progressivament, a volum constant, fins arribar de nou a la temperatura ambient inicial. Això provocarà un augment gradual de la pressió fins un valor P_2 .

Donat que la temperatura inicial del gas i la que s'obté després d'aquest calentament és la mateixa, podem suposar la transformació isoterma entre l'estat inicial i l'estat final del sistema i en conseqüència la relació entre variables es podrà establir com segueix:

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_a \quad [2]$$

o també:

$$P_1^\gamma \cdot V_1^\gamma = P_2^\gamma \cdot V_a^\gamma \quad [3]$$

De les equacions [1] i [3] podem obtenir:

$$\frac{P_1}{P_a} = \left(\frac{V_a}{V_1}\right)^\gamma \quad \text{i} \quad \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^\gamma = \left(\frac{V_a}{V_1}\right)^\gamma \quad [4]$$

és a dir:

$$\frac{P_1}{P_a} = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^\gamma \quad [5]$$

Prenent logaritmes, es podrà expressar com:

$$\gamma = \frac{\ln(P_1 / P_a)}{\ln(P_1 / P_2)} = \frac{\ln P_1 - \ln P_a}{\ln P_1 - \ln P_2} \quad [6]$$

Aquesta última equació serà la que s'aplicarà per determinar el coeficient γ .

Per altre part, el valor de γ pot determinar-se a partir de les capacitats calorífiques C_p i C_v ja que, com s'ha indicat, $\gamma = C_p/C_v$. La capacitat calorífica C_p és major que C_v i en conseqüència $\gamma > 1$. A més, per un gas perfecte, es compleix la relació de Mayer essent la diferència $C_p - C_v = R$. La dificultat de determinar C_v per un determinat gas, fa que el coneixement de γ pugui permetre la seva determinació si es coneix el valor de C_p .

El valor teòric de γ pot predir-se, de forma aproximada i per les molècules monoatòmiques i diatòmiques, en base a la teoria cinètica dels gasos ja que γ està relacionat amb el número d'àtoms que componen la molècula. Per les monoatòmiques el número de graus de llibertat, f , és de 3; en les diatòmiques és $f = 5$, etc., relacionats amb els moviments de translació, rotació i vibració. En base a això el coeficient γ es determina per la relació:

$$\gamma = (f+2) / f \quad [7]$$

3. PART EXPERIMENTAL

La determinació experimental de γ s'efectuarà en dos gasos de característiques diferents. Per una part s'utilitzarà un gas monoatòmic tipus **Heli** (He) i per altra un gas diatòmic tipus **N₂**, **O₂** o bé **aire** (que pot considerar-se com si fos diatòmic).

3.1. Equip experimental.

L'equip experimental és el descrit a la Figura 1. Consta d'un tub per l'entrada del gas que va connectat a un compressor (en el cas de l'aire) o bé a una bombona amb un manoreductor en el cas d'altres tipus de gasos. Entre el recipient i la font del gas es disposa d'una clau L, per permetre l'entrada del fluid o aïllar el recipient un cop s'hagi introduït el gas. Així mateix, un altre conducte comunica el recipient amb un manòmetre de mercuri M, per conèixer la pressió

del sistema en cada un dels processos que sigui el gas. Un altre conducte de major diàmetre permet comunicar directament el recipient amb l'exterior si s'elimina el tap de tancament T.

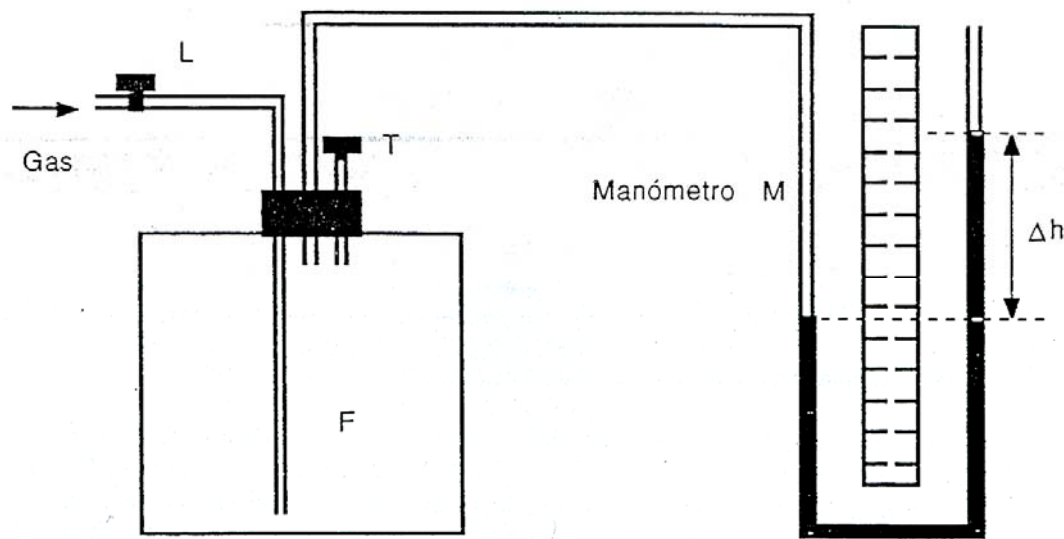


Figura 1. Equip experimental per determinar el coeficient γ d'un gas

3.2. Procediment experimental

- Treure el tap T de forma que el recipient comuniqui directament amb l'exterior. Comprovar que la clau que aïlla el recipient de la font de gas L, estigui tancada.
- Posar en funcionament el compressor (en el cas de l'aire) o obrir la vàlvula de la bala de gas (assegurar-se com a precaució que la vàlvula del manoreductor està totalment afluixada i que el manòmetre de sortida indiqui zero).
- Obrir la clau que permet l'entrada de gas en el recipient. Obrir suaument la vàlvula del compressor (o bé la vàlvula del manoreductor) fins observar un lleuger flux de gas en el recipient. Deixar que el gas flueixi durant uns minuts per purgar el recipient i eliminar tota traça d'un altre gas.
- Tancar amb el tap T el tub que connecta el recipient amb l'exterior i omplir el recipient de gas fins observar que una de les rames del manòmetre indiqui uns 150-160 mm de Hg (aproximadament). Comprovar que la pujada del Hg per la rama del manòmetre s'efectua de forma lenta i regular, manipulant la vàlvula del compressor o del manoreductor si fos necessari.
- Tancar la clau L que aïlla el recipient i tancar totalment la vàlvula del compressor (o bé afluixar totalment la del manoreductor) per tallar tot flux de gas.
- Donat que la temperatura del gas en el recipient serà superior a la de l'ambient, deixar establitzar el sistema de forma que pugui intercanviar calor amb l'exterior i arribar finalment a la temperatura ambient. La pressió del sistema davallarà lleugerament,

observant-se una lleugera disminució de la diferència d'alçades entre ambdós rames. Un cop el sistema hagi arribat a l'equilibri tèrmic amb l'ambient, cessarà tot moviment del Hg a les rames del manòmetre. Esperar uns minuts fins no observar cap moviment. En aquestes condicions llegir la diferència d'alçades entre ambdues rames Δh_1 .

La pressió en el sistema serà: $P_1 = P_a + \Delta h_1$, essent P_1 la pressió atmosfèrica en mm de Hg.

Anotar a la taula de resultats els valors de Δh_1 , P_a i P_1 .

- g) Treure el tap que comunica el recipient amb l'exterior, amb el que l'aire s'escaparà del recipient. Tornar a col·locar el tap en l'instant just en el que les dues rames del manòmetre es creuin. La pressió en aquest instant serà l'atmosfèrica P_a .
- h) Donat que l'expansió adiabàtica del gas provoca el descens de la temperatura, el sistema absorbirà calor de l'exterior fins arribar a l'equilibri tèrmic. Això donarà lloc a una variació de la pressió en el sistema que es manifestarà amb un moviment de les columnes de Hg del manòmetre. Arribat novament a l'equilibri tèrmic amb el medi exterior, el manòmetre s'estabilitzarà. Seguir l'evolució del manòmetre durant uns minuts fins no observar-hi variació. En aquest instant llegir la diferència d'alçades entre ambdues rames Δh_2 .

La pressió en el sistema serà: $P_2 = P_a + \Delta h_2$, en mm de Hg.

Anotar a la taula de resultats els valors de Δh_2 , i P_2 .

- i) Tornar a repetir l'experiència introduint més gas en l'interior del recipient, sense efectuar com és lògic, l'etapa de purgat, obrint la clau L i la vàlvula del compressor (o bé del manoreductor). Efectuar un mínim de 5 experiències amb el gas utilitzat. Anotar els valors obtinguts en la taula de resultats, calcular el valor de γ per cada experiència en base a l'equació [5] i determinar el valor promig de γ del gas estudiat.
- j) Finalitzada la sèrie d'experiències amb un dels gasos s'obrirà el tap T per tornar el manòmetre a zero, es parará el compressor (o bé es tancarà la vàlvula de la bala de gas), es desconnectarà el tub que els uneix al recipient i es procedirà a descarregar el compressor (o bé el manoreductor de la bala).
- k) Efectuar una nova sèrie d'experiències amb l'altre gas, connectant el recipient a la font de gas corresponent.

4. **BIBLIOGRAFIA**

- "Experimentos de Fisicoquímica". M. Urquiza. De. Limusa-Wiley S.A., México 1969. Cap. 1, pag. 25-27.
- "Química Física". W.J. Moore. De. Urmo, 1977. Vol. 1, cap. 4.
- "Experimentos de Fisicoquímica". D.P. Shoemaker i C.W. Garland. De. Uteha, 1968. Cap. III, pag.77.

DEPARTAMENT DE MÀQUINES I MOTORS TÈRMICS

PRÀCTIQUES DE TERMODINÀMICA I FÍSICO-QUÍMICA

Nom i Cognoms:

Grup:

Data: Qualificació:

PRÀCTICA 7. DETERMINACIÓ DE L'EXPONENT DE L'ADIABÀTICA γ D'UN GAS MITJANÇANT EL MÈTODE DE CLEMENT-DESORMES

Recordeu que amb aquests informes s'avalua la competència genèrica: "Ús solvent dels recursos de la informació" en el nivell 2. Heu citar les referències, tal com us indiquen en les sessions de la Biblioteca.

RESULTATS

Gas utilitzat :

Pressió atmosfèrica P_a :mm Hg

Δh_1 mm Hg	Δh_2 mm Hg	P_1 mm Hg	P_2 mm Hg	γ

Valor promig γ :

QÜESTIONARI

1. Representar els processos indicats en la realització de la pràctica en els diagrames P-V i T-S.
2. Calcular el valor de γ , per cada gas utilitzat en la pràctica, en base a l'equació [6] i a la relació de capacitats calorífiques C_p i C_v . Els valors de C_p i C_v es determinaran a partir de les taules i es suposarà que el seu comportament és el d'un gas perfecte. Comparar aquests valors amb els obtinguts experimentalment.

PRÀCTICA 8

DETERMINACIÓ DEL COEFICIENT ADIABÀTIC D'UN GAS: MÈTODE DE RÜCKHARDT

1. OBJECTIU DE LA PRÀCTICA

En aquesta pràctica s'avalua el coeficient adiabàtic γ d'un gas mitjançant l'expansió i compressió adiabàtica d'una massa de gas coneguda en un recinte. Aquestes expansions i compressions es realitzen mitjançant oscil·lacions respecte la posició d'equilibri d'un oscil·lador que tanca el recinte. El fluid és subministrat de manera contínua i surt a l'exterior per una petita obertura situada en el tub on es mou l'oscil·lador. Aquesta sortida permet mantenir l'oscil·lador estable i amb oscil·lacions no esmorteïdes. Com a conseqüència de la rapidesa de les oscil·lacions, podem considerar que el procés és adiabàtic i per tant sense intercanvi de calor amb l'exterior.

2. EQUIP UTILITZAT

L'equip utilitzat consta de:

- 1) Bomba d'aire que impulsa un petit flux d'aire cap el sistema.
- 2) Sistema de regulació de l'aire (clau i cargol d'ajust fi).
- 3) Ampolla de vidre amortidora.
- 4) Matràs de volum V amb entrada d'aire mitjançant un capil·lar. Va connectat al tub de vidre vertical on es mou l'oscil·lador. Aquest tub conté dues marques dintre de les quals es procurarà que es mogui l'oscil·lador i una petita obertura per on surt l'aire cap a l'exterior.
- 5) Comptador del nombre d'oscil·lacions produïdes. Aquest sistema disposa d'un dispositiu òptic que permet la lectura.
- 6) Oscil·lador de massa m i radi r .

3. PROCEDIMENT EXPERIMENTAL

El procediment experimental serà:

- a) Procurar que el tub de vidre estigui ben col·locat i absolutament net (en cas contrari es netejarà amb etanol).
- b) Determinar el pes de l'oscil·lador amb la balança (repetir 4 vegades la pesada, anotar cada resultat i determinar el valor mig).

- c) Determinar el radi de l'oscil·lador amb el micròmetre (repetir 4 vegades la mesura, anotar cada resultat i determinar el valor mig).
- d) Posar en funcionament la bomba d'aire.
- e) Comprovar que el mesurador d'oscil·lacions estigui ben centrat i en funcionament.
- f) Col·locar l'oscil·lador en el tub de vidre i comprovar que les oscil·lacions són estables i pràcticament dintre de les marques més allunyades del centre.
- g) Posar el comptador a zero i mesurar el temps que es necessita per fer 200 oscil·lacions (repetir la mesura i determinar el valor mig del període).
- h) Parar la bomba d'aire.

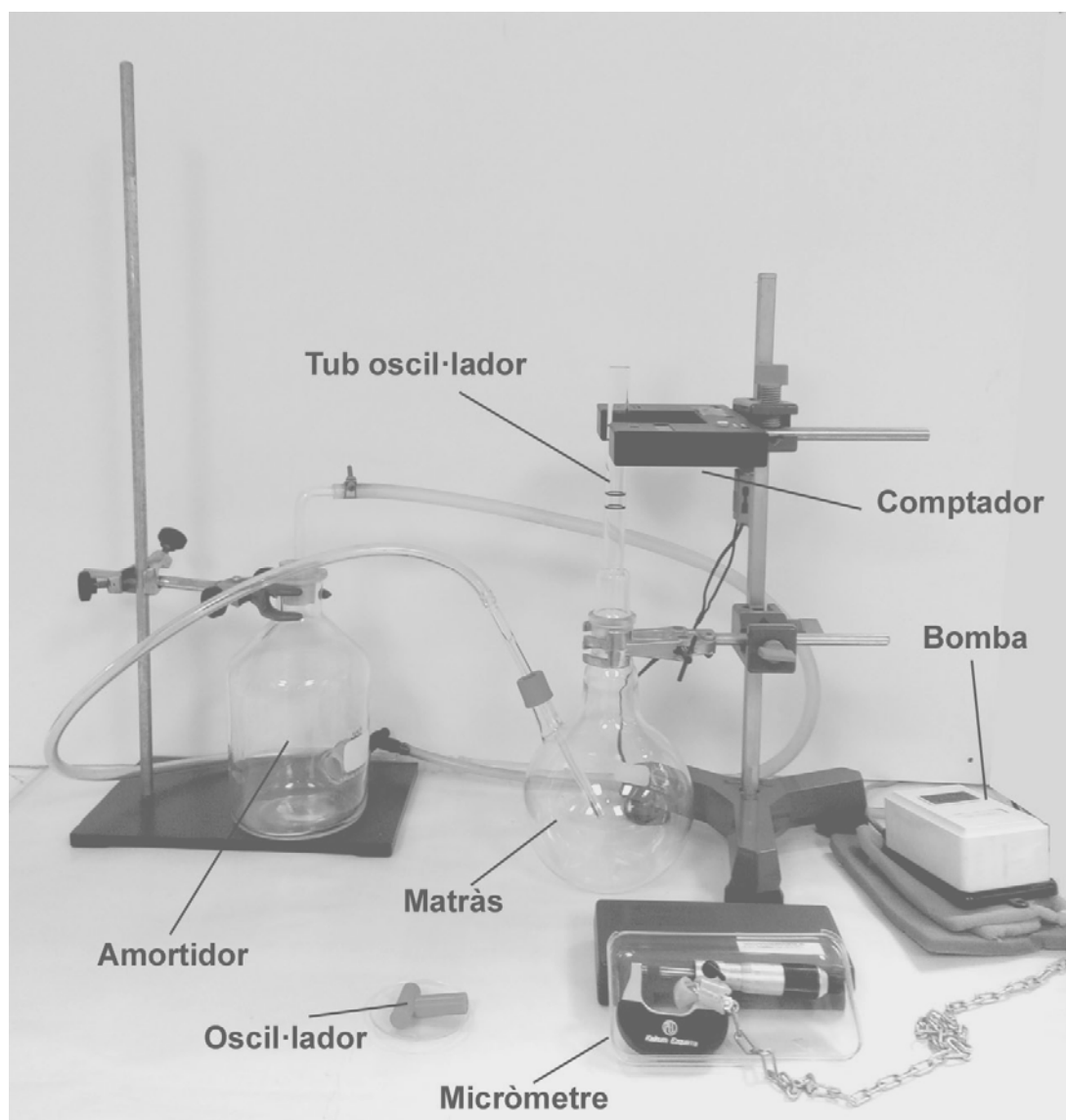


Figura 1. Equip experimental per determinar el coeficient γ d'un gas

DEPARTAMENT DE MÀQUINES I MOTORS TÈRMICS

PRÀCTIQUES DE TERMODINÀMICA I FÍSICO-QUÍMICA

Nom i Cognoms:

Grup:

Data: Qualificació:

**PRÀCTICA 8. DETERMINACIÓ DEL COEFICIENT ADIABÀTIC D'UN GAS:
MÈTODE DE RÜCKHARDT**

Recordeu que amb aquests informes s'avalua la competència genèrica: "Ús solvent dels recursos de la informació" en el nivell 2. Heu citar les referències, tal com us indiquen en les sessions de la Biblioteca.

1. Gas utilitzat:

2. Determinació de la massa de l'oscil·lador m(kg):

MESURA 1	MESURA 2	MESURA 3	MITJANA

3. Determinació del radi r (m) de l'oscil·lador:

MESURA 1	MESURA 2	MESURA 3	MITJANA

4. Determinació del període d'oscil·lació.

Es determina mitjançant el nombre d'oscil·lacions i el temps:

$$T = \frac{t(s)}{n(osc.)} (s) \quad [1]$$

NOMBRE OSCIL·LAC (n)	TEMPS (s)	PERIODE T (s)

Valor mig del període: $T = \dots\dots\dots(s)$

5. Determinació de la pressió interna del gas: P

$$P = P_L + \frac{mg}{r^2 \pi} \quad [2]$$

on P_L és la pressió atmosfèrica que s'ha de mesurar i escriure en Pa:

$$P_L = \dots\dots\dots \text{ Pa}$$

I d'aquí:

$$P = \dots\dots\dots \text{ Pa}$$

6. Determinació del coeficient adiabàtic γ

El coeficient adiabàtic es determina mitjançant l'equació:

$$\gamma = \frac{4mV}{T^2 r^4 P} \quad [3]$$

on $V=1,160 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$

El valor de γ és de: $\dots\dots\dots$

7 Deducir l'equació [3]

PRÀCTICA 9

EFFECTE JOULE-THOMSON

1. OBJECTIU DE LA PRÀCTICA

Mesurar el coeficient de Joule-Thomson com una estimació de la desviació d'un gas real respecte d'un gas ideal.

2. EQUIP EXPERIMENTAL

- Aparell Joule-Thomson
- Tub de gas CO₂
- Tub de gas O₂

3. FONAMENT TEÒRIC

3.1. Concepte d'expansió lliure d'un gas en un procés de flux estacionari (Expansió de Joule-Thomson).

Aquest procés es produeix quan un gas real a una temperatura T_1 i sotmès a una pressió P_1 , s'expansiona adiabàticament fins a una pressió P_2 ($P_2 < P_1$) i una temperatura T_2 ($T_2 \neq T_1$), en passar a través d'un estrangulament o paret porosa. Aquest procés té lloc sense efectuar-se treball mecànic. (Figura 1)

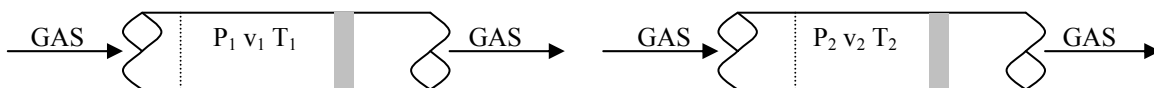


Figura 1. Experiència de Joule-Thomson.

Si ens fixem en l'equació de balanç d'energia en un sistema obert de flux estacionari:

$$q - w_a = \Delta h + \Delta e_c + \Delta e_p \quad [1]$$

Si menyspreem Δe_p , i suposem que el fluid passa prou lentament com perquè $c_1 \approx c_2$ ($\Delta e_c = 0$), llavors imposant les condicions termodinàmiques descrites anteriorment ($q=0$ i $w_a=0$). S'obté:

$$0 = \Delta h \quad [2]$$

Per tant, el procés d'expansió lliure d'un gas és un procés on la variació d'entalpia específica entre la sortida i l'entrada es manté constant. (Això no vol dir que l'entalpia específica es

mantingui constant durant el procés, ja que els principis termodinàmics només s'apliquen als estats d'equilibri i aquí l'esmentat procés és irreversible).

3.2. Línia isentàlpica. Coeficient Joule-Thomson.

Suposem que el flux de gas travessa diverses parets poroses tal com s'observa en la Figura 2:

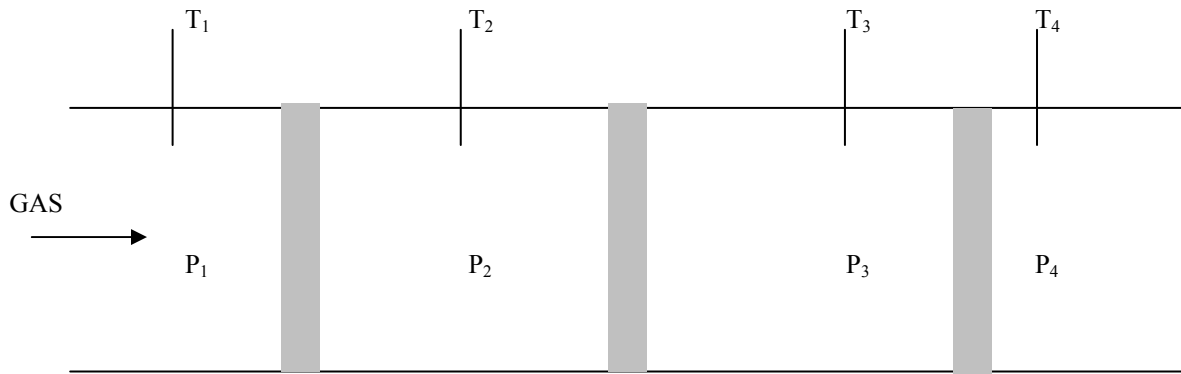


Figura 2. Sèrie d'expansions Joule-Thomson d'un gas.

Si en assolir l'estat d'equilibri mesurem els valors de T i P de cadascuna de les regions separades pels tabics porosos i els representem en un diagrama T - P , el lloc geomètric d'aquests punts serà una línia isentàlpica. Cal destacar que aquesta línia no representa una sèrie contínua d'estats d'equilibri, ja que la transformació és irreversible sinó una successió de punts discontinus d'igual entalpia. (Figura 3)

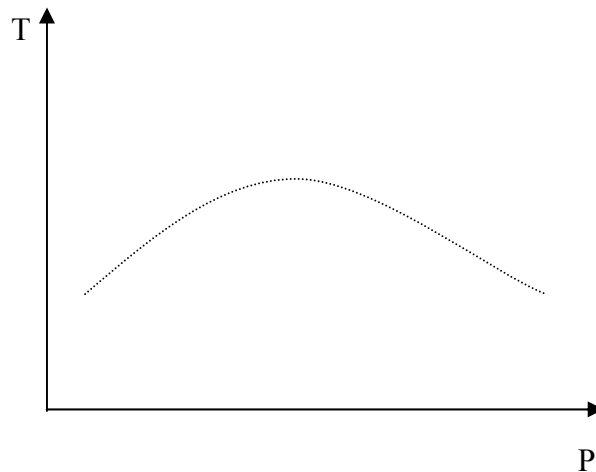


Figura 3. Línia isentàlpica.

Realitzant sèries d'experiències Joule-Thomson a diferents condicions inicials, sempre amb el mateix gas, obtindrem diferents *línies isentàlpiques* com s'observa en la Figura 4.

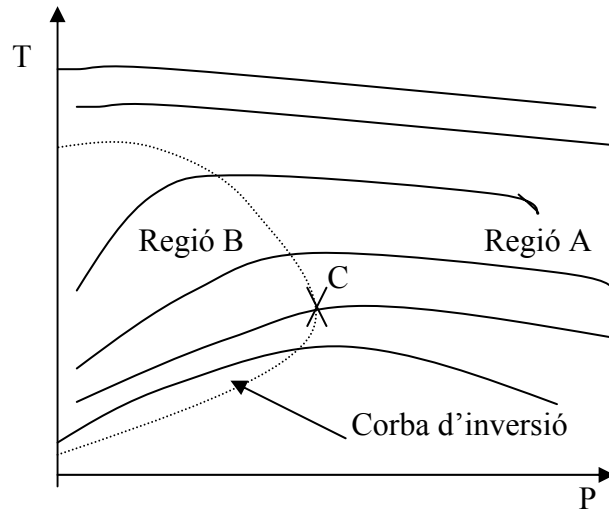


Figura 4. Corbes isentàlpiques i corba d'inversió.

Si calculem la variació de temperatura que ha tingut lloc en el procés d'estrangulament en el que la pressió ha disminuït dP . Llavors, tenint en compte l'equació fonamental de la Termodinàmica:

$$dh = Tds + vdP \quad [3]$$

si substituïm ds com:

$$ds = \left(\frac{\partial s}{\partial T} \right)_P dT + \left(\frac{\partial s}{\partial P} \right)_T dP \quad [4]$$

s'obté:

$$dh = T \left(\frac{\partial s}{\partial T} \right)_P dT + \left[T \left(\frac{\partial s}{\partial P} \right)_T + v \right] dP \quad [5]$$

que aplicant la relació de Maxwell¹:

$$\left(\frac{\partial s}{\partial P} \right)_T = - \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_T \quad [6]$$

resulta llavors:

$$dh = c_p dT + [v - T\alpha] dP \quad [7]$$

com que entre els estats inicial i final, s'ha mantingut h constant:

$$0 = c_p dT + [v - T\alpha] dP \quad [8]$$

¹ Les relacions de Maxwell es veuen a l'assignatura de Complementos de Termodinàmica

i:

$$\left(\frac{dT}{dP}\right)_h = \frac{1}{c_p} [T\alpha - v] \quad [9]$$

La variació de la temperatura amb la pressió se l'anomena coeficient de Joule-Thomson, μ_{JT} :

$$\mu_{JT} = \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_h \quad [10]$$

El pendent d'una corba isentàlpica en qualsevol estat (en un diagrama T-P) és el **coeficient de Joule-Thomson**.

De l'anàlisi de la Figura 4, s'observa, excepte per temperatures elevades, que les corbes isentàlpiques presenten un màxim. Això vol dir que tenim dues regions, una (regió A) on després d'efectuar-se l'expansió, el gas experimenta un augment de la temperatura ($\mu_{JT} < 0$), i una altra (regió B) on després de tenir lloc l'expansió es produeix una disminució de la temperatura del gas ($\mu_{JT} > 0$) (refredament del gas), de gran aplicació tecnològica. El punt màxim de cada isentàlpica (on $\mu_{JT} = 0$) s'anomena el punt d'inversió, el lloc geomètric d'aquest màxim (línia discontinua) s'anomena corba d'inversió.

Per cada isentàlpica, la temperatura a la que $\mu_{JT} = 0$ s'anomena temperatura d'inversió.

Per pressions superiors a la màxima de la corba d'inversió (punt C) no hi ha temperatura d'inversió. I per a pressions inferiors existeixen dues temperatures d'inversió (una línia vertical tallaria la corba d'inversió en dos punts).

En la Figura 5 s'observa el detall d'una línia isentàlpica en la que es poden distingir les diferents regions en les que el coeficient de Joule-Thomson pren signe positiu, nul i negatiu.

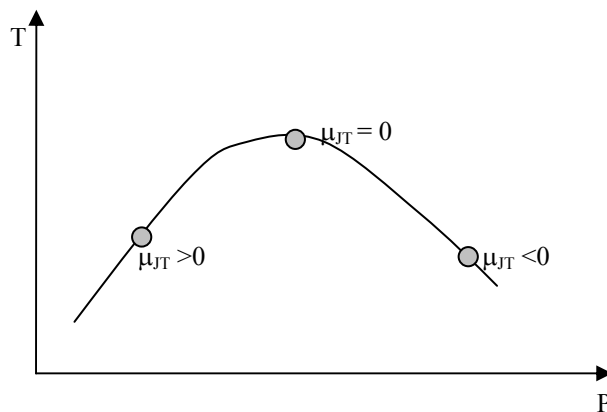


Figura 5. Línia isentàlpica en la que s'han indicat les diferents regions on canvia de signe el coeficient de Joule-Thomson

3.3. Coeficient de Joule-Thomson i temperatura d'inversió de van der Waals.

A partir de l'equació de Van der Waals es pot trobar una expressió, aproximada (per a una regió de pressions molt baixes), per calcular el coeficient de Joule-Thomson disposant de la c_p del gas, la temperatura a la que s'ha realitzat l'experiència, i les constants a i b de l'equació de Van der Waals com:

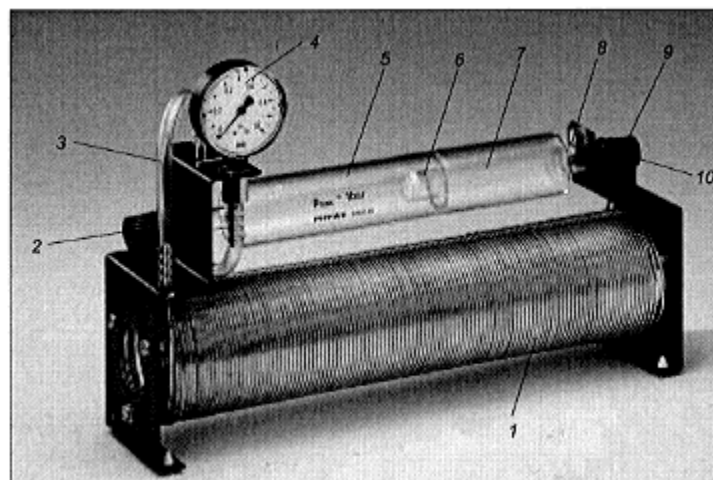
$$\mu = \frac{1}{c_p} \left[\frac{2a}{RT} - b \right] \quad [11]$$

La temperatura d'inversió màxima s'obté per a pressions molt baixes a partir d'imposar $\mu=0$ en l'equació (10), i s'obté:

$$T = \frac{2a}{Rb} \quad [12]$$

4. DESCRIPCIÓ DE L'APARELL

Aquest aparell serveix per determinar el coeficient de Joule-Thomson. Es disposa d'una bombona de gas O_2 i una altra de CO_2 que contenen aquests gasos comprimits a pressió elevada i baixa temperatura. En obrir la clau del manoreductor situat en la bombona, s'expansiona el gas fins a una pressió que com a molt elevada, pot ser de 1 bar per sobre de la de l'ambient (controlar-la exactament amb el manòmetre (4) situat en l'aparell de Joule-Thomson). Aquest gas que surt de la bombona a baixa temperatura, passa per un bescanviador de calor (1) on és escalfat fins a la temperatura de l'ambient. Una vegada travessat el bescanviador, el gas és introduït dins del cilindre (5) i passarà a través de l'estretament (paret porosa) (6), que és on experimentarà el procés d'expansió de Joule-Thomson, i passarà al cilindre (7) i d'aquí a l'atmosfera a través de (8). Dos sensors disposats en els cilindres (5) i (6) mesuraran la diferència de temperatures, ΔT , que es produirà en tenir lloc l'expansió de Joule-Thomson.



5. MÈTODE EXPERIMENTAL

- a) Connecteu l'instrument digital de mesura de temperatures 30 min abans de començar les mesures experimentals.
- b) Obriu la clau de la bombona de gas comprimit i regular la pressió de sortida del gas amb la clau del manoreductor. **Tingueu cura que la sobrepressió que indiqui el manòmetre no sigui superior a la pressió màxima admissible per l'aparell de Joule-Thomson de 1 bar.**
- c) Realitzeu diverses mesures de pressió-temperatura. Comenceu per les pressions més elevades i aneu-les disminuint lentament. (Es recomana disminuir la pressió en intervals de 0,2 bar cada vegada, des de **0,9** bar fins a 0,1 bar).
- d) Deixeu fluir el gas durant 6 min (8 min per a la 1^a mesura) a la pressió constant que tingueu fixada. Aquest temps és necessari perquè s'estableixi l'equilibri. El valor de ΔT s'ha d'anar controlant cada 10 ó 15 s (aproximadament). Quan ja s'hagi arribat a l'equilibri, observareu una oscil·lació del valor de ΔT en la segona xifra decimal. La mesura de ΔT que anotareu serà el promig de les mesures que llegim els darrer 20 segons aproximadament. Tal com s'indica en el full d'informes s'haurà de fer una taula amb el valor de la pressió fixada i el valor de ΔT promig corresponent.

6. BIBLIOGRAFIA

- J. Aguilar Peris, "Curso de Termodinámica", Alhambra Universidad, (1984).
- M.D. Baró, S. Bordas, J.A. Ibáñez, J.E. Llebot, S. Suriñach, "Experiencias de Termodinámica" Ed. Departamento de Termología. U.A.B. (1985).
- Phywe, Laboratory Experiments Chemistry, Phywe series of publications.

DEPARTAMENT DE MÀQUINES I MOTORS TÈRMICS

PRÀCTIQUES DE TERMODINÀMICA I FÍSICO-QUÍMICA

Nom i Cognoms:

Grup:

Data: Qualificació:

PRÀCTICA 9. EFECTE JOULE-THOMSON.

Recordeu que amb aquests informes s'avalua la competència genèrica: "Ús solvent dels recursos de la informació" en el nivell 2. Heu citar les referències, tal com us indiquen en les sessions de la Biblioteca.

1. RESULTATS

1.1. Anoteu els resultats experimentals en la següent taula de valors:

Gas: $t(^{\circ}\text{C}) =$

P (kPa)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)

Gas: $t(^{\circ}\text{C}) =$

P (kPa)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)

1.2. Representeu gràficament la diferència de temperatura en front de la pressió. Determineu la recta de regressió que millor ajusti els resultats experimentals. Feu-ho per a cada gas.

1.3. Indiqueu el valor del coeficient Joule-Thomson, μ_{JT} , per a cada gas. Aquest coeficient és el pendent de la recta ajustada a les dades experimentals de l'apartat anterior.

Gas: μ_{JT} ($^{\circ}\text{C}/\text{kPa}$) =

Gas: μ_{JT} ($^{\circ}\text{C}/\text{kPa}$) =

2.1. Calculeu el coeficient de Joule-Thomson dels gasos utilitzats, a partir de l'equació de Van der Waals, utilitzant l'expressió (11). Les constants a i b les podeu calcular a partir dels paràmetres crítics utilitzant les equacions 5, 6, 7 de la pràctica 10. Compareu amb els resultats experimentals.

Gas	c_p ()	a ()	b ()	T ()	μ_{JT} ()

Gas	μ_{JT} ()	μ_{JT} ()

2.2. Citeu quines aplicacions pràctiques pot tenir l'efecte Joule-Thomson

2.3. Quin significat físic té la temperatura d'inversió?. Calculeu la temperatura d'inversió màxima de cadascun dels gasos utilitzant l'equació [12].

Gas	T (inversió) ()

2.4. Si el gas utilitzat en l'experiment tingués un comportament de gas ideal, indiqueu què s'observaria.

PRÀCTICA 10

ESTUDI DEL COMPORTAMENT PVT D'UN FLUID PUR

1.- OBJECTIU DE LA PRÀCTICA

L'objectiu d'aquesta pràctica és determinar experimentalment el comportament líquid-vapor d'un fluid pur mitjançant mesures de les propietats PVT (pressió, volum, temperatura). Es tracta de veure el comportament PVT d'un fluid pur (en aquest cas el SF₆) quan se'l sotmet a compressió isotèrmica en la regió en la que els vapors condensen (regió subcrítica) i en la regió per sobre del punt crític (regió supercrítica).

Amb els resultats experimentals es pot construir el diagrama P-V on es representaran les diferents mesures PV obtingudes per a cada isoterma. Es podrà distingir la regió dels vapors sobreescalfats, la regió de saturació (equilibri líquid-vapor) i la regió dels líquids. Sobre aquest diagrama es podrà veure la forma de la regió de saturació. També s'estudia el comportament del fluid de treball mitjançant l'equació d'estat de Redlich-Kwong i es compara amb l'obtingut a partir d'aquest estudi experimental. Per altra banda, també es podran constatar les limitacions que comporta utilitzar l'equació de gas ideal, i delimitar la regió on és possible utilitzar-la sense produir errors considerables.

2.- INTRODUCCIÓ TEÒRICA

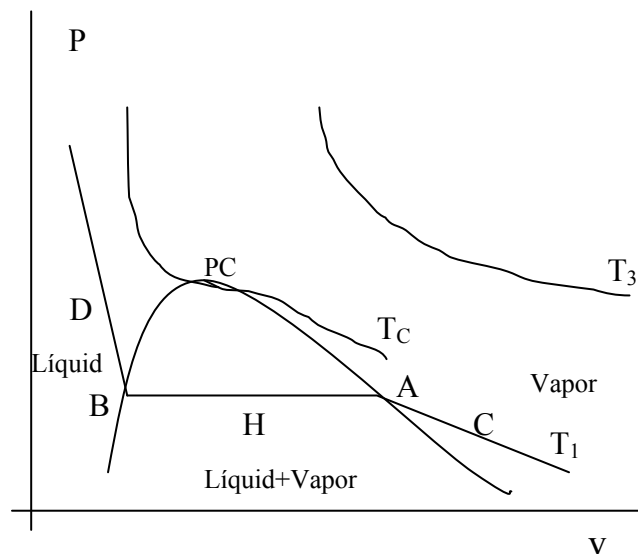


Figura 1. Diagrama P-v d'un fluid pur

Si ens fixem en el diagrama P-v de la figura 1, veiem que si ens situem en un punt com C (anomenat de *vapor rescalfat*) i efectuem una compressió isotèrmica a una temperatura T₁ inferior a la crítica, T_c, veiem que va augmentant la pressió alhora que el volum específic disminueix. Aquest comportament es va repetint fins a trobar un punt com el A (estat de *vapor saturat*). A partir del punt A s'observa que si seguim disminuint el volum específic de la substància, no augmenta la pressió, sinó que es manté constant, i apareixen les primeres gotes de líquid, la substància està en estat d'equilibri líquid-vapor. Si hi ha una mescla física

de les fases líquid i vapor diem que estem en un estat com H que se l'anomena *vapor humit*. Si seguim disminuint el volum específic a T constant, la fase líquida va creixent a expenses de la fase vapor fins a trobar un punt com B on tot és líquid (estat de *líquid saturat*). La pressió a la que ha tingut lloc el canvi de fase a la temperatura T_1 és la *pressió de saturació*.

A partir del punt B s'observa que en disminuir el volum específic de la substància la seva pressió augmenta molt i el pendent de la isoterma és molt gran, estem en la regió dels líquids comprimits (un estat com D se l'anomena un estat de *líquid comprimit o sotsrefredat*). En aquesta regió per poc que disminuïm el volum la pressió augmenta molt.

Aquest comportament aquí descrit s'anirà donant per totes les isoterms situades per sota de la isoterma crítica (a la temperatura T_c).

En la isoterma crítica la coexistència de les fase líquida-vapor queda reduïda a un únic punt anomenat *punt crític* (PC). Les coordenades d'aquest punt crític se les designa per T_c , P_c , v_c i estan tabulades per la major part de les substàncies. La isoterma crítica es pot veure que té forma d'inflexió, (el punt d'inflexió és el punt crític). Per això, la condició analítica de punt crític és la següent:

$$\left(\frac{\partial P}{\partial v}\right)_{T_c} = \left(\frac{\partial^2 P}{\partial v^2}\right)_{T_c} = 0 \quad [1]$$

Els llocs geomètrics dels punts de vapors saturats i líquids saturats s'uneixen en el punt crític formant l'anomenada *regió de saturació*.

Per sobre del punt crític les isoterms tenen aspecte *hiperbòlic recordant a les dels gasos ideals* (T_3) i no es pot obtenir per simple compressió isotèrmica la separació de les fases líquida i gasosa.

Títol d'un vapor humit

Es defineix el títol d'un vapor humit com el quocient entre la massa de vapor saturat, m_g , i la massa total de substància, m :

$$x = \frac{m_g}{m} = \frac{m_g}{m_l + m_g} \quad [2]$$

on $m = m_l + m_g$, la massa total de substància és la suma de la massa de líquid saturat i la massa de vapor saturat.

El títol també es pot escriure en funció dels volums específics d'acord amb l'expressió següent:

$$x = \frac{v - v_l}{v_g - v_l} \quad [3]$$

on v és el volum específic del nostre fluid, v_l és el volum específic de líquid saturat i v_g és el volum específic de vapor saturat.

Per poder disposar de dades de propietats volumètriques dels fluids es fan servir equacions tèrmiques d'estat, o correlacions generalitzades. Per alguns fluids existeixen taules de propietats termodinàmiques. Generalment, en una taula es donen taules de propietats de saturació i en una altra es donen dades de propietats de líquids comprimits i vapors sobreescalfats.

2.1 Equacions tèrmiques d'estat

Qualsevol relació entre la pressió, la temperatura i el volum específic o molar, rep el nom d'equació d'estat.

L'equació més simple i coneguda és l'equació d'estat del gas ideal, que és:

$$Pv = RT \quad [4]$$

Però el comportament PvT de substàncies es representa amb més exactitud mitjançant equacions d'estat més complexes. Existeixen equacions tèrmiques d'estat cúbiques o de dues constants, són les més senzilles alhora d'operar però els resultats són només aproximats, dins de les equacions cúbiques hi ha, entre d'altres, la de Van der Waals, la de Redlich-Kwong, la de Berthelot, Dieterici, entre d'altres.

Equació de Van der Waals

Proposada per J.D. Van der Waals el 1873:

$$P = \frac{RT}{v - b} - \frac{a}{v^2} \quad [5]$$

on a i b estan tabulades o es poden calcular a partir de les constants crítiques com:

$$a = \frac{27R^2T_c^2}{64P_c} \quad \text{bar (l/mol)}^2 \quad [6]$$

$$b = \frac{RT_c}{8P_c} \quad \text{(l/mol)} \quad [7]$$

Equació de Redlich-Kwong

$$P = \frac{RT}{v - b} - \frac{a}{T^{1/2}v(v + b)} \quad [8]$$

on a i b es calculen a partir de les constants crítiques com:

$$a = \frac{0,42748R^2T_c^{2,5}}{P_c} \quad \text{bar (l/mol)}^2 \text{K}^{1/2} \quad [9]$$

$$b = \frac{0,08664RT_c}{P_c} \quad \text{(l/mol)} \quad [10]$$

és una equació molt utilitzada en enginyeria

Les equacions de més de dues constants ens ofereixen resultats més precisos però resulta més complicat operar amb elles. Entre d'altres existeixen la de Beattie-Bridgeman (de 5 constants), la de Benedict-Webb-Rubbin (de 8 constants)

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

El muntatge del que es disposa en aquesta pràctica és el que es mostra en la figura 2:

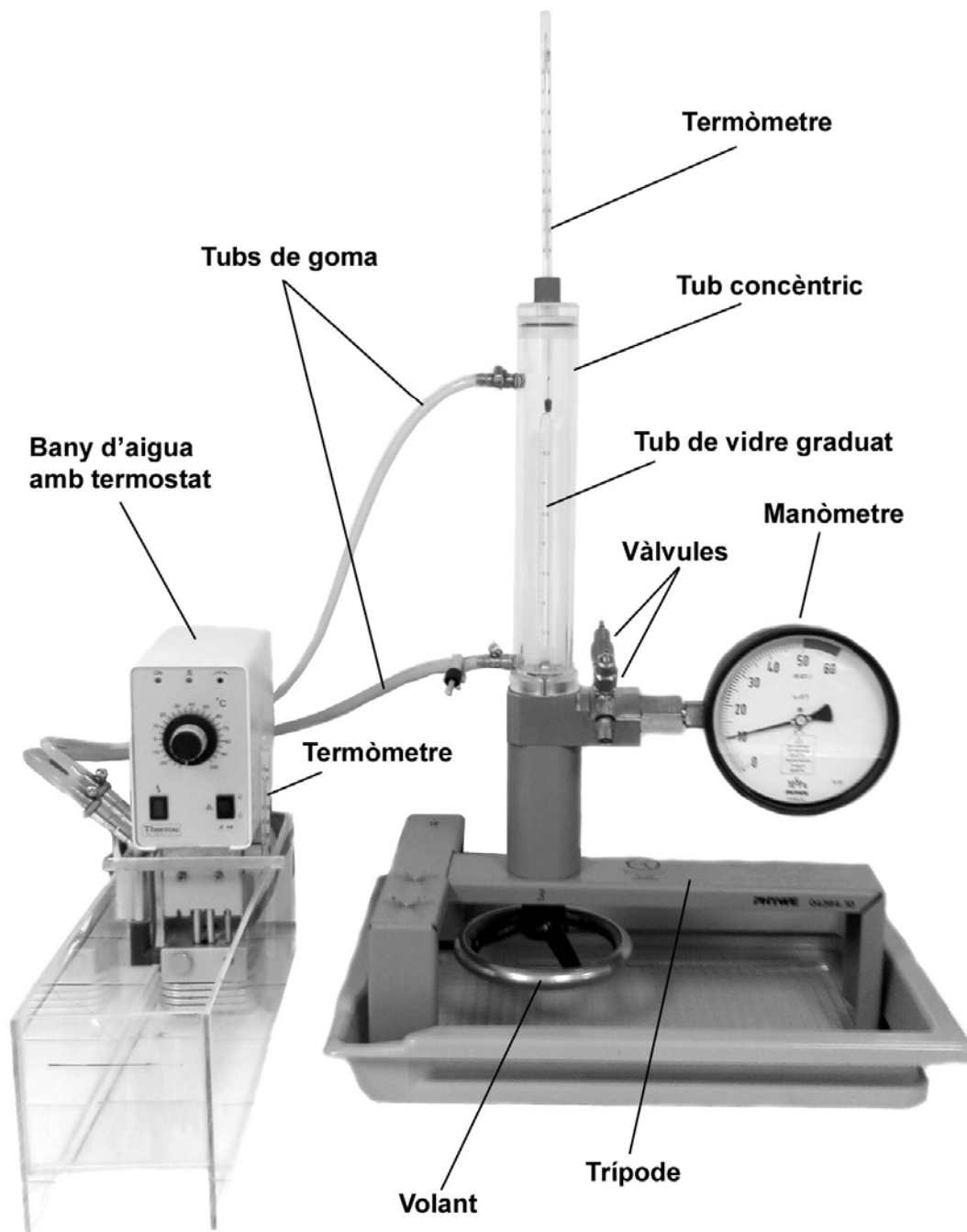


Figura 2. Equip Experimental

Els elements dels que consta són els següents:

- Aparell per determinar el punt crític, amb un trípod, un tub de vidre graduat i segellat que conté el fluid de treball, un manòmetre, un tub concèntric que fa de dispositiu de termostatització, un volant per graduar la pressió i un sistema de vàlvules per poder canviar el fluid que es vol estudiar
- Bany d'aigua amb un termostat
- Tubs de goma
- Termòmetres
- Bomba de buit, que s'utilitzarà quan s'hagi d'omplir el tub amb el fluid de treball

Fluids de treball

Els fluids de treball dels que es disposa en el laboratori són: Hexafluorur de sofre (SF_6) i età (C_2H_6), que tenen els següents valors de les propietats crítiques:

Hexafluorur de sofre:

$$P_c = 37,6 \text{ bar}$$
$$T_c = 318,7 \text{ K}$$
$$v_c = 198,8 \text{ cm}^3/\text{mol}$$

Età:

$$P_c = 48,7 \text{ bar}$$
$$T_c = 305,3 \text{ K}$$
$$v_c = 148,3 \text{ cm}^3/\text{mol}$$

Realització experimental

El muntatge experimental consta d'una proveta graduada invertida de vidre resistent que conté el fluid de treball i mercuri. El fluid de treball el podem comprimir elevant la columna de mercuri accionada pel gir del volant. El bany termostàtic permet mantenir constant la temperatura a la que estem treballant en cada moment.

Alhora de treballar heu de vigilar:

- El nivell de mercuri de la proveta no ha de ser inferior als 4 ml
- No excedir la pressió màxima de 50 bar

Mesures experimentals

Mesures experimentals amb SF_6

En aquesta pràctica es tracta de realitzar mesures de pressió, P, i volum, V a diferents temperatures d'isoterma.

Les temperatures d'isoterma a les que heu de treballar són aproximadament les següents: 20°C, 30°C, 40°C, 46°C. Per a la isoterma de 20°C comenceu fent mesures a un volum de 4 ml i després aneu comprimint cada 0,5 ml fins a un volum de 2,5 ml. Una vegada assolit el volum de 2,5 ml es va reduint cada 0,2 ml fins que la pressió augmenti fins a uns 40-42 bar (mai superar els 50 bar).

Per a la realització de les següents isoterms a 30, 40°C, heu de començar a treballar a 4 ml, i anar comprimint cada 0,5 ml fins arribar a trobar el volum en el que ha aparegut la primera gota de líquid en la isoterma anterior. A partir d'aquí aneu comprimint cada 0,2 ml fins arribar a completar tot el procés (canvi de fase i posterior compressió de la fase líquida)

Per a la isoterma de 46°C, on tot el sistema està tota l'estona en fase gas, heu d'anar fent mesures de volum cada 0,5 ml fins a 40 bar.

Mesures experimentals amb C₂H₆

Les temperatures de les diferents isoterms en aquest cas han de ser aproximadament de: 8°C, 15°C, 23°C i 34°C.

Per les isoterms de 8°C, 15°C, 23°C, comenceu fent mesures a un volum de 4 ml, i després aneu comprimint cada 0,5 ml fins a 2 ml. Una vegada assolit el volum de 2 ml, feu mesures cada 0,2 ml fins assolir la primera gota de líquid. Un cop assolida la primera gota de líquid, feu mesures cada 0,1 ml fins a tenir tot el líquid. A partir d'aquí, la pressió és molt elevada i és aconsellable fer com a màxim una mesura més. A més a més, heu de tenir cura de fer les compressions molt a poc a poc per tal que no es produeixi una sobrepressió que faci que se superi el límit de pressions del muntatge.

Per la isoterma de 34°C comenceu fent mesures a un volum de 4 ml i després aneu comprimint cada 0,5 ml.

Important:

Per a cada isoterma amb la que trebal·leu anoteu quan apareix la primera gota de líquid i quan ha desaparegut tot el gas.

4.- BIBLIOGRAFIA

- M.J. Moran y H.N. Shapiro, Fundamentos de Termodinámica Técnica vol. I. Reverté, 1993, Cap. 3 p. 83-88.
- J.M. Smith, H.C. van Ness, Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química McGraw-Hill, 1989, Cap. 3 p. 81-86
- Y.A. Çengel, M.A. Boles, Termodinámica vol. I McGraw-Hill, 1996, Cap. 2
- J. Aguilar, Curso de Termodinámica Alhambra Universidad, 1984, Cap. 6, 6.3, 6.5
- Phywe, Laboratory Experiments Chemistry, Phywe series of publications

DEPARTAMENT DE MÀQUINES I MOTORS TÈRMICS

PRÀCTIQUES DE TERMODINÀMICA I FÍSICO-QUÍMICA

Nom i Cognoms:

Grup:

Data: Qualificació:

PRÀCTICA 10. ESTUDI DEL COMPORTAMENT PVT D'UN FLUID PUR

Recordeu que amb aquests informes s'avalua la competència genèrica: "Ús solvent dels recursos de la informació" en el nivell 2. Heu citar les referències, tal com us indiquen en les sessions de la Biblioteca.

1.- RESULTATS

1.1 Anoteu en una taula com la que s'adjunta les dades experimentals de pressió i volum preses a una determinada temperatura constant.

T = °C	
V (ml)	P (bar)

1.2 Representeu en un diagrama PV les dades obtingudes experimentalment per les diferents isoterms realitzades. Dibuixeu les isoterms que determinen aquests punts experimentals.

1.3 Identifiqueu les diferents fases que ens apareixen en el diagrama

1.4 Dibuixeu la corba de saturació sobre el diagrama PV. Dibuixeu-la amb un color diferent

1.5 A partir de les propietats crítiques, determineu les constants a i b de Redlich-Kwong per a la substància emprada.

1.6 Representeu en un diagrama Pv (on v és el volum molar en L/mol) les isoterms corresponents a les diferents temperatures a les que s'han fet les experiències segons l'equació de Redlich-Kwong. Comenteu la forma de les isoterms. El número de mols aproximat que tenim en el muntatge experimental és de

$$\text{SF}_6: n = 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ mol}$$

$$\text{C}_2\text{H}_6: n = 3,2 \cdot 10^{-3} \text{ mol}$$

1.7 Poseu en un mateix diagrama P-v (on v és el volum molar en L/mol):

a) les isoterms obtingudes en el punt anterior per l'equació de Redlich-Kwong

- b) les isoterms obtingudes a cada temperatura a la que heu fet les experiències segons el model de gas ideal
- c) les isoterms obtingudes experimentalment

Nota: Escolliu l'escala dels eixos de manera que les diferències entre els valors experimentals, els de Redlich-Kwong i els de gas ideal siguin ben visibles. Si ho creieu convenient, feu un diagrama per a cada isoterma.

Comenteu:

- 1.7.1 Les discrepàncies que hi ha entre els diferents comportaments de Redlich-Kwong, el ideal i els resultats experimentals. Remarcar en quines regions s'ajusta més bé cada equació d'estat

2.- QÜESTIONS

- 1.- Què és un vapor saturat i un líquid saturat?
- 2.- Què és un vapor sobreescalfat i perquè se l'anomena així?
- 3.- Què és un líquid sotsrefredat i perquè se l'anomena així?
- 4.- Quin comportament observeu en augmentar la temperatura d'isoterma?
- 5.- Tenim una substància en l'estat de vapor saturat a una determinada temperatura i pressió. És possible obtenir líquid saturat en les mateixes condicions de temperatura i pressió, sense que en cap moment s'observi l'equilibri líquid-vapor? Expliqueu com es podria fer.

PRÀCTICA 11

BOMBA DE CALOR

1.- OBJECTIU DE LA PRÀCTICA

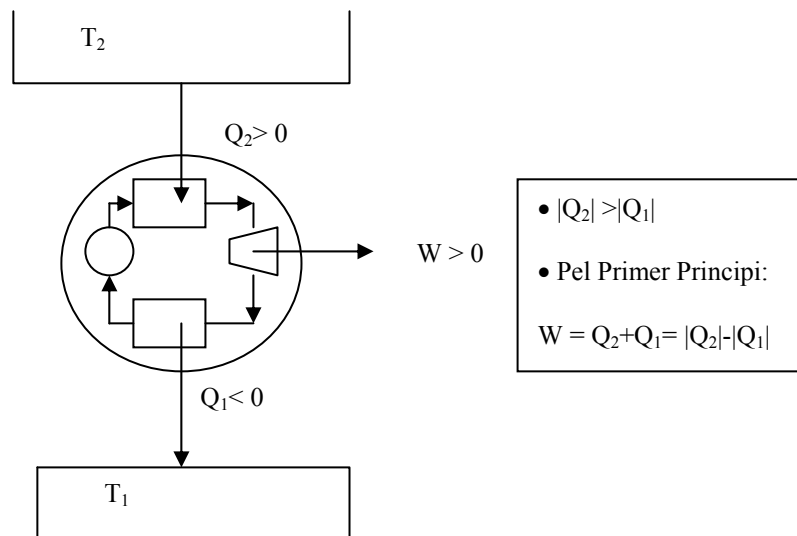
La bomba de calor és una pràctica demostrativa d'una bomba de calor per compressió de vapor. L'objectiu és introduir a l'estudiant en un estudi senzill d'un cicle termodinàmic. En la part experimental mesurarà les diferents pressions i temperatures que hi ha en les diferents parts del cicle i podrà veure a través de les finestretes de que disposa el muntatge com el fluid de treball és alternativament líquid i vapor en les diferents parts del cicle. En l'elaboració de l'informe haurà d'aplicar un balanç energètic al cicle, aprendrà a representar cicles en diagrames termodinàmics (P-h en aquest cas) i haurà de buscar propietats termodinàmiques en taules.

2.- INTRODUCCIÓ TEÒRICA: MÀQUINES TÈRMiques DIRECTES I INVERSES

La bomba de calor de la pràctica és una màquina tèrmica inversa. Per poder entendre el seu comportament, es millor començar considerant les màquines tèrmiques directes.

Una màquina tèrmica directa és una instal·lació amb un fluid motor que permet l'obtenció de treball com a conseqüència d'una calor absorbida o rebuda pel fluid.

Esquema d'una màquina tèrmica



El **fluid de treball** és el que recorre tots els dispositius de la instal·lació que forma el cicle i és aquell cap a / o des del qual es transfereix calor mentre se'l sotmet a un cicle.

Les màquines tèrmiques poden diferir molt les unes de les altres però totes es caracteritzen pel següent:

- 1.- Reben calor d'una font d'alta temperatura (energia solar, forns de petroli, reactors nuclears,...)
- 2.- Converteixen part d'aquesta calor en treball
- 3.- Cedeixen calor a un focus a baixa temperatura

4.- Es tanca el cicle mitjançant un dispositiu de compressió

El rendiment d'una màquina tèrmica directa es defineix com el quocient entre el treball net que dona el cicle i el calor que absorbeix.

$$\eta = \frac{W}{Q_{\text{abs}}} \quad [1]$$

Màquines tèrmiques inverses: són les màquines frigorífiques i les bombes de calor, com la de la nostra pràctica. Les màquines tèrmiques inverses no fan treball, si no que n'han de rebre per poder funcionar ($W < 0$). Rebren calor d'un focus fred ($Q_1 > 0$) i n'escalfen un de calent ($Q_2 < 0$). Els fluids de treball que utilitzen aquestes màquines se'ls anomena fluids refrigerants. Molts dispositius d'ús habitual, com per exemple les neveres, es poden considerar com màquines tèrmiques inverses. Per a les màquines tèrmiques inverses, no parlem de rendiment si no de **coeficient d'eficiència (COP)**.

Segons la seva funció, podem considerar que hi ha dues menes de màquines tèrmiques inverses:

a) Màquina frigorífica

És una màquina tèrmica inversa que té per objectiu absorbir calor d'un focus fred a la temperatura T_1 . Dóna calor a un focus calent a $T_2 > T_1$ que està a la temperatura de l'ambient, amb l'aportació de treball. Per una màquina frigorífica, el COP es calcula com:

$$\text{COP} = \frac{Q_1}{|W|} \quad [2]$$

sent Q_1 la quantitat de calor que la màquina frigorífica absorbeix del focus fred.

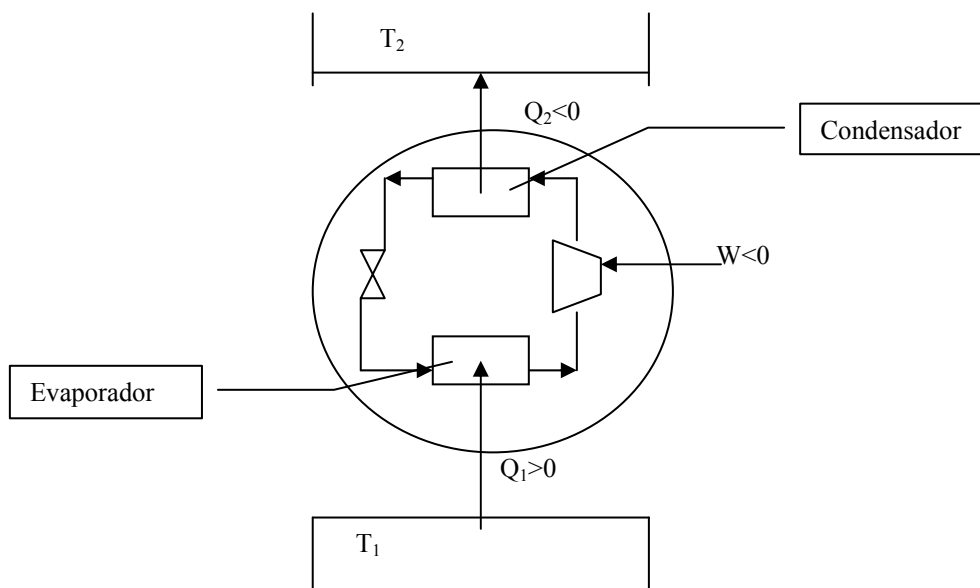
b) Bomba de calor

És una màquina tèrmica inversa que té per objectiu cedir calor a un focus calent a la temperatura T_2 , superior a la de l'ambient que està a la temperatura T_1 . El coeficient d'eficiència de la bomba de calor és:

$$\text{COP} = \frac{|Q_2|}{|W|} \quad [3]$$

sent Q_2 la quantitat de calor que la màquina cedeix al focus calent.

Esquema d'una màquina tèrmica inversa



El cicle termodinàmic que realitza aquesta màquina és el següent: (cicle de refrigeració per compressió de vapor)

El fluid refrigerant surt de l'evaporador generalment com a vapor saturat a baixa pressió i a continuació ingressa en el compressor on es comprimeix adiabàticament, mitjançant una aportació de treball, fins a la pressió del condensador. Del compressor surt com a vapor sobreescalfat. A la sortida del compressor el fluid refrigerant ingressa en el condensador on cedint calor, a pressió constant, al focus calent de la màquina (que es troba a T_2) surt com a líquid saturat. A la sortida del condensador el refrigerant passa per una vàlvula d'estrangulament² on s'expansiona fins a la pressió de l'evaporador on entra com a vapor humit i, absorbint calor a pressió constant del focus fred que es troba a T_1 s'evapora fins a vapor saturat.

Fluids refrigerants

Els fluids de treball utilitzats en els equips de refrigeració s'anomenen genèricament refrigerant. Són uns fluids que han de complir una sèrie de requisits, tals com adequades propietats físiques i termodinàmiques, baix grau de toxicitat, d'inflamabilitat i explosivitat i no ser nocius per la capa d'ozó, abans de ser acceptats en aquest tipus d'equips.

De refrigerants n'hi ha de molt diversos: derivats halogenats d'hidrocarburs (anomenats industrialment freons), amoníac, hidrocarburs, i fins i tot l'aigua.

Un dels refrigerants que s'ha utilitzat molt fins fa poc és el Freó-12 (CCl_2F_2), però aquest refrigerant degut als efectes nocius que té sobre la capa d'ozó s'ha arribat a una sèrie d'acords internacionals per eliminar el seu ús. El tetrafluoroetano (CH_2FCF_3), anomenat R-134a, no

² Tal com es descriu a la Pràctica 8 en un vàlvula d'estrangulament es realitza una expansió del fluid i l'entalpia a l'entrada i la sortida de la vàlvula és la mateixa (procés isoentàlpic)

conté clor i, per tant, es considera un substitut acceptable pel R-12. Les propietats termodinàmiques del R-134a el permeten substituir el R-12.

La selecció d'un refrigerant específic es basa en les seves relacions pressió-temperatura de saturació en el rang d'aplicació particular. El tipus de compressor també afecta a l'elecció del refrigerant. Els compressors centrífugs són els millors per a baixes pressions és més adient que treballin amb refrigerants que tinguin gran volum específic a baixa pressió. Els compressors alternatius funcionen millor en rangs de pressió alts i són més aptes per treballar amb refrigerants amb volums específics petits.

El diagrama de propietats termodinàmiques més utilitzat en el camp de la refrigeració és el pressió-entalpia. (P-h) i existeixen aquests diagrames construïts per a la majoria de refrigerants.

3.- METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Descripció de l'aparell

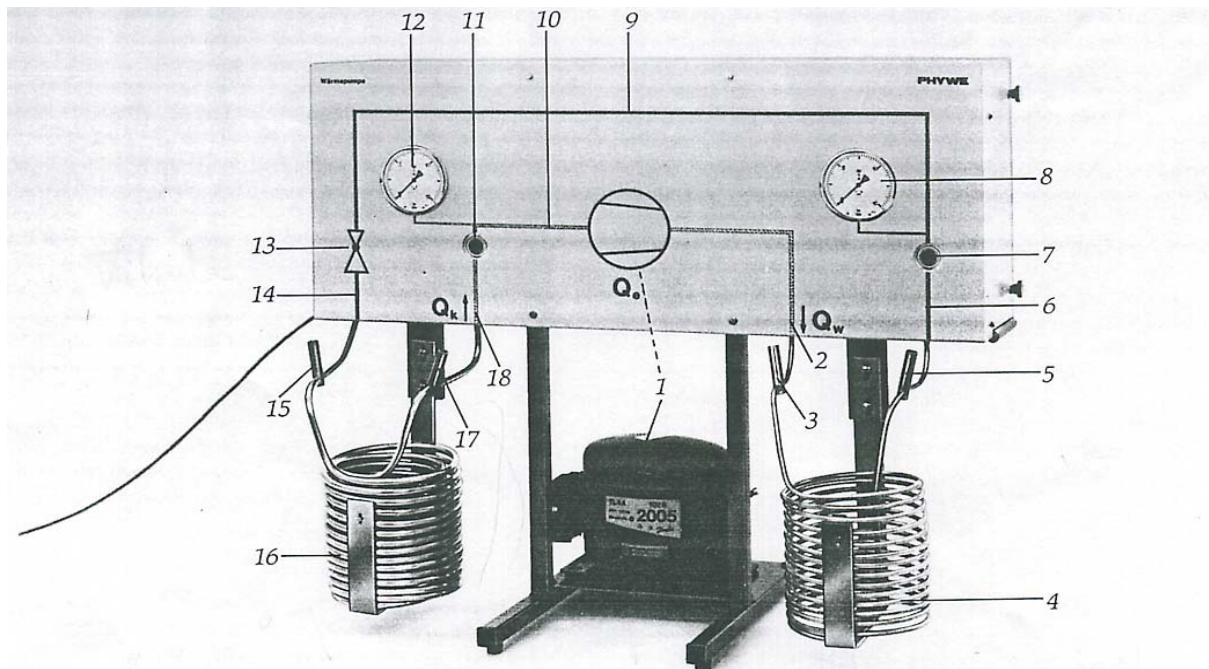


Fig. 1.- Muntatge experimental del cicle de la bomba de calor

La substància de treball és R-134a. El compressor 1 comprimeix el refrigerant gasós que surt de l'evaporador 16, mitjançant una aportació de treball W , fins a la pressió del condensador que se mesura amb el manòmetre 8. El fluid gasós que surt del compressor és conduït al condensador a través del conducte 2 i passa pel punt de mesura de temperatures 3. El R-134a entra al condensador 4 on donant calor a l'aigua que constitueix el focus calent de la màquina, condensa fins a sortir com a líquid saturat a la pressió del condensador. A la sortida del condensador el fluid passa pel punt de medició de temperatures 5. El fluid és líquid i es pot veure per la finestra 7. A través del conducte 9 el fluid passa a la vàlvula d'expansió 13. En la vàlvula el fluid s'expansiona i es refreda (l'entalpia del fluid a l'entrada de la vàlvula és la mateixa que a la sortida). A continuació i a través del conducte 14 el fluid de treball arriba a

l'evaporador després de passar pel punt 15 de medició de temperatures. En l'evaporador el R-134a absorbeix calor de l'aigua que constitueix el focus fred de la màquina i es vaporitza. A la sortida de l'evaporador el fluid passa pel mesurador de temperatures 17 i se'n va pel conducte 18. A la sortida de l'evaporador el fluid és vapor i es pot veure el seu estat a través de la finestra 11. La pressió a la que opera l'evaporador es pot mesurar en el manòmetre 12. Finalment, i passant pel conducte 10, el fluid torna al compressor 1 i es torna a començar el cicle.

El muntatge complet que trobarem al laboratori és el següent:

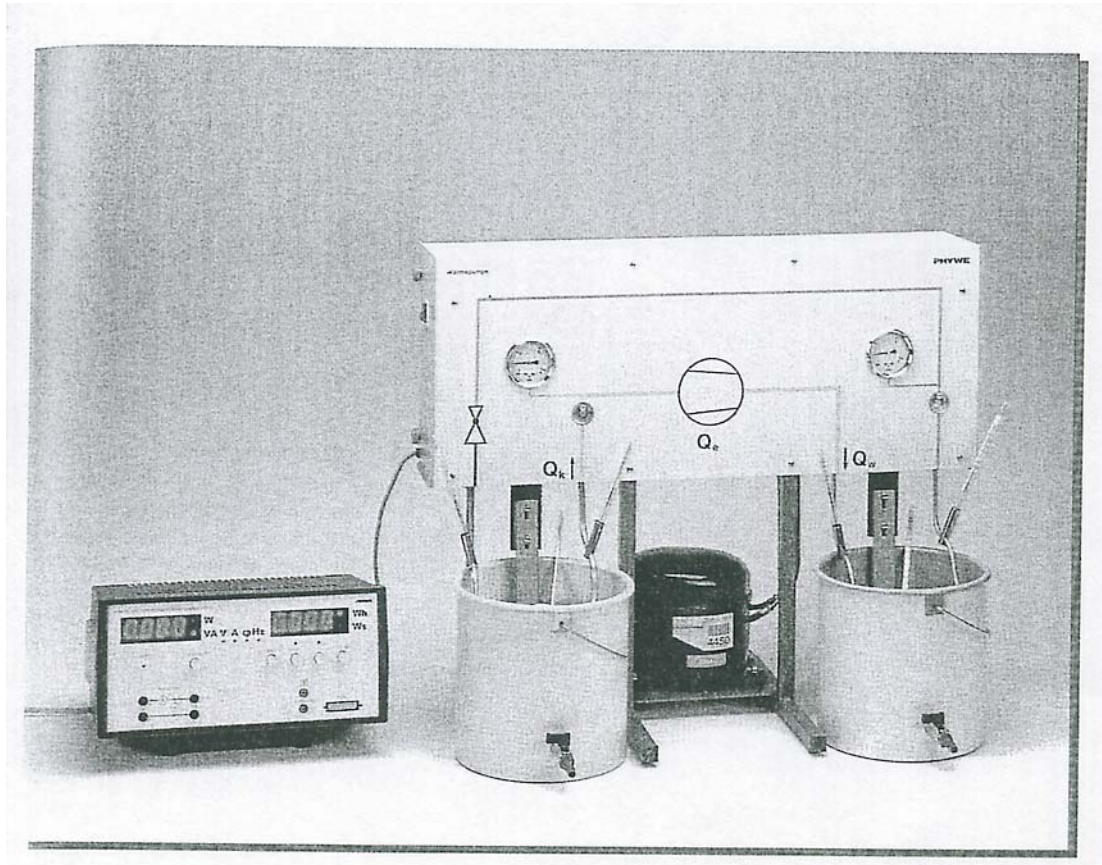


Fig. 2 Muntatge experimental complet de la bomba de calor

S'observa que tant l'evaporador com el condensador estan submergits en recipients d'aigua que constituïran el focus calent i el focus fred de la màquina. En cadascun d'aquests recipients podem trobar un termòmetre que ens permetrà mesurar la temperatura de l'aigua.

També es disposa d'un instrument de mesura de treball i potència que ens permetrà mesurar la potència del compressor.

4.- PROCEDIMENT EXPERIMENTAL

La bomba de calor es connecta a la xarxa de corrent altern mitjançant un interruptor col·locat en la paret lateral del panell on hi ha dibuixat el cicle.

S'han d'omplir els recipients que formen el focus calent i el focus fred de la màquina amb 5 L d'aigua destil·lada i s'ha de mesurar la seva temperatura, T_a .

Cada 5 minuts, durant 30-35 minuts, s'han d'efectuar mesures de:

- Pressió de l'evaporador, P_e
- Pressió del condensador, P_c
- Temperatura d'entrada, T_1 , i de sortida de l'evaporador, T_2
- Temperatura d'entrada, T_3 , i de sortida del condensador, T_4
- Temperatura de l'aigua en l'evaporador, T_A , temperatura de l'aigua en el condensador, T_B
- Potència del compressor, W

Els estats pels que passa el fluid de treball en realitzar el cicle els anomenarem de la forma següent:

- Estat 1: entrada de l'evaporador (P_e, T_1)
- Estat 2: sortida de l'evaporador (P_e, T_2)
- Estat 3: entrada del condensador (P_c, T_3)
- Estat 4: sortida del condensador (P_c, T_4)

5.- BIBLIOGRAFIA

- Phywe, Laboratory Experiments Chemistry, Phywe series of publications
- M.J. Moran y H.N. Shapiro, Fundamentos de Termodinámica Técnica Vol.II. Reverté, 1993. Cap. 10

DEPARTAMENT DE MÀQUINES I MOTORS TÈRMICS

PRÀCTIQUES DE TERMODINÀMICA I FÍSICO-QUÍMICA

Nom i Cognoms:

Grup:

Data: Qualificació:

PRÀCTICA 11. BOMBA DE CALOR

Recordeu que amb aquests informes s'avalua la competència genèrica: "Ús solvent dels recursos de la informació" en el nivell 2. Heu citar les referències, tal com us indiquen en les sessions de la Biblioteca.

1.- RESULTATS

1. Anoteu en una taula com la que s'adjunta les dades experimentals que heu mesurat cada 5 minuts

t (min)	W (W)	P_e (bar)	P_c (bar)	T₁ (°C)	T₂ (°C)	T₃ (°C)	T₄ (°C)	T_A (°C)	T_B (°C)

Anoteu el volum d'aigua que poseu en els recipients que formen el focus calent i el focus fred de la màquina i la seva temperatura:

Condensador:

$$V =$$

$$T_b =$$

Evaporador:

$$V =$$

$$T_a =$$

A partir d'ara heu de treballar amb les dades que heu mesurat

- 2.- Amb l'ajut de les taules de propietats termodinàmiques del R-134a digueu en quin estat es troba l'esmentat fluid refrigerant (líquid saturat, vapor humit, vapor rescalfat...) en cadascun dels quatre estats pels que passa al llarg del cicle. *Si algun és vapor humit doneu el seu títol.*

Estat	Estat en què es troba	Títol si n'hi ha
1		
2		
3		
4		

3.- Per cadascun del estats analitzats anteriorment, doneu la seva entalpia utilitzant les taules de propietats termodinàmiques

Estat	h (kJ/kg)
1	
2	
3	
4	

3.1.- Representeu el cicle obtingut en el diagrama P-h del R-134a que s'adjunta

4.- Fent un balanç d'energia en el compressor trobeu el cabal màssic de R-134a que circula per la instal·lació

4.1 Calculeu la quantitat de calor que el fluid de treball absorbeix a l'aigua de l'evaporador

4.2 Calculeu la quantitat de calor que el fluid de treball cedeix de l'aigua del condensador

4.3 Calculeu el COP de la màquina

5.- Busqueu informació sobre bombes de calor i fluids refrigerants i redacteu un resum d'aproximadament 1 plana i mitja.

6.- En les condicions en què té lloc el procés a la vàlvula d'estrangulament, quin signe té el coeficient de Joule-Thomson? Seria possible utilitzar com a fluid de treball una substància que en les condicions en què s'ha de realitzar el procés de la vàlvula d'estrangulament tingués un coeficient de Joule-Thomson de signe contrari? Justifiqueu la resposta.

PRÀCTICA 12

PRESSIÓ DE VAPOR DE L'AIGUA A TEMPERATURES INFERIORS A 100°C. DETERMINACIÓ DE LA CALOR LATENT DE VAPORITZACIÓ.

4. OBJECTIU DE LA PRÀCTICA

L'objectiu de la pràctica es la mesura de la pressió de vapor d'un líquid mitjançant un mètode estàtic. De les dades de pressió de vapor i temperatura de l'equilibri de fases líquid-vapor se n'obindrà la calor latent de vaporització del líquid.

5. ASPECTES TEÒRICS

La pressió de vapor d'un líquid augmenta amb la temperatura. L'equació de Clausius-Clapeyron dona el coeficient de temperatura de la pressió de vapor del líquid:

$$\frac{d \ln P}{dT} = \frac{\Delta H_v}{R \cdot T^2} \quad [1]$$

On ΔH_v és la calor de vaporització del líquid. La integració de l'equació [1], suposant que ΔH_v és constant en l'interval de temperatures d'integració, dona la següent equació:

$$\ln P = -\frac{\Delta H_v}{R \cdot T} + I \quad [2]$$

De manera que la representació gràfica de $\ln P$ enfront $1/T$ proporciona una línia recta la pendent de la qual permet calcular la calor de vaporització.

Per altre banda, existeixen regles empíriques que permeten estimar la calor latent de vaporització, tal és el cas de la regla de Trouton, segons la qual la entropia de vaporització dels líquids anomenats normals (no polars) es de 21 cal/mol·K en el punt normal d'ebullició:

$$\Delta S_v = \frac{\Delta H_v}{T_v^\circ} \approx 21 \text{ cal/mol}\cdot\text{K} \quad [3]$$

On T_v° és la temperatura normal d'ebullició (a 1 atm) del líquid, expressada en K i ΔH_v és l'entalpia normal o calor latent de vaporització.

Els líquids associats per enllaços d'hidrogen (com l'aigua, alcohols, etc.) presenten un ΔS_v superior a 21 cal/mol·K com a conseqüència d'una major associació de molècules en la fase líquida que en la gasosa. No obstant, la regla de Trouton es compleix bé en hidrocarburs, ésters i altres compostos en que no hi ha associacions moleculars fortes.

Una variant de la regla de Trouton és l'equació proposta per Kistyakowsky, que també s'aplica en el punt normal d'ebullició de líquids no polars:

$$\frac{\Delta H_V}{T_V^\circ} = 8.75 + 4.571 \cdot \log T_V^\circ \quad [4]$$

On la temperatura normal d'ebullició també s'expressa en K. Aquesta equació dóna bons resultats en una gran varietat de líquids no polars i ofereix una major desviació en els polars.

Altres mètodes per estimar la calor latent de vaporització són els que apliquen correlacions generalitzades. Dels mètodes proposats, la correlació de Watson és la que dóna resultats més satisfactoris:

$$\frac{\Delta H_{V2}}{\Delta H_{V1}} = \left(\frac{1 - T_{r2}}{1 - T_{r1}} \right)^{0.38} \quad [5]$$

On ΔH_{V1} i ΔH_{V2} són els calors latents de vaporització a les temperatures T_1 i T_2 , essent respectivament T_{r1} i T_{r2} les temperatures reduïdes. Aquest mètode permet estimar la calor latent de vaporització d'un líquid, a una temperatura determinada, a partir de la calor latent donat a una altra temperatura, que pot ser la d'ebullició del líquid. Una variant d'aquesta equació es dóna en el llibre de "Taules i Gràfics de Termodinàmica":

$$\Delta H_V = \Delta H_{V1} \cdot \left(\frac{T_C - T}{T_C - T_1} \right)^n \quad [6]$$

On ΔH_V és la calor latent a la temperatura T , ΔH_{V1} és la calor latent a la temperatura T_1 (que estan tabulats i coincideixen amb els valors normals de vaporització), T_C és la temperatura crítica i n és una constant el valor del qual és 0,38 excepte en l'hidrogen i en els òxids i alcohols orgànics.

Mitjançant la correlació de Pitzer del factor acèntric també es pot estimar la calor latent de vaporització. Així, inicialment es determina la entropia de vaporització mitjançant les dades generalitzades de líquid i vapor saturats a una T_r determinada (veure la taula de valors en el llibre de "Taules i Gràfics de Termodinàmica"):

$$\Delta S_V = \Delta S_V^\circ + \omega \cdot \Delta S_V^1 \quad [7]$$

i posteriorment la calor latent de vaporització a la temperatura de vaporització T_V :

$$\Delta H_V = \Delta S_V \cdot T_V \quad [8]$$

Igualment, ΔH_V es pot estimar mitjançant el gràfic de discrepàncies d'entalpia (correlació del factor de compressibilitat crític) en la zona de vaporització.

Una altra equació basada en la correlació del factor acèntric és la següent:

$$\frac{\Delta H_v}{R \cdot T_c} = 7.08 \cdot (1 - T_r)^{0.354} + 10.95 \cdot \omega \cdot (1 - T_r)^{0.456} \quad [9]$$

6. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1. Descripció de l'equip experimental.

El mètode consisteix en mesurar la pressió de vapor d'un líquid a diferents temperatures (mètode estàtic).

L'equip que s'utilitzarà està representat en la figura 1 .

Consta de les següents parts:

Matràs de 3 boques (1), que contindrà el líquid (aigua) del que volem mesurar la pressió de vapor a diferents temperatures i la calor latent de vaporització, que porta un termòmetre (2), un tub de vidre que es connecta a una bomba de buit (3) i un altre tub de vidre que es connecta al manòmetre (4). Les altres parts de l'equip estan constituïdes per: una clau 1 de dos vies, una clau 2 de tres vies, un vas de precipitats de 600 ml (5), un agitador magnètic amb sistema calefactor (6) i un manòmetre (7). El buit es fa mitjançant una bomba rotatòria d'oli (8).

3.2. Procediment experimental

A) Preparació de l'aigua

- A.1.-** Fer bullir 250 ml de aigua destil·lada per tal d'eliminar l'aire dissolt.
- A.2.-** Omplir el matràs de 3 boques, amb l'aigua destil·lada desgasificada i freda, fins els 3/4 del seu volum.
- A.3.-** Enroscar el tap que conté el termòmetre (2) a la boca esquerra, de manera que el termòmetre estigui submergit dintre de l'aigua.
- A.4.-** Enroscar el tap que conté el tub que està connectat a la bomba de buit (3) a la boca del mig.
- A.5.-** Enroscar el tap que conté el tub que està connectat al manòmetre (4) a la boca esquerra, de manera que aquest no estigui en contacte amb l'aigua.
- A.6.-** Omplir el vas de precipitats (5) amb aigua destil·lada fins uns 3/4 del seu volum.

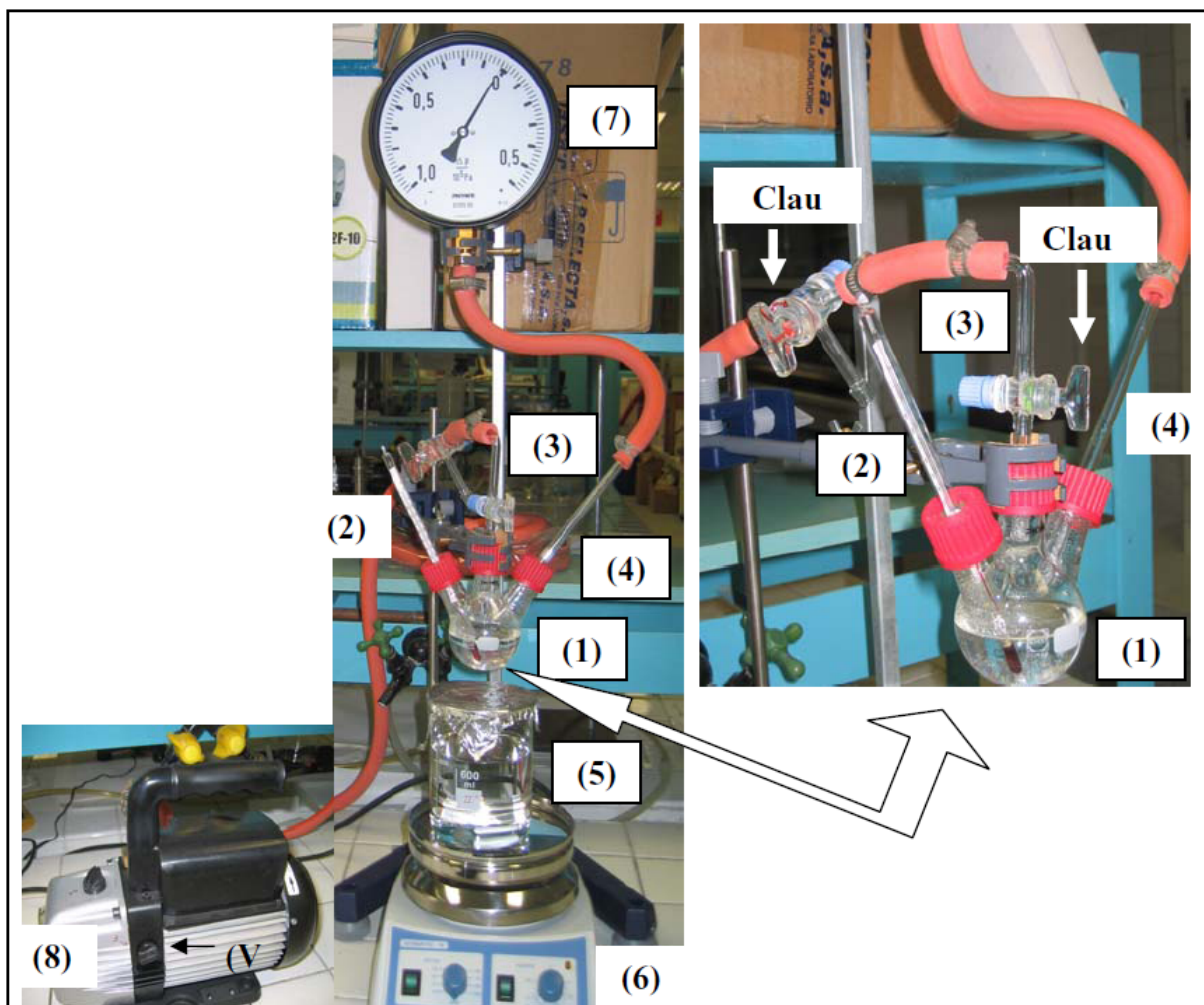


Figura 1.- Esquema de la instal·lació



Figura 2.- Posicions de la clau 1



Figura 3.- Posicions de la clau 2

B) Posta en marxa de la bomba de buit

- B.1.- Comprovar que la clau 2 està en posició IV (Figura 3).
- B.2.- Posar en marxa la bomba de buit pressionant l'interruptor situat al darrere.
- B.3.- Obrir la vàlvula (V3) de la bomba de buit, girant-la 180° en el sentit contrari a les agulles del rellotge, per tal d'eliminar el vapor d'aigua que hi ha al dipòsit d'oli.
- B.4.- Deixar en marxa la bomba de buit durant uns 10 minuts.

C) Desenvolupament experimental:

- C.1.- Anotar la pressió P_0 que marca el manòmetre
- C.2.- Submergir el matràs de 3 boques (1) dintre del vas de precipitats (5) que conté aigua destil·lada. El nivell d'aigua en el vas ha de cobrir el nivell d'aigua dintre del matràs.
- C.3.- Fer el buit dintre del matràs (1), girant la clau 1 a la posició I (figura 2) i girant la clau 2 a la posició III (figura 3), per tal d'evacuar l'aire que hi ha dintre del matràs. Es pot observar que el manòmetre indica una pressió relativa d'uns -0.95 bar. Deixar les claus 1 i 2 en les posicions anteriors fins que l'aigua del matràs hagi eliminat tot l'aire dissolt.
- C.4.- Aïllar el matràs del buit girant la clau 1 a la posició II i la clau 2 a la posició IV (figures 2 i 3).
- C.5.- Submergir el tub connectat al manòmetre (4) dintre de l'aigua (**vigilar que el tub no toqui el fons del matràs**).
- C.6.- Girar la clau 1 a la posició I (figura 2) per tal de restablir la pressió atmosfèrica dintre del matràs. S'observa que el tub de vidre connectat al manòmetre (4) s'omple ràpidament d'aigua. Prendre la lectura de la pressió inicial, del manòmetre ($P_{\text{inicial llegida}}$).

La pressió inicial corregida serà: $P_{\text{inicial}} = P_{\text{inicial llegida}} - P_0$

- C.7.- Posar en marxa l'agitador magnètic amb sistema calefactor (6) pressionant l'interruptor situat al darrere. Posar en marxa el calefactor i girar el selector de potència fins a la posició de 90%. Posar en marxa l'agitador i girar el selector de velocitats fins a una posició entre 60 i 100 rpm.
- C.8.- Escalfar l'aigua fins a una temperatura de 35°C.
- C.9.- Eliminar l'aire existent dintre del matràs, fent el buit. Per aconseguir-ho, cal girar la clau 2 en sentit contrari a les agulles del rellotge fins a la posició III (figura 3).
- C.10.- Girar la clau 1 a la posició II (figura 2) mentre es continua escalfant l'aigua fins a 40°C. Seguidament es redueix la potència del calefactor movent el selector fins a la posició corresponent al 85%.
- C.11.- Desconnectar la bomba de buit (8), pressionant l'interruptor posterior.
- C.12.- Prendre dades de temperatura i pressió (P_{manom}) cada 5°C, començant als 45°C, fins als 85°C com a temperatura màxima.
- C.13.- Acabat l'experiment, desconnectar el calefactor i l'agitador.
- C.14.- Deixar que l'equip es refredi.

D) Eliminació de la presència d'humitat a la bomba de buit

- D.1.-** Treure la boca del tub submergit dintre de l'aigua del matràs fins a una posició que estigui per damunt de la superfície de l'aigua.
- D.2.-** Posar en marxa la bomba de buit mitjançant l'interruptor situat a la part posterior de la bomba.
- D.3.-** Girar la clau 1 a la posició I (figura 2) . S'observa que cau tota l' aigua que omple el tub connectat al manòmetre.
- D.4.-** Girar la clau 2, en el sentit de les agulles del rellotge, fins a la posició IV (figura 3) per tal que es restableixi la pressió atmosfèrica en el sistema.
- D.5.-** Deixar que la bomba de buit (8) elimini la presència d'humitat durant uns 15 minuts, girant 180° en sentit contrari a les agulles del rellotge la vàlvula “vallast” (V3).
- D.6.-** Tancar la vàlvula “vallast” (V3) i parar la bomba de buit (8).

Anotar els valors experimentals obtinguts en la taula de resultats.

Amb els valors experimentals de la pressió de vapor, a cada temperatura, es calcularà la calor latent de vaporització i es comprovarà la veracitat de les regles empíriques anteriorment indicades (veure el full de l'informe de pràctiques).

4.- BIBLIOGRAFIA

- “Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química”, J.M. Smith y H.C. Van Ness. McGraw-Hill, 2ª ed. española, 1998.
- “Química Física”. Moore. Tomo I. De. Urmo, 1976.
- “Manual de Laboratorio de Química Física”, H:D: Crockford y J.W. Nowell. Ed. Alhambra, 1960. Experimento nº4:”Presión de vapor: Método Dinámico”.

DEPARTAMENT DE MÀQUINES I MOTORS TÈRMICS

PRÀCTIQUES DE TERMODINÀMICA I FÍSICO-QUÍMICA

Nom i Cognoms:

Grup:

Data: Qualificació:

PRÀCTICA 12. PRESSIÓ DE VAPOR DE L'AIGUA A TEMPERATURES INFERIORS A 100°C. DETERMINACIÓ DE LA CALOR LATENT DE VAPORITZACIÓ.

Recordeu que amb aquests informes s'avalua la competència genèrica: "Ús solvent dels recursos de la informació" en el nivell 2. Heu citar les referències, tal com us indiquen en les sessions de la Biblioteca.

RESULTATS

4. Efecte de la temperatura sobre la pressió de vapor.

Anotar els resultats experimentals i omplir la següent taula de valors:

Pressió de vapor serà: $P = P_{\text{atm}} + P_{\text{manom}} - P_{\text{inicial}}$

SUBSTÀNCIA	T ()	P _{manom} ()	P Pressió vapor ()	ln P	1/T (K ⁻¹)

Pressió baromètrica $P_{\text{atm}} = \dots\dots\dots$ mm Hg

1.1. Representar gràficament la pressió de vapor davant la temperatura

5. Determinació de la calor latent vaporització del líquid.

Representar gràficament el $\ln P$ davant $1/T$.

Determinar analíticament la recta de regressió de $\ln P$ davant de $1/T$, mitjançant un mètode de mínims quadrats:

Pendent :
 Ordenada a l'origen: :
 Coeficient de regressió :

Calor latent de vaporització ΔH_v : (kcal/mol)

2.3. Comparar el valor de la calor latent de vaporització calculat amb el que s'indica en unes taules de propietats físiques de substàncies pures.

2.4. Representar en el diagrama $\ln P$ vs. $1/T$ el comportament de l'aigua segons l'equació d'Antoine i comparar amb els resultats experimentals obtinguts.

$$\ln P = A - \frac{B}{T + C} \quad [10]$$

on P és la pressió de vapor en mm Hg, T la temperatura en K i A, B i C són constants característiques de cada substància.

Valors de les constants A, B i C de l'equació d'Antoine:

	A	B	C
Aigua	18.3036	3816.44	-46.13

6. Comprovació de les regles de Trouton i de Kistyakowsky.

3.1. Anotar a la taula els valors estimats de la calor de vaporització mitjançant la regla de Trouton i l'equació de Kistyakowsky. Justificar les possibles desviacions en relació als respectius valors experimentals. (T_v és la temperatura normal d'ebullició).

SUBSTÀNCIA	T_v (°C)	ΔH_{vap} (kcal/mol)		
		Experimental	R. Trouton	Eq. Kistyakowsky

3.2. Suposem un líquid A que segueix perfectament el comportament descrit per la regla de Trouton. A més a més, es coneix que a la temperatura de 77°C la seva pressió de vapor és la mateixa que la de l'aigua a 90°C. Quina serà la temperatura d'ebullició normal del líquid A?

PRÀCTICA 13

BOMBA DE CALOR R-134a – H₂O

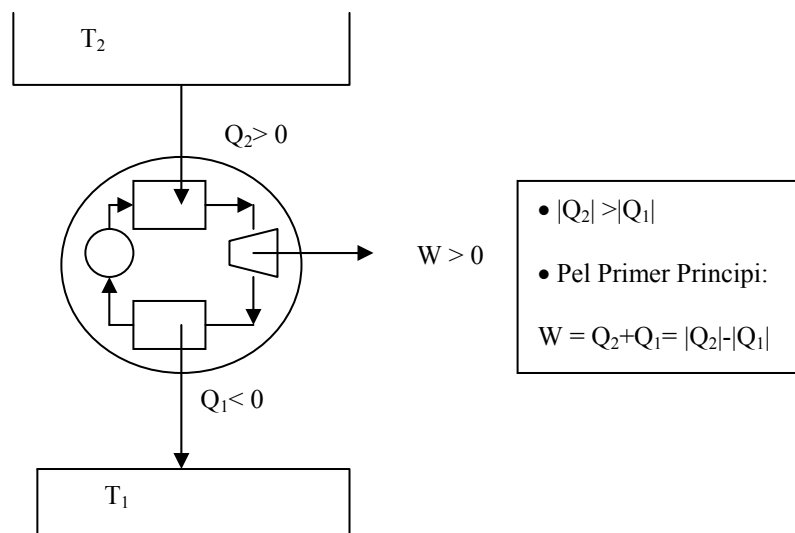
1.- OBJECTIU DE LA PRÀCTICA

La bomba de calor és una pràctica demostrativa d'una bomba de calor per compressió de vapor. L'objectiu és introduir a l'estudiant en un estudi senzill d'un cicle termodinàmic. En la part experimental mesurarà les diferents pressions i temperatures que hi ha en les diferents parts del cicle i podrà veure a través de les finestretes de que disposa el muntatge com el fluid de treball és alternativament líquid i vapor en les diferents parts del cicle. En l'elaboració de l'informe haurà d'aplicar un balanç energètic al cicle, aprendrà a representar cicles en diagrames termodinàmics (P-h en aquest cas) i haurà de buscar propietats termodinàmiques en taules.

2.- INTRODUCCIÓ TEÒRICA

Una màquina tèrmica és una màquina generadora de potència. En canvi, una màquina frigorífica o una bomba de calor és una màquina generadora de fred o calor. Les màquines generadores de potència són *màquines tèrmiques directes* i les explicarem seguidament. Les màquines frigorífiques i bombes de calor són *màquines tèrmiques inverses* i les descriurem més endavant. Primer de tot doncs, començarem per definir una màquina tèrmica directa. Una màquina tèrmica directa és una instal·lació amb un fluid motor que permet l'obtenció de treball com a conseqüència d'una calor absorbida o rebuda pel fluid.

Esquema d'una màquina tèrmica directa



El **fluid de treball** és el que recorre tots els dispositius de la instal·lació que forma el cicle i és aquell cap a / o des del qual es transfereix calor mentre se'l sotmet a un cicle.

Les màquines tèrmiques directes poden diferir molt les unes de les altres però totes es caracteritzen pel següent:

1.- Reben calor d'una font d'alta temperatura (energia solar, forns de petroli, reactors nuclears,...)

- 2.- Converteixen part d'aquesta calor en treball
- 3.- Cedeixen calor a un focus a baixa temperatura
- 4.- Es tanca el cicle mitjançant un dispositiu de compressió

El rendiment d'una màquina tèrmica directa es defineix com el quocient entre el treball net que dona el cicle i el calor que absorbeix.

$$\eta = \frac{W}{Q_{\text{abs}}} \quad [1]$$

Màquines tèrmiques inverses: com hem dit abans, són les màquines frigorífiques i les bombes de calor. Els fluids de treball que utilitzen aquestes màquines se'ls anomena fluids refrigerants.

a) Màquina frigorífica

És una màquina tèrmica inversa que absorbeix calor d'un focus fred a T_1 , i dona calor a un focus calent a $T_2 > T_1$, que està a la temperatura de l'ambient, amb l'aportació de treball. En les màquines tèrmiques inverses es defineix el coeficient d'eficiència (COP), que per una màquina frigorífica es calcula com:

$$\text{COP} = \frac{Q_1}{|W|} \quad [2]$$

sent Q_1 la quantitat de calor que la màquina frigorífica absorbeix del focus fred.

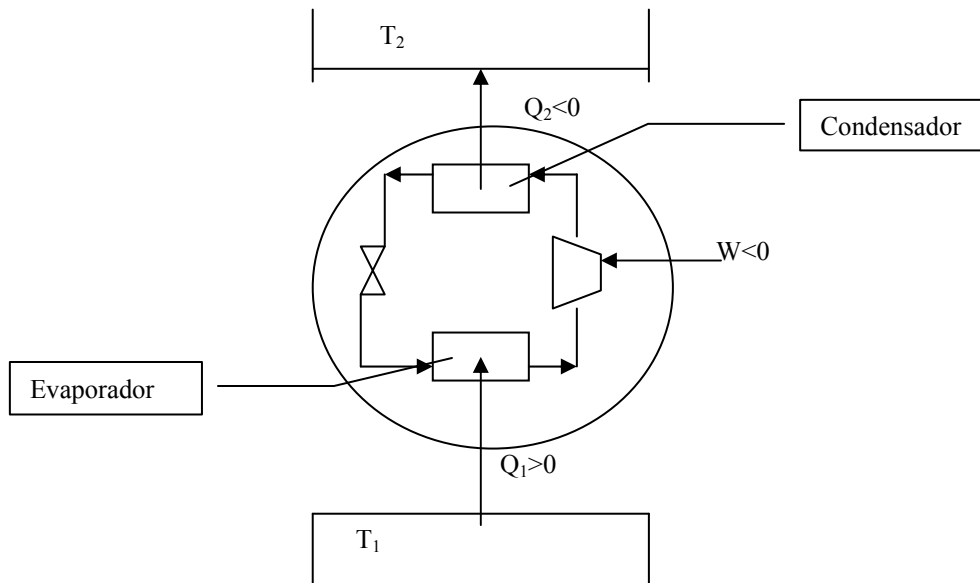
b) Bomba de calor

És una màquina tèrmica inversa que absorbeix calor d'un focus fred a T_1 , que està a la temperatura de l'ambient, i dona calor a un focus calent $T_2 > T_1$, que està a una temperatura superior a la de l'ambient, amb aportació de treball. El coeficient d'eficiència de la bomba de calor és:

$$\text{COP} = \frac{|Q_2|}{|W|} \quad [3]$$

sent Q_2 la quantitat de calor que la màquina cedeix al focus calent.

Esquema d'una màquina tèrmica inversa



El cicle termodinàmic que realitza aquesta màquina és el següent: (cicle de refrigeració per compressió de vapor)

El fluid refrigerant surt de l'evaporador generalment com a vapor saturat a baixa pressió i a continuació ingressa en el compressor on es comprimeix adiabàticament, mitjançant l'aportació de treball, fins a la pressió del condensador. Del compressor surt com a vapor sobreescalfat. A la sortida del compressor el fluid refrigerant ingressa en el condensador on cedint calor, a pressió constant, al focus calent de la màquina (que es troba a T_2) surt com a líquid saturat (o lleugerament sotsrefredat). A la sortida del condensador el refrigerant passa per una vàlvula d'estrangulament³ on s'expansiona fins a la pressió de l'evaporador on entra com a vapor humit i, absorbint calor a pressió constant del focus fred que es troba a T_1 s'evapora fins a vapor saturat.

Fluids refrigerants

Els fluids de treball utilitzats en els equips de refrigeració s'anomenen genèricament *refrigerants*. Són uns fluids que han de complir una sèrie de requisits, tals com adequades propietats físiques i termodinàmiques, baix grau de toxicitat, d'inflamabilitat i d'explosió i no ser nocius per la capa d'ozó, abans de ser acceptats en aquests tipus d'equips.

De refrigerants n'hi ha de molt diversos: derivats halogenats d'hidrocarburs (anomenats industrialment freons), amoníac, hidrocarburs, i fins i tot l'aigua.

Un dels refrigerants que s'ha utilitzat molt fins fa poc és el Freó-12 (CCl_2F_2), però aquest refrigerant degut als efectes nocius que té sobre la capa d'ozó actualment no s'utilitza. El tetrafluoroetà (CH_2FCF_3), anomenat R-134a, no conté clor i, per tant, es considera un substitut acceptable pel R-12.

La selecció d'un refrigerant específic es basa en les seves relacions pressió-temperatura de saturació en el rang d'aplicació particular. El tipus de compressor també afecta a l'elecció del

³ Tal com es descriu a la Pràctica 8 en un vàlvula d'estrangulament es realitza una expansió del fluid i l'entalpia a l'entrada i la sortida de la vàlvula és la mateixa (procés isentàpic)

refrigerant. Els compressors centrífugs són els millors per a baixes pressions és més adient treballar amb refrigerants que tinguin gran volum específic a baixa pressió. Els compressors alternatius funcionen millor en rangs de pressió alts i són més aptes per treballar amb refrigerants amb volums específics petits.

El diagrama de propietats termodinàmiques més utilitzat en el camp de la refrigeració és el pressió-entalpia. (P-h) i es disposen d'aquests diagrames per a la majoria de refrigerants.

3.- METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Descripció de l'aparell

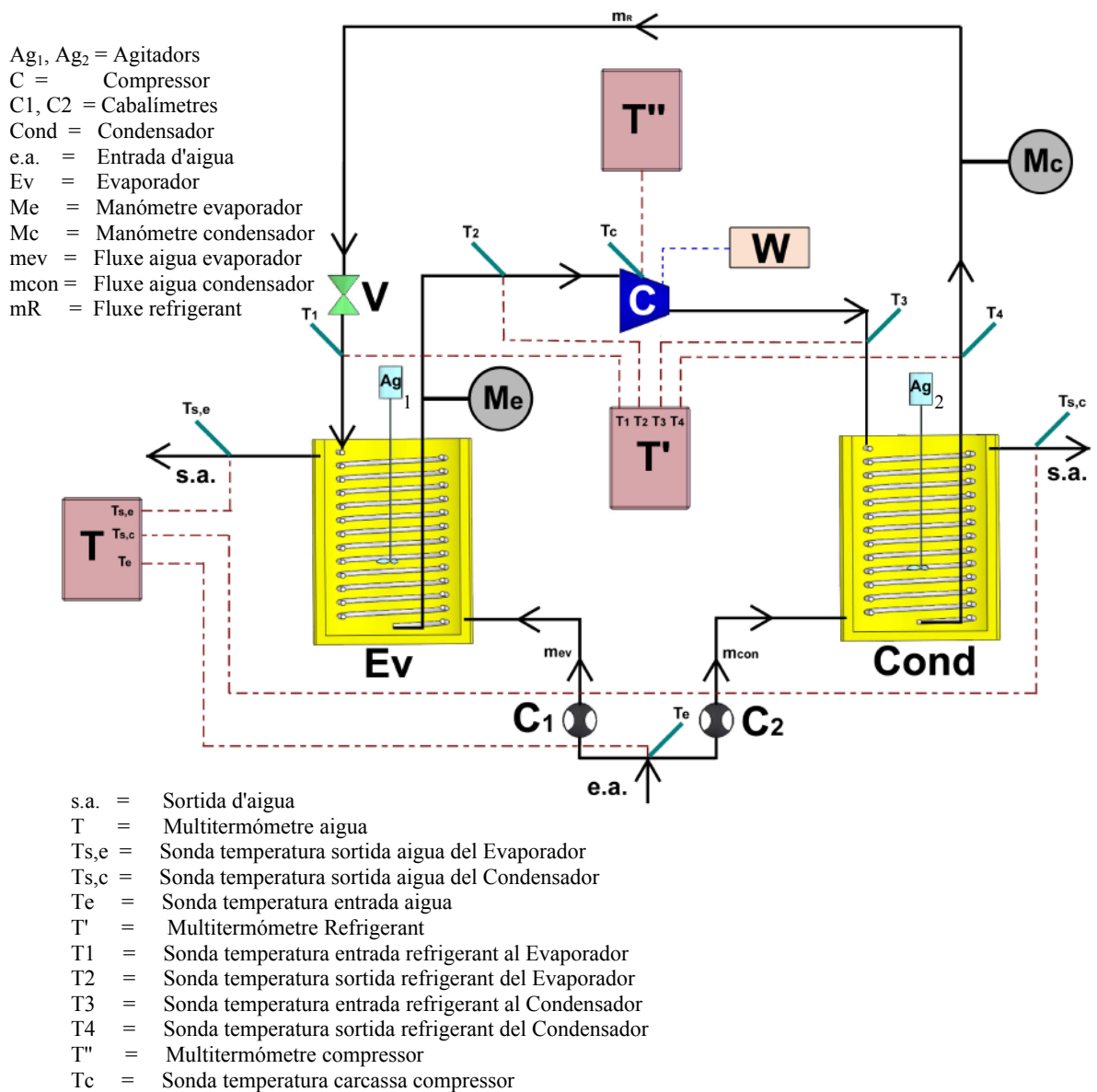


Figura 1.- Esquema experimental del cycle de la bomba de calor

El fluid refrigerant de treball és R-134a, aquest surt de l'evaporador E_v , a la temperatura T_2 i a la pressió P_e , i passa per el compressor C on el gas refrigerant es comprimeix mitjançant una aportació de treball W , fins a la pressió del condensador, P_c , que es mesura amb el manòmetre Me . El fluid gasós que surt del compressor és conduït al condensador a través del conducte i passa pel punt de mesura de temperatures T_3 . El R-134a entra al condensador, C_{ond} , on dona calor a l'aigua, que constitueix el focus calent de la màquina, i condensa fins a sortir com a líquid saturat a la pressió del condensador. A la sortida del condensador el fluid passa pel punt de medició de temperatures T_4 . El fluid és líquid saturat o sotsrefredat i es pot veure per la finestra. A través del conducte el fluid passa a la vàlvula d'expansió V . En la vàlvula el fluid s'expansiona i es refreda isoentàlpicament (l'entalpia del fluid a l'entrada de la vàlvula és la mateixa que a la sortida). A continuació i a través del conducte el fluid de treball arriba a l'evaporador, E_v , després de passar pel punt de medició de temperatures T_1 . En l'evaporador, el R-134a absorbeix calor de l'aigua, que constitueix el focus fred de la màquina, i es vaporitza. A la sortida de l'evaporador el fluid és vapor saturat o sobreescalfat i es pot veure el seu estat a través de la finestra corresponent. La pressió a la que opera l'evaporador, P_e , es pot mesurar en el manòmetre Me . Finalment, el fluid passa pel punt de mesura de temperatures T_2 continua pel conducte, cap al compressor C i es torna a començar el cicle.

L'equip disposa d'una sonda connectada a la carcassa del compressor per a mesurar la temperatura a la superfície del compressor T_c , per mitjà del multitermòmetre T'' .

Per altra banda els intercanvis de calor, tant en l'evaporador com en el condensador es realitzen per mitjà d'un corrent d'aigua. L'aigua procedeix de la xarxa i a l'entrada, e.a., es mesura la temperatura T_e mitjançant el multitermòmetre T . El circuit d'entrada de l'aigua es separa en dos cabals m_{ev} i m_{con} que es mesuren amb els cabalímetres C_1 i C_2 .

El cabal d'aigua m_{ev} va a l'evaporador i degut al bescanvi de calor amb el R-134e que recorre el cicle es refreda, a pressió constant, i surt a la temperatura $T_{s,e}$ mesurada amb el multitermòmetre T . Per facilitar i homogeneïtzar el bescanvi de calor en l'evaporador es disposa d'un agitador Ag_1 . El cabal d'aigua m_{con} va al condensador i degut al bescanvi de calor amb el R-134e que recorre el cicle s'escalfa, a pressió constant, i surt a la temperatura $T_{s,c}$ mesurada amb el multitermòmetre T . Per facilitar i homogeneïtzar el bescanvi de calor en el condensador es disposa d'un segon agitador Ag_2 .

L'equip també disposa d'un instrument de mesura que ens permetrà mesurar la potència del compressor W .

El muntatge complet que trobarem al laboratori és el següent:

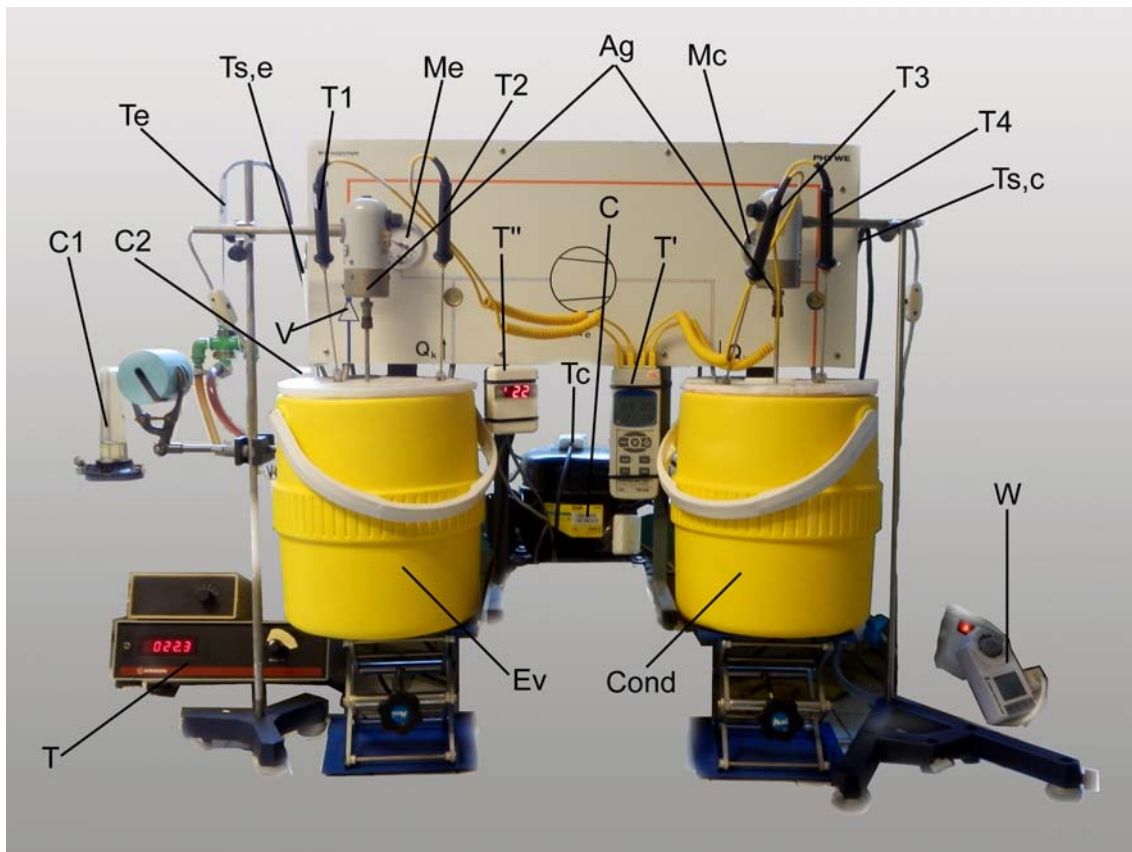


Figura 2.- Equip experimental complet de la bomba de calor

4.- PROCEDIMENT EXPERIMENTAL

Comproveu que les claus de pas de tres vies, que permeten l'entrada d'aigua i sortida de l'aigua cap als desaignes de l'evaporador i del condensador, estiguin en la posició correcta. Es a dir, que permetin l'entrada de l'aigua de la xarxa cap al condensador i a l'evaporador.

Veure posició de les claus a la figura 3.

Obriu el circuit d'entrada de l'aigua i reguleu els dos cabals dels cabalímetres C_1 i C_2 de manera que els dos indiquin aproximadament un mateix cabal. Connecteu els agitadors Ag del condensador i de l'evaporador, regulant la velocitat de gir.

Poseu en posició de mesura els multitermòmetres T, T' i T'', comprovant que totes les sondes de mesura estiguin operatives. Al multitermòmetre T hi estan connectades les sondes que indiquen: temperatura d'entrada de l'aigua T_e (posició 1), temperatura de sortida de l'aigua de l'evaporador $T_{s,e}$ (posició 2) i temperatura de sortida de l'aigua del condensador $T_{s,c}$ (posició 3). Al multitermòmetre T' hi estan connectades les sondes que indiquen la temperatura del R-134a que recorre el cicle: T_1 entrada de l'evaporador, T_2 sortida de l'evaporador, T_3 entrada del condensador i T_4 sortida del condensador. El multitermòmetre

T'' indica la temperatura superior i la temperatura lateral de la carcassa del compressor (de manera automàtica va indicant les dues temperatures, diferenciades per una marca a baix o a dalt de la pantalla).

Connecteu el wattímetre i comproveu que el display indiqui potència en Watts.

La bomba de calor es connecta a la xarxa de corrent altern mitjançant un interruptor col·locat en la paret lateral del panell on hi ha dibuixat el cicle.

Cada 5 minuts, durant 45-60 minuts, efectueu les mesures de:

- Cabal d'aigua que circula pel condensador m_{con}
- Cabal d'aigua que circula per l'evaporador m_{ev}
- Temperatura de l'aigua a l'entrada T_e
- Temperatura de l'aigua a la sortida de l'evaporador $T_{s,e}$
- Temperatura de l'aigua a la sortida del condensador $T_{s,c}$
- Pressió del R-134 a l'evaporador, P_e
- Pressió del R-134a al condensador, P_c
- Temperatura d'entrada, T_1 , i de sortida de l'evaporador, T_2
- Temperatura d'entrada, T_3 , i de sortida del condensador, T_4
- Potència del compressor, W
- Temperatura superior, $T_{c,sup}$, i temperatura lateral, $T_{c,l}$, de la carcassa del compressor.

En la taula de resultats, indiqueu els valors trobats **cada 5 minuts fins a 45-60 minuts**.

Una vegada finalitzada la pràctica:

- Pareu l'equip amb l'interruptor lateral.
- Desconnecteu els multitermòmetres T, T' i T''.
- Pareu els agitadors.
- Pareu el wattímetre.
- Tanqueu l'entrada d'aigua de la xarxa.
- Poseu les claus de tres vies in la posició que permeti el buidat de l'evaporador i del condensador (veure figura 3).
- Una vegada s'ha buidat totalment l'aigua de l'evaporador i del condensador, moveu les claus de tres vies de manera que quedin en la posició correcta que permeti l'entrada de l'aigua de la xarxa (veure figura 3).

Els estats pels que passa el fluid de treball en realitzar el cicle els anomenarem de la forma següent:

- Estat 1: entrada de l'evaporador (P_e, T_1)
- Estat 2: sortida de l'evaporador (P_e, T_2)
- Estat 3: entrada del condensador (P_c, T_3)
- Estat 4: sortida del condensador (P_c, T_4)

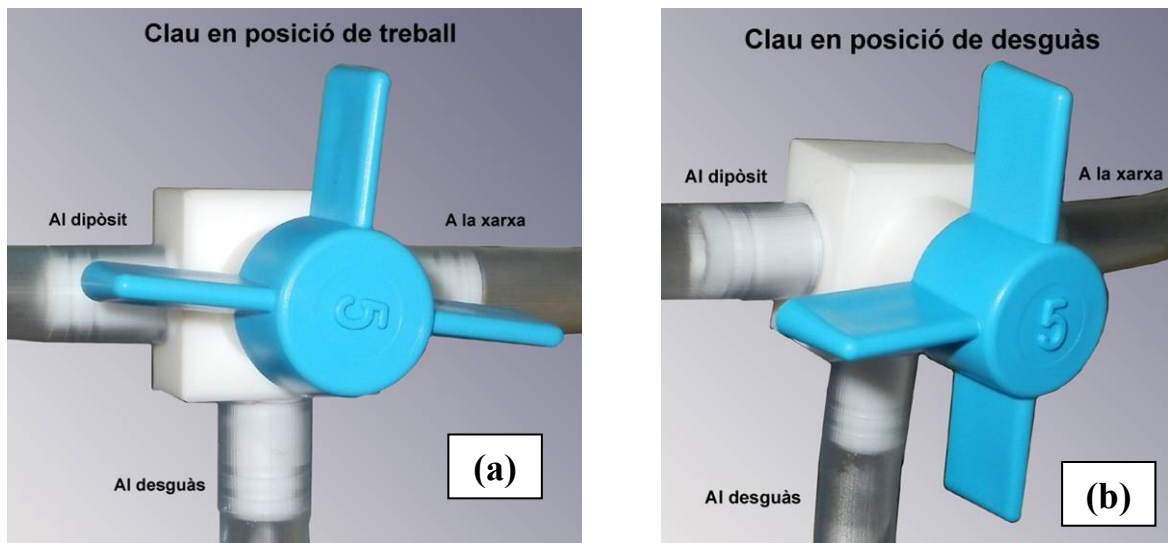


Figura 3.- Posició claus de tres vies en posició: (a) de treball i en posició, (b) de desguàs del condensador i de l'evaporador.

5.- BIBLIOGRAFIA

- Phywe, Laboratory Experiments Chemistry, Phywe series of publications
- M.J. Moran y H.N. Shapiro, Fundamentos de Termodinámica Técnica Vol.II. Reverté, 1993. Cap. 10.

DEPARTAMENT DE MÀQUINES I MOTORS TÈRMICS

PRÀCTIQUES DE TERMODINÀMICA

Nom i Cognoms:

Grup:

Data: Qualificació:

PRÀCTICA 13. BOMBA DE CALOR: R-134a - AIGUA

Recordeu que amb aquests informes s'avalua la competència genèrica: "Ús solvent dels recursos de la informació" en el nivell 2. Heu citar les referències, tal com us indiquen en les sessions de la Biblioteca.

1.- RESULTATS

1. Anoteu en una taula com la que s'adjunta les dades experimentals que heu mesurat cada 5 minuts

temps (min)	Pot. (W)	m_{ev} (L/h)	m_{con} (L/h)	T_e (°C)	$T_{s,e}$ (°C)	$T_{s,c}$ (°C)	T_1 (°C)	T_2 (°C)	T_3 (°C)	T_4 (°C)	P_e (bar)	P_{con} (bar)

temps (min)	$T_{c, sup}$ (°C)	$T_{c,l}$ (°C)	$T_{c, promig}$ (°C)

$T_{c, sup}$ És la temperatura superior de la carcassa del compressor
 $T_{c,l}$ És la temperatura lateral de la carcassa del

2.- Representeu gràficament:

2.1.- La temperatures de l'aigua a l'entrada i sortida de l'evaporador i condensador en funció del temps.

2.2.- Les temperatures del R-134a a l'entrada i sortida de l'evaporador i a l'entrada i sortida del condensador en funció del temps.

2.3.- Les temperatures lateral i superior de la carcassa del compressor en funció del temps.

2.4.-Indiqueu breument quines conclusions se'n poden deduir d'aquestes representacions gràfiques.

3.- Treballant únicament amb les dades obtingudes en la darrera lectura feta a la part experimental i amb l'ajut de les taules de propietats termodinàmiques del R-134a, digueu en quin estat es troba l'esmentat fluid refrigerant (líquid saturat, vapor humit, vapor rescalfat...) en cadascun dels quatre estats pels que passa al llarg del cicle. Si algun és vapor humit doneu el seu títol.

Estat	Estat en què es troba	Títol si n'hi ha
1		
2		
3		
4		

4.- Per a cada un del estats analitzats anteriorment, doneu el valor de la seva entalpia utilitzant les taules de propietats termodinàmiques

Estat	h (kJ/kg)
1	
2	
3	
4	

5.- Representeu el cicle obtingut en el diagrama P-h del R-134a que s'adjunta.

6.1- Fent un balanç d'energia en el condensador i trobeu el cabal màssic de R-134a que circula per la instal·lació (es considera que no hi ha pèrdues de calor per les parets).

6.2.- Fent un balanç d'energia en l'evaporador i trobeu el cabal màssic de R-134a que circula per la instal·lació (es considera que no hi ha pèrdues de calor per les parets).

6.3.- Atenent als cabals de R-134a trobats anteriorment, determineu el cabal promig que circula per la instal·lació.

6.4.- Calculeu la quantitat de calor que el fluid de treball absorbeix a l'aigua de l'evaporador.

6.5.- Calculeu la quantitat de calor que el fluid de treball cedeix de l'aigua del condensador.

6.6.- Calculeu el COP de la màquina.

6.7.- Determineu mitjançant un balanç en el compressor, la quantitat de calor que es perd per les parets del compressor.

7.- QÜESTIONS

7.1.- Busqueu informació sobre bombes de calor i fluids refrigerants i redacteu un resum d'aproximadament 1 plana i mitja.

7.2.- En les condicions en què té lloc el procés a la vàlvula d'estrangulament, quin signe té el coeficient de Joule-Thomson? Seria possible utilitzar com a fluid de treball una substància que en les condicions en què s'ha de realitzar el procés de la vàlvula d'estrangulament tingués un coeficient de Joule-Thomson de signe contrari? Justifiqueu la resposta.

APENDIX

Taules i Diagrames

Volum específic i densitat relativa de l'aigua a diferents temperatures

Els valors indicats a la taula estan calculats suposant que la massa d'1 ml d'aigua a 4°C és la unitat. Per transformar els valors de densitat relativa a absoluta multipliqueu per 0.999973.

t (°C)	Densidad Relativa (g/ml)	Volumen Especifico (ml/g)
-10	0.99815	1.00186
-9	0.99843	1.00157
-8	0.99869	1.00131
-7	0.99892	1.00108
-6	0.99912	1.00088
-5	0.99930	1.00070
-4	0.99945	1.00055
-3	0.99958	1.00042
-2	0.99970	1.00031
-1	0.99979	1.00021
0	0.99987	1.00013
1	0.99993	1.00007
2	0.99997	1.00003
3	0.99999	1.00001
4	1.00000	1.00000
5	0.99999	1.00001
6	0.99997	1.00003
7	0.99993	1.00007
8	0.99988	1.00012
9	0.99981	1.00019
10	0.99973	1.00027
11	0.99963	1.00037
12	0.99952	1.00048
13	0.99940	1.00060
14	0.99927	1.00073
15	0.99913	1.00087
16	0.99897	1.00103
17	0.99880	1.00120
18	0.99862	1.00138
19	0.99843	1.00157

t (°C)	Densidad Relativa (g/ml)	Volumen Especifico (ml/g)
20	0.99823	1.00177
21	0.99802	1.00198
22	0.99780	1.00221
23	0.99755	1.00244
24	0.99732	1.00268
25	0.99707	1.00294
26	0.99681	1.00320
27	0.99654	1.00347
28	0.99626	1.00375
29	0.99597	1.00405
30	0.99557	1.00435
31	0.99537	1.00466
32	0.99505	1.00497
33	0.99473	1.00530
34	0.99440	1.00563
35	0.99406	1.00598
36	0.99371	1.00633
37	0.99326	1.00669
38	0.99299	1.00706
39	0.99252	1.00743
40	0.99224	1.00782
41	0.99186	1.00821
42	0.99147	1.00861
43	0.99107	1.00901
44	0.99066	1.00943
45	0.99025	1.00985
46	0.98982	1.01028
47	0.98940	1.01072
48	0.98996	1.01116
49	0.98852	1.01162
50	0.98807	1.01207

t (°C)	Densidad Relativa (g/ml)	Volumen Especifico (ml/g)
51	0.98762	1.01254
52	0.98715	1.01301
53	0.98659	1.01349
54	0.98621	1.01398
55	0.98573	1.01448
60	0.98324	1.01705
65	0.98059	1.01979
70	0.97781	1.02270
75	0.97489	1.02576
80	0.97183	1.02899
85	0.96855	1.03237
90	0.96534	1.03590
95	0.96192	1.03959
100	0.95838	1.04343
110	0.9510	1.0515
120	0.9434	1.0601
130	0.9352	1.0693
140	0.9264	1.0794
150	0.9173	1.0902
160	0.9075	1.1019
170	0.8973	1.1145
180	0.8866	1.1279
190	0.8750	1.1429
200	0.8628	1.1590
210	0.850	1.177
220	0.837	1.195
230	0.823	1.215
240	0.809	1.236
250	0.794	1.259

Volum específic i densitat relativa del mercuri a diferents temperatures

t (°C)	Densidad Relativa (g/ml)	Volumen Especifico (ml/g)
-5	13.6078	0.0734873
-4	13.6053	0.0735006
-3	13.6029	0.0735140
-2	13.6004	0.0735273
-1	13.5979	0.0735407
0	13.5955	0.0735540
1	13.5930	0.0735674
2	13.5905	0.0735808
3	13.5880	0.0735943
4	13.5856	0.0736075
5	13.5831	0.0736209
6	13.5806	0.0736342
7	13.5782	0.0736476
8	13.5757	0.0736610
9	13.5732	0.0736746
10	13.5708	0.0736877
11	13.5683	0.0737011
12	13.5658	0.0737145
13	13.5634	0.0737278
14	13.5609	0.0737412
15	13.5584	0.0737550
16	13.5560	0.0737680
17	13.5535	0.0737813
18	13.5511	0.0737947
19	13.5486	0.0738081
20	13.5461	0.0738215
21	13.5437	0.0738348
22	13.5412	0.0738487
23	13.5388	0.0738617
24	13.5363	0.0738754

t (°C)	Densidad Relativa (g/ml)	Volumen Especifico (ml/g)
25	13.5339	0.0738888
26	13.5314	0.0739022
27	13.5290	0.0739153
28	13.5265	0.0739289
29	13.5241	0.0739423
30	13.5216	0.0739558
31	13.5191	0.0739691
32	13.5167	0.0739825
33	13.5142	0.0739960
34	13.5118	0.0740094
35	13.5094	0.0740228
36	13.5069	0.0740362
37	13.5045	0.0740496
38	13.5020	0.0740630
39	13.4996	0.0740765
40	13.4971	0.0740898
41	13.4947	0.0741033
42	13.4922	0.0741167
43	13.4898	0.0741301
44	13.4873	0.0741435
45	13.4849	0.0741570
46	13.4825	0.0741704
47	13.4800	0.0741838
48	13.4776	0.0741972
49	13.4751	0.0742107
50	13.4727	0.0742241
51	13.4703	0.0742375
52	13.4678	0.0742510
53	13.4654	0.0742644
54	13.4630	0.0742778
55	13.4605	0.0742913

t (°C)	Densidad Relativa (g/ml)	Volumen Especifico (ml/g)
60	13.4484	0.0743585
65	13.4362	0.0744257
70	13.4211	0.0744930
75	13.4120	0.0745602
80	13.3999	0.0746276
85	13.3878	0.0746949
90	13.3757	0.0747623
95	13.3637	0.0748294
100	13.3516	0.0748971
110	13.328	0.075032
120	13.304	0.075167
130	13.280	0.075303
140	13.256	0.075439
150	13.232	0.075575
160	13.208	0.075712