

Termodinàmica aplicada

Rosa Albalat

Termodinàmica aplicada

Rosa Albalat



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

Edicions

METODOLOGIA 23

Al meu fill, el meu «motor»

Índex

PART I. ANÀLISI DE SISTEMES	15
1. ANÀLISI ENERGÈTICA DE SISTEMES	19
1.1. Conceptes generals	19
1.1.1. Tipus de sistema objecte d'estudi	19
1.1.2. Propietats dels sistemes	20
1.1.2.1. Diagrama de fases per a una substància pura	21
1.1.2.2. Taules de propietats	22
1.1.2.3. Equacions d'estat	31
1.1.3. Unitats	32
1.2. Principis de conservació: Primer Principi de la Termodinàmica, en sistemes tancats	33
1.2.1. Conservació de la massa	33
1.2.2. Primer Principi de la Termodinàmica	33
1.3. Balanç energètic en sistemes oberts o volums de control	38
1.3.1. Conservació de la massa per a un volum de control	38
1.3.2. Conservació de l'energia per a un volum de control	40
1.3.3. Anàlisi de volums de control en estat estacionari	42
1.3.3.1. Conservació de la massa	43
1.3.3.2. Conservació de l'energia	43
1.3.4. Aplicacions a operacions en estat estacionari	45
1.3.5. Anàlisi d'estats transitoris	50
1.4. Objectius principals del capítol	54
Problemes	55
Bibliografia recomanada	61
2. ANÀLISI EXERGÈTICA DE SISTEMES	63
2.1. Introducció a l'anàlisi exergètica	63
2.2. Exergia	64
2.2.1. Exergia dels sistemes tancats	66
2.2.2. Balanç d'exergia per a sistemes tancats	70
2.2.3. Exergia de flux	77
2.2.4. Càlcul gràfic de l'exergia de flux per a un sistema amb flux estacionari	79
2.2.5. Balanç d'exergia per a volums de control	80
2.3. Eficiència termodinàmica o exergètica	84
2.4. Objectius principals del capítol	93
Problemes	94
Bibliografia recomanada	97
PART II. CICLES GENERADORS DE POTÈNCIA I CICLES REFRIGERADORS	99
3. INTRODUCCIÓ ALS CICLES GENERADORS DE POTÈNCIA	103
3.1. Consideracions bàsiques	103
3.2. Metodologia d'anàlisi	105
3.3. Aproximació dels cicles de gas a cicles d'aire estàndard	108

3.4. Efecte de l'aproximació a cicle d'aire estàndard fred	109
3.5. Objectius principals del capítol.....	109
Bibliografia recomanada.....	110
4. CICLES DE GAS GENERADORS DE POTÈNCIA	111
4.1. Cicles de motors de combustió externa	111
4.1.1. Cicle Stirling	111
4.1.2. Cicle Ericsson.....	115
4.1.3. Cicle Brayton	117
4.1.3.1. Cicle Brayton tancat d'aire estàndard amb absorció de calor a pressió constant i compressió adiabàtica	118
4.1.3.2. Cicle Brayton tancat d'aire estàndard amb absorció de calor a pressió constant i compressió isotèrmica	123
4.1.3.3. Cicle Brayton amb regeneració.....	125
4.1.3.4. Cicle Brayton amb reescalfament, refrigeració i regeneració.....	130
4.2. Cicles de motors de combustió interna.....	136
4.2.1. Descripció d'un motor alternatiu.....	136
4.2.1.1. Cicle Otto d'aire estàndard.....	139
4.2.1.2. Cicle dièsel d'aire estàndard.....	147
4.2.1.3. Cicle dual d'aire estàndard.....	152
4.2.2. Cicle Brayton amb combustió interna	157
4.2.3. Aplicacions del cicle Brayton de combustió interna: motors de reacció.....	158
4.3. Anàlisi exergètica dels cicles de gas.....	163
4.4. Objectius principals del capítol.....	166
Problemes	168
Bibliografia recomanada.....	174
5. CICLES DE VAPOR GENERADORS DE POTÈNCIA I CICLES BINARIS	177
5.1. Cicle de vapor. Cicle ideal Rankine.....	177
5.1.1. Càlcul del rendiment tèrmic del cicle Rankine bàsic.....	181
5.1.2. Desviacions dels cicles reals respecte del cicle ideal	184
5.1.3. Millora del rendiment tèrmic del cicle Rankine.....	185
5.2. Cicle Rankine amb reescalfament intermedi del vapor	187
5.3. Cicle Rankine amb regeneració de calor	192
5.3.1. Cicle amb regenerador obert.....	193
5.3.2. Cicle amb regenerador tancat	197
5.4. Anàlisi exergètica del cicle Rankine bàsic amb irreversibilitats	203
5.5. Cogeneració	207
5.6. Cicles de vapor binaris.....	209
5.7. Cicles combinats gas-vapor.....	212
5.8. Objectius principals del capítol.....	215
Problemes	217
Bibliografia recomanada.....	222
6. CICLES DE REFRIGERACIÓ	225
6.1. Refrigeradors i bombes de calor	225
6.2. Cicles de refrigeració per compressió de vapor	229
6.2.1. Cicle ideal de refrigeració per compressió de vapor	229
6.2.2. Càlcul del coeficient de rendiment.....	232
6.2.3. Cicle real de refrigeració per compressió de vapor	237

6.2.4.	Agents refrigerants en cicles de refrigeració per compressió de vapor.....	240
6.2.5.	Particularitats de les bombes de calor	241
6.2.6.	Sistemes de refrigeració per compressió de vapor en cascada i de compressió multietapa	243
6.2.6.1.	Sistemes de refrigeració en cascada	243
6.2.6.2.	Cicles de refrigeració amb compressió multietapa i interrefrigeració	247
6.3.	Sistemes de refrigeració amb absorció del refrigerant.....	250
6.4.	Cicles de refrigeració de gas	252
6.4.1.	Cicle Brayton de refrigeració.....	252
6.4.2.	Aplicacions dels cicles de gas modificats	256
6.5.	Objectius principals del capítol.....	259
	Problemes	260
	Bibliografia recomanada.....	263
7.	SISTEMES DE CONVERSIÓ DIRECTA D'ENERGIA (DEC)	265
7.1.	Descripció general i classificació.....	265
7.2.	Sistemes DEC que operen entre dues temperatures límit.....	266
7.2.1.	Efectes i dispositius termoelèctrics.....	266
7.2.1.1.	Generadors termoelèctrics	268
7.2.1.2.	Refrigeradors termoelèctrics	271
7.2.2.	Transformadors termoiònics	273
7.2.3.	Generadors magnetohidrodinàmics (mhd).....	277
7.3.	Sistemes DEC que operen isotèrmicament	280
7.3.1.	Piles de combustió.....	280
7.3.1.1.	Tipus de piles de combustió	281
7.3.1.2.	Teoria de les piles de combustió i càlcul del rendiment tèrmic	283
7.3.1.3.	Aplicacions de les piles de combustió	286
7.3.2.	Cèl·lules fotovoltaïques.....	287
7.4.	Objectius principals del capítol.....	291
	Bibliografia recomanada.....	292
PART III.	APÈNDIX	293
ÍNDIX ALFABÈTIC		329

INTRODUCCIÓ

Aquest manual pretén ser una introducció a les aplicacions de la termodinàmica en el camp de l'enginyeria. Va dirigit principalment als alumnes de l'ensenyament d'Enginyeria Química un cop han adquirit els coneixements bàsics d'aquesta disciplina mitjançant l'assignatura Química Física, en la qual es desenvolupen àmpliament les bases de la termodinàmica però no les seves aplicacions. La termodinàmica és una eina molt important en el món de la indústria, però té certes limitacions que fan que assignatures com ara Circulació de Fluids, Fenòmens de Transport i Transmissió de Calor siguin imprescindibles per a la compressió de determinats processos industrials.

L'objectiu de l'assignatura de Termodinàmica Aplicada és subministrar aquells coneixements que permetin dissenyar, desenvolupar, millorar i optimitzar instal·lacions industrials destinades a la producció de potència i a la refrigeració, sense entrar en consideracions referents a l'elecció de components ni a la construcció mecànica.

El manual s'ha dividit en dues parts. La primera prepara el camí de la segona i pretén establir una bona base, sobretot pel que fa als tipus de sistemes que analitzarem i a la metodologia utilitzada per fer-ho, basada en els Primer i Segon Principis de la Termodinàmica.

En el primer capítol es repassen i s'amplien conceptes generals, especialment els que fan referència a les lleis de la conservació de la massa i l'energia per a sistemes a través dels quals hi ha flux de matèria.

En el segon capítol es posa de manifest la preocupació pel possible impacte mediambiental i socioeconòmic que ocasiona la transformació de recursos energètics: la segona llei de la termodinàmica limita la fracció d'energia total consumida que pot ser transformada en treball útil o potència per una instal·lació, i l'enginyer té l'obligació d'utilitzar aquesta fracció energètica de la millor manera possible. El mètode exergètic, introduït en aquest segon capítol, té en compte aquests dos punts, de manera que permet determinar quin és el profit o rendiment que dona aquesta fracció energètica utilitzable. Fins a cert punt, quant a l'optimització de recursos, el mètode exergètic va una mica més enllà que el Segon Principi de la Termodinàmica.

La segona part entra de ple en les aplicacions, amb un tema previ (capítol 3) en el qual s'estableixen alguns criteris generals vàlids per analitzar qualsevol tipus d'instal·lació, ja sigui productora de potència o de refrigeració. La distribució dels capítols següents es basa en un augment del grau de complexitat, considerablement diferent del desenvolupament històric i tecnològic. En aquest sentit, es tracten primer les màquines tèrmiques que operen segons un cicle termodinàmic de gas (capítol 4) i, a continuació, les màquines de vapor (capítol 5), tot i que el funcionament d'aquestes últimes és previ al de les primeres.

En el capítol 6 s'analitzen les instal·lacions frigorífiques, tant les que operen seguint cicles de vapor com les de gas, les seves modificacions i les bombes de calor.

Finalment, es presenta un capítol dedicat als sistemes de conversió directa d'energia, d'importància creixent en el camp de l'enginyeria, ja que, entre altres raons, alguns d'aquests dispositius utilitzen energies renovables o alternatives als combustibles fòssils.

L'objectiu principal de *Termodinàmica aplicada* és l'anàlisi dels cicles termodinàmics que recorren les instal·lacions generadores de potència i els sistemes de refrigeració. El punt de partida d'aquest estudi consisteix en la idealització de la realitat, la qual cosa permetrà a

l'enginyer avaluar de manera simple l'efecte dels paràmetres més significatius que controlen un procés. Les preguntes que l'enginyer es planteja sobre una instal·lació fan referència a la quantitat d'energia necessària per al seu funcionament, al rendiment que té, de quins factors depèn i quines mesures haurà d'adoptar per millorar-lo. La finalitat que es persegueix donant resposta a totes aquestes preguntes no és altra que aconseguir dissenyar dispositius amb un alt rendiment des del punt de vista energètic o amb una elevada potència.

Cada capítol s'inicia amb una petita introducció on s'indiquen els punts més rellevants que s'hi tractaran. A continuació, es desenvolupa el tema seguint un ordre de complexitat creixent, començant per l'anàlisi dels sistemes més senzills idealitzats i fins a arribar a les instal·lacions més complexes mitjançant la incorporació progressiva de modificacions i millores. Els principis bàsics s'apliquen repetidament en cada capítol, cosa que propicia que, en els darrers temes, l'alumnat hagi assumit de manera natural la metodologia de treball utilitzada per comprendre, plantejar i resoldre diferents problemes relacionats amb les instal·lacions estudiades. La termodinàmica té fama de ser una matèria complicada, i ho és si l'estudiant només s'esforça a memoritzar conceptes i equacions sense tractar de comprendre'ls. En aquest manual s'intenta evitar aquest problema aprofitant l'avantatge que representa el fet d'estudiar les seves aplicacions tècniques. Finalment, s'inclou un petit resum on es destaquen els conceptes i punts més rellevants. Al llarg de cada capítol es plantegen una sèrie de qüestions per tal que l'alumne comprovi no tan sols si ha assimilat els conceptes bàsics del tema, sinó també si és capaç de relacionar aquests conceptes amb altres aplicacions quotidianes conegudes per tots, com poden ser el funcionament d'una olla de pressió, un escalfador d'aigua o el mateix cos humà. De fet, tots els principis de la termodinàmica es basen en les experiències de cada dia i l'observació experimental.

L'exposició de cada tema finalitza amb un recull dels objectius principals que convé no oblidar si a final de curs es vol tenir una visió de conjunt de l'assignatura.

En acabar cada capítol s'inclou un conjunt de problemes, no gaire extens però que cobreix els aspectes més interessants i destacats de la teoria estudiada. Normalment els problemes es presenten amb el mateix ordre que els apartats i en grau creixent de dificultat. Resoldre'ls és gairebé imprescindible per clarificar la teoria i il·lustrar els principis més bàsics aplicats, per practicar l'ús de les taules i els diagrames de propietats i per establir una metodologia d'anàlisi comuna a les diferents transformacions energètiques de processos industrials. Se suggereix que es resolguin a mesura que s'avanci en el desenvolupament del tema, de manera que puguin servir d'exemple dels conceptes que es van introduint. Alguns problemes no són propis d'un apartat específic, sinó que revisen tot el contingut del tema. Els resultats indicats poden variar lleugerament segons el mètode de resolució, que no és únic, però aquesta variació no és mai prou significativa perquè pugui conduir a una interpretació i una anàlisi incorrectes del funcionament d'una instal·lació.

El manual incorpora al final un apèndix que recull les taules de propietats i els diagrames necessaris per resoldre els problemes plantejats. Val a dir que tot aquest material està informatitzat, cosa que facilita considerablement, potser en excés per a un alumne d'aquest nivell, el càlcul numèric. És convenient que l'estudiant comenci emprant les taules de propietats impreses a fi d'adquirir la familiaritat que li permeti, més endavant, utilitzar convenientment el material informatitzat. Les unitats en què es presenten les taules corresponen al sistema internacional (SI), però atès que el sistema d'unitats britànic (BTS, per British Technique System) és el que s'empra en la bibliografia menys recent i que encara s'utilitza en la majoria d'indústries americanes, s'ha dedicat un apartat del primer capítol a comentar les equivalències entre els dos sistemes i s'han proposat alguns problemes amb dades en el sistema anglès. Malgrat tot, la comunitat científica internacional recomana utilitzar

únicament el sistema internacional d'unitats. D'altra banda, tot i que no deixa de ser una contradicció, a tot el manual s'ha utilitzat el punt per separar les xifres decimals, adoptant així el criteri nord-americà i britànic, i no la coma, tal com correspon al nostre llenguatge. La raó, potser no del tot convincent, no és altra que, per a tal finalitat, els sistemes informatitzats no reconeixen la coma, sinó el punt.

La bibliografia es podria presentar agrupada al final del text, en comptes de distribuïda per capítols, ja que la majoria de referències són totalment generals i, per tant, vàlides per a la consulta de quasi tots els temes. S'ha optat, però, per afegir al final de cada capítol un apartat on s'indica quines són les referències més adequades i amb quina profunditat tracten el contingut del tema. En cap moment no es mencionen textos especialitzats o monogràfics sobre un tipus d'instal·lació en concret, ja que el seu nivell supera de llarg els objectius fixats en aquest manual.

El conveni de signes adoptat per a les transferències energètiques mitjançant treball és el contrari del que probablement s'ha introduït en les assignatures aconsellades com a prerrequisit de la de Termodinàmica Aplicada. En aquest manual considerarem que el treball produït pel sistema és positiu, tal com accepta tota la comunitat d'enginyers. Certament, hi ha raons per adoptar qualsevol dels dos convenis: si analitzem les transformacions que experimenta un sistema, pot ser lògic que el treball que aquest rep i que provoca un augment del seu contingut energètic es consideri positiu; en canvi, si la finalitat d'un procés o un conjunt de processos és l'obtenció de treball, sembla més raonable que sigui aquest treball obtingut el que es consideri positiu.

Confio que amb l'ajuda d'aquest text l'alumnat adquirirà no tan sols els coneixements necessaris per tractar numèricament les diferents instal·lacions estudiades, sinó també els criteris que li permetin millorar-ne el funcionament. L'índex del manual és exactament igual que el programa de l'assignatura, amb la qual cosa es fa palesa la seva finalitat, que és servir de suport bibliogràfic tant de les classes teòriques com de l'estudi personal de l'alumne. Així mateix, espero que la seva lectura serveixi d'estímul per aprofundir més en aquesta matèria d'àmplia aplicació tant en l'àmbit industrial com en el domèstic. És impensable que un enginyer en exercici de la seva professió no es trobi en algun moment, per no dir habitualment, amb problemes relacionats amb sistemes generadors de potència.

No voldria acabar aquesta presentació sense agrair la contribució de tots aquells que han fet possible aquesta publicació, amb la lectura del manuscrit i els nombrosos suggeriments que han ajudat a simplificar l'exposició. També estic en deute amb tots els autors dels llibres de termodinàmica aplicada que figuren a la bibliografia i que han estat una bona referència per elaborar aquest manual. I, igualment, amb els alumnes que m'han indicat i corregit errors de la primera edició.

Barcelona, febrer de 2020

Rosa Albalat Piñol

Professora titular. Secció de Química Física
Departament de Ciències de Materials i Química Física
Universitat de Barcelona

PART I
ANÀLISI DE SISTEMES

Si bé aquest curs està plenament dedicat a l'aplicació de la termodinàmica en el camp de l'enginyeria química, necessitem uns capítols previs per ampliar els coneixements que s'han adquirit sobre aquesta matèria en assignatures de cursos anteriors i per introduir algun concepte nou del tot necessari en el tipus d'anàlisi que pretenem fer.

Començarem el primer capítol repassant i ampliant uns quants conceptes molt generals: definirem els tipus de sistemes que són objecte del nostre estudi (sistemes tancats i volums de control) i recordarem els recursos de què disposem pel que fa a la determinació de propietats d'aquests sistemes (diagrames, taules i equacions d'estat).

A continuació, i seguint en la mateixa línia, aplicarem l'anàlisi energètica tant a sistemes tancats com a volums de control o sistemes oberts, amb la complicació que comporta l'aparició d'un flux de matèria.

En el segon capítol parlarem d'una nova magnitud: l'exergia. Aquest és un concepte relativament nou que s'introdueix a partir del Segon Principi de la Termodinàmica, per la utilitat que presenta a l'hora d'aprofitar millor els recursos energètics.

El Primer Principi de la Termodinàmica fa referència a la quantitat d'energia i afirma que aquesta ni es crea ni es destrueix. Aquesta llei només serveix com a eina per comptabilitzar les transferències d'energia durant un procés, però no ofereix cap repte a l'enginyer.

El Segon Principi fa referència al balanç d'energia i incorpora els conceptes de degradació d'energia i producció d'entropia durant un procés. Avalua, per tant, la pèrdua de l'oportunitat de produir treball i ofereix un ampli ventall de possibilitats de millora dels processos i de les instal·lacions on aquests tenen lloc.

En relació amb el que acabem de dir, el terme exergia, també anomenat disponibilitat, es defineix com el màxim treball útil que es pot obtenir d'un sistema en un estat determinat respecte a l'ambient que l'envolta. No es tracta ara d'avançar coneixements, però sí que podem anticipar que relacionarem l'exergia amb les irreversibilitats dels processos que experimenten els sistemes termodinàmics més complexos, la qual cosa ens permetrà definir l'eficiència termodinàmica.

La informació que contenen aquests dos primers capítols s'anirà aplicant al llarg de tota l'assignatura, de manera que els conceptes nous s'acabaran d'assimilar mitjançant la seva aplicació.

ANÀLISI ENERGÈTICA DE SISTEMES

Una etapa prèvia important per realitzar qualsevol anàlisi en enginyeria consisteix a descriure amb exactitud el sistema que s'estudia, que pot ser molt simple o extremament complicat.

El nostre objectiu pot ser l'estudi de la matèria continguda en un tanc de parets rígides, que amb els coneixements adquirits en assignatures prèvies ja sabem fer, o bé l'anàlisi d'un element d'una instal·lació a través de la qual hi ha flux de matèria. Així mateix, la composició de la matèria en l'interior d'un sistema pot ser fixa o variar mitjançant una reacció química. Fins i tot el buit pot ser objecte d'estudi. Per tant, és necessari ampliar alguns conceptes adquirits en assignatures precedents i adaptar-los al camp de l'enginyeria termodinàmica.

1.1. Conceptes generals

1.1.1. Tipus de sistema objecte d'estudi

En línies generals, es defineix un *sistema termodinàmic* com la quantitat de matèria, o regió de l'espai que conté la matèria, escollida per a l'estudi. Amb aquesta definició fem referència a la possibilitat de tenir sistemes oberts o sistemes tancats.

Un *sistema tancat*, denominat també *massa de control*, consisteix en una quantitat fixa de matèria, sense possibilitat de bescanvi de massa a través de les parets. Sí que és possible, en canvi, que hi hagi bescanvi energètic, ja sigui en forma de calor o de treball, entre el sistema i l'ambient. Si aquest bescanvi energètic no fos possible, hauríem de parlar de sistema aïllat. Pel que fa al volum, tampoc no ha de ser fix.

Un *sistema obert*, conegut habitualment com a *volum de control*, està constituït per una regió de l'espai, normalment delimitada per un element d'una instal·lació, a través de la qual hi ha flux de massa, com pot ser un compressor, una turbina, una tovera, etc. Els processos en què està implicat un flux de matèria s'estudien millor si se selecciona una regió ben delimitada per l'anomenada *superfície de control*.

Un volum de control és qualsevol regió de l'espai. En quines condicions un volum de control coincideix amb una massa de control? En quines condicions és un sistema aïllat?

Un exemple il·lustratiu de sistema obert el trobem en un escalfador d'aigua. Imaginem-nos que volem determinar la quantitat de calor necessària que s'ha de subministrar a l'aigua perquè surti de l'escalfador a una temperatura determinada. Atès que l'aigua calenta sortirà de l'escalfador quan serà reemplaçada per l'aigua freda, és convenient concentrar el nostre estudi en el volum delimitat per les parets interiors de l'escalfador i considerar el flux de massa i energia a través de la superfície de control.

Com que les relacions termodinàmiques aplicables a sistemes oberts i a sistemes tancats són diferents, és extremament necessari definir correctament el sistema abans de començar-ne l'anàlisi.

1.1.2. Propietats dels sistemes

Per poder fer correctament un balanç de la matèria o energia d'un sistema que experimenta un procés entre dos estats en equilibri termodinàmic, cal conèixer les seves propietats o funcions d'estat i com es relacionen.

Ja hem estudiat molts aspectes relacionats amb aquest punt en cursos anteriors:

- Coneixem la regla de les fases de Gibbs, que fixa el nombre de variables intensives independents necessàries per especificar l'estat d'equilibri d'un sistema determinat i que, en cas de ser un sistema de massa i composició constant, és igual a 2.
- Disposem d'equacions d'estat que descriuen el comportament de sistemes, principalment per les variables corresponents a sistemes en estat gasós.

A més a més, a part de les equacions d'estat, hi ha un ampli ventall de possibilitats per determinar propietats termodinàmiques: diagrames de fases i taules de valors de diferents propietats per a sistemes d'interès en enginyeria.

Hem d'assenyalar ara que el que més ens interessa de tota aquesta informació és la que fa referència a les *substàncies pures*. Presentarem algunes excepcions que a la pràctica es podran tractar com una substància pura, com és el cas de l'aire, que de fet és una mescla de gasos no reactiva. En alguns dels sistemes que estudiarem s'hi poden produir reaccions de combustió, la qual cosa implica que en un principi tindrem una mescla d'aire i carburant i que, a més a més, la composició del sistema variarà. Però salvarem aquestes complicacions gràcies a l'estudi de sistemes idealitzats, que seran una bona aproximació als sistemes reals.

Així mateix, centrarem l'atenció en els sistemes gasosos i líquids i en els que poden experimentar un canvi de fase passant de líquid a vapor o a la inversa.

Com ja sabem, la caracterització de l'estat homogeni d'una substància pura requereix únicament el coneixement de dues variables intensives independents, a partir de les quals es poden determinar la resta de propietats termodinàmiques. En aquest cas, les dues propietats independents poden ser la pressió i la temperatura. Però si tenim un sistema heterogeni líquid-vapor, en equilibri, la pressió i la temperatura no seran variables independents i, per tant, l'estat intensiu del sistema quedarà caracteritzat per una d'aquestes dues propietats intensives (p o T). Ara bé, algunes instal·lacions que operen amb sistemes heterogenis, com ara les plantes de vapor (capítol 5), generen més potència o menys segons la quantitat de vapor relativa a la massa total del sistema. Per tant, serà necessari definir no tan sols l'estat intensiu del sistema, sinó també el seu estat extensiu. En el cas de sistemes heterogenis, constituïts per una substància pura en equilibri líquid-vapor, que recorrin cicles generadors de potència, a més de conèixer la pressió o temperatura per definir l'estat intensiu del sistema, necessitem conèixer una altra propietat relativa al seu estat extensiu, i que pot ser, entre d'altres, la fracció molar de líquid o vapor.

Les variacions de les funcions d'estat durant un canvi de fase s'entenen millor amb l'ajuda dels diagrames de fases que recordarem en la secció següent.

1.1.2.1. Diagrama de fases per a una substància pura

En aquest apartat analitzarem els diagrames $p-v$ i $T-v$, corresponents a les substàncies pures en les condicions en què presenten dues fases en equilibri líquid i vapor.

El nostre objectiu és analitzar un procés de canvi de fase, a pressió constant, des del líquid subrefredat (comprimit) fins al vapor sobreescalfat, mitjançant la transferència de calor. A la figura 1.1 es representa aquest procés, des del punt 1 fins al punt 2, en els diagrames $p-v$ i $T-v$:

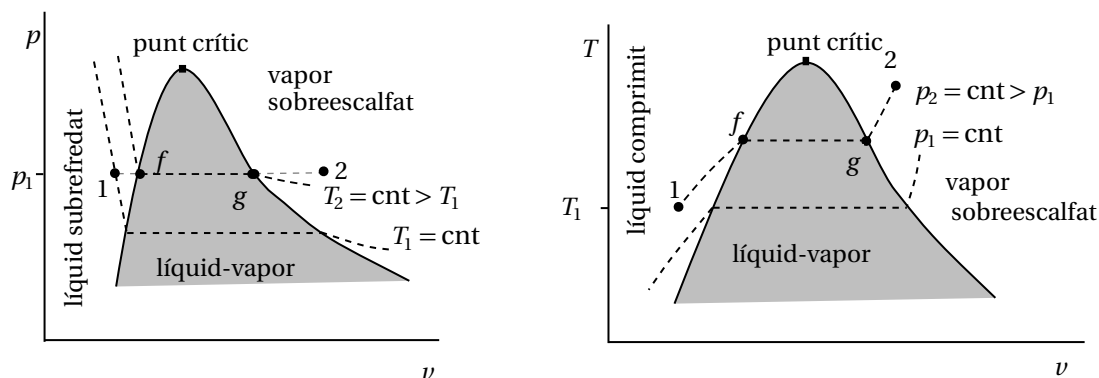


Figura 1.1. Diagrames $p-v$ i $T-v$ per a una substància pura.

Tal com podem observar, el punt de partida del procés, punt 1, es troba a la regió corresponent a l'anomenat líquid subrefredat o comprimit. La raó d'aquestes dues denominacions equivalents és que, d'una banda, en aquesta zona els estats es troben a una temperatura inferior a la temperatura de saturació a la mateixa pressió (en el diagrama $p-v$, $T_1 < T_{sat(p1)} = T_f$), d'aquí ve el nom de subrefredat, però, de l'altra, a una mateixa temperatura, la pressió corresponent és superior a la pressió de saturació (en el diagrama $T-v$, $p_2 > p_{sat(T1)} = p_1$), i d'aquí ve el nom de comprimit.

En escalfar el sistema a pressió constant, augmenta la temperatura fins a arribar al punt f , en què tenim líquid saturat. A partir d'aquest moment, si seguim escalfant, es produeix el pas de líquid a vapor, a pressió i temperatura constants (recordeu la regla de les fases), fins a arribar al punt g , on tenim vapor saturat. Si seguim subministrant energia, a pressió constant, es produirà l'augment de temperatura i així obtindrem vapor sobreescalfat en el punt 2. En tot el procés d'1 a 2 ha anat augmentant el volum específic del sistema.

Els estats que uneixen els punts f i g es caracteritzen per l'anomenat títol de vapor (x_v), que no és altra cosa que la fracció molar (o el tant per cent de massa, ja que es tracta d'una substància pura) de vapor del sistema bifàsic.

Per què a l'hivern els vidres de les finestres s'entelen per la part interior? Per què no s'entelen per la part exterior? (Raoneu-ho amb l'ajuda dels diagrames de fase.)

Tal com dèiem, és útil poder visualitzar els processos termodinàmics, i per tant els cicles, en diagrames com els que acabem de veure; però també seran molt útils els diagrames representats en funció d'altres propietats termodinàmiques.

El diagrama $p-v$ és important per calcular el treball implicat en un procés de compressió reversible, ja que l'àrea compresa sota la representació del procés correspon a aquest treball.

Amb una finalitat semblant s'utilitzen habitualment els diagrames temperatura-entropia, $T - s$, ja que l'àrea sota la representació del procés indica la calor transferida durant aquest i, a més a més, aquests diagrames permeten visualitzar a l'instant les etapes adiabàtiques reversibles d'un cicle.

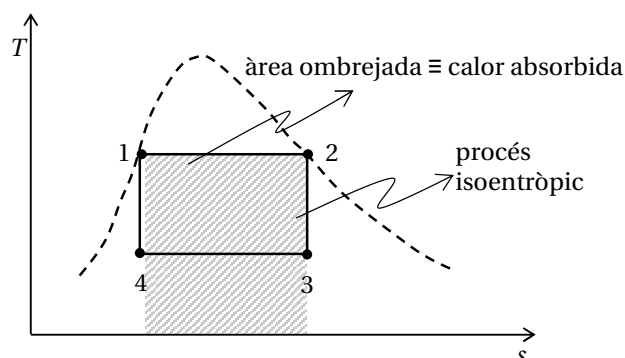


Figura 1.2. Diagrama $T - s$ per a una substància pura.

Més endavant veurem la gran utilitat dels diagrames entalpia-entropia, $h - s$, coneguts com a diagrames de Mollier (capítol 5).

1.1.2.2. Taules de propietats

Per a la majoria de les substàncies, les relacions entre propietats termodinàmiques són massa complicades per ser expressades en forma d'una equació senzilla i, per tant, se solen presentar en forma de taules. Algunes propietats poden ser fàcilment mesurades, però d'altres no, i s'han de calcular utilitzant les equacions que les relacionen amb les propietats mesurables. Atès que generalment les propietats mesurables són la temperatura i la pressió, és habitual presentar les taules en funció de T i p com a propietats independents i les altres propietats (v , u , h i s) com a propietats dependents.

Per començar, discutirem el format en què es presenten les taules de propietats per fluids que poden estar en estat líquid i/o vapor, anomenades *taules de vapor*, ja que moltes instal·lacions industrials treballen amb fluids d'aquestes característiques i, per tant, disposen de taules molt extenses. Utilitzarem d'exemple les taules corresponents a l'aigua en els diferents estats d'agregació, amb el benentès que les taules de propietats de les altres substàncies s'utilitzen de la mateixa manera.

Després comentarem el format de les taules de propietats per a gasos que es comporten com a gasos ideals, ja que, si bé per a gasos ideals es coneixen prou equacions per no haver de recórrer a les taules, aquestes són molt útils en l'estudi dels cicles.

Taules de vapor

Estats saturats: líquid saturat i vapor saturat

Les propietats de l'aigua saturada es recullen en les taules A-2 i A-3 de l'apèndix. Totes dues donen la mateixa informació i utilitzarem l'una o l'altra segons la propietat coneguda, temperatura o pressió, respectivament. A continuació, mostrem un petit extracte de cada taula per facilitar-ne l'explicació (taules 1.1 i 1.2).