

Pol Navarro Puche

Disseny de dispositius d'alleujament de pressió per a flux bifàsic. Comparació entre API 520, ISO 4126-10 i GOST 12.2.085

**Treball Fi de Màster
dirigit pel Dr. Josep Basco**

Màster en Enginyeria Industrial



UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

**Tarragona
2021**

Agraïments

En primer lloc, vull donar les gràcies al Dr. Leonid Korelstein, que m'ha ajudat a proporcionar-me tota la informació relacionada amb la norma russa GOST 12.2.085, especialment en l'aplicació als casos d'estudi. Sense la seva ajuda no hauria acabat aquesta tesis.

També m'agradaria donar les gràcies al Sr. Oleg Dubov per haver traduït alguns capítols de la norma russa.

Voldria donar les gràcies al Dr. Josep Basco, que m'ha ajudat a proporcionar-me el suport necessari per a desenvolupar el meu treball.

Finalment, m'agradaria donar les gràcies a la meva família pel suport durant aquest llarg període i especialment a la meva parella Ariadna i al meu amic Javi, per tots els moments que hem passat junts.

Índex

1	Introducció.....	1
1.1	Definició i funció d'una vàlvula de seguretat	1
1.2	Tipus de vàlvules de seguretat	1
1.2.1	Vàlvules d'alleujament de pressió amb molla	1
1.2.2	Vàlvules d'alleujament de pressió pilotades	4
1.3	La vàlvula de seguretat com a capa independent de protecció.....	5
2	Objectius	6
3	Revisió crítica dels mètodes disponibles per el disseny de vàlvules de seguretat per flux bifàsic.....	6
3.1	Evolució històrica dels models per dimensionar una vàlvula de seguretat amb flux bifàsic	6
3.1.1	Henry-Fauske (1971)	6
3.1.2	VdTÜV-Merkblatt (1973).....	7
3.1.3	Wong (1992).....	7
3.1.4	API 520 Part 1 (1993)	7
3.1.5	Leung (1996)	7
3.1.6	Ouderkirk (2002)	7
3.1.7	Schmidt HNE-DS (2007)	8
3.1.8	Integració directa – API 520 Part 1 (2008).....	8
3.1.9	Líquid subrefredat a l'entrada – API 520 Part 1 (2008).....	9
3.1.10	Self i Do (2010).....	9
3.1.11	ISO 4126-10 (2010).....	10
3.1.12	Leung (2015)	10
3.1.13	GOST 12.2.085 (2017).....	10
3.2	Descripció rigorosa del model API 520 Part 1 – 2020.....	11
3.2.1	Limitacions del model.....	11
3.2.2	Disseny	11
3.2.3	Software disponible.....	16
3.3	Descripció rigorosa del model ISO 4126-10 – 2010.....	16
3.3.1	Limitacions del model.....	16
3.3.2	Disseny	17
3.3.3	Software disponible.....	21
3.4	Descripció rigorosa del model GOST 12.2.085 (2017)	22
3.4.1	Limitacions del model.....	22
3.4.2	Disseny	23
3.4.3	Mètodes de càlcul	26

	3.4.4 Software disponible.....	31
4	Casos d'estudi	32
	4.1 Introducció	32
	4.2 Cas 1 – Líquid saturat a l'entrada.....	32
	4.2.1 Descripció de l'estudi.....	32
	4.2.2 Suposicions i metodologia.....	33
	4.2.3 Resultats i discussió	34
	4.3 Cas 2 – Flux bifàsic a l'entrada	35
	4.3.1 Descripció de l'estudi.....	35
	4.3.2 Suposicions i metodologia.....	36
	4.3.3 Resultats i discussió	37
	4.4 Cas 3 – Líquid subrefredat a l'entrada	38
	4.4.1 Descripció de l'estudi.....	38
	4.4.2 Suposicions i metodologia.....	39
	4.4.3 Resultats i discussió	40
	4.5 Cas 4 – Vapor supercrític a l'entrada	41
	4.5.1 Descripció de l'estudi.....	41
	4.5.2 Suposicions i metodologia.....	42
	4.5.3 Resultats i discussió	43
	4.6 Cas 5 – Líquid supercrític a l'entrada.....	44
	4.6.1 Descripció de l'estudi.....	44
	4.6.2 Suposicions i metodologia.....	44
	4.6.3 Resultats i discussió	45
	4.7 Cas 6 – Vapor supercrític a l'entrada i bifàsic a la sortida	46
	4.7.1 Descripció de l'estudi.....	46
	4.7.2 Suposicions i metodologia.....	47
	4.7.3 Resultats i discussió	48
	4.8 Cas 7 – Líquid saturat multicomponent a l'entrada	49
	4.8.1 Descripció de l'estudi.....	49
	4.8.2 Suposicions i metodologia.....	49
	4.8.3 Resultats i discussió	50
	4.9 Cas 8 – Flux bifàsic multicomponent a l'entrada	51
	4.9.1 Descripció de l'estudi.....	51
	4.9.2 Suposicions i metodologia.....	52
	4.9.3 Resultats i discussió	53
5	Conclusions	54
6	Proposta d'ampliació de la recerca.....	55
7	Referències	56

8	Annex.....	57
A.1	Cas 1 – Líquid saturat a l'entrada.....	57
	A.1.1 API 520 – Part 1 (Mètode integració directa)	57
	A.1.2 ISO 4126-10 (Tenint en compte el desequilibri)	58
	A.1.3 ISO 4126-10 (Sense tenir en compte el desequilibri)	59
	A.1.4 GOST 12.2.085 (2017).....	60
A.2	Cas 2 – Flux bifàsic a l'entrada	62
	A.2.1 API 520 – Part 1 (Mètode integració directa)	62
	A.2.2 ISO 4126-10.....	63
	A.2.3 GOST 12.2.085-2017.....	64
A.3	Cas 3 – Líquid subrefredat a l'entrada	64
	A.3.1 API 520 – Part 1 (Mètode integració directa)	65
	A.3.2 ISO 4126-10.....	66
A.4	Cas 4 – Vapor supercrític a l'entrada	66
	A.4.1 API 520 – Part 1 (Mètode integració directa)	66
A.5	Cas 5 – Líquid supercrític a l'entrada	68
	A.5.1 API 520 – Part 1 (Mètode integració directa)	68
A.6	Cas 6 – Vapor supercrític a l'entrada i bifàsic a la sortida	69
	A.6.1 API 520 – Part 1 (Mètode integració directa)	69
A.7	Cas 7 – Líquid saturat multicomponent a l'entrada	70
	A.7.1 API 520 – Part 1 (Mètode integració directa)	70
	A.7.2 ISO 4126-10 (Amb factor d'equilibri).....	71
	A.7.3 ISO 4126-10 (Sense factor d'equilibri).....	72
	A.7.4 GOST 12.2.085 (2017).....	73
A.8	Cas 8 – Flux bifàsic multicomponent a l'entrada	74
	A.8.1 API 520 – Part 1 (Mètode integració directa)	74
	A.8.2 ISO 4126-10.....	75
	A.8.3 GOST 12.2.085-2017.....	76

Taules de nomenclatura

Taula 0.1. Nomenclatura de la norma API 520 Part 1 – 2020.

Símbol	Definició	Unitats
A	Àrea requerida de descàrrega.	mm ²
G	Flux màssic	kg/s·m ²
K _b	Factor de correcció de contrapressió del vapor (vàlvules balancejades).	-
K _c	Factor de correcció de combinació amb disc de ruptura.	-
K _d	Coeficient de descàrrega	-
K _v	Factor de viscositat.	-
P	Pressió d'estancament del fluid.	Pa
P ₁	Pressió a l'entrada de la PRV.	Pa
P ₂	Contrapressió aigües a baix.	Pa
P _{cf}	Pressió crítica.	Pa
P _s	Pressió de saturació del vapor.	Pa
Q	Cabal volumètric.	L/min
v	Volum específic del fluid.	m ³ /kg
v ₁	Volum específic del sistema bifàsic a l'entrada de la PRV.	m ³ /kg
v ₉	Volum específic avaluat al 90% de la pressió d'entrada a la PRV.	m ³ /kg
W	Cabal màssic requerit.	kg/h
x	Fracció màssica de la fase vapor.	-
α	Fracció volumètrica de la fase vapor a la barreja.	-
η	Relació de contrapressió.	-
η _a	Relació de contrapressió real.	-
η _c	Relació de pressió crítica.	-
η _s	Relació de pressió de saturació.	-
η _{st}	Relació de pressió de saturació de transició.	-
ρ	Densitat màssica del fluid.	kg/m ³
ρ ₉	Densitat avaluada al 90% de la pressió de saturació (vapor)	kg/m ³
ρ _l	Densitat del líquid.	kg/m ³
ρ _{l1}	Densitat del líquid a l'entrada de la PRV.	kg/m ³
ρ _v	Densitat del vapor.	kg/m ³
ω	Paràmetre Omega.	-
ω _s	Paràmetre Omega per líquid saturat.	-

Taula 0.2. Nomenclatura de la norma ISO 4126-10.

Símbol	Definició	Unitats
$\left. \frac{dT}{dt} \right _0$	Taxa d'augment de la temperatura en les condicions de disseny.	K/s
$\left. \frac{dT}{dt} \right _{\text{over}}$	Taxa d'augment de la temperatura a la màxima pressió durant l'alleujament.	K/s
\dot{m}_{SV}	Flux màssic descarregable per la PRV.	kg/m ² ·s
\dot{Q}_0	Aportació de calor del sistema a pressió per una reacció fora de control.	W
\dot{Q}_{acc}^*	Proporció de calor sensible a calor latent.	-
\dot{x}_0	Qualitat del flux màssic (cabal màssic de gas en relació al cabal màssic bifàsic total).	-
A_0	Àrea mínima requerida de la secció transversal de la PRV.	m ²
A_v	Àrea de la secció transversal del sistema pressuritzat.	m ²
C	Coefficient de flux.	
$c_{pl,0}$	Capacitat calorífica específica a pressió constant de la fase líquida.	J/kg·K
d_0	Diàmetre mínim requerit de la PRV.	m
g_n	Gravetat (9,81).	m/s ²
k_0	Coefficient isentròpic de la fase gas.	-
k_∞	Constant segons el flux és turbulent o homogeni.	-
$K_{dr,2ph}$	Coefficient de descàrrega de la vàlvula per al flux bifàsic.	-
$K_{dr,g}$	Coefficient de descàrrega de la vàlvula certificada per al flux de gas/vapor monofàsic.	-
$K_{dr,l}$	Coefficient de descàrrega de la vàlvula certificada per al flux líquid monofàsic.	-
M_0	Pes del sistema en condicions de disseny.	kg
N	Factor de retard d'ebullició.	-
p_0	Pressió de disseny.	Pa
p_b	Contrapressió.	Pa
p_c	Pressió crítica termodinàmica del fluid.	Pa
p_{over}	Pressió màxima durant l'alleujament.	Pa
p_{red}	Pressió reduïda.	-
p_{sat}	Pressió de saturació.	Pa
$Q_{m,g,\text{out}}$	Cabal màssic de vapor requerit per descarregar.	kg/s
$Q_{m,\text{out}}$	Cabal màssic de gas o vapor requerit per descarregar.	kg/s
T_0	Temperatura de disseny.	K
T_c	Temperatura crítica termodinàmica del fluid.	K
T_{over}	Temperatura màxima durant l'alleujament.	K
T_{red}	Temperatura reduïda.	-
$T_{\text{sat},i}$	Temperatura de saturació a la pressió de disseny del component i, component amb la temperatura més alta de la barreja.	K
$T_{\text{sat},j}$	Temperatura de saturació a la pressió de disseny del component j, component amb la temperatura més baixa de la barreja.	K
u	Velocitat de pujada de bombolles adimensional.	-
u_∞	Velocitat de pujada de bombolles en el flux turbulent de la barreja en condicions de disseny.	cm/s
$u_{g,0}$	Velocitat superficial del gas a la cúpula del sistema pressuritzat.	cm/s
v^*	Volum específic adimensional.	-
v_0	Volum específic de la mescla.	m ³ /kg
$v_{g,0}$	Volum específic de gas en condicions de disseny en el sistema pressuritzat.	m ³ /kg
$v_{l,0}$	Volum específic del líquid en condicions de disseny en el sistema pressuritzat.	m ³ /kg
α	Fracció volumètrica de la fase vapor a la barreja.	-
$\Delta h_{v,0}$	Calor latent de vaporització en la condició de disseny.	J/kg
ΔT_{over}	Diferència de temperatura de saturació.	K
ϵ_0	Fracció buida del sistema.	-
ϵ_{seat}	Fracció buida a la secció transversal més estreta de la PRV.	-

Continuació Taula 0.2. Nomenclatura de la norma ISO 4126-10.

Símbol	Definició	Unitats
η_b	Relació de contrapressió de la PRV i la pressió de disseny.	-
η_{crit}	Relació de pressió crítica.	-
$\rho_{g,0}$	Densitat del gas en condicions de disseny.	kg/m ³
$\rho_{l,0}$	Densitat del líquid en condicions de disseny.	kg/m ³
$\sigma_{l,0}$	Tensió superficial del líquid a l'interior del sistema a pressió en condicions de disseny.	N/m
ϕ_0	Nivell inicial d'ompliment del líquid.	-
ω	Coefficient de compressibilitat.	-
ω_{eq}	Coefficient de compressibilitat tenint en compte que el flux és bifàsic, equilibrat i homogeni.	-

Taula 0.3. Nomenclatura de la norma GOST 12.2.085 (2017).

Símbol	Definició	Unitats
C_{pg}	Capacitat calorífica isobàrica específica de la fase gasosa.	J/kg·K
C_{pl}	Capacitat calorífica isobàrica específica de la fase líquida.	J/kg·K
C_{pm}	Capacitat calorífica isobàrica específica de la mescla.	J/kg·K
C_{vg}	Capacitat calorífica isocora específica de la fase gasosa.	J/kg·K
C_{vl}	Capacitat calorífica isocora específica de la fase líquida.	J/kg·K
d_0	Diàmetre del seient de la vàlvula.	m
DN_1	Diàmetre nominal d'entrada de la vàlvula.	m
F	Àrea mínima del seient de la vàlvula.	m ²
G	Capacitat real de la vàlvula.	kg/s
G^*_{ideal}	Velocitat màssica	kg/m ² ·s
h_g	Entalpia específica del vapor.	J/kg
h_{gl}	Calor latent de vaporització.	J/kg
h_l	Entalpia específica del gas.	J/kg
I_{WT}	Longitud de la connexió d'entrada a la vàlvula fins al seient.	m
$I_{WT\ PABH}$	Longitud de la tovera d'entrada on s'estableix l'equilibri.	m
K_b	Coeficient adimensional que caracteritza la diferència entra la velocitat màssica precrítica i la crítica.	-
K_c	Coeficient de disminució del rendiment de la vàlvula degut a la instal·lació de dispositius de seguretat de membrana.	-
k_g	Coeficient adimensional de compressibilitat isotèrmica del vapor.	-
k_l	Coeficient adimensional de compressibilitat isotèrmica del líquid.	-
K_v	Coeficient de disminució del rendiment de la vàlvula degut a fluids d'alta viscositat.	-
K_w	Coeficient per l'efecte de l'apertura incompleta de la vàlvula degut a la pressió de l'aigua.	-
K_{Π}	Velocitat màssica adimensional.	-
$K_{\Pi\ k\pi}$	Velocitat màssica adimensional en el flux de sortida crític.	-
M_m	Massa molar del medi.	g/mol
N	Nombre de vàlvules idèntiques instal·lades en paral·lel i que funcionen simultàniament.	-
n	Coeficient isentròpic.	-
n_g	Coeficient isentròpic de la fase gasosa.	-
n_l	Coeficient isentròpic de la fase líquida.	-
$P^{(1)}$	Pressió de vapor saturat.	Pa
P	Pressió de disseny (sobrepessió)	Pa
P_0	Pressió absoluta a la sortida del seient de la vàlvula.	Pa
P_1	Pressió absoluta aigües amunt de la vàlvula.	Pa
P_2	Contrapressió absoluta.	Pa
P_{atm}	Pressió atmosfèrica.	Pa
P_{kp}	Pressió crítica absoluta del medi.	Pa
P_{KOHA}	Pressió de condensació.	Pa
P_{OT}	Pressió d'obertura total de la vàlvula.	Pa
Pr	Número de Prandtl.	-
P_{Π}	Contrapressió.	Pa
r	Índex de curació.	-
R	Constant universal dels gasos.	J/kg·K
Re	Nombre de Reynolds.	-
R_{ya}	Constant específica del gas.	J/kg·K
R_{yag}	Constant específica del gas de la fase gasosa.	J/kg·K
R_{yal}	Constant específica dels gasos de la fase líquida.	J/kg·K
T_1	Temperatura de treball abans de la vàlvula a la pressió P_1 .	K
T_{topm}	Temperatura d'estancament del medi.	K

Continuació Taula 0.3. Nomenclatura de la norma GOST 12.2.085 (2017).

Símbol	Definició	Unitats
T_{CT}	Temperatura de la paret de la PRV i la canonada de descàrrega.	K
T_{HAC}	Temperatura de saturació.	K
u_{JT}	Relació Joule-Thomson.	-
x	Grau de sequedat del vapor humit a plena pressió i temperatura d'obertura de la vàlvula.	-
Z	Factor de compressibilitat.	-
Z_g	Factor de compressibilitat de la fase gasosa.	-
Z_l	Factor de compressibilitat de la fase líquida.	-
λ	Coefficient de transferència de calor del medi.	-
α	Coefficient de flux.	-
α_1	Coefficient de flux per a gas.	-
α_2	Coefficient de flux per al líquid.	-
β	Relació de pressió absoluta.	-
$\widehat{\beta}_g$	Coefficient adimensional d'expansió tèrmica de la fase gasosa.	-
β_{kp}	Relació de pressió absoluta crítica	-
$\widehat{\beta}_l$	Coefficient adimensional d'expansió tèrmica de la fase líquida.	-
ϵ	Fracció de volum de gas en el flux de fases amb velocitats iguals.	-
Λ	Índex de temperatura isentròpica de la mescla bifàsica.	-
Λ_g	Índex de temperatura isentròpica de la fase gasosa.	-
Λ_l	Índex de temperatura isentròpica de la fase líquida.	-
μ	Viscositat dinàmica del medi que es descàrrega.	Pa·s
μ_g	Viscositat dinàmica de la fase gas.	Pa·s
μ_l	Viscositat dinàmica de la fase líquida.	Pa·s
μ_m	Viscositat dinàmica de la mescla.	Pa·s
ρ_0	Densitat del medi a la sortida del seient de la vàlvula.	kg/m ³
ρ_1	Densitat del fluid aigües amunt.	kg/m ³
ρ_g	Densitat de la fase gasos.	kg/m ³
ρ_l	Densitat de la fase líquida.	kg/m ³
ω	Paràmetre Omega.	-

1 Introducció

Aquest treball s'ha realitzat per diferents motius. El principal motiu d'elecció ha sigut l'interès en com es realitza el disseny d'una vàlvula de seguretat. Una de les últimes etapes de protecció que disposa la indústria per a donar seguretat i evitar incidents no desitjats.

Aquest treball vol donar a conèixer la importància de realitzar el disseny d'una vàlvula de seguretat, per tal d'evitar errors en el disseny que posin en perill la indústria, la societat i el medi ambient.

En aquest capítol es realitzarà una introducció basada en la definició i la funció d'una vàlvula de seguretat, quins tipus de vàlvules de seguretat hi ha actualment i finalment en quina capa de seguretat estan ficades les vàlvules en el que s'anomena "la figura de la ceba". [1]

1.1 Definició i funció d'una vàlvula de seguretat

Una vàlvula de seguretat (Pressure Relief Valve, PRV) és un dispositiu accionat per la pressió estàtica d'entrada i dissenyat per obrir-se durant situacions d'emergència o condicions anormals per evitar un augment de la pressió interna del fluid, superior al valor de disseny especificat de l'aparell a pressió. El dispositiu també es pot dissenyar per evitar un buit intern excessiu. [2]

1.2 Tipus de vàlvules de seguretat

A continuació es presenten els diversos tipus de vàlvules de seguretat que esmenta la norma API 520 Part 1 – 2020, per l'alleujament de flux bifàsic.

1.2.1 Vàlvules d'alleujament de pressió amb molla

Les vàlvules d'alleujament de pressió amb molla són un tipus de vàlvules que, com el seu propi nom indica, el seu mecanisme d'accionament disposa d'una molla per tal d'obrir la vàlvula en les condicions desitjades i així alleujar la possible sobrepressió. Existeixen 3 models diferents de vàlvula d'aquest tipus:

1.2.1.1 Vàlvules convencionals d'alleujament de pressió per a gasos

Una PRV convencional amb molla es basa en un equilibri de forces entre la pressió del fluid a la entrada de la vàlvula i la pressió de la molla al disc. A la figura 1 es pot observar aquest tipus de vàlvula. [2]

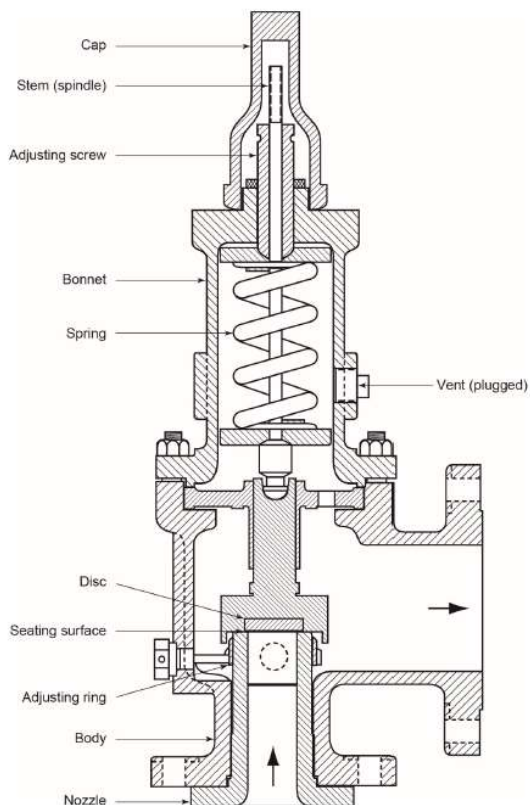


Figura 1. Vàlvula convencional d'alleujament de pressió amb un únic anell d'ajust per al control de la descàrrega. (Font: API 520 Part 1 – 2020)

En aquest cas, un cop fixada la pressió de tarat de la vàlvula, es dissenya una molla que suporti aquesta pressió. Per tant, en l'instant en que la pressió del fluid a l'entrada de la vàlvula sigui superior a la pressió d'actuació de la molla, aquesta cedirà permetent l'alleujament de la pressió en el fluid, fins que la pressió de la molla sigui superior a la del fluid, instant en que la vàlvula es tancarà. A la figura 2 es pot veure l'acció d'obertura de la vàlvula de seguretat. [2]

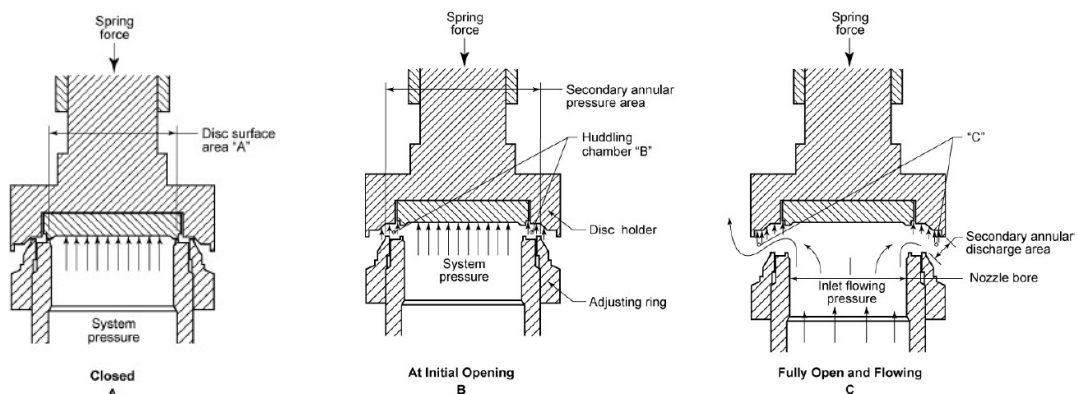


Figura 2. Funcionament de la vàlvula d'alleujament de pressió (servei gas). (Font: API 520 Part 1 – 2020)

1.2.1.2 Vàlvules d'alleujament de pressió amb molla dissenyades per a aplicacions de servei líquid

La principal diferència entre aquest tipus de PRV i l'anterior, és que aquesta vàlvula es basa en el principi de les forces reactives per aconseguir l'elevació de la molla. És a dir, quan la força que provoqui el fluid a l'entrada de la vàlvula sigui inferior a la força que provoca la molla en sentit contrari, la vàlvula romandrà tancada. Un cop arribat el moment en que la pressió del fluid provoqui una força superior a la de la molla, la vàlvula obrirà lleugerament fent que el fluid surti de la vàlvula en règim laminar. Aquest fluid degut a la forma geomètrica de la vàlvula, impacta contra el seient del disc, fent que el cabal de fluid es dirigeixi cap a baix i alhora provoqui una força reactiva que impulsi el disc a pujar i per tant, la vàlvula permet el pas de tot el fluid necessari per alleujar la pressió interior. [2]

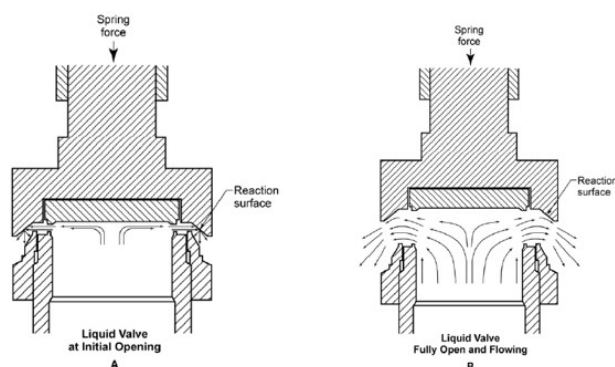


Figura 3. Funcionament de la vàlvula d'alleujament de pressió (Servei líquid). (Font: API 520 Part 1 – 2020)

1.2.1.3 Vàlvules d'alleujament de pressió equilibrades

Una PRV equilibrada és una vàlvula d'alleujament de pressió amb molla, que incorpora una manxa que permet realitzar l'obertura i el tancament d'aquesta de manera progressiva, i així minimitzar els efectes de la contrapressió. Aquest equilibri permet assegurar les característiques de rendiment de la vàlvula. A la figura 4 es pot observar una vàlvula d'alleujament de pressió equilibrada. [2]

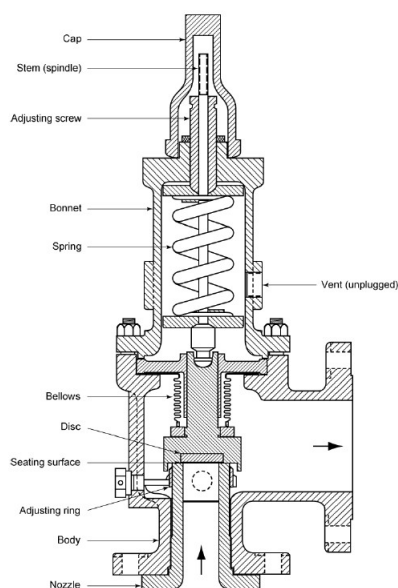


Figura 4. Vàlvula d'alleujament de pressió amb equilibrades (amb manxa). (Font: API 520 Part 1 – 2020)

1.2.2 Vàlvules d'alleujament de pressió pilotades

Una PRV pilotada consisteix en una vàlvula principal, que normalment tanca un conjunt de pistons desequilibrats i una vàlvula de seguretat externa. El pistó està dissenyat amb la part superior més gran que la inferior, de tal manera que la pressió en ambdós costats sigui la mateixa i per tant, la part superior mantingui la vàlvula tancada a causa de la superfície més gran. [2]

En canvi, quan la pressió sigui major a l'establerta, la força neta provocarà que el pistó pugui i permetrà al fluid passar per la vàlvula principal. A la figura 5 es pot veure una vàlvula d'alleujament de pressió pilotada. [2]

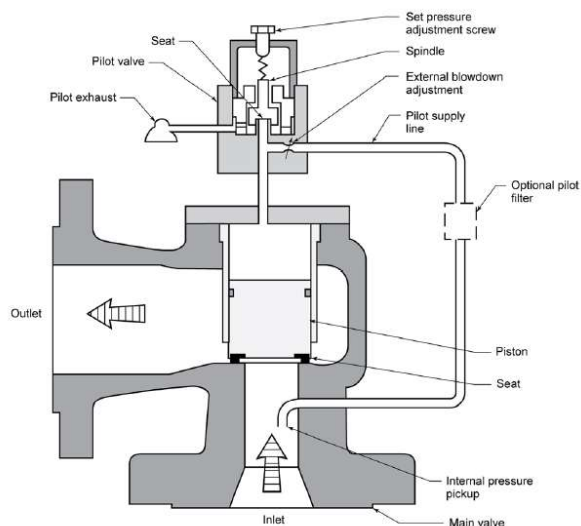


Figura 5. Vàlvula d'alleujament de pressió pilotada. (Font: API 520 Part 1 – 2020)

1.3 La vàlvula de seguretat com a capa independent de protecció

En aquest apartat, es determinarà el nivell de seguretat de les PRV. Per tal de determinar aquest nivell s'ha emprat el mètode de les capes de protecció (LOPA).

Aquest mètode consisteix en realitzar un símil amb una cebra i les seves diverses capes. La capa més interna és el procés industrial, per protegir aquesta capa es fica una segona, que consisteix en el control de processos. Després aquesta última, es protegeix amb la capa de prevenció, a continuació vindria la mitigació, tot seguit el pla d'autoprotecció i finalment el pla d'emergència exterior. A la figura 6 es poden veure les diferents capes de protecció amb una breu explicació.

- Control i monitoratge: Són els processos bàsics de seguretat, que permeten realitzar modificacions per adaptar contínuament el procés a les necessitats d'aquest. Així evitar alteracions greus que puguin provocar anar a una segona etapa.
- Prevenció: En aquesta capa de protecció tenim els elements mecànics, les alarmes de seguretat per prendre accions correctives i per últim, els instruments de seguretat com les vàlvules d'alleujament de pressió.
- Mitigació: En aquesta capa s'inclouen totes les accions correctives que a la capa de prevenció no han sigut solucionades i que s'intenten mitigar per no arribar a un escenari d'emergència.
- Resposta d'emergència de la planta: En aquesta capa ja no hi ha solucions per evitar l'accident i l'únic que queda per realitzar és la reducció dels danys.
- Resposta d'emergència comunitària: Quan la resposta d'emergència de la planta no és suficient per reduir els danys, s'activa l'última capa de protecció, que consisteix en posar en marxa un pla d'emergència que afecta als voltants de la zona i no solament a la planta en qüestió.

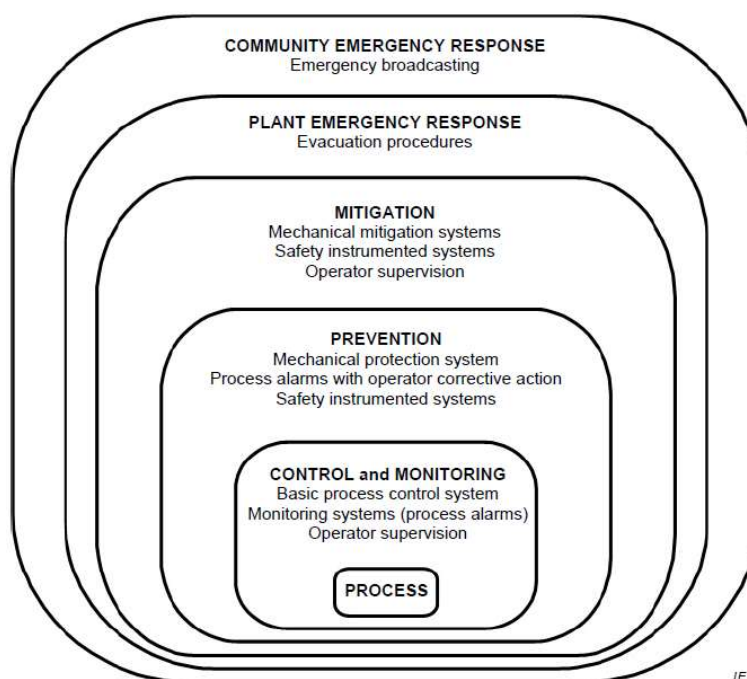


Figura 6. Capes de protecció. (Font: IEC 61511 – Part 1 – 2016)

Tal com es pot veure, les vàlvules de seguretat pertanyen a la capa de protecció anomenada prevenció. Ja que eviten que escenaris de risc elevat acabin succeint. Realitzades amb un disseny correcte poden alleujar pics de sobrepressió que esdevinguin en l'ús d'una capa de protecció més elevada.

2 Objectius

La principal motivació d'aquest treball és el dimensionament rigorós de dispositius de descàrrega de pressió per a flux bifàsic.

Per a la realització d'aquest disseny s'empraran les següents normatives, que són les més utilitzades a nivell mundial:

- API 520 Part 1 – 2020
- ISO 4126-10 – 2010
- GOST 12.2.085 – 2017

A partir d'aquestes normatives es treballaran els següents objectius específics del treball:

1. Fer una comparativa dels resultats de l'àrea requerida per a un determinat escenari de sobrepressió, incloent els límits d'ús de cada normativa.
2. Donar a l'enginyer de seguretat de processos, recomanacions pràctiques sobre els límits d'utilització de cada normativa.

3 Revisió crítica dels mètodes disponibles per el disseny de vàlvules de seguretat per flux bifàsic

En aquest apartat del treball, es pretén primer de tot, veure l'evolució històrica dels models més rellevants per dimensionar una vàlvula de seguretat amb flux bifàsic. L'objectiu principal de realitzar l'evolució històrica dels models de càlcul per a vàlvules de seguretat amb flux bifàsic és donar un marc de referència per a les tres normatives que s'estudiaran més endavant, i així poder entendre com ha evolucionat el disseny i a partir de quines normes.

Per altra banda, es realitzarà una síntesis de les diferents normatives que s'empraran per al dimensionat de les PRV, és a dir, de la normativa API 520 Part 1 – 2020, de la ISO 4126-10 – 2010 i finalment, de la normativa GOST 12.2.085 – 2017.

3.1 Evolució històrica dels models per dimensionar una vàlvula de seguretat amb flux bifàsic

A continuació, es presenta l'evolució històrica dels models, seguint l'ordre cronològic. També es farà menció a les 3 normatives escollides per a la realització d'aquest disseny, degut a la rellevància que tenen en l'evolució i història dels models.

3.1.1 Henry-Fauske (1971)

L'any 1971 Henry-Fauske va proposar un model per al disseny de vàlvules d'alleujament de pressió amb flux bifàsic. És un dels més coneguts, és un model homogeni de no-equilibri (HNE).

A continuació es detallen les hipòtesis de càlcul del model per flux crític que va emprar per a realitzar-lo. [3]

- La transferència de massa durant l'expansió és insignificant.
- L'expansió del vapor es modela mitjançant procés politròpic.
- La fase líquida és incompressible.
- La taxa de transferència màssica a la tovera és apreciable.
- Flux homogeni, és a dir, sense desplaçament de fases.

3.1.2 VdTÜV-Merkblatt (1973)

L'any 1973 va publicar una equació per calcular l'àrea requerida, emprant la suma d'àrees de cada fase a la sortida de la vàlvula i aplicant a aquesta suma un factor corrector amb el valor de 1,2. [4]

3.1.3 Wong (1992)

Wing Y. Wong va realitzar un procediment per al disseny de vàlvules d'alleujament de pressió amb flux bifàsic, a partir del cas pràctic del trencament d'un tub d'un bescanviador de calor.

Per tal de realitzar el disseny de la PRV amb flux bifàsic, Wong va realitzar les següents hipòtesis de càlcul: [5]

- La ruptura es considera en un sol tub i de manera brusca, tenint en compte que el fluid amb pressió més elevada circula pels costats del trencament.
- Els costats del trencament es tracten com si fos un orifici amb un tall afilat que té la secció transversal d'un tub.
- El fluid que brolla a través d'aquest orifici afilat és una expansió isentàlpica.
- L'autorefrigeració derivada de l'efecte flash, es menysprea.
- L'efecte de la fase lliscant és considera insignificant.

3.1.4 API 520 Part 1 (1993)

A l'API 520 Part 1 de l'any 1993, es considera que l'àrea requerida per la vàlvula, es calcula amb el concepte de "frozen flow". Aquest, indica que les condicions de flash a la sortida, s'extrapolen a l'entrada d'aquesta. [6]

Per tal de realitzar el disseny de les PRV amb flux bifàsic, primer de tot es determina la quantitat de líquid que fa flash per expansió isentàlpica des de les condicions d'alleujament fins a les de sortida. Tot seguit, es realitza el càlcul de l'àrea requerida de l'orifici per l'alleujament de la fase vapor que fa flash. Un cop realitzat el càlcul de la fase vapor, es realitza el càlcul de l'àrea requerida de l'orifici de la fase líquida que no realitza flash. Finalment, per tal de realitzar el disseny de l'àrea requerida per la PRV, s'han de sumar les àrees individuals de la fase de vapor que fa flash i de la fase líquida que no en fa. [6]

3.1.5 Leung (1996)

L'any 1996, Leung va proposar un model per al dimensionat de PRVs.

És un model HEM (Model homogeni d'equilibri), considerat un model conservador, per a realitzar el disseny de la capacitat de flux, tant de les PRV com dels discs de ruptura. Aquest mètode consisteix en la metodologia de càlcul Omega. A continuació es mostren els punts claus d'aquest mètode proposat: [7]

- Les configuracions de toveres i canonades es poden tractar de forma similar.
- Redueix el numero de paràmetres clau i emfatitza la importància de les propietats físiques a les condicions d'entrada.
- El mètode Omega es basa en una equació d'estat (EOS) general per descriure la expansió d'un fluid bifàsic.

3.1.6 Ouderkirk (2002)

R. Ouderkirk va realitzar un model rigorós per calcular el ritme d'alleujament necessari i dimensionar la PRV per a fluids supercrítics per als casos de foc en un recipient ple de gas.

La taxa d'alleujament es modela al llarg del temps per un recipient bloquejat utilitzant petits increments de temperatura. Per altra banda, la mida de la vàlvula d'alleujament de pressió es calcula mitjançant el modelat del flux de massa, a través d'un orifici isentròpic, fins arribar al límit del flux estrangulat. [8]

Finalment, per realitzar el càlcul de l'àrea requerida de l'orifici de la vàlvula, s'ha de realitzar la següent seqüència:

- 1- Dades prèvies al càlcul:
 - a. Pressió d'alleujament.
 - b. Temperatura d'alleujament.
 - c. Increment de temperatura.
 - d. Volum.
 - e. Àrea.
 - f. Factor d'aïllament ignífug i ambiental.
 - g. Temps d'alleujament.
- 2- Selecció del model per a l'estimació de les següents propietats:
 - a. Pressió crítica.
 - b. Temperatura crítica.
 - c. Factor acèntric del fluid.
 - d. Pes molecular.
 - e. Coeficients tèrmics del gas ideal.
- 3- Realitzar el procés iteratiu per al càlcul de l'àrea requerida.
- 4- Calcular l'energia absorbida per l'alleujament de pressió. En aquest model es considera que l'energia és constant durant tot el procés d'alleujament de pressió.
- 5- Calcular les propietats físiques del fluid alleujat:
 - a. Volum.
 - b. Entalpia.
 - c. Entropia.
- 6- Realitzar el càlcul del cabal d'alleujament, tant volumètric com màssic.
- 7- Càlcul del temps que ha passat des de l'inici de l'incendi.
- 8- Càlcul del flux isentròpic.
- 9- Finalment, es realitza el càlcul de l'àrea de l'orifici, en funció del flux de massa teòric i la taxa d'alleujament requerida.

3.1.7 Schmidt HNE-DS (2007)

J. Schmidt va proposar el model HNE-DS (Homogeneous Non-Equilibrium-Diener Schmidt). Aquest model es basa en la suposició d'un flux homogeni, corregit pels efectes de no-equilibri tèrmic i mecànic. [9]

Aquest mètode es basa en una combinació entre el model Leung de l'any 1996 i el model Henry y Fauske de l'any 1971. Cal esmentar que el mètode HNE-DS s'adapta a les condicions d'entrada i té en compte el factor de retard d'ebullició i el factor de correcció de lliscament. [9]

Cal esmentar que aquest mètode està inclòs en la normativa ISO 4126-10 de l'any 2010.

3.1.8 Integració directa – API 520 Part 1 (2008)

Aquest mètode de càlcul és vàlid per als següents casos pràctics: [10]

- Mescla de líquid i vapor (inclòs líquid saturat): No hi ha gas incondensable present i en el flux bifàsic de condensació s'inclouen tant si estan per damunt com per sota del punt crític termodinàmic.

- Líquid altament subrefredat i gas incondensable, vapor condensable o ambdues: No es produeix flash a la PRV.
- Vapor amb gas incondensable i líquid saturat o subrefredat: Realitza flash i el gas incondensable entra a la PRV.
- Líquid subrefredat (inclòs líquid saturat): Realitza flash i cap vapor condensable o gas incondensable entra a la PRV.

Normalment es suposa que la canonada d'entrada a una PRV és l'element que limita el flux en una vàlvula completament oberta. Per tant, aquesta dada determina el flux que pot alleujar la vàlvula. [10]

Una suposició bastant estandarditzada és que per determinar el flux màssic màxim a través d'una tovera convergent, es suposa que la tovera és adiabàtica i reversible, és a dir, isentròpica. Com a inconvenient, s'ha d'esmentar que es necessari un simulador de processos per fer tots els flashos isentròpics necessaris, com per exemple Aspen Hysys, Unisim, Chemcad, etc. [10]

3.1.9 Líquid subrefredat a l'entrada – API 520 Part 1 (2008)

En aquesta norma, es presenta el mètode Omega per realitzar el càlcul de l'àrea requerida per l'alleujament de pressió amb líquid subrefredat a l'entrada. Aquest mètode també es pot emprar per a líquid saturat que entra a la PRV i fa flash. S'ha de tenir en compte que ni vapor condensable ni gas incondensable entra a la PRV. [10]

A continuació es detalla el mètode de càlcul: [10]

- 1- El primer pas a realitzar és el càlcul del paràmetre Omega saturat. Per tal de realitzar aquest càlcul, s'ha de tenir en compte que el volum específic s'ha de calcular tenint en compte que al realitzar el flash es fa de manera isentròpica o per fluids allunyats del punt crític. També es podria realitzar el flash isentàlpic, és a dir, adiabàtic.
- 2- Determinar la regió de subrefredament, ja que s'ha de tenir en compte alhora de calcular la pressió de saturació.
- 3- Un cop determinada la regió de subrefredament i calculada la pressió de saturació, s'ha de determinar si el flux és crític o subcrític, ja que es realitzarà el càlcul de la relació de pressió crítica, en funció de la determinació d'aquest flux.
- 4- Tot seguit es realitza el càlcul del flux màssic de la PRV, tenint en compte els diferents paràmetres del fluid que ja s'han determinat.
- 5- Finalment, es realitza el càlcul de l'àrea requerida de la PRV.

3.1.10 Self i Do (2010)

Self i Do van proposar un altre mètode per calcular l'índex d'alleujament de l'expansió volumètrica d'un gas, un fluid en fase densa o un líquid degut a la inserció de calor extern. [11]

Aquest mètode està condicionat a la suposició de que no hi ha ebullició en el canvi de fase. A continuació es mostra el mètode càlcul a realitzar: [11]

- 1- Primer de tot s'ha de determinar l'absorció de calor quan s'obre la PRV.
- 2- Calcular la temperatura del fluid quan s'obre la PRV. Per realitzar aquest pas es té en compte que la pressurització del fluid és isocor (volum constant).
- 3- Realitzar el càlcul de càrrega d'alleujament deguda a l'expansió de la fase densa.
- 4- Finalment, per calcular la mida de l'orifici de la PRV, s'emprarà el mètode d'integració directa (apartat 3.1.8).

3.1.11 ISO 4126-10 (2010)

Un cop comprovades les condicions que limiten el model de la ISO 4126-10, i que es podran veure més endavant, es pot realitzar el càlcul de la PRV a partir dels següents passos: [12]

- 1- Primer es necessari realitzar el càlcul del coeficient de compressibilitat per un flux d'equilibri bifàsic homogeni.
- 2- Càlcul de la relació de la contrapressió de la vàlvula d'alleujament de pressió.
- 3- Tot seguit, es calcula el factor de retard d'ebullició, tenint en compte si és flux bifàsic homogeni o no homogeni.
- 4- A continuació, es realitza el càlcul de la fracció de buit a la secció transversal més estreta.
- 5- Determinar el coeficient de descàrrega de la vàlvula de flux bifàsic.
- 6- Càlcul del coeficient de flux.
- 7- Tot seguit, es realitza el càlcul del flux màssic que es descàrrega a través de la PRV.
- 8- Finalment, es realitza el càlcul de l'àrea transversal mínima requerida per la PRV.

3.1.12 Leung (2015)

L'any 2015, Leung va proposar l'HNE- ω un model de descàrrega de no-equilibri. Va desenvolupar el model d'Omega per flux homogeni i sense equilibri. Aquest model consistia en la simplificació i ampliació del model Henry-Fauske de l'any 1971, esmentat anteriorment, utilitzant l'Omega en termes d'equilibri. [13]

Va donar solucions algebraiques de manera tancada per a la descàrrega de líquids inicialment saturats i subrefredats, i també va desenvolupar una equació transcendental per a la relació de pressió crítica en descàrrega bifàsica de baixa qualitat, una equació algebraica que no necessita la resolució d'equacions diferencials. [13]

3.1.13 GOST 12.2.085 (2017)

Aquesta normativa aplicable forçosament a Rússia i països de la seva àrea d'influència sorgeix de l'actual API 520 Part 1, ja que recull el desenvolupament del disseny d'una PRV realitzant millores en la metodologia i les equacions d'aquesta. [14]

A continuació, s'esmenta l'abast de la norma GOST 12.2.085: [14]

- Terminologia del sistema d'alleujament de pressió.
- Classificació i propietats de les PRV.
- Selecció de la PRV.
- Influència de la contrapressió.
- Metodologia i equacions de dimensionament de PRV.
- Estimació de la temperatura del fluid i la paret.

Un cop esmentat l'abast de la normativa, es comenten els 5 principis del desenvolupament de la normativa. [14]

- 1- Revisió crítica de les millors pràctiques i mètodes dels principals documents mundials (API 520 Part 1, ISO 4126, DIERS), per cobrir pràcticament tots els casos importants.
- 2- Metodologia general i específica amb equacions i algoritmes per al disseny.
- 3- Abast complet dels diferents mètodes per diferents usuaris amb diferents recursos o necessitats.
- 4- Límit de cada mètode i recomanacions de selecció.

5- Descripció senzilla, clara i unificada dels mètodes.

3.2 Descripció rigorosa del model API 520 Part 1 – 2020

A continuació, es detallarà el procediment de càlcul dels diferents models de disseny de vàlvules d'alleujament de pressió amb flux bifàsic. [2]

Abans de realitzar la descripció dels diferents models de càlcul, s'ha d'esmentar que no hi ha cap procediment reconegut per a la certificació de la capacitat de les PRV per a flux bifàsic. [2]

3.2.1 Limitacions del model

Primer de tot, cal esmentar que en aquests models de càlcul es tindran en compte els escenaris següents: [2]

- Una barreja de dues fases entra o surt de la PRV.
- Es produeix una barreja de dues fases a mesura que el fluid es mou a través de la vàlvula.

És molt important a l'hora de dissenyar una vàlvula d'alleujament de pressió, tenir en compte la generació de vapor degut al flash, ja que pot reduir la capacitat de cabal màssic de la vàlvula. [2]

Per al disseny per integració directa del flux isentròpic de la tovera s'empren un conjunt d'equacions que es basen en el model d'equilibri homogeni (HEM). S'assumeix que la barreja de fluids es comporta com un "fluid pseudo monofàsic", amb una densitat que és la mitjana en volum de les dues fases. [2]

Per al disseny de flux bifàsic que realitza flash o que no en realitza i per al disseny del líquid subrefredat a l'entrada de la PRV, s'empren el mètode Omega de Leung. En aquests models el paràmetre Omega es calcula a partir de dades de volum específiques, obtingudes a partir d'un càlcul flash. Per tant, el paràmetre Omega és una correlació entre la densitat del fluid bifàsic i la pressió i es calcula amb el mètode de dos punts, tal i com es mostra a l'equació (1). [2]

$$\omega = \frac{\frac{\rho_1 - 1}{\rho_x} = \frac{v_x - 1}{v_1}}{\frac{P_1 - 1}{P_x} = \frac{P_1 - 1}{P_x}} \quad (1)$$

On:

- 1 representa la condició inicial per al flash (per exemple, condició d'entrada PRV).
- x representa el resultat del flash a una pressió inferior.

3.2.2 Disseny

3.2.2.1 Dimensionament per integració directa del flux isentròpic de la tovera

Cal esmentar que la tovera d'entrada a una PRV és l'element que limita el flux quan aquesta està totalment oberta. Per determinar el flux màssic a través de la tovera, s'assumeix que és adiabàtica i reversible, i es calcula a partir de l'equació (2). [2]

$$G^2 = \left[\frac{-2 \cdot \int_{P_1}^P v \cdot dP}{v_t^2} \right]_{\max} = \left[(\rho_t^2) \cdot \left(-2 \cdot \int_{P_1}^P \frac{dP}{\rho} \right) \right]_{\max} \quad (2)$$

On:

- 1 representa les condicions d'entrada de la tovera.
- t representa les condicions a la gola de la tovera on es troba la secció transversal mínima.
- max representa la maximització d'aquest càlcul.

En el cas de conèixer la pressió al punt més estret de la tovera coneguda, es pot realitzar el balanç energètic a partir de l'equació (3) i utilitzant l'aproximació de càlcul de l'equació (4). [2]

$$G^2 = (\rho_t^2) \cdot \left(-2 \cdot \int_{P_1}^{P_t} \frac{dP}{\rho} \right) \quad (3)$$

$$\int_{P_1}^{P_t} \frac{dP}{\rho} \approx \sum_{i=1}^t 2 \cdot \left(\frac{P_{i+1} - P_i}{\rho_{i+1} + \rho_i} \right) \quad (4)$$

A continuació, a l'equació (5) es mostra el càlcul de la densitat màssica global del fluid i a l'equació (6) el càlcul de la fracció volumètrica de la fase vapor a la barreja. [2]

$$\rho = (a \cdot \rho_v) + (1-a) \cdot \rho_l \quad (5)$$

$$\frac{a}{1-a} = \frac{x}{1-x} \cdot \frac{\rho_l}{\rho_v} \quad (6)$$

Finalment, un cop determinat el flux màssic, ja es pot determinar l'àrea requerida de l'orifici a partir de l'equació (7). [2]

$$A = \frac{277,8 \cdot W}{K_d \cdot K_b \cdot K_c \cdot K_v \cdot G} \quad (7)$$

On:

- K_d és el coeficient de descàrrega:
 - 0,85 per fluid bifàsic o líquid saturat que entra a la PRV.
 - 0,65 per líquid subrefredat.
- K_b és el factor de correcció de contrapressió del vapor i solament s'aplica a les vàlvules balancejades. Aquest factor es pot extreure de la figura 31 de l'API 520 Part 1 – 2020.
- K_c és el factor de correcció de combinació amb disc de ruptura amunt de la PRV:
 - 1,0 quan no s'instal·la disc de ruptura.
 - 0,9 quan s'instal·la disc de ruptura i la combinació no té un valor certificat.
- K_v és el factor de la viscositat. Per a fluxos bifàsics on el líquid té una viscositat de 100 cP (0,1 Pa·s) o menys, el factor és 1,0.

3.2.2.2 Dimensionament del flux bifàsic que realitza flash o que no en realitza a través d'una vàlvula d'alleujament de pressió utilitzant el mètode Omega

Primer de tot es realitza el càlcul de paràmetre Omega, a partir de l'equació (8). [2]

$$\omega = 9 \cdot \left(\frac{v_9}{v_1} - 1 \right) \quad (8)$$

On:

- v_9 és el volum específic avaluat al 90% de la pressió d'entrada de la PRV (P_1). Per determinar el volum, el càlcul del flash s'hauria de realitzar isentròpicament, però realitzant el flash isentàpic és suficient per a mesclades de baixa qualitat lluny del punt crític termodinàmic (m^3/kg).

- v_1 és el volum específic del sistema bifàsic a l'entrada de la PRV (m^3/kg).

Un cop realitzat el càlcul del paràmetre Omega, s'ha de determinar si el flux és crític o subcrític a partir de l'equació (9) i els criteris que es mostren tot seguit. [2]

$$P_{cf} = \eta_c \cdot P_1 \quad (9)$$

$$P_{cf} \geq P_2 \rightarrow \text{Flux crític} \quad (10)$$

$$P_{cf} < P_2 \rightarrow \text{Flux subcrític} \quad (11)$$

On:

- P_1 és la pressió a l'entrada de la PRV (Pa): Aquesta és la pressió establerta per la PRV (P_{ag}) més la sobrepressió admissible (P_a) més la pressió atmosfèrica (P_a).
- η_c és la relació de pressió crítica que es determina a partir de l'equació (12) o de la figura 7.

$$\eta_c^2 + (\omega^2 - 2\omega)(1 - \eta_c)^2 + 2\omega^2 \ln \eta_c + 2\omega^2(1 - \eta_c) = 0 \quad (12)$$

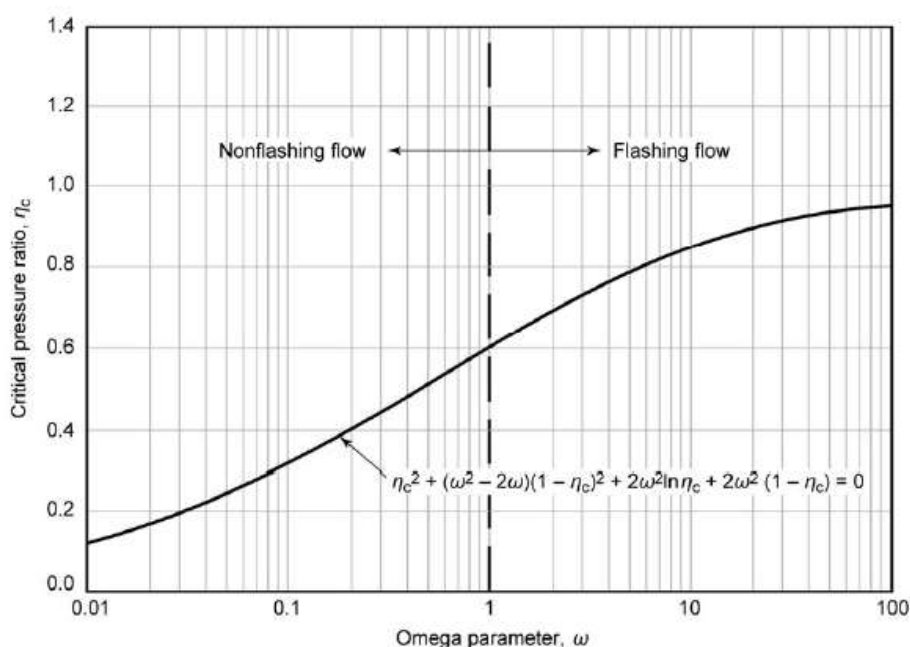


Figura 7. Correlació del flux crític de les toveres dels sistemes amb flash i sense flash.
(Font: API 520 Part 1 – 2020)

Un cop determinat si el flux és crític o subcrític, es realitza el càlcul del flux màssic. L'equació (13) si el flux és crític o l'equació (14) si el flux és subcrític. [2]

$$G = \eta_c \cdot \sqrt{\frac{P_1}{v_1 \cdot \omega}} \quad (13)$$

$$G = \frac{\{-2 \cdot [\omega \cdot \ln \eta_a + (\omega - 1) \cdot (1 - \eta_a)]\}^{1/2}}{\omega \cdot \left(\frac{1}{\eta_a} - 1\right) + 1} \cdot \sqrt{\frac{P_1}{v_1}} \quad (14)$$

On:

- η_a és la relació de contrapressió real, que es calcula a partir de l'equació (15).

$$\eta_a = \frac{P_2}{P_1} \quad (15)$$

Finalment, es realitza el càlcul de l'àrea requerida a partir de l'equació (7), esmentada anteriorment. [2]

3.2.2.3 Dimensionament del líquid subrefredat a l'entrada de la vàlvula d'alleujament mitjançant el mètode Omega

Per aquest mètode s'ha de tenir en compte que a l'entrada de la PRV no ha d'haver presència ni de vapor ni de gas incondensable. [2]

Primer de tot, es realitza el càlcul del paràmetre Omega del líquid saturat, a partir de l'equació (16).

$$\omega_s = 9 \cdot \left(\frac{\rho_{l1} - 1}{\rho_g} \right) \quad (16)$$

Un cop realitzat el càlcul del paràmetre Omega, s'ha de determinar la regió de subrefredament, a partir de l'equació (17) i les condicions següents. [2]

$$\eta_{st} = \frac{2 \cdot \omega_s}{1 + 2 \cdot \omega_s} \quad (17)$$

$$P_s \geq \eta_{st} \cdot P_1 \rightarrow \text{Regió de subrefredament baixa (el flash es produeix amunt de la gola)} \quad (18)$$

$$P_s < \eta_{st} \cdot P_1 \rightarrow \text{Regió de subrefredament alta (el flash es produeix a la tovera)} \quad (19)$$

A continuació, es realitza la determinació de si el flux és crític o subcrític, a partir de l'equació (20). [2]

$$P_{cf} = \eta_c \cdot P_1 \quad (20)$$

On:

- Si la regió de subrefredament és baixa:
 - $P_{cf} \geq P_2 \rightarrow$ Flux crític.
 - $P_{cf} < P_2 \rightarrow$ Flux subcrític.
- Si la regió de subrefredament és alta:
 - $P_s \geq P_2 \rightarrow$ Flux crític.
 - $P_s < P_2 \rightarrow$ Flux subcrític (flux totalment líquid).
- η_c és la relació de pressió crítica que es determina a partir de l'equació (21) o de la figura 8.

$$\frac{\left(\omega_s + \frac{1}{\omega_s} - 2 \right)}{2 \cdot \eta_s} \cdot \eta_c^2 - 2(\omega_s - 1) \cdot \eta_c + \omega_s \cdot \eta_s \cdot \ln \left(\frac{\eta_c}{\eta_s} \right) + \frac{3}{2} \cdot \omega_s \cdot \eta_s - 1 = 0 \quad (21)$$

On:

- η_s és la relació de pressió de saturació que es determina amb l'equació (22).

$$\eta_s = \frac{P_s}{P_1} \quad (22)$$

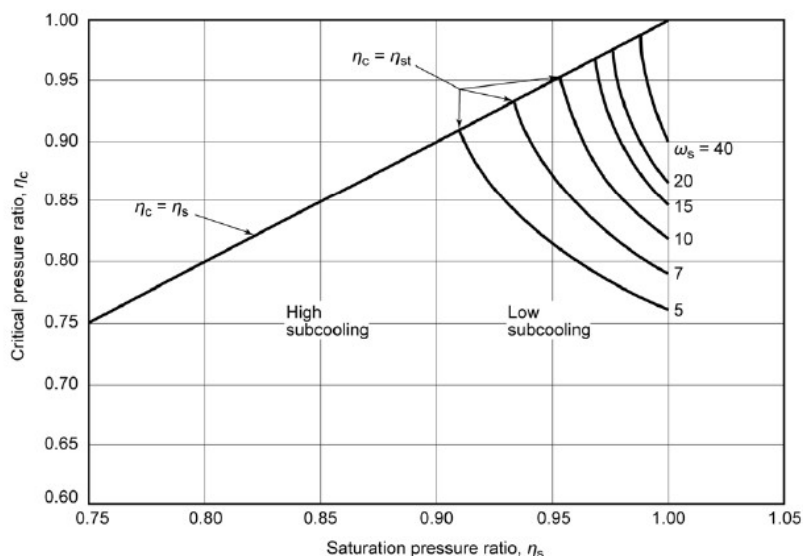


Figura 8. Correlació del flux crític de la tovera del líquid subrefredat d'entrada. (Font: API 520 Part 1 – 2020)

Tot seguit, ja es pot realitzar el càlcul del flux màssic, tenint en compte el següent: [2]

- Regió de subrefredament baixa, equació (23):
 - Si el flux és crític, s'ha d'emprar η_c en comptes de η .
 - Si el flux és subcrític, s'ha d'emprar η_a en comptes de η . Aquesta relació es pot calcular a partir de l'equació (24).
- Regió de subrefredament alta, equació (25):
 - Si el flux és crític, s'ha d'emprar P_s en comptes de P .
 - Si el flux és subcrític, s'ha d'emprar P_2 en comptes de P .

$$G = \frac{\left\{ 2(1-\eta_s) + 2 \left[\omega_s \cdot \eta_s \cdot \ln \left(\frac{\eta_s}{\eta} \right) - (\omega_s - 1)(\eta_s - \eta) \right] \right\}^{1/2}}{\omega_s \left(\frac{\eta_s}{\eta} - 1 \right) + 1} \cdot \sqrt{P_1 \cdot \rho_{l1}} \quad (23)$$

$$\eta_a = \frac{P_2}{P_1} \quad (24)$$

$$G = 1,414 [\rho_{l1} (P_1 - P)]^{1/2} \quad (25)$$

Finalment, es pot realitzar el càlcul de l'àrea requerida de la PRV a partir de l'equació (26). Aquesta equació només és vàlida per a sistemes amb flux turbulent. [2]

$$A = 16,67 \cdot \frac{Q \cdot \rho_{l1}}{K_d \cdot K_b \cdot K_c \cdot K_v \cdot G} \quad (26)$$

On:

- K_d és el coeficient de descàrrega:
 - 0,85 per líquid saturat i bifàsic.
 - 0,65 per líquid subrefredat.
- K_b és el factor de correcció de contrapressió del líquid i solament s'aplica a les vàlvules balancejades. Aquest factor es pot extreure de la figura C.3 de l'API 520 Part 1 – 2020.
- K_c és el factor de correcció de combinació amb disc de ruptura amunt de la PRV:
 - 1,0 quan no s'instal·la el disc de ruptura.

- 0,9 quan s'instal·la la disc de ruptura i la combinació no té un valor certificat.
- K_v és el factor de la viscositat, per a fluxos bifàsics on el líquid té una viscositat de 100 cP (0,1 Pa·s) o menys, el factor és 1,0.

3.2.3 Software disponible

A continuació, es detallen els softwares disponibles per al disseny de les vàlvules d'alleujament de pressió.

- Aspen Plus/Hysys: Des de la versió 8.6 hi ha la possibilitat de dimensionar PRVs que inclouen moltes possibilitats, és a dir, fluids supercrítics amb el mètode Ouderkirk i càlcul en escenari de foc amb una mescla líquida multicomponent, per exemple.
- PSPPM: Aquest programari va ser desenvolupat per l'antiga empresa Berwanger Inc, que avui en dia, forma part de Siemens AG.
- CONVAL: Aquest programari prové de FIRST (Alemanya). Permet el disseny de vàlvules de seguretat per a fluids monofàsic i bifàsics amb el mètode de Leung. Tot i que no calcula càrregues d'alleujament, té una excel·lent base de dades de fabricants europeus de vàlvules de seguretat.
- Superchems: Aquest programari prové d'ioMosaic. Superchems és un software umbreller per a molts problemes de seguretat de processos. Està valorat com a molt bo segons alguns experts, tot i que no és fàcil treballar amb ell.
- Superchems DIERS Lite: Aquest programari s'inclou al llibre: CCPS (2017) Guidelines for pressure relief and effluent handling Systems, 2a Edició, AIChE, Wiley.
- ProSar: Aquest programari va ser desenvolupat pel professor Jürgen Schmidt i col·laboradors de l'Institut de Tecnologia de Karlsruhe. Avui ofereixen el programa a través del CSE-Engineering Center of Safety Excellence. És un programa molt fàcil d'utilitzar per a flux monofàsic i bifàsic (API i ISO) per a vàlvules de seguretat i discs de ruptura.
- iPRSM: Aquest programari l'ofereix Farris Engineering Services. És un programa habilitat per la web.
- Valvestar: És un programari gratuït per al disseny de vàlvules de seguretat Leser. Té la possibilitat de dissenyar flux bifàsic segons el mètode Omega de l'API 520.
- PRV2SIZE: És un programari gratuït generat per Emerson. Té totes les dades de les vàlvules Anderson-Greenwood.

3.3 Descripció rigorosa del model ISO 4126-10 – 2010

El mètode de dimensionament de vàlvules d'alleujament de pressió que es realitza en aquesta norma és un model de flux homogeni i sense equilibri d'un sol component. Per tant, els sistemes multicomponent es realitzen amb dades de propietats mitjanes de la mescla. [12]

3.3.1 Limitacions del model

Aquest mètode és vàlid per als sistemes ens que es compleix una o les dues condicions que es mostren a continuació: [12]

- La temperatura màxima és inferior al 90% de la temperatura crítica termodinàmica del fluid, tal i com es mostra a l'equació (27).
- La sobrepressió és inferior al 50% de la pressió crítica termodinàmica del fluid, tal i com es mostra a l'equació (28).

$$T_{red} = \frac{T_{over}}{T_c} < 0,9 \quad (27)$$

$$p_{\text{red}} = \frac{P_{\text{over}}}{p_c} < 0,5 \quad (28)$$

Per altra banda, aquest mètode es pot aplicar a sistemes flash de components múltiples que tinguin rang de temperatura de saturació que no superi els 100 K, tal i com es mostra a l'equació (29). [12]

$$T_{\text{sat},i} - T_{\text{sat},j} < 100 \quad (29)$$

Una limitació molt important que cal tenir en compte és que aquest mètode no es pot aplicar directament als casos en què es dissolen quantitats significatives de gasos en el fluid que s'està descarregant, ja que la presència de gasos dissolts pot afectar profundament les propietats de la barreja i el cabal màssic de la PRV. [12]

En el cas d'una reacció fora de control, la velocitat d'autoescalfament de la reacció, a la pressió màxima durant l'alleujament, ha de ser inferior a 2 K/s, tal i com es mostra a l'equació (30). Per altra banda, la taxa màxima d'augment de pressió es limita a 20 kPa/s, tal i com es mostra a l'equació (31). [12]

$$\left. \frac{dT}{dt} \right|_{\text{over}} < 2 \quad (30)$$

$$\left. \frac{dp}{dt} \right|_{\text{over}} < 20 \quad (31)$$

Finalment, cal esmentar que aquest mètode no es pot aplicar directament si hi ha líquids immiscibles al sistema. [12]

3.3.2 Disseny

El primer pas i més important a l'hora de dissenyar una vàlvula de seguretat, és identificar i avaluar els riscos del procés i per tant, decidir per quin escenari (foc, fallada de la vàlvula de control, etc.) s'ha de dissenyar l'element de seguretat. [12]

Per tant, una vegada realitzada la comprovació que limiten el model de la ISO 4126-10, ja es pot realitzar el disseny de la PRV com es mostra a continuació. [12]

3.3.2.1 Règim del cabal a l'entrada de la vàlvula de seguretat

El procediment de càlcul que s'ha realitzat és per a un sistema no espumós i una barreja de baixa viscositat en les condicions de disseny. [12]

Primer de tot és necessari realitzar el càlcul de l'entrada de calor al sistema pressuritzat, per tal de determinar el cabal màssic de vapor requerit per a ser descarregat. A l'equació (32) es mostra la fórmula d'aquest càlcul. [12]

$$\dot{Q}_0 = M_0 \cdot c_{p,l,0} \cdot \left. \frac{dT}{dt} \right|_0 \quad (32)$$

Un cop realitzat aquest càlcul, ja es pot determinar el cabal màssic de vapor requerit per a ser descarregat, tal i com es mostra a l'equació (33). [12]

$$Q_{m,\text{out}} = \frac{\dot{Q}_0}{\Delta h_{v,0}} \quad (33)$$

Un cop determinat el cabal màssic de gas o vapor requerit per descarregar, ja es pot determinar la velocitat de pujada de bombolles adimensional. Per tal de determinar aquesta velocitat, primer de tot s'ha de realitzar el càlcul de la velocitat superficial del gas a la cúpula del sistema pressuritzat, com es mostra a l'equació (34). Per altra banda, s'ha de realitzar el

càlcul de la velocitat de pujada de bombolles en el flux turbulent de la barreja, en les condicions de disseny, com es mostra a l'equació (35). [12]

$$u_{g,0} = Q_{m,g,out} \cdot \frac{V_{g,0}}{A_v} \quad (34)$$

$$u_{\infty} = k_{\infty} \cdot \frac{[\sigma_{l,0} \cdot g_n (\rho_{l,0} - \rho_{g,0})]^{1/4}}{\sqrt{\rho_{l,0}}} \quad (35)$$

Un cop realitzats aquests dos càlculs, es pot determinar la velocitat de pujada de bombolles adimensional, a partir de l'equació (36). [12]

$$u = \frac{u_{g,0}}{u_{\infty}} \quad (36)$$

En aquesta norma, es fa èmfasis en que per distingir entre flux monofàsic i bifàsic, els criteris a emprar són el nivell inicial d'ompliment del líquid, la taxa de producció de gas o vapor, la viscositat del líquid i el comportament de la espuma. La viscositat del líquid es considerarà en les condicions de màxima pressió acumulada admissible en el sistema pressuritzat. En la figura 9 es mostra el llindar d'ompliment crític en funció de la velocitat de pujada de bombolles adimensional. En aquesta figura es poden observar dues corbes: [12]

- Una primera per a líquids no espumosos ni aquosos:
 - o $\Omega_{l,0} < 0,1$ Pa·s (flux turbulent $k_{\infty}=1,53$)
- Per altra banda, una segona per a líquids escumosos i viscosos:
 - o $\Omega_{l,0} > 0,1$ Pa·s (flux homogeni $k_{\infty}=1,18$).

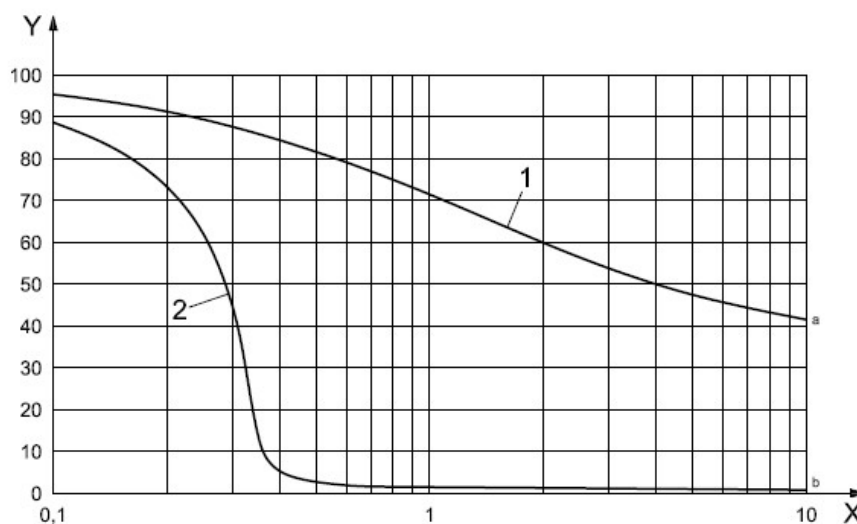


Figura 9. Règim de cabal a l'entrada de la vàlvula (flux monofàsic o bifàsic) – Llindar d'ompliment crític (ϕ_{limit}) en funció de la velocitat de pujada de bombolles adimensional. (Font: ISO 4126-10)

Per tant, un cop determinada la velocitat de pujada de bombolles adimensional i tenint en compte el tipus de fluid, a partir de la figura anterior, es pot determinar el llindar d'ompliment crític. [12]

Si el llindar d'ompliment crític de les condicions de disseny és superior al llindar determinat per la figura anterior, s'ha de considerar la descàrrega de flux bifàsic. [12]

3.3.2.2 Càlcul del cabal bifàsic que cal descarregar

En aquest apartat, es mostrarà el procediment de càlcul del cabal bifàsic que cal descarregar. Primer de tot, a partir de l'equació (37) es determina l'entrada de calor mitjana al sistema pressuritzat. [12]

$$\dot{Q}_0 = \frac{M_0 \cdot c_{pl,0}}{2} \cdot \left(\frac{dT}{dt} \Big|_0 + \frac{dT}{dt} \Big|_{over} \right) \quad (37)$$

Un cop realitzat aquest càlcul, a partir de l'equació (38) es determina la relació de calor sensible i calor latent del sistema. Per poder realitzar posteriorment el càlcul del cabal màssic. [12]

$$\dot{Q}_{acc}^* = \frac{c_{pl,0} \cdot \Delta T_{over}}{\Delta h_{v,0}} \quad (38)$$

Tot seguit s'ha de realitzar el càlcul del volum específic adimensional a partir de l'equació (39). Per tal de realitzar aquest càlcul, primer és necessari realitzar el càlcul de la retenció inicial del gas a partir de l'equació (40), també s'ha de realitzar el càlcul de la qualitat del flux màssic a partir de l'equació (41) i el càlcul del volum específic de la barreja a partir de l'equació (42). [12]

$$v^* = \frac{v_0}{v_{g,0} - v_{l,0}} \quad (39)$$

$$\epsilon_0 = 1 - \phi_0 \quad (40)$$

$$\dot{x}_0 = \frac{\epsilon_0 \cdot v_{l,0}}{(1 - \epsilon_0) \cdot v_{g,0} + \epsilon_0 \cdot v_{l,0}} \quad (41)$$

$$v_0 = \dot{x}_0 \cdot v_{g,0} + (1 - \dot{x}_0) \cdot v_{l,0} \quad (42)$$

Finalment, ja es pot realitzar el càlcul del cabal màssic bifàsic a partir de l'equació (43). Cal esmentar que aquesta equació és per al cas de sistema temperat, és a dir, que l'obertura de la PRV ajuda a disminuir la temperatura del sistema pressuritzat. [12]

$$Q_{m,out} = \frac{\dot{Q}}{\Delta h_{v,0}} \cdot \frac{1}{\left(\sqrt{v^*} + \sqrt{\dot{Q}_{acc}^*} \right)^2} \quad (43)$$

Un cop realitzat el càlcul del cabal màssic bifàsic per al cas de sistema temperat, s'ha de realitzar el càlcul del flux màssic bifàsic descarregable a través d'una vàlvula de seguretat, tal i com es mostra en el següent apartat. [12]

3.3.2.3 Càlcul del flux màssic bifàsic descarregable a través d'una vàlvula de seguretat

Per tal de realitzar el càlcul del cabal màssic bifàsic que es descarrega a través de la vàlvula de seguretat, primer de tot cal determinar la relació entre la contrapressió de la vàlvula i la pressió de tarat, tal i com es mostra a l'equació (44). [12]

$$\eta_b = \frac{p_b}{p_0} \quad (44)$$

Tot seguit es realitza el càlcul del coeficient de compressibilitat. Per tal de realitzar aquest càlcul primer de tot cal realitzar una aproximació del factor de retard d'ebullició on (N) és igual a 1, tal i com es mostra a l'equació (45). [12]

$$\omega_{eq} = \frac{\dot{x}_0 \cdot v_{g,0}}{K_0 \cdot v_0} + \frac{c_{pl,0} \cdot p_0 \cdot T_0}{v_0} \cdot \left(\frac{v_{g,0} - v_{l,0}}{\Delta h_{v,0}} \right)^2 \quad (45)$$

Un cop determinat el coeficient de compressibilitat, si aquest és major a 2, es pot realitzar el càlcul de la relació de pressió crítica a partir de l'aproximació d'emprar l'equació (46). En cas de que el coeficient de compressibilitat sigui menor a 2, s'ha d'emprar l'equació (12), ja esmentada en la norma API 520 Part 1 – 2020. [12]

$$\eta_{crit} = 0,55 + 0,217 \cdot \ln(\omega_{eq}) - 0,046 \cdot [\ln(\omega_{eq})]^2 + 0,004 \cdot [\ln(\omega_{eq})]^3 \quad (46)$$

Per altra banda, en cas de tenir l'escenari de líquid subrefredat la qualitat del flux màssic per al càlcul de l'Omega és 0, per tant el mètode per calcular la relació de pressió crítica esmentada anteriorment no és vàlid. En aquest cas, per calcular aquesta relació de pressió crítica s'ha d'emprar l'equació (47). [12]

$$\eta_{crit} = \frac{p_{sat}}{p_0} \quad (47)$$

Un cop calculada la relació de pressió crítica, i si aquesta és superior a la relació de contrapressió de la PRV i la pressió de disseny, calculada anteriorment, llavors el flux arriba al punt crític i es pot emprar l'equació (48) per determinar el factor de retard d'ebullició, que anteriorment s'havia suposat que era 1. Aquest coeficient de compressibilitat solament s'haurà de tenir en compte en els casos on el fluid sigui líquid o la fracció de vapor sigui inferior al 3%. [12]

$$N = \left[\dot{x}_0 + c_{pl,0} \cdot p_0 \cdot T_0 \cdot \frac{v_{g,0} - v_{l,0}}{\Delta h_{v,0}^2} \cdot \ln \left(\frac{1}{\eta_{crit}} \right) \right]^{2/5} \quad (48)$$

Tot seguit, ja es pot realitzar el càlcul del coeficient de compressibilitat aplicant el factor de retard d'ebullició, tal i com es mostra a l'equació (49). [12]

$$\omega = \frac{\dot{x}_0 \cdot v_{g,0}}{K_0 \cdot v_0} + \frac{c_{pl,0} \cdot p_0 \cdot T_0}{v_0} \cdot \left(\frac{v_{g,0} - v_{l,0}}{\Delta h_{v,0}} \right)^2 \cdot N \quad (49)$$

Com es pot veure en les equacions anteriors, la relació de pressió crítica depèn del coeficient de compressibilitat, per tant en el cas d'haver de realitzar el càlcul del factor de retard d'ebullició, s'ha de realitzar un procés iteratiu per obtenir el coeficient de compressibilitat. [12]

Un cop determinat el coeficient de compressibilitat del sistema, s'ha de procedir a determinar el coeficient de descàrrega de la vàlvula de flux bifàsic. Per tal determinar aquest coeficient, primer cal determinar la fracció buida a la secció transversal més estreta de la PRV, tal i com es pot veure amb l'equació (50). [12]

$$\epsilon_{seat} = 1 - \frac{v_{l,0}}{v_0 \cdot \left[\omega \cdot \left(\frac{1}{\eta_{crit}} - 1 \right) + 1 \right]} \quad (50)$$

A partir de la fracció buida, ja es pot determinar el coeficient de descàrrega de la vàlvula de flux bifàsic, a partir de l'equació (51). [12]

$$K_{dr,2ph} = K_{dr,g} \cdot \epsilon_{seat} + (1 - \epsilon_{seat}) \cdot K_{dr,l} \quad (51)$$

Per altra banda, és necessari realitzar el càlcul del coeficient de flux a partir de l'equació (52), per posteriorment determinar el flux màssic descarregable per la PRV. En el cas de líquid subrefredat, com ja s'ha esmentat, no es pot determinar l'Omega i per tant emprant la relació

de pressió crítica calculada a l'equació (47), el coeficient de flux es pot calcular emprant l'equació (53). [12]

$$C = \frac{\sqrt{\omega \cdot \ln\left(\frac{1}{\eta_{\text{crit}}}\right) - (\omega - 1) \cdot (1 - \eta_{\text{crit}})}}{\omega \cdot \left(\frac{1}{\eta_{\text{crit}}} - 1\right) + 1} \quad (52)$$

$$C = \sqrt{1 - \eta_{\text{crit}}} \quad (53)$$

Tot seguit, ja es pot realitzar el càlcul del flux màssic descarregable per la PRV, a partir del coeficient de descàrrega de la vàlvula de flux bifàsic i el coeficient de flux, calculats anteriorment. A l'equació (54) es mostra el càlcul del flux màssic descarrgable. [12]

$$\dot{m}_{\text{SV}} = K_{\text{dr},2\text{ph}} \cdot C \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot p_0}{v_0}} \quad (54)$$

Finalment, ja es pot realitzar el càlcul de la secció mínima requerida de la secció transversal de la vàlvula i el diàmetre mínim requerit de la mateixa, a partir de l'equació (55) i (56), respectivament. [12]

$$A_0 = \frac{Q_{\text{m,out}}}{\dot{m}_{\text{SV}}} \quad (55)$$

$$d_0 = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot A_0} \quad (56)$$

3.3.3 Software disponible

A continuació, es detallen els softwares disponibles per al disseny de les vàlvules d'alleujament de pressió.

- Aspen Plus/Hysys: Des de la versió 8.6 hi ha la possibilitat de dimensionar PRVs que inclouen moltes possibilitats, és a dir, fluids supercrítics amb el mètode Ouderkirk i càlcul en escenari de foc amb una mescla líquida multicomponent, per exemple.
- PSPPM: Aquest programari va ser desenvolupat per l'antiga empresa Berwanger Inc, que avui en dia, forma part de Siemens AG.
- CONVAL: Aquest programari prové de FIRST (Alemanya). Permet el disseny de vàlvules de seguretat per a fluids monofàsic i bifàsics amb el mètode de Leung. Tot i que no calcula càrregues d'alleujament, té una excel·lent base de dades de fabricants europeus de vàlvules de seguretat.
- Superchems: Aquest programari prové d'ioMosaic. Superchems és un software umbrellera per a molts problemes de seguretat de processos. Està valorat com a molt bo segons alguns experts, tot i que no és fàcil treballar amb ell.
- Superchems DIERS Lite: Aquest programari s'inclou al llibre: CCPS (2017) Guidelines for pressure relief and effluent handling Systems, 2a Edició, AICHE, Wiley.
- Prostar: Aquest programari va ser desenvolupat pel professor Jürgen Schmidt i col·laboradors de l'Institut de Tecnologia de Karlsruhe. Avui ofereixen el programa a través del CSE-Engineering Center of Safety Excellence. És un

programa molt fàcil d'utilitzar per a flux monofàsic i bifàsic (API i ISO) per a vàlvules de seguretat i discs de ruptura.

- iPRSM: Aquest programari l'ofereix Farris Engineering Services. És un programa habilitat per la web.
- Valvestar: És un programari gratuït per al disseny de vàlvules de seguretat Leser. Té la possibilitat de dissenyar flux bifàsic segons el mètode Omega de l'API 520.
- PRV2SIZE: És un programari gratuït generat per Emerson. Té totes les dades de les vàlvules Anderson-Greenwood.

3.4 Descripció rigorosa del model GOST 12.2.085 (2017)

A continuació, es detallarà el procediment de càlcul dels diferents models de disseny de vàlvules d'alleujament de pressió amb flux bifàsic que descriu la norma GOST 12.2.085 de l'any 2017. Aquesta norma inclou procediments de càlcul explicats tant a la norma API 520 Part 1 – 2020 com a la ISO 4126-10.

3.4.1 Limitacions del model

Per escollir el mètode correcte de càlcul de la velocitat màssica es recomana prèviament determinar la naturalesa del medi. Per tal de determinar-la es recomana utilitzar els diagrames de fases del medis amb els límits bifàsics i les línies d'entropia constant. Els tipus de naturalesa dels diferents medis a l'entrada i sortida de la vàlvula són: [14]

- Líquid – Líquid.
- Líquid – Bifàsic.
- Gas – Gas.
- Gas – Bifàsic.
- Bifàsic – Bifàsic.

A continuació, es mostra una taula amb el mètode a emprar per al càlcul segons les condicions i la naturalesa del medi. [14]

Taula 1. Mètode de càlcul segons la naturalesa del fluid. [14]

Naturalesa del medi	Mètode de càlcul	Camp d'aplicació
Líquid – Líquid	Fluid incompressible	Es recomana aplicar si es compleixen les dues condicions: $T_r < 1,0$ $P_r \leq 1,00 + 1,25 \cdot (1 - T_r)$
	Coeficient isentròpic constant	Es recomana el seu ús a altes pressions i a prop de la pressió crítica.
Gas – Gas	Coeficient isentròpic constant	Mètode bàsic per al càlcul de flux de gasos i medis supercrítics. Es recomana aplicar si: $n \geq 1$
	Mètode Omega	Es recomana aplicar si es compleixen les tres condicions: $n < 1$ $P_r \geq 1,0 + 5,0 \cdot (T_r - 1)$ $P_r \leq 1,5 + 15,0 \cdot (T_r - 1)$

Continuació Taula 1. Mètode de càlcul segons la naturalesa del fluid. [14]

Naturalesa del medi	Mètode de càlcul	Camp d'aplicació
Bifàsic – Bifàsic	Mètode Omega	Solament si el medi és bifàsic constantment.
	Coeficient isentròpic constant	Es recomana el seu ús si es compleix el següent: $x > 0,8$ $P_r < 0,4$ En aquest cas és més precís que el mètode Omega.
Líquid – Bifàsic	Fluid incompressible + Mètode Omega	Es recomana aplicar si es compleixen les dues condicions: $T_r < 1,0$ $P_r \leq 1,00 + 1,25 \cdot (1 - T_r)$
	Mètode Omega (amb valors diferents del paràmetre Omega per líquid i per bifàsic)	Es recomana aplicar si es compleixen les tres condicions: $T_r > 1,0$ $P_r \geq 1,0 + 5,0 \cdot (T_r - 1)$ $P_r \leq 1,5 + 15,0 \cdot (T_r - 1)$
	Coeficient isentròpic constant + Mètode Omega	Es recomana l'ús quan no es poden emprar els dos mètodes anteriors.
Gas – Bifàsic	Coeficient isentròpic constant (amb valors diferents de l'índex per gas i per bifàsic)	Es recomana aplicar si es compleixen les quatre condicions: $n > 1$ $T_r > 1,0$ $P_r \geq 1,0 + 5,0 \cdot (T_r - 1)$ $P_r \leq 1,5 + 15,0 \cdot (T_r - 1)$
	Mètode Omega (amb valors diferents del paràmetre Omega per gas i per bifàsic)	Es recomana aplicar si es compleixen les tres condicions: $T_r > 1,0$ $P_r \geq 1,0 + 5,0 \cdot (T_r - 1)$ $P_r \leq 1,5 + 15,0 \cdot (T_r - 1)$

Per als casos de fluids supercrítics, la norma GOST 12.2.085 (2017) no especifica un procediment clar a realitzar. Per aquest motiu, es va realitzar una consulta a un dels integrants de la realització d'aquesta norma per determinar el procediment més adequat per aquests casos. La resolució del dubte va ser que el mètode més fiable per a realitzar el disseny de PSV's en medi supercrític és el mètode d'integració directa que es descriu tant en la norma com a l'API 520 Part 1 – 2020. [15]

3.4.2 Disseny

Primer de tot, cal esmentar que el càlcul de la vàlvula d'alleujament de pressió es basa en el model de tovera ideal. Per tant, el flux a través de la vàlvula primer es calcula per equilibri adiabàtic (sense intercanvi de calor amb el entorn) i isentròpic (sense pèrdua per fricció hidràulica). [14]

A continuació, es mostra el model de càlcul tenint en compte les condicions reals i la influència de diferents factors addicionals. [14]

Per altra banda, és important mencionar que aquesta norma és una norma que engloba les anteriors, és a dir, realitza el procediment de càlcul de la integració directa esmentat en la norma API 520 Part 1 – 2020 i el mètode Omega de la norma ISO 4126-10. Per aquest motiu

s'ha realitzat una explicació més detallada dels conceptes i s'han obviat els punts que es repeteixen de les altres normes.

3.4.2.1 Capacitat real de la vàlvula de seguretat

A continuació, es mostra el càlcul de la capacitat real de la vàlvula de seguretat a partir de l'equació (57). [14]

$$G = \alpha \cdot K_c \cdot K_v \cdot K_w \cdot G_{ideal}^* \cdot F \quad (57)$$

A continuació, es detallarà el mètode de càlcul a emprar per determinar els diferents paràmetres de l'equació (57). [14]

3.4.2.2 Àrea mínima del seient de la vàlvula

Per tal de realitzar el càlcul de l'àrea mínima del seient de la vàlvula, s'emprarà l'equació (58). [14]

$$F = \frac{G_{ab}}{\alpha \cdot K_c \cdot K_v \cdot K_w \cdot G_{ideal}^* \cdot N} \quad (58)$$

3.4.2.3 Velocitat màssica

A continuació, es mostra el procediment de càlcul de la velocitat màssica, tenint en compte el comportament termodinàmic. [14]

Primer de tot, cal esmentar que la pressió davant de la vàlvula és l'absoluta i es determina a partir de l'equació (59). [14]

$$P_1 = P_{OT} + P_{atm} \quad (59)$$

Tot seguit, s'ha de determinar si el flux és crític o subcrític. A continuació es mostra el procediment per determinar-ho. [14]

3.4.2.3.1 Flux crític

En condicions de flux crític, la velocitat del flux agafa la velocitat del so. Provoca que la velocitat màssica no depengui de la pressió aigües a baix de la vàlvula i solament estigui determinada per les propietats del medi descarregat i els paràmetres aigües amunt de la vàlvula, tal i com es mostra a l'equació (60). [14]

$$G_{ideal}^* = K_{\pi kp} \cdot \sqrt{P_1 \cdot \rho_1} \quad (60)$$

Per determinar el valor de $K_{\pi kp}$, s'emprarà l'equació (61) si l'coeficient isentròpic és constant i l'equació (62) si es realitza amb el mètode Omega. [14]

$$K_{\pi kp} = \sqrt{n \cdot \beta_{kp}^{\frac{n+1}{n}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot n}{n+1}} \cdot \left(\frac{2}{n+1}\right)^{\frac{1}{n-1}} \quad (61)$$

$$K_{\pi kp} = \frac{\beta_{kp}}{\sqrt{\omega}} \quad (62)$$

Per determinar el valor de β_{kp} , s'emprarà l'equació (63) si l'coeficient isentròpic és constant i l'equació (64) si es realitza amb el mètode Omega. [14]

$$\beta_{kp} = \left(\frac{2}{n+1}\right)^{\frac{n}{n-1}} \quad (63)$$

$$\left[2 \cdot \omega - (\omega - 1) \cdot \beta_{kp}\right]^2 - (\omega + 1)^2 + 2 \cdot \omega^2 \cdot \ln \beta_{kp} + 1 = 0 \quad (64)$$

3.4.2.4 Coeficient de flux α

El coeficient de flux el determina el fabricant de manera experimental i l'indica per diferents medis i règims de flux. A continuació s'esmenta quan emprar els diferents coeficients de flux. [14]

- α_1 - Per a flux crític a través de la vàlvula.
- α_2 - Per a flux de líquid i gas, en condicions de flux nominal de la vàlvula.

Cal esmentar, que si s'empra la pressió del seient com a pressió de sortida al calcular G_{ideal}^* per la descàrrega de gas, es pot utilitzar el factor α_1 .

Per altra banda, com es realitzarà el disseny preliminar de vàlvules que no són existents i que per tant no tenim els coeficients del fabricant, s'emprarà com a coeficient de descàrrega de flux els valors que determina la norma API 520 Part 1 – 2020. [16]

3.4.2.5 Coeficient K_c

Aquest coeficient determina la possible disminució del rendiment de la PRV degut a la instal·lació de dispositius de seguretat de membrana. A continuació, es mostren els valors del coeficient. [14]

- $K_c=0,9$ – A l'instal·lar dispositius abans o després de la vàlvula.
- $K_c=1$ – Si no hi ha dispositius.

3.4.2.6 Coeficient K_v

Aquest coeficient determina la possible disminució del rendiment de la PRV degut a la descàrrega de fluids d'alta viscositat, degut a les pèrdues hidràuliques addicionals. [14]

A l'equació (65) es mostra el càlcul del coeficient K_v en el cas de conèixer alguns paràmetres de l'àrea de la vàlvula. En el cas de no tenir aquests paràmetres, es pot emprar l'equació (66) per a Reynolds entre 1000 i 100000, l'equació (67) per Reynolds més petits que 1000 i un valor de K_v de 1 per a Reynolds superiors a 100000. [14]

$$K_v = 0,975 \cdot \sqrt{\frac{(d_0/DN_1)^{0,1}}{\frac{950 \cdot (1-d_0/DN_1)^{1,4}}{Re} + 0,900}} \quad (65)$$

$$K_v = \left(0,9935 + \frac{2,8780}{Re^{0,5}} + \frac{342,7500}{Re^{1,5}}\right)^{-1} \quad (66)$$

$$K_v = 0,975 \cdot \sqrt{\frac{1}{\frac{170}{Re + 0,980}}} \quad (67)$$

Per determinar el nombre de Reynolds, primer s'ha de determinar la fracció de volum de gas en el flux de fases amb velocitats iguals, tal i com es mostra a l'equació (68). A partir de la fracció de volum de gas, s'ha de determinar la viscositat dinàmica efectiva d'una mescla bifàsica a partir de l'equació (69) i tot seguit ja es pot determinar el nombre de Reynolds amb l'equació (70). [14]

$$\varepsilon = \left[1 + \frac{1-x}{x} \cdot \frac{\rho_g}{\rho_l} \right]^{-1} \quad (68)$$

$$\mu = \varepsilon \cdot \mu_g + (1-\varepsilon) \cdot (1 + 2,5 \cdot \varepsilon) \cdot \mu_l \quad (69)$$

$$Re = \frac{G}{3,6 \cdot \mu} \cdot \sqrt{\frac{4}{\pi \cdot F}} \quad (70)$$

3.4.2.7 Coeficient K_w

Aquest coeficient és el factor de correcció de la contrapressió del vapor i solament s'aplica a les vàlvules de tipus balancejades amb manxa. [14]

Aquest factor el determina el fabricant, però per realitzar el càlcul preliminar de la vàlvula es pot emprar la taula D.1 o el gràfic I.1 de la pròpia norma. [14]

3.4.3 Mètodes de càlcul

En aquest apartat es realitzarà el disseny de la vàlvula, tenint en compte diferents mètodes de càlcul. [14]

3.4.3.1 Mètode d'integració directa

Aquest mètode és universal per calcular l'àrea de descàrrega d'una vàlvula, tant de medis monofàsics com medis bifàsics. [14]

A partir de l'equació (71) es pot determinar el flux a través de la tovera ideal, emprant solament el càlcul de la densitat del medi en funció de la pressió a entropia constant. [14]

$$G_{ideal}^* = \rho_0 \cdot \left[-2 \cdot \int_{P_1}^{P_0} \frac{dP}{\rho} \right]^{1/2} \quad (71)$$

Cal esmentar que l'equació (71) s'empra quan P_0 disminueix de P_1 a P_2 , en canvi si P_0 té màxims dins del mateix rang, llavors s'ha d'emprar P_{kp} i el règim de flux és crític. Per altra banda, si P_0 augmenta monòtonament, llavors el flux és subcrític i s'ha d'emprar P_2 . [14]

Per tant a partir de l'equació (71), i tenint en compte que el flux és crític, s'obté l'equació (72). [14]

$$G_{ideal}^* = \rho \cdot \left[-2 \cdot \int_{P_1}^{P_{kp}} \frac{dP}{\rho} \right]^{1/2} \quad (72)$$

3.4.3.2 Càlcul de magnituds auxiliars

3.4.3.2.1 Càlcul de l'coeficient isentròpic i del paràmetre Omega

3.4.3.2.1.1 Per medis bifàsics sense intercanvi màssic

En cas d'haver un medi bifàsic on la transferència de massa entre les fases líquida i gasosa sigui inexistent o es pugui menysprear, el paràmetre Omega i l'coeficient isentròpic es calcularà a partir de l'equació (73). [14]

$$\omega = n^{-1} = \varepsilon \cdot n_g^{-1} + (1-\varepsilon) \cdot n_l^{-1} + \frac{\varepsilon \cdot (1-\varepsilon) \cdot (\Lambda_g - \Lambda_l)^2}{\varepsilon \cdot \frac{\Lambda_l}{\hat{\beta}_l} + (1-\varepsilon) \cdot \frac{\Lambda_g}{\hat{\beta}_g}} \quad (73)$$

On cada paràmetre que es mostra en aquesta equació, es calcula a partir de les següents equacions. [14]

$$\varepsilon = \left[1 + \frac{(1-x) \cdot \rho_g}{x \cdot \rho_l} \right]^{-1} \quad (74)$$

$$n_g = \left(\frac{\partial \ln P}{\partial \ln \rho_g} \right)_s \quad (75)$$

$$n_l = \left(\frac{\partial \ln P}{\partial \ln \rho_l} \right)_s \quad (76)$$

$$\hat{\beta}_g = - \left(\frac{\partial \ln \rho_g}{\partial \ln T} \right)_p \quad (77)$$

$$\hat{\beta}_l = - \left(\frac{\partial \ln \rho_l}{\partial \ln T} \right)_p \quad (78)$$

$$\Lambda_g = - \left(\frac{\partial \ln T}{\partial \ln P} \right)_{s_g} = \frac{P}{T \cdot \rho_g \cdot c_{pg}} \cdot \hat{\beta}_g = \frac{Z_g \cdot R_{yag}}{c_{pg}} \cdot \hat{\beta}_g = \frac{k_g - 1}{n_g \cdot \hat{\beta}_g} \quad (79)$$

$$\Lambda_l = - \left(\frac{\partial \ln T}{\partial \ln P} \right)_{s_l} = \frac{P}{T \cdot \rho_l \cdot c_{pl}} \cdot \hat{\beta}_l = \frac{Z_l \cdot R_{yal}}{c_{pl}} \cdot \hat{\beta}_l = \frac{k_l - 1}{n_g \cdot \hat{\beta}_l} \quad (80)$$

$$k_g = \frac{c_{pg}}{c_{vg}} \quad (81)$$

$$k_l = \frac{c_{pl}}{c_{vl}} \quad (82)$$

Si ε és major a 0,2 i lluny del punt crític de la fase líquida (pressió reduïda inferior a 0,5), es pot menysprear la compressibilitat del líquid i utilitzar l'equació (83), per calcular el paràmetre Omega i l'coeficient isentròpic. [14]

$$\omega = n^{-1} = \varepsilon \cdot \frac{k_g}{n_g} \cdot \frac{x \cdot \frac{c_{pg}}{k_g} + (1-x) \cdot c_{pl}}{x \cdot c_{pg} + (1-x) \cdot c_{pl}} \quad (83)$$

3.4.3.2.1.2 Per mesclades vapor-líquid monocomponents

En aquest cas, el paràmetre Omega i l'coeficient isentròpic es calcula mitjançant l'equació (84) o (85). [14]

$$\omega = n^{-1} = \frac{c_{pm} \cdot T}{u_m \cdot P} \cdot \Lambda^2 - 2\Lambda \cdot \left[\varepsilon \cdot \hat{\beta}_g + (1-\varepsilon) \cdot \hat{\beta}_l \right] + \left[\varepsilon \cdot \hat{k}_g + (1-\varepsilon) \cdot \hat{k}_l \right] \quad (84)$$

$$\omega = n^{-1} = \frac{x + (1-x) \cdot \frac{c_{pl}}{c_{pg}}}{x + (1-x) \cdot \frac{\rho_g}{\rho_l}} \cdot \frac{c_{pg}}{Z_g \cdot R_{ya}} \cdot \Lambda^2 - 2\Lambda \cdot \left[\varepsilon \cdot \hat{\beta}_g + (1-\varepsilon) \cdot \hat{\beta}_l \right] + \left[\varepsilon \cdot \hat{k}_g + (1-\varepsilon) \cdot \hat{k}_l \right] \quad (85)$$

On cada paràmetre que es mostra en aquestes equacions, es calcula a partir de les següents equacions. [14]

$$\hat{k}_g = \left(\frac{\partial \ln \rho_g}{\partial \ln P} \right)_T = \frac{k_g}{n_g} \quad (86)$$

$$\hat{k}_l = \left(\frac{\partial \ln \rho_l}{\partial \ln P} \right)_T = \frac{k_l}{n_l} \quad (87)$$

$$\Lambda = \frac{P \cdot (\rho_g^{-1} - \rho_l^{-1})}{h_{gl}} = \frac{d \ln T_{HAC}}{d \ln P} \quad (88)$$

$$h_{gl} = h_g - h_l \quad (89)$$

En el cas d'una pressió reduïda inferior a 0,5, es poden avaluar les propietats amb el model de gas ideal i de líquid incompressible, i per tant l'equació (84) i (85) quedarien modificades com es mostra a l'equació (90) i (91). [14]

$$\omega = n^{-1} = \frac{c_{pm} \cdot T}{u_m \cdot P} \cdot \Lambda^2 + \varepsilon \cdot (1 - 2\Lambda) \quad (90)$$

$$\omega = n^{-1} = \frac{x + (1-x) \cdot \frac{c_{pl}}{c_{pg}}}{x + (1-x) \cdot \frac{\rho_g}{\rho_l}} \cdot \frac{c_{pg}}{Z_g \cdot R_{ya}} \cdot \Lambda^2 + \varepsilon \cdot (1 - 2\Lambda) \quad (91)$$

En el cas d'una pressió reduïda inferior a 0,1 i una fracció de gas superior al 0,5, l'equació queda simplificada tal i com es mostra a l'equació (92). [14]

$$\omega = n^{-1} = [x \cdot c_{pg} + (1-x) \cdot c_{pl}] \cdot \frac{\Lambda^2}{x \cdot R_{ya}} + \varepsilon \cdot (1 - 2\Lambda) \quad (92)$$

Per altra banda, en el cas d'estar a prop de la línia d'ebullició, amb una fracció de vapor i una fracció de buit de zero, es pot emprar la següent equació per determinar el paràmetre Omega. [14]

$$\omega = n^{-1} = \frac{\rho_l}{\rho_g} \cdot \frac{c_{pl}}{Z_g \cdot R_{ya}} \cdot \Lambda^2 + \hat{k}_l - 2 \cdot \hat{\beta}_l \cdot \Lambda \quad (93)$$

Si alhora la pressió reduïda del cas és inferior a 0,5, es pot emprar aquesta equació simplificada. [14]

$$\omega = n^{-1} = \frac{\rho_l}{\rho_g} \cdot \frac{c_{pl}}{Z_g \cdot R_{ya}} \cdot \Lambda^2 \quad (94)$$

3.4.3.2.1.3 Mètode dels dos punts

Per les mesclades bifàsiques multicomponent amb intercanvi de massa entre les fases gasosa i líquida, el càlcul del paràmetre Omega necessita càlculs d'equilibri de fases, incloent la consideració dels canvis en les composicions de les fases líquids i gasosa durant l'evaporació o condensació. [14]

Tot i això, si es coneixen els valors de les densitats per les dos pressions durant l'expansió isentròpica, el paràmetre Omega es pot estimar a partir de les equacions (95) i (96). [14]

$$P/\rho^n = \text{constant} \quad (95)$$

$$\frac{\rho^*}{\rho} - 1 = \omega \cdot \left(\frac{P^*}{P} - 1 \right) \quad (96)$$

On P^* i ρ^* són les variables corresponents a un punt base de la línia isentròpica. Si a més del punt base, es coneixen les variables per un segon punt, el paràmetre Omega es calcula a partir de l'equació (97). [14]

$$\omega = \frac{\frac{\rho^*}{\rho^{**}} - 1}{\frac{P^*}{P^{**}} - 1} \quad (97)$$

Es recomana utilitzar com a segon punt la densitat en expansió isentròpica al 90% de la pressió base ($P^{**} = P_{0,9} = 0,9 \cdot P^*$), i per tant l'equació queda com es mostra a continuació. [14]

$$\omega = 9 \cdot \left(\frac{\rho^*}{P_{0,9}} - 1 \right) \quad (98)$$

Per tant l'exponent isentròpic d'una mescla bifàsica es pot calcular a partir de l'equació (105). [14]

$$n = \frac{\ln\left(\frac{P^*}{P^{**}}\right)}{\ln\left(\frac{\rho^*}{\rho^{**}}\right)} \quad (99)$$

3.4.3.3 Mètodes per comptabilitzar el desequilibri

Els mètodes descrits en aquest apartat: [14]

- Permeten tenir en compte l'efecte del desequilibri tèrmic (ebullició retardada) en la descàrrega del líquid en ebullició o del medi bifàsic amb petits continguts de la fracció massica de gas (fins 0,01).
- Es basen (directament o indirectament) en relacions empíriques que permeten expressar el contingut de gas en desequilibri a través de l'equilibri.

3.4.3.3.1 Mètode d'integració directa tenint en compte el desequilibri

El mètode és una modificació del mètode descrit en l'apartat 3.4.3.1. Ja que en aquest cas es vol tenir en compte el desequilibri del fluid, per tal de tenir-lo en compte, s'ha d'emprar el factor que es mostra a l'equació (100) a l'hora de determinar la densitat mitjana del fluid. [14]

$$X_{\text{desequilibri}} = X_1 + (X - X_1) \cdot \frac{I_W}{I_{W \text{ PABH}}} \quad (100)$$

3.4.3.3.2 Mètode de desequilibri Omega per la descàrrega de líquid monocomponent o mescla bifàsica basada en el mètode ISO 4126-10

3.4.3.3.2.1 Descàrrega de líquid saturat o mescla bifàsica (paràmetres de saturació a l'entrada de la vàlvula)

En aquest cas, s'empraran les equacions (84) i (85) per calcular el paràmetre Omega, però tenint en compte el factor de desequilibri ($0 \leq N \leq 1$), tal i com es mostra a les equacions (101) i (102). [14]

$$\omega = \left\{ \frac{c_{pm} \cdot T}{u_m \cdot P} \cdot \Lambda^2 - 2\Lambda \cdot \left[\varepsilon \cdot \widehat{\beta}_g + (1-\varepsilon) \cdot \widehat{\beta}_l \right] + \left[\varepsilon \cdot \widehat{\kappa}_g + (1-\varepsilon) \cdot \widehat{\kappa}_l \right] \right\} \cdot N + \frac{\varepsilon}{n_g} \cdot (1-N) \quad (101)$$

$$\omega = \left\{ \frac{x+(1-x) \cdot \frac{C_{pl}}{C_{pg}}}{x+(1-x) \cdot \frac{\rho_g}{\rho_l}} \cdot \frac{C_{pg}}{Z_g \cdot R_{ya}} \cdot \Lambda^2 - 2\Lambda \cdot [\varepsilon \cdot \widehat{\beta}_g + (1-\varepsilon) \cdot \widehat{\beta}_l] + [\varepsilon \cdot \widehat{k}_g + (1-\varepsilon) \cdot \widehat{k}_l] \right\} \cdot N + \frac{\varepsilon}{n_g} \cdot (1-N) \quad (102)$$

Per al cas de gas ideal o líquid incompressible es poden emprar les següents equacions. [14]

$$\omega = \left\{ \frac{C_{pm} \cdot T}{u_m \cdot P} \cdot \Lambda^2 + \varepsilon \cdot (1-2 \cdot \Lambda) \right\} \cdot N + \frac{\varepsilon}{k_g} \cdot (1-N) \quad (103)$$

$$\omega = \left\{ \frac{x+(1-x) \cdot \frac{C_{pl}}{C_{pg}}}{x+(1-x) \cdot \frac{\rho_g}{\rho_l}} \cdot \frac{C_{pg}}{Z_g \cdot R_{ya}} \cdot \Lambda^2 + \varepsilon \cdot (1-2 \cdot \Lambda) \right\} \cdot N + \frac{\varepsilon}{K_g} \cdot (1-N) \quad (104)$$

Cal esmentar que el valor de $N=1$ correspon a un flux completament en equilibri i el valor $N=0$ completament en desequilibri (és a dir, flux congelat). [14]

Pel càlcul del factor de desequilibri s'emprarà l'equació (105).

$$N = \left[x_1 + \frac{C_{1pm} \cdot T_1}{u_{1gl} \cdot P_1} \cdot \Lambda^2 \cdot \ln \left(\frac{1}{\beta_{kp}} \right) \right]^a \quad (105)$$

En aquesta equació el paràmetre a és igual a 0,4 i el subíndex 1 fa referència a que els paràmetres s'agafen a l'entrada de la vàlvula. [14]

Aquest procés és iteratiu, ja que β_{kp} depèn del paràmetre Omega. S'ha d'esmentar que una variació dels paràmetres menor a un 3%, és un valor adequat. [14]

Per tant, per calcular la velocitat màssica, s'haurà de calcular el coeficient de flux i el contingut volumètric de gas al seient de la vàlvula, a partir de les equacions (106) i (107), respectivament. [14]

$$a = \varepsilon_0 \cdot a_1 + (1-\varepsilon_0) \cdot a_2 \quad (106)$$

$$\varepsilon_0 = 1 - \frac{\rho_1}{\rho_{0l} \cdot \left[\omega \cdot \left(\frac{1}{\beta_0} - 1 \right) + 1 \right]} \quad (107)$$

Per flux incompressible, en comptes de ρ_{0l} es pot emprar el valor de ρ_{1l} . [14]

3.4.3.3.2 Descàrrega de líquid amb una temperatura inferior a la de saturació a l'entrada de la vàlvula

En aquest cas per calcular el paràmetre N , s'ha de tenir en compte que $a = \beta_1^{-0.6}$. [14]

$$N = \left[\frac{C_{1pm} \cdot T_1^{(1)}}{u_{1gl} \cdot P_1^{(1)}} \cdot \Lambda^2 \cdot \ln \left(\frac{\beta_1}{\beta} \right) \right]^a \quad (108)$$

3.4.3.3.3 Mètode Omega de desequilibri per la descàrrega de líquid monocomponent o de mescla bifàsica basada en el mètode Henry-Fauske

Aquest mètode es basa en la relació del desequilibri i el contingut de gas en equilibri, tal i com es mostra en les següents equacions. [14]

$$\frac{dx}{dP} = c_1 \cdot x \cdot \frac{dx}{dP} \quad (109)$$

$$c_1 = 1 + 12 \cdot \frac{I_W}{I_{W \text{ PABH}}} \quad (110)$$

3.4.3.3.1 Descàrrega de la línia de saturació

En el cas d'un fluid saturat, s'han d'emprar les següents equacions per la pressió crítica i la velocitat màssica. D'aquesta manera es tindrà en compte el desequilibri del fluid. [14]

$$\beta_{kp} = \frac{1}{1 + \sqrt{1/\hat{c}_1}} \quad (111)$$

$$K_{nkp} = \sqrt{2 \cdot (1 - \beta_{kp})} \quad (112)$$

$$\hat{c}_1 = 2 \cdot c_1 \cdot \frac{\rho_{g1}}{\rho_{l1}} \cdot \omega^2 \quad (113)$$

3.4.3.3.2 Descàrrega de líquid amb temperatura per sota de la temperatura de saturació

En el cas de líquid subrefredat, la pressió crítica es calcula a partir de les següents equacions. [14]

$$\beta_{kp} = \frac{2 \cdot \beta_1}{1 + \beta_1 + \sqrt{(1 - \beta_1)^2 + 4 \cdot \frac{\beta_1}{\hat{c}_1}}} \quad (114)$$

$$\beta_1 = \frac{p^{(1)}}{P_1} \quad (115)$$

$$\hat{c}_1 = 2 \cdot c_1 \cdot \frac{\rho_g^{(1)}}{\rho_l^{(1)}} \cdot \omega^2 \quad (116)$$

3.4.3.3.3 Descàrrega d'una mescla de líquid i vapor amb baix contingut de gas

Finalment en el cas d'una mescla bifàsica amb baix contingut de la fracció de vapor, la pressió crítica i la velocitat màssica es calculen a partir de les següents equacions. [14]

$$\frac{\beta_{kp}}{\sqrt{\varepsilon + (1 - \varepsilon) \cdot \omega \cdot c_1 \cdot \left[x + \omega \cdot \frac{\rho_{g1}}{\rho_{l1}} \cdot (1 - \beta_{kp}) \right]}}} = \frac{\sqrt{2 \cdot \left[-\varepsilon \cdot \ln \beta_{kp} + (1 - \varepsilon) \cdot (1 - \beta_{kp}) \right]}}{\varepsilon \cdot \left(\frac{1}{\beta_{kp}} - 1 \right) + 1} \quad (117)$$

$$K_{nkp} = \frac{\sqrt{2 \cdot \left[-\varepsilon \cdot \ln \beta_{kp} + (1 - \varepsilon) \cdot (1 - \beta_{kp}) \right]}}{\varepsilon \cdot \left(\frac{1}{\beta_{kp}} - 1 \right) + 1} \quad (118)$$

3.4.4 Software disponible

Per a la norma GOST 12.2.085 (2017) no hi ha cap software disponible actualment, segons un dels autors de la pròpia norma russa.

4 Casos d'estudi

4.1 Introducció

En aquest apartat es mostraran els diferents estudis realitzats per al disseny de vàlvules de seguretat. Cada estudi s'ha realitzat amb unes condicions de disseny i del medi de descàrrega diferents, per així valorar i comparar de manera més òptima les diferents normatives explicades en els capítols anteriors.

4.2 Cas 1 – Líquid saturat a l'entrada

4.2.1 Descripció de l'estudi

El primer cas d'estudi és el cas d'alleujament de propilè en estat líquid saturat. A continuació, a la taula 2 es mostren les dades inicials del cas d'estudi.

Taula 2. Dades inicials del cas de líquid saturat.

Propietat	Valor
Fracció de vapor	0,001
Flux màssic de descàrrega (kg/s)	12,60
Pressió d'alleujament (Pa)	1,379E+06
Contrapressió de la vàlvula (Pa)	1,013E+05
Coefficient de descàrrega del gas	0,953
Coefficient de descàrrega del líquid	0,720

A partir d'aquestes dades, s'ha realitzat el disseny de la vàlvula de seguretat. Cal esmentar que els coeficients de descàrrega per al càlcul de l'àrea requerida de la vàlvula són els valors mitjans de la casa Crosby.

A continuació, a la figura 10 es pot veure el diagrama de Mollier del propilè per al cas de líquid saturat.

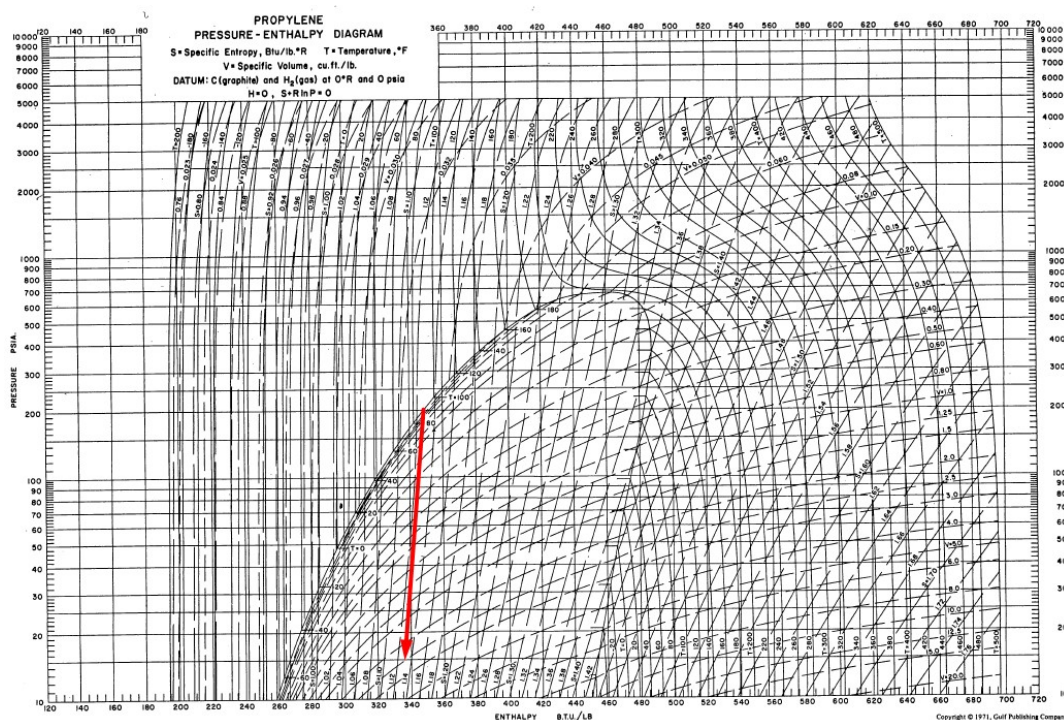


Figura 10. Diagrama de Mollier del propilè (líquid saturat).

Al diagrama s'ha dibuixat el procés pel qual el propilè passa durant l'alleujament de la sobrepressió. Com es pot observar, el punt de partida d'aquest cas és la línia de saturació i realitzant una expansió isentròpica el fluid acaba en estat bifàsic.

4.2.2 Suposicions i metodologia

Primer de tot, s'ha d'esmentar que el càlcul de les propietats del fluid s'ha obtingut del programari ASPEN HYSYS V10 utilitzant Peng Robinson com equació d'estat. A partir d'aquí s'han obtingut un conjunt de paràmetres essencials per al càlcul de la vàlvula. A la taula 3 es mostren aquests valor obtinguts.

Taula 3. Dades obtingudes d'Aspen Hysys V10.

Propietat	Valor	Unitats
Temperatura	305,6	K
Temperatura crítica	365,0	K
Pressió crítica	4,620E+06	Pa
Densitat del vapor	29,32	kg/m ³
Volum específic del vapor	3,411E-02	m ³ /kg
Densitat del líquid	493,8	kg/m ³
Volum específic del líquid	2,025E-03	m ³ /kg
Densitat de la mescla	486,1	kg/m ³
Volum específic de la mescla	2,057E-03	m ³ /kg
Densitat de la mescla al 90% de la pressió d'entrada a la PRV.	301,7	kg/m ³
Volum específic de la mescla al 90% de la pressió d'entrada a la PRV.	3,314E-03	m ³ /kg
Coeficient isentròpic de fase gas	1,343	-
Calor de vaporització	3,249E+05	J/kg
Capacitat calorífica del líquid	2903	J/(kg·K)
Capacitat calorífica de la mescla	2902	J/(kg·K)

4.2.2.1 Consideracions rellevants de la norma API 520 Part 1 – 2020

Primer de tot cal fer menció que les limitacions de la normativa respecte l'ús d'aquesta per al disseny de vàlvules d'alleujament de pressió és compleixen perfectament. La normativa indica que es pot realitzar el càlcul aplicant-la sempre i quant tinguis un fluid bifàsic a l'entrada, sortida o al recorregut de la vàlvula. En el nostre cas, a l'entrada de la vàlvula hi ha líquid saturat que durant l'alleujament del fluid es realitza flash, i per tant a la sortida de la vàlvula hi ha un fluid bifàsic, tal i com s'ha explicat en la figura 10.

La metodologia de la norma és l'ús del mètode d'integració directa, és a dir, la realització de diferents flash isentròpics que permeten l'obtenció dels paràmetres termodinàmics a varies pressions i d'aquesta manera determinar el flux màssic màxim a descarregar per la vàlvula.

4.2.2.2 Consideracions rellevants amb la norma ISO 4126-10

Primer de tot cal comprovar les limitacions que determina l'aplicació d'aquesta norma, tal i com es mostra a continuació.

$$T_{\text{red}} = \frac{305,6}{365,0} = 0,837 < 0,9 \quad (119)$$

$$p_{\text{red}} = \frac{1,379 \cdot 10^6}{4,620 \cdot 10^6} = 0,298 < 0,5 \quad (120)$$

Com es pot veure en les equacions anteriors, el model de la norma permet realitzar el disseny per al cas esmentat anteriorment, ja que, tant la temperatura reduïda com la pressió reduïda estan per sota dels valors màxims permesos.

Un dels punts claus de la realització del càlcul amb la norma ISO 4126-10 és considerar el no equilibri durant l'alleujament de la vàlvula. La pròpia norma especifica que per a líquids o mescles bifàsiques amb un percentatge de vapor molt petit, s'ha de tenir en compte el factor N (no equilibri). Tot i això, també s'ha realitzat el càlcul de l'àrea requerida de la vàlvula per condicions d'equilibri, per així poder comparar el mètode d'integració directa, el qual no té en compte el desequilibri.

4.2.2.3 Consideracions rellevants de la norma GOST 12.2.085 (2017)

Primer de tot, partint de la taula 1 i sabent que tenim líquid a l'entrada de la vàlvula i a la sortida hi haurà una mescla bifàsica. S'han de comprovar les limitacions per determinar quin tipus de procediment de càlcul es realitzarà. A continuació es mostra la comprovació de les limitacions.

$$T_{red} = \frac{305,6}{365,0} = 0,837 < 0,9 \quad (121)$$

$$p_{red} = \frac{1,379 \cdot 10^6}{4,620 \cdot 10^6} = 0,298 < (1 + 1,25 \cdot (1 - 0,837)) = 1,204 \quad (122)$$

Com es pot veure en les equacions anteriors, la temperatura reduïda i la pressió reduïda compleixen les limitacions del primer cas de líquid – bifàsic. Per aquest motiu el mètode que determina la norma que s'ha d'emprar és la consideració de fluid incompressible utilitzant el mètode Omega, és a dir, el mètode descrit en la norma ISO 4126-10.

Com ja s'ha comentat en l'apartat 4.2.2.2, la norma ISO 4126-10 recomana utilitzar el factor de desequilibri. Per aquest motiu s'ha comprovat el que esmenta la norma GOST 12.2.085 (2017), respecte a la utilització del factor de desequilibri.

Aquesta norma juntament amb la ISO 4126-10, recomana també emprar el factor de desequilibri. L'alimentació a la vàlvula de seguretat és líquida i per tant hi haurà un retard en l'ebullició del fluid, durant l'expansió d'aquest a la vàlvula.

4.2.3 Resultats i discussió

En aquest apartat es mostren els resultats que s'han obtingut al realitzar el disseny preliminar de la vàlvula d'alleujament de pressió, en el cas de propilè en estat líquid saturat. S'han tingut en compte les consideracions esmentades anteriorment respecte a cadascuna de les normatives.

A la taula 4 es mostren les diferents normatives emprades per al càlcul. En els annexos corresponents es detallen els càlculs realitzats.

Taula 4. Normatives emprades per al càlcul i el seu annex corresponent amb el detall del càlcul realitzat.

Norma	Annex
API 520 Part 1 – 2020	A.1.1
ISO 4126-10 (Tenint en compte el desequilibri)	A.1.2
ISO 4126-10 (Sense tenir en compte el desequilibri)	A.1.3
GOST 12.2.085 (2017)	A.1.4

Tot seguit, a la taula 5 es mostren els valors de l'àrea requerida de la vàlvula per alleujar el medi definit anteriorment segons cadascun dels mètodes emprats per al càlcul.

Taula 5. Valors de l'àrea requerida de la vàlvula segons els mètodes de càlcul.

Norma	Àrea requerida (mm ²)
API 520 Part 1 – 2020	1694
ISO 4126-10 (Tenint en compte el desequilibri)	1284
ISO 4126-10 (Sense tenir en compte el desequilibri)	1706
GOST 12.2.085 (2017)	1264

Com es pot veure en els resultats mostrats anteriorment, hi ha dos mètodes que es podrien considerar molt semblants amb una diferència de l'àrea requerida de menys de l'1% entre ells. Aquests dos mètodes són l'API 520 Part 1 – 2020 i el mètode ISO 4126-10 sense tenir en compte el desequilibri.

Per altra banda tenim el valor de la ISO 4126-10 i el de la GOST 12.2.085 (2017) tenint en compte el desequilibri, ja que hi ha líquid a l'entrada de la vàlvula. Com es pot veure el valor d'aquests són molt semblants amb una diferència de menys del 2% entre ells.

Per tant, es pot concloure que el disseny més real és el de la ISO 4126-10 i el de la GOST 12.2.085 (2017) tenint en compte el desequilibri a l'hora d'alleujar el fluid esmentat. Els altres dos mètodes no tenen en compte aquest desequilibri i per tant estan sobredimensionant la vàlvula de seguretat.

Cal mencionar que no s'han pogut realitzar els càlculs del desequilibri amb els dos mètodes alternatius a la ISO 4126-10 que esmenta la norma GOST 12.2.085 (2017), ja que aquests dos mètodes alternatius necessiten de l'obtenció de la vàlvula real, per així definir el desequilibri segons la distància entre el punt d'alleujament i la tovera de la vàlvula.

4.3 Cas 2 – Flux bifàsic a l'entrada

4.3.1 Descripció de l'estudi

El segon cas d'estudi és el cas d'alleujament de propilè en estat bifàsic. A continuació, a la taula 6 es mostren les dades inicials del cas d'estudi.

Taula 6. Dades inicials del cas bifàsic.

Propietat	Valor
Fracció de vapor	0,5
Flux màssic de descàrrega (kg/s)	12,60
Pressió d'alleujament (Pa)	1,379E+06
Contrapressió de la vàlvula (Pa)	1,013E+05
Coeficient de descàrrega del gas	0,953
Coeficient de descàrrega del líquid	0,720

A partir d'aquestes dades, s'ha realitzat el disseny de la vàlvula de seguretat. Cal esmentar que els coeficients de descàrrega per al càlcul de l'àrea requerida de la vàlvula són els valors mitjans de la casa Crosby.

A continuació, a la figura 11 es pot veure el diagrama de Mollier del propilè, per al cas bifàsic.

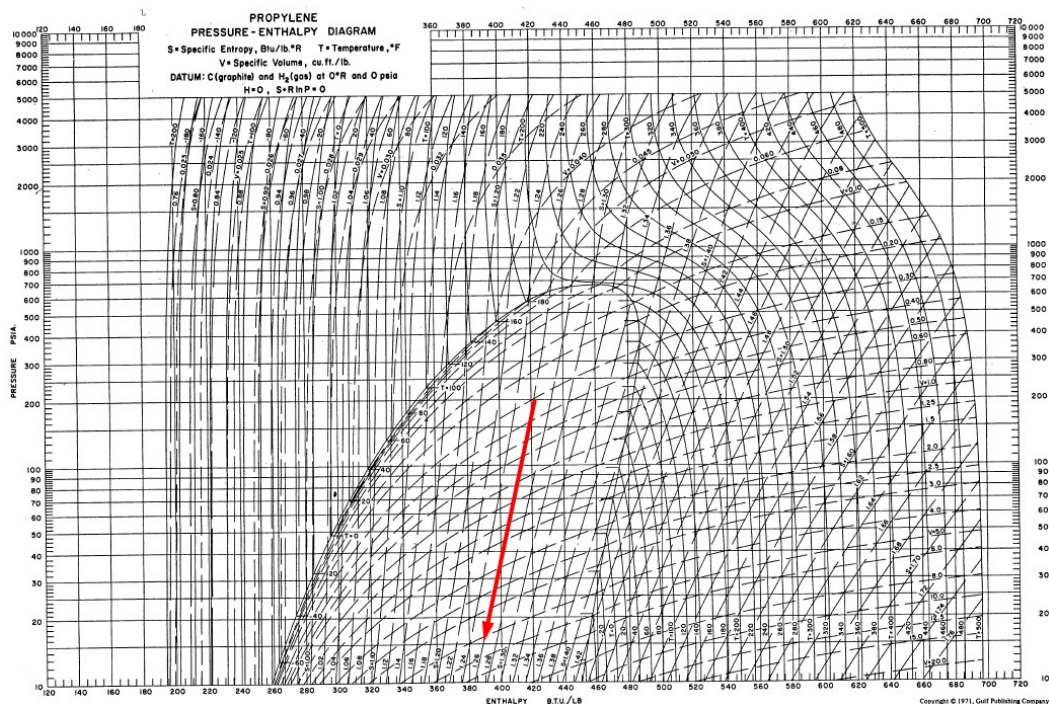


Figura 11. Diagrama de Mollier del propilè (bifàsic).

Al diagrama s’ha dibuixat el procés pel qual el propilè passa durant l’alleujament de la sobrepressió. Com es pot observar, el punt de partida d’aquest cas és a dintre de la corba de saturació, és a dir, estat bifàsic. Si es realitza l’expansió isentròpica el fluid segueix en estat bifàsic a la pressió de sortida de la vàlvula.

4.3.2 Suposicions i metodologia

Primer de tot, s’ha d’indicar que el càlcul de les propietats del fluid s’han obtingut del programari ASPEN HYSYS V10 utilitzant Peng Robinson com equació d’estat. A partir d’aquí s’han obtingut un conjunt de paràmetres essencials per al càlcul de la vàlvula. A la taula 7 es mostren els valors obtinguts.

Taula 7. Dades obtingudes d’Aspen Hysys V10.

Propietat	Valor	Unitats
Temperatura	305,6	K
Temperatura crítica	365,0	K
Pressió crítica	4,620E+06	Pa
Densitat del vapor	29,32	kg/m ³
Volum específic del vapor	3,411E-02	m ³ /kg
Densitat del líquid	493,8	kg/m ³
Volum específic del líquid	2,025E-03	m ³ /kg
Densitat de la mescla	55,36	kg/m ³
Volum específic de la mescla	1,806E-02	m ³ /kg
Densitat de la mescla al 90% de la pressió d’entrada a la PRV	48,51	kg/m ³
Volum específic de la mescla al 90% de la pressió d’entrada a la PRV	2,061E-02	m ³ /kg
Coefficient isentròpic de fase gas	1,146	-
Calor de vaporització	3,249E+05	J/kg
Capacitat calorífica del líquid	2903	J/(kg·K)
Capacitat calorífica del gas	1842	J/(kg·K)
Factor de compressibilitat	0,779	-
Constant dels gasos	197,6	J/(kg·K)

4.3.2.1 Consideracions rellevants de la norma API 520 Part 1 – 2020

Primer de tot cal fer menció que les limitacions de la normativa respecte l'ús d'aquesta per al disseny de vàlvules d'alleujament de pressió és compleixen perfectament. La normativa indica que es pot realitzar el càlcul aplicant-la sempre i quant tinguis un fluid bifàsic a l'entrada, sortida o al recorregut de la vàlvula. En el nostre cas, a l'entrada de la vàlvula hi ha un fluid bifàsic, i per tant, a la sortida de la vàlvula també hi ha un fluid bifàsic, tal i com s'ha pogut veure a la figura 11.

La metodologia de la norma és l'ús del mètode d'integració directa. Es realitzen diferents flash isentròpics que permeten l'obtenció dels paràmetres termodinàmics a varies pressions i d'aquesta manera determinar el flux màssic màxim a descarregar per la vàlvula.

4.3.2.2 Consideracions rellevants amb la norma ISO 4126-10

Primer de tot cal comprovar les limitacions que determina l'aplicació d'aquesta norma, tal i com es mostra a continuació.

$$T_{\text{red}} = \frac{305,6}{365,0} = 0,837 < 0,9 \quad (123)$$

$$p_{\text{red}} = \frac{1,379 \cdot 10^6}{4,620 \cdot 10^6} = 0,298 < 0,5 \quad (124)$$

Com es pot veure en les equacions anteriors, el model de la norma permet realitzar el disseny per al cas presentat anteriorment, ja que, tant la temperatura reduïda com la pressió reduïda estan per sota dels valors màxims permesos.

Un dels punts claus de la realització del càlcul amb la norma ISO 4126-10 és el factor de desequilibri durant l'alleujament de la vàlvula. La pròpia norma especifica que per a líquids o mescles bifàsiques amb un percentatge de vapor molt petit, s'ha de tenir en compte el factor N (no equilibri). En el nostre cas d'estudi, com hi ha una fracció de vapor del 50% no es tindrà en compte aquest desequilibri i per tant es considera que el fluid està en equilibri durant l'alleujament del fluid.

4.3.2.3 Consideracions rellevants de la norma GOST 12.2.085 (2017)

En aquest cas, la norma GOST 12.2.085 (2017) per a fluids que són bifàsics durant tot el procés d'alleujament, recomana emprar el mètode Omega per al càlcul de l'àrea requerida. El mètode Omega que s'explica a la norma parteix de la norma ISO 4126-10. Existeixen algunes adaptacions en les fórmules, respecte a la ISO 4126-10, per aquest motiu es realitzarà aquest mètode per poder comparar-lo amb el valor de la ISO 4126-10.

Per altra banda, com ja s'ha esmentat en l'apartat anterior, en aquest cas el factor de desequilibri no es tindrà en compte. El percentatge de vapor a l'entrada de la vàlvula d'alleujament de pressió és bastant elevat i per tant, es considera fluid en equilibri.

4.3.3 Resultats i discussió

En aquest apartat es mostren els resultats que s'han obtingut al realitzar el disseny preliminar de la vàlvula d'alleujament de pressió en el cas de propilè bifàsic, tenint en compte les consideracions presentades anteriorment respecte a cadascuna de les normatives.

A la taula 8 es mostren les diferents normatives emprades per al càlcul amb el seu annex corresponent que inclou el detall dels càlculs realitzats.

Taula 8. Normatives emprades per al càlcul i el seu annex corresponent amb el detall del càlcul realitzat.

Norma	Annex
API 520 Part 1 – 2020	A.2.1
ISO 4126-10	A.2.2
GOST 12.2.085 (2017)	A.2.3

Tot seguit, a la taula 9 es mostren els valors de l'àrea requerida de la vàlvula per alleujar el medi definit anteriorment, segons cadascun dels mètodes emprats per al càlcul.

Taula 9. Valors de l'àrea requerida de la vàlvula segons els mètodes de càlcul.

Norma	Àrea requerida (mm ²)
API 520 Part 1 – 2020	2992
ISO 4126-10	2852
GOST 12.2.085 (2017)	2706

Com es pot veure a la taula anterior, els valors de l'àrea requerida per aquest cas segons cada normativa emprada varien uns respecte als altres.

En aquest cas concret, el valor que s'ajusta més a la realitat és el de la norma API 520 Part 1 – 2020, ja que aquest mètode utilitza els valors de les propietats en diferents pressions durant l'alleujament. Per aquest motiu es considera el mètode més ajustat al càlcul.

Per altra banda, es considera que la ISO 4126-10 i la GOST 12.2.085 (2017), en el cas d'un medi bifàsic a l'entrada i sortida de la vàlvula, són dos mètodes que s'aproximen al mètode d'integració directa, és a dir, al valor de referència. De totes formes, es pot afirmar que aquests dos mètodes subdimensionen les vàlvules de seguretat per aquest escenari en concret.

4.4 Cas 3 – Líquid subrefredat a l'entrada

4.4.1 Descripció de l'estudi

El tercer cas d'estudi és el cas d'alleujament de propilè líquid subrefredat. A continuació, a la taula 10 es mostren les dades inicials del cas d'estudi.

Taula 10. Dades inicials del cas bifàsic.

Propietat	Valor
Flux màssic de descàrrega (kg/s)	12,60
Pressió d'alleujament (Pa)	6,895E+06
Contrapressió de la vàlvula (Pa)	1,013E+05
Temperatura d'alleujament (K)	302,6
Coefficient de descàrrega del líquid	0,720

A partir d'aquestes dades, s'ha realitzat el disseny de la vàlvula de seguretat. Cal esmentar que el coeficient de descàrrega per al càlcul de l'àrea requerida de la vàlvula és el valor mitjà de la casa Crosby.

A continuació, a la figura 12 es pot veure el diagrama de Mollier del propilè per al cas de líquid subrefredat.

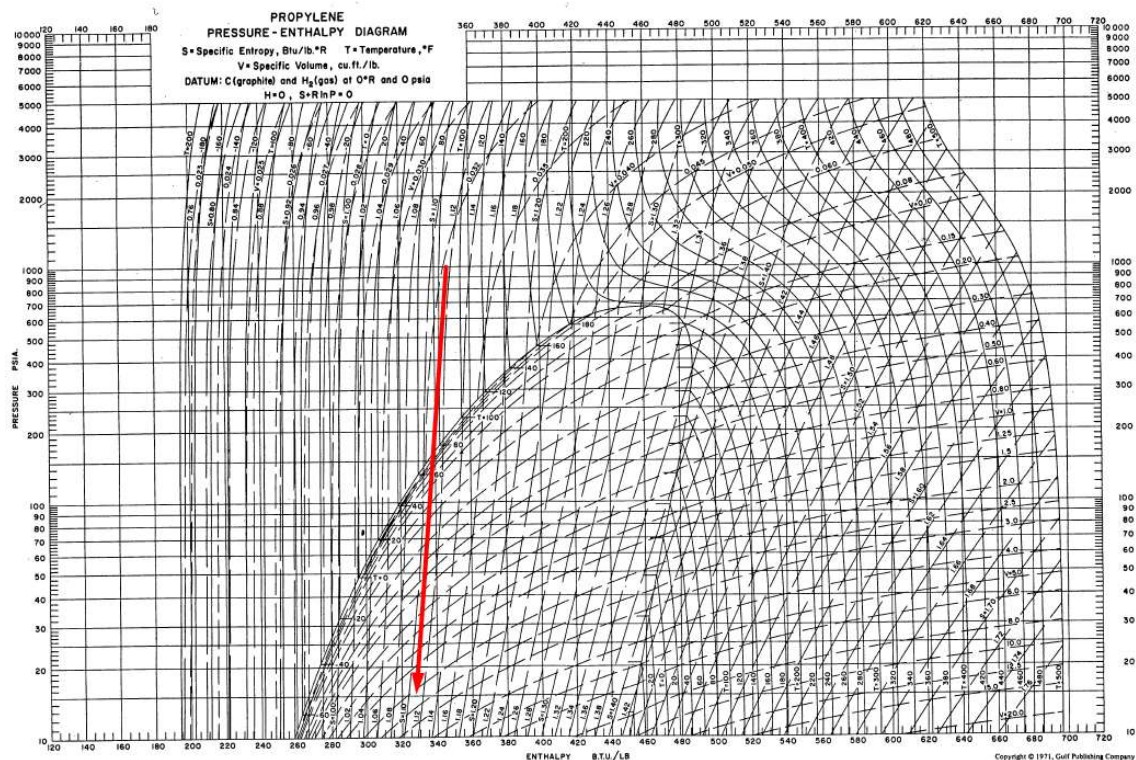


Figura 12. Diagrama de Mollier del propilè (líquid subrefredat).

Al diagrama s’ha dibuixat el procés pel qual el propilè passa durant l’alleujament de la sobrepressió. Com es pot observar, el punt de partida d’aquest cas és en la regió de líquid i a una certa distància de la línia de saturació, per aquest motiu el fluid està en estat de líquid subrefredat. Un cop realitzada l’expansió isentròpica, el fluid passa a estar en estat bifàsic a la pressió de sortida de la vàlvula.

4.4.2 Suposicions i metodologia

Primer de tot, s’ha d’indicar que el càlcul de les propietats del fluid s’han obtingut del programari ASPEN HYSYS V10 utilitzant Peng Robinson com equació d’estat. A partir d’aquí, s’han obtingut un conjunt de paràmetres essencials per al càlcul de la vàlvula. A la taula 11 es mostren aquests valors obtinguts.

Taula 11. Dades obtingudes d’Aspen Hysys V10.

Propietat	Valor	Unitats
Temperatura crítica	365,0	K
Pressió crítica	4,620E+06	Pa
Densitat de la mescla	517,0	kg/m ³
Volum específic de la mescla	1,934E-03	m ³ /kg
Pressió de saturació	1,283E+06	Pa
Densitat de la mescla al 90% de la pressió de saturació	507,7	kg/m ³
Volum específic de la mescla al 90% de la pressió de saturació	1,970E-03	m ³ /kg

4.4.2.1 Consideracions rellevants de la norma API 520 Part 1 – 2020

Primer de tot cal fer menció que les limitacions de la normativa respecte l’ús d’aquesta per al disseny de vàlvules d’alleujament de pressió és compleixen perfectament. La normativa indica que es pot realitzar el càlcul aplicant-la sempre i quant tinguis un fluid bifàsic a l’entrada, sortida o al recorregut de la vàlvula. En el nostre cas, a l’entrada de la vàlvula hi ha líquid

subrefredat que durant l'alleujament del fluid es realitza flash, i per tant a la sortida de la vàlvula acabes obtenint un fluid bifàsic, tal i com s'ha pogut veure a la figura 12.

La metodologia de la norma és l'ús del mètode d'integració directa, és a dir, la realització de diferents flash isentròpics que permeten l'obtenció dels paràmetres termodinàmics a varies pressions i d'aquesta manera determinar el flux màssic màxim a descarregar per la vàlvula.

4.4.2.2 Consideracions rellevants amb la norma ISO 4126-10

Primer de tot cal comprovar les limitacions que determinen l'aplicació d'aquesta norma, tal i com es mostra a continuació.

$$T_{\text{red}} = \frac{302,6}{365,0} = 0,829 < 0,9 \quad (125)$$

$$p_{\text{red}} = \frac{6,895 \cdot 10^6}{4,620 \cdot 10^6} = 1,492 > 0,5 \quad (126)$$

Com es pot veure en les equacions anteriors, el model de la norma permet realitzar el disseny per al cas esmentat anteriorment, ja que, en aquest cas, tot i que la pressió reduïda no compleix la norma, la temperatura reduïda sí que ho fa, i per tant, el mètode és vàlid solament complint una de les dues condicions.

4.4.2.3 Consideracions rellevants de la norma GOST 12.2.085 (2017)

Primer de tot, partint de la taula 1 i sabent que tenim líquid a l'entrada de la vàlvula i a la sortida, hi haurà una mescla bifàsica. S'han de comprovar les limitacions per determinar quin tipus de procediment de càlcul es realitzarà. A continuació es mostra la comprovació de les limitacions.

$$T_{\text{red}} = \frac{302,6}{365,0} = 0,829 < 0,9 \quad (127)$$

$$p_{\text{red}} = \frac{6,895 \cdot 10^6}{4,620 \cdot 10^6} = 1,492 > (1 + 1,25 \cdot (1 - 0,829)) = 1,214 \quad (128)$$

Com es pot veure en les equacions anterior, la temperatura reduïda i la pressió reduïda no compleixen les limitacions del cas de líquid – bifàsic. Per aquest motiu, el mètode que determina la norma que s'ha d'emprar és la consideració d'coeficient isentròpic constant utilitzant el mètode Omega, és a dir, el mètode descrit en la norma ISO 4126-10.

4.4.3 Resultats i discussió

En aquest apartat es mostren els resultats que s'han obtingut al realitzar el disseny preliminar de la vàlvula d'alleujament de pressió en el cas de propilè líquid subrefredat, tenint en compte les consideracions esmentades anteriorment respecte a cadascuna de les normatives.

A la taula 12 es mostren les diferents normatives emprades per al càlcul. En el seu annex corresponent es detalla el càlcul realitzat.

Taula 12. Normatives emprades per al càlcul i el seu annex corresponent amb el detall del càlcul realitzat.

Norma	Annex
API 520 Part 1 – 2020	A.3.1
ISO 4126-10	A.3.2

Tot seguit, a la taula 13 es mostren els valors de l'àrea requerida de la vàlvula per alleujar el medi definit anteriorment, segons cadascun dels mètodes emprats per al càlcul.

Taula 13. Valors de l'àrea requerida de la vàlvula segons els mètodes de càlcul.

Norma	Àrea requerida (mm ²)
API 520 Part 1 – 2020	260,0
ISO 4126-10	229,7

Com es pot veure en la taula anterior, els valors amb els dos mètodes emprats per al càlcul de propilè líquid subrefredat tenen una variació, un respecte l'altre.

Primer de tot cal fer menció que el valor més petit és el calculat amb la ISO 4126-10. En aquest cas la norma, tot i ser un líquid no utilitza el factor de desequilibri (retard d'ebullició). En aquest cas en concret, especifica un procediment de càlcul completament diferent.

Per altra banda, tenim el valor de l'API 520 Part 1 – 2020 calculat amb el mètode d'integració directa. En aquest cas el valor de l'àrea requerida és superior al calculat amb la ISO 4126-10.

Des de el meu punt de vista, probablement el valor que s'ajusta més a la realitat és el de la ISO 4126-10, ja que té un procediment concret per aquest cas específic, a diferència de l'API 520 Part 1 – 2020, que empra el mateix procediment per a tots els casos.

Tot i això, en aquest cas jo em quedaria amb el valor de l'API 520 Part 1 – 2020, ja que utilitza les propietats del fluid a diferents pressions de l'alleujament i a l'hora assegura no subdimensionar la vàlvula de seguretat.

4.5 Cas 4 – Vapor supercrític a l'entrada

4.5.1 Descripció de l'estudi

El quart cas d'estudi és el cas d'alleujament de propilè vapor supercrític. A continuació, a la taula 14 es mostren les dades inicials del cas d'estudi.

Taula 14. Dades inicials del cas bifàsic.

Propietat	Valor
Flux màssic de descàrrega (kg/s)	12,60
Pressió d'alleujament (Pa)	6,895E+06
Contrapressió de la vàlvula (Pa)	1,013E+05
Temperatura d'alleujament (K)	410,9

A partir d'aquestes dades, s'ha realitzat el disseny de la vàlvula de seguretat.

A continuació, a la figura 13 es pot veure el diagrama de Mollier del propilè per al cas de vapor supercrític.

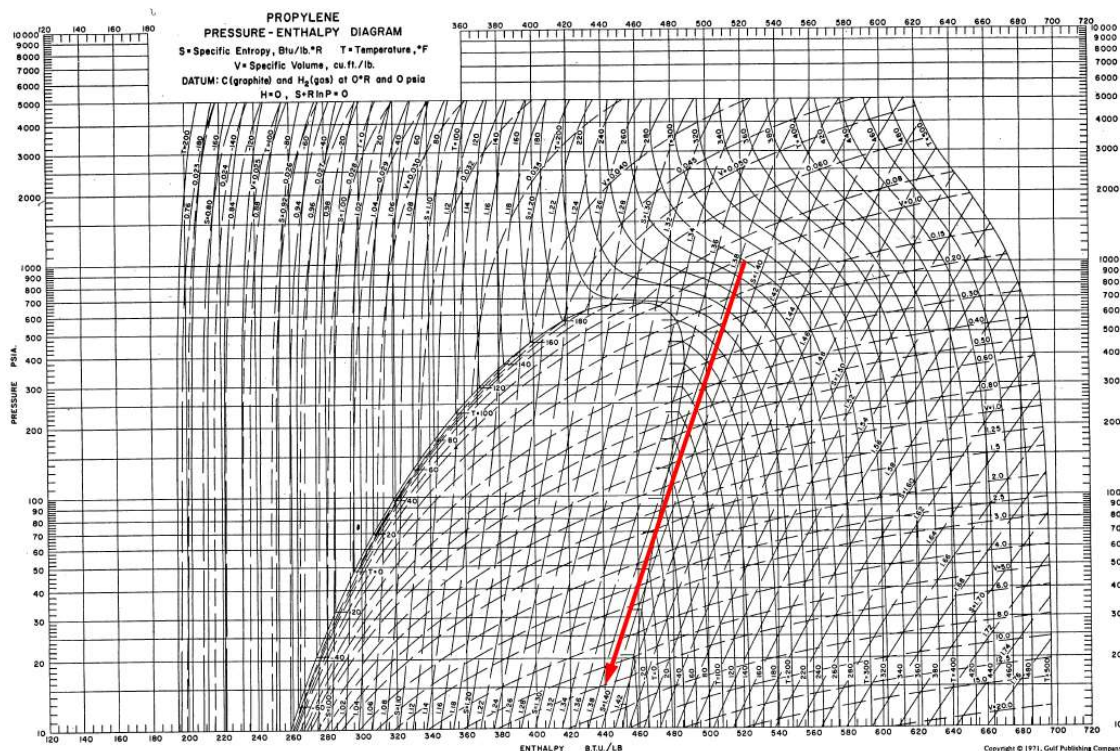


Figura 13. Diagrama de Mollier del propilè (vapor supercrític).

Al diagrama s’ha dibuixat el procés pel qual el propilè passa durant l’alleujament de la sobrepressió. Com es pot observar, el punt de partida d’aquest cas és en la regió de vapor supercrític. Un cop realitzada l’expansió isentròpica, el fluid passa a estar en estat bifàsic a la sortida de la vàlvula, ja que com es pot veure, el fluid traspasa la línia de saturació del diagrama mostrat.

4.5.2 Suposicions i metodologia

Primer de tot, s’ha d’esmentar que el càlcul de les propietats del fluid s’ha obtingut del programari ASPEN HYSYS V10 utilitzant Peng Robinson com equació d’estat. A partir d’aquí s’han obtingut un conjunt de paràmetres essencials per al càlcul de la vàlvula. A la taula 15 es mostren aquests valor obtinguts.

Taula 15. Dades obtingudes d’Aspen Hysys V10.

Propietat	Valor	Unitats
Temperatura crítica	365,0	K
Pressió crítica	4,620E+06	Pa
Densitat de la mescla	153,2	kg/m ³

4.5.2.1 Consideracions rellevants de la norma API 520 Part 1 – 2020

Primer de tot cal fer menció que les limitacions de la normativa respecte l’ús d’aquesta per al disseny de vàlvules d’alleujament de pressió és compleixen perfectament. La normativa indica que es pot realitzar el càlcul aplicant-la sempre i quant tinguis un fluid bifàsic a l’entrada, sortida o al recorregut de la vàlvula. En el nostre cas, a l’entrada de la vàlvula hi ha vapor supercrític que durant l’alleujament del fluid es realitza flash. Per tant a la sortida de la vàlvula acabes obtenint un fluid bifàsic, tal i com s’ha pogut veure a la figura 13.

La metodologia de la norma és l'ús del mètode d'integració directa, és a dir, la realització de diferents flash isentròpics que permeten l'obtenció dels paràmetres termodinàmics a varies pressions i d'aquesta manera determinar el flux màssic màxim a descarregar per la vàlvula.

4.5.2.2 Consideracions rellevants amb la norma ISO 4126-10

Primer de tot cal comprovar les limitacions que determina l'aplicació d'aquesta norma, tal i com es mostra a continuació.

$$T_{\text{red}} = \frac{410,9}{365,0} = 1,126 > 0,9 \quad (129)$$

$$p_{\text{red}} = \frac{6,895 \cdot 10^6}{4,620 \cdot 10^6} = 1,492 > 0,5 \quad (130)$$

Com es pot veure en les equacions anteriors, el model de la ISO 4126-10 no permet realitzar el càlcul de l'àrea requerida de la vàlvula per a casos amb vapor supercrític.

4.5.2.3 Consideracions rellevants de la norma GOST 12.2.085 (2017)

Com ja s'ha esmentat anteriorment, la norma GOST 12.2.085 (2017) per aquest cas, de vapor supercrític, recomana emprar el mètode d'integració directa, és a dir, el mateix que recomana l'API 520 Part 1 – 2020.

4.5.3 Resultats i discussió

En aquest apartat es mostren els resultats que s'han obtingut de realitzar el disseny preliminar de la vàlvula d'alleujament de pressió en el cas de propilè vapor supercrític, tenint en compte les consideracions mencionades anteriorment respecte a cadascuna de les normatives.

A la taula 16 es mostren les diferents normatives emprades per al càlcul amb el seu annex corresponent, on es troba el detall del càlcul realitzat.

Taula 16. Normativa emprada per al càlcul i el seu annex corresponent amb el detall del càlcul realitzat.

Norma	Annex
API 520 Part 1 – 2020	A.4.1

Tot seguit, a la taula 17 es mostren els valors de l'àrea requerida de la vàlvula per alleujar el medi definit anteriorment, segons cadascun dels mètodes emprats per al càlcul.

Taula 17. Valor de l'àrea requerida de la vàlvula segons mètode de càlcul.

Norma	Àrea requerida (mm ²)
API 520 Part 1 – 2020	757,0

En aquest cas, solament s'ha pogut realitzar el càlcul de l'àrea requerida amb el mètode d'integració que presenta la norma API 520 Part 1 – 2020 i la norma GOST 12.2.085 (2017). Per aquest motiu no es pot comparar el resultat final amb altres mètodes de càlcul.

Es pot considerar que el mètode s'intenta aproximar el màxim a la realitat, degut a que utilitza l'expansió isentròpica en petits intervals per emprar els valors de les propietats en cada estat durant l'alleujament del fluid.

4.6 Cas 5 – Líquid supercrític a l'entrada

4.6.1 Descripció de l'estudi

El cinquè cas d'estudi és el cas d'alleujament de propilè líquid supercrític. A continuació, a la taula 18 es mostren les dades inicials del cas d'estudi.

Taula 18. Dades inicials del cas bifàsic.

Propietat	Valor
Flux màssic de descàrrega (kg/s)	12,60
Pressió d'alleujament (Pa)	6,895E+06
Contrapressió de la vàlvula (Pa)	1,013E+05
Temperatura d'alleujament (K)	377,6

A partir d'aquestes dades, s'ha realitzat el disseny de la vàlvula de seguretat.

A continuació, a la figura 14 es pot veure el diagrama de Mollier del propilè per al cas de líquid supercrític bifàsic.

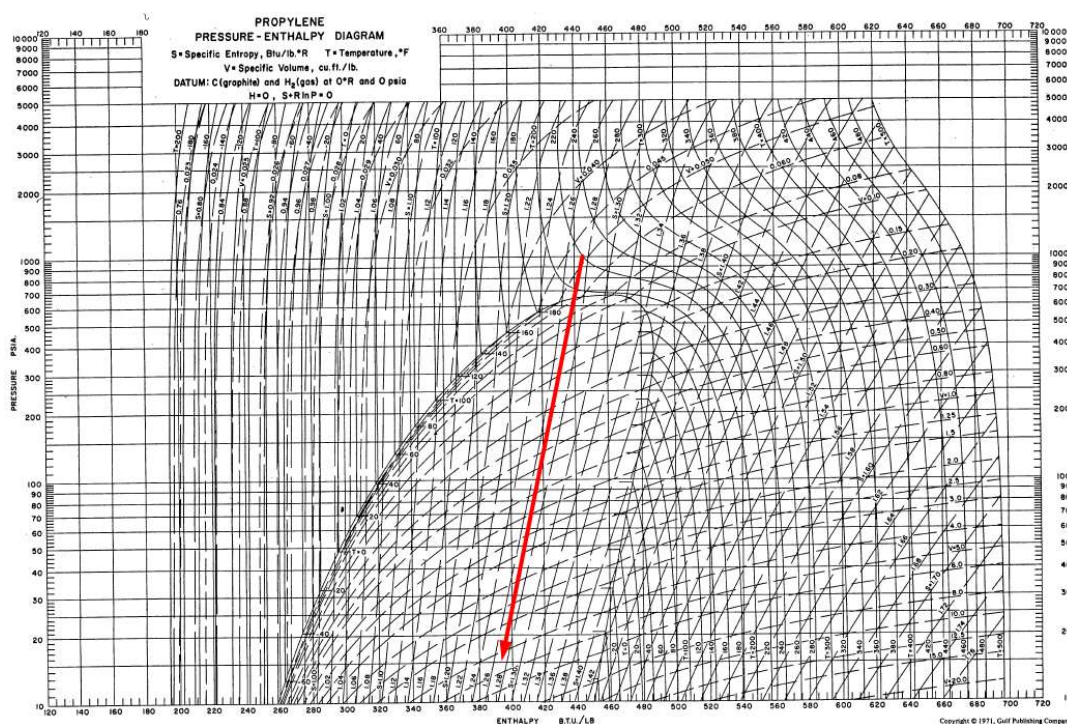


Figura 14. Diagrama de Mollier del propilè (líquid supercrític).

Al diagrama s'ha dibuixat el procés pel qual el propilè passa durant l'alleujament de la sobrepressió. Com es pot observar, el punt de partida d'aquest cas és en la regió de líquid supercrític. Un cop realitzada l'expansió isentròpica, el fluid passa a estar en estat bifàsic a la sortida de la vàlvula, ja que com es pot veure, el fluid passa la línia de saturació del diagrama mostrat.

4.6.2 Suposicions i metodologia

Primer de tot, s'ha d'esmentar que el càlcul de les propietats del fluid s'han obtingut del programari ASPEN HYSYS V10 utilitzant Peng Robinson com equació d'estat. A partir d'aquí, s'han obtingut un conjunt de paràmetres essencials per al càlcul de la vàlvula. A la taula 19 es mostren aquests valor obtinguts.

Taula 19. Dades obtingudes d'Aspen Hysys V10.

Propietat	Valor	Unitats
Temperatura crítica	365,0	K
Pressió crítica	4,620E+06	Pa
Densitat de la mescla	305,3	kg/m ³

4.6.2.1 Consideracions rellevants de la norma API 520 Part 1 – 2020

Primer de tot cal fer menció que les limitacions de la normativa respecte l'ús d'aquesta per al disseny de vàlvules d'alleujament de pressió és compleixen perfectament. La normativa indica que es pot realitzar el càlcul aplicant-la sempre i quant tinguis un fluid bifàsic a l'entrada, sortida o al recorregut de la vàlvula. En el nostre cas, a l'entrada de la vàlvula hi ha líquid supercrític que durant l'alleujament del fluid es realitza una condensació, i per tant a la sortida de la vàlvula hi ha un fluid bifàsic, tal i com s'ha pogut veure a la figura 14.

La metodologia de la norma és l'ús del mètode d'integració directa, és a dir, la realització de diferents flash isentròpics que permeten l'obtenció dels paràmetres termodinàmics a varies pressions i d'aquesta manera determinar el flux màssic màxim a descarregar per la vàlvula.

4.6.2.2 Consideracions rellevants amb la norma ISO 4126-10

Primer de tot cal comprovar les limitacions que determinen l'aplicació d'aquesta norma, tal i com es mostra a continuació.

$$T_{\text{red}} = \frac{410,9}{365,0} = 1,035 > 0,9 \quad (131)$$

$$P_{\text{red}} = \frac{6,895 \cdot 10^6}{4,620 \cdot 10^6} = 1,492 > 0,5 \quad (132)$$

Com es pot veure en les equacions anteriors, el model de la ISO 4126-10 no permet realitzar el càlcul de l'àrea requerida de la vàlvula per a casos amb líquid supercrític bifàsic.

4.6.2.3 Consideracions rellevants de la norma GOST 12.2.085 (2017)

Com ja s'ha mencionat anteriorment, la norma GOST 12.2.085 (2017) per aquest cas, de líquid supercrític bifàsic, recomana emprar el mètode d'integració directa, és a dir, el mateix que recomana la API 520 Part 1 – 2020.

4.6.3 Resultats i discussió

En aquest apartat es mostren els resultats que s'han obtingut de realitzar el disseny preliminar de la vàlvula d'alleujament de pressió en el cas de propilè líquid supercrític bifàsic. S'han tingut en compte les consideracions esmentades anteriorment respecte a cadascuna de les normatives.

A la taula 20 es mostren les diferents normatives emprades per al càlcul amb el seu annex corresponent, que inclou el càlcul realitzat.

Taula 20. Normativa emprada per al càlcul i el seu annex corresponent amb el detall del càlcul realitzat.

Norma	Annex
API 520 Part 1 – 2020	A.5.1

Tot seguit, a la taula 21 es mostren els valors de l'àrea requerida de la vàlvula per alleujar el medi definit anteriorment, segons el mètode emprat per al càlcul.

Taula 21. Valor de l'àrea requerida de la vàlvula segons mètode de càlcul.

Norma	Àrea requerida (mm ²)
API 520 Part 1 – 2020	428,5

En aquest cas, solament s'ha pogut realitzar el càlcul de l'àrea requerida amb el mètode d'integració que presenta la norma API 520 Part 1 – 2020 i la norma GOST 12.2.085 (2017). Per aquest motiu no es pot comparar el resultat final amb altres mètodes de càlcul.

Es pot considerar que el mètode s'intenta aproximar el màxim a la realitat, degut a que utilitza l'expansió isentròpica en petits intervals per emprar els valors de les propietats en cada estat durant l'alleujament del fluid.

4.7 Cas 6 – Vapor supercrític a l'entrada i bifàsic a la sortida

4.7.1 Descripció de l'estudi

El sisè cas d'estudi és el cas d'alleujament de propilè vapor supercrític amb condensació a la sortida. A continuació, a la taula 22 es mostren les dades inicials del cas d'estudi.

Taula 22. Dades inicials del cas bifàsic.

Propietat	Valor
Flux màssic de descàrrega (kg/s)	12,60
Pressió d'alleujament (Pa)	5,516E+06
Contrapressió de la vàlvula (Pa)	1,013E+05
Temperatura d'alleujament (K)	377,0

A partir d'aquestes dades, s'ha realitzat el disseny de la vàlvula de seguretat.

A continuació, a la figura 15 es pot veure el diagrama de Mollier del propilè per al cas de vapor supercrític bifàsic.

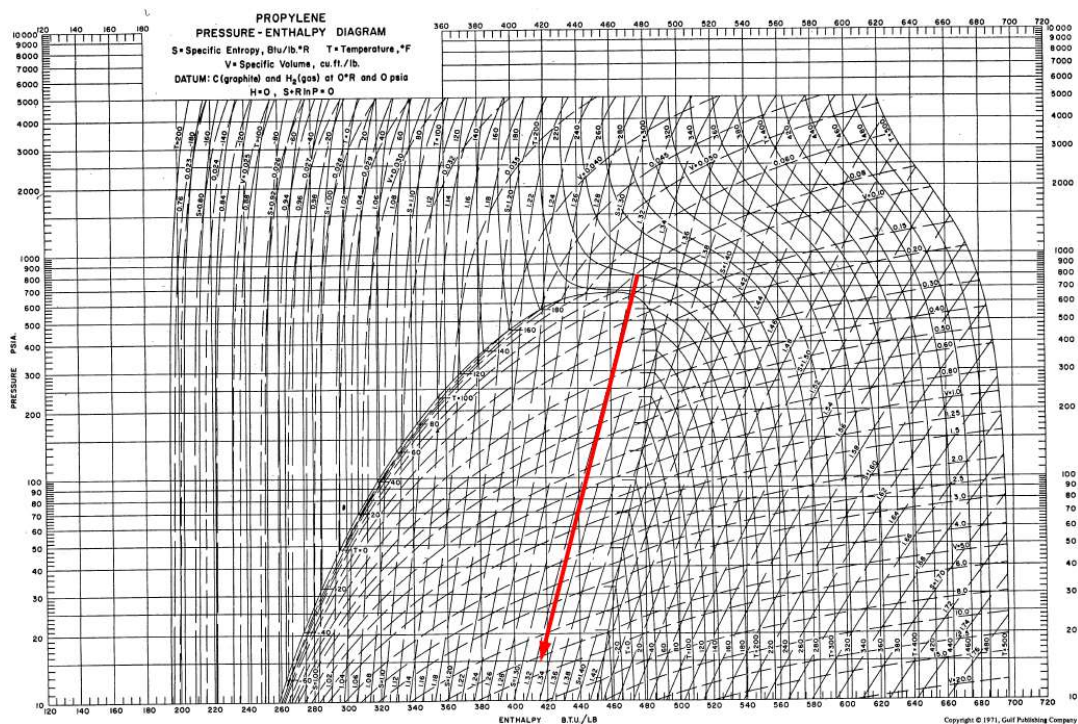


Figura 15. Diagrama de Mollier del propilè (vapor supercrític).

Al diagrama s'ha dibuixat el procés pel qual el propilè passa durant l'alleujament de la sobrepressió. Com es pot observar, el punt de partida d'aquest cas és en la regió de vapor supercrític. Un cop realitzada l'expansió isentròpica el fluid passa a estar en estat bifàsic a la sortida de la vàlvula, ja que com es pot veure, el fluid passa la línia de saturació del diagrama mostrat.

4.7.2 Suposicions i metodologia

Primer de tot, s'ha d'esmentar que el càlcul de les propietats del fluid s'ha obtingut del programari ASPEN HYSYS V10 utilitzant Peng Robinson com equació d'estat. A partir d'aquí s'han obtingut un conjunt de paràmetres essencials per al càlcul de la vàlvula. En la taula 23 es mostren aquests valor obtinguts.

Taula 23. Dades obtingudes d'Aspen Hysys V10.

Propietat	Valor	Unitats
Temperatura crítica	365,0	K
Pressió crítica	4,620E+06	Pa
Densitat de la mescla	198,0	kg/m ³

4.7.2.1 Consideracions rellevants de la norma API 520 Part 1 – 2020

Primer de tot cal fer menció que les limitacions de la normativa respecte l'ús d'aquesta per al disseny de vàlvules d'alleujament de pressió és compleixen perfectament. La normativa indica que es pot realitzar el càlcul aplicant-la sempre i quant tinguis un fluid bifàsic a l'entrada, sortida o al recorregut de la vàlvula. En el nostre cas, a l'entrada de la vàlvula hi ha vapor supercrític que durant l'alleujament del fluid es realitza una condensació, i per tant a la sortida de la vàlvula hi ha un fluid bifàsic, tal i com s'ha pogut veure a la figura 15.

La metodologia de la norma és l'ús del mètode d'integració directa, és a dir, la realització de diferents flash isentròpics que permeten l'obtenció dels paràmetres termodinàmics a varies pressions i d'aquesta manera determinar el flux màssic màxim a descarregar per la vàlvula.

4.7.2.2 Consideracions rellevants amb la norma ISO 4126-10

Primer de tot cal comprovar les limitacions que determinen l'aplicació d'aquesta norma, tal i com es mostra a continuació.

$$T_{red} = \frac{377,0}{365,0} = 1,033 > 0,9 \quad (133)$$

$$p_{red} = \frac{5,516 \cdot 10^6}{4,620 \cdot 10^6} = 1,194 > 0,5 \quad (134)$$

Com es pot veure en les equacions anteriors, el model de la ISO 4126-10 no permet realitzar el càlcul de l'àrea requerida de la vàlvula per a casos amb vapor supercrític.

4.7.2.3 Consideracions rellevants de la norma GOST 12.2.085 (2017)

Com ja s'ha esmentat anteriorment, la norma GOST 12.2.085 (2017) per aquest cas, de vapor supercrític bifàsic, recomana emprar el mètode d'integració directa, és a dir, el mateix que recomana la API 520 Part 1 – 2020.

4.7.3 Resultats i discussió

En aquest apartat es mostren els resultats que s'han obtingut de realitzar el disseny preliminar de la vàlvula d'alleujament de pressió en el cas de propilè vapor supercrític bifàsic, tenint en compte les consideracions mencionades anteriorment respecte a cadascuna de les normatives.

A la taula 24 es mostren les diferents normatives emprades per al càlcul amb el seu annex corresponent on es troba el càlcul realitzat.

Taula 24. Normativa emprada per al càlcul i el seu annex corresponent amb el detall del càlcul realitzat.

Norma	Annex
API 520 Part 1 – 2020	A.6.1

Tot seguit, a la taula 25 es mostren els valors de l'àrea requerida de la vàlvula per alleujar el medi definit anteriorment segons cadascun dels mètodes emprats per al càlcul.

Taula 25. Valor de l'àrea requerida de la vàlvula segons mètode de càlcul.

Norma	Àrea requerida (mm ²)
API 520 Part 1 – 2020	799,9

En aquest cas, solament s'ha pogut realitzar el càlcul de l'àrea requerida amb el mètode d'integració que esmenta la norma API 520 Part 1 – 2020 i la norma GOST 12.2.085 (2017). Per aquest motiu no es pot comparar el resultat final amb altres mètodes de càlcul.

Es pot considerar que el mètode s'intenta aproximar el màxim a la realitat, degut a que utilitza l'expansió isentròpica en petits intervals per emprar els valors de les propietats en cada estat durant l'alleujament del fluid.

4.8 Cas 7 – Líquid saturat multicomponent a l'entrada

4.8.1 Descripció de l'estudi

El setè cas d'estudi és el cas d'alleujament d'un corrent format 20% per età i 80% hexà, en estat líquid saturat. A continuació, a la taula 26 es mostren les dades inicials del cas d'estudi. Aquest cas concret correspon a l'exemple del CCPS del 2017 (Guidelines for pressure relief systems and effluent handling systems).

Taula 26. Dades inicials del cas de líquid saturat.

Propietat	Valor
Fracció de vapor	0,023
Flux màssic de descàrrega (kg/s)	7,334
Pressió d'alleujament (Pa)	1,000E+06
Contrapressió de la vàlvula (Pa)	1,013E+05
Coefficient de descàrrega del gas	0,953
Coefficient de descàrrega del líquid	0,720

A partir d'aquestes dades, s'ha realitzat el disseny de la vàlvula de seguretat. Cal indicar que els coeficients de descàrrega per al càlcul de l'àrea requerida de la vàlvula són els valors mitjans de la casa Crosby.

4.8.2 Suposicions i metodologia

Primer de tot, s'ha d'esmentar que el càlcul de les propietats del fluid s'han obtingut del programari ASPEN HYSYS V10 utilitzant Peng Robinson com equació d'estat. A partir d'aquí, s'han obtingut un conjunt de paràmetres essencials per al càlcul de la vàlvula. A la taula 27 es mostren aquests valor obtinguts.

Taula 27. Dades obtingudes d'Aspen Hysys V10.

Propietat	Valor	Unitats
Temperatura	329,0	K
Temperatura crítica	492,7	K
Pressió crítica	4,156E+06	Pa
Densitat del vapor	13,64	kg/m ³
Volum específic del vapor	7,333E-02	m ³ /kg
Densitat del líquid	604,1	kg/m ³
Volum específic del líquid	1,655E-03	m ³ /kg
Densitat de la mescla	417,5	kg/m ³
Volum específic de la mescla	2,395E-03	m ³ /kg
Densitat de la mescla al 90% de la pressió d'entrada a la PRV	310,7	kg/m ³
Volum específic de la mescla al 90% de la pressió d'entrada a la PRV	3,219E-03	m ³ /kg
Coefficient isentròpic de fase gas	1,006	-
Calor de vaporització	5,261E+05	J/kg
Capacitat calorífica del líquid	2409	J/(kg·K)

4.8.2.1 Consideracions rellevants de la norma API 520 Part 1 – 2020

Primer de tot cal fer esment que les limitacions de la normativa respecte el seu ús per al disseny de vàlvules d'alleujament de pressió és compleixen perfectament. La normativa indica que es pot realitzar el càlcul aplicant-la sempre i quant tinguis un fluid bifàsic a l'entrada, sortida o al recorregut de la vàlvula. En el nostre cas, a l'entrada de la vàlvula hi ha líquid

saturat que durant l'alleujament del fluid es realitza flash, i per tant a la sortida de la vàlvula hi ha un fluid bifàsic.

La metodologia de la norma és l'ús del mètode d'integració directa, és a dir, la realització de diferents flash isentròpics que permeten l'obtenció dels paràmetres termodinàmics a varies pressions i d'aquesta manera determinar el flux màssic màxim a descarregar per la vàlvula.

4.8.2.2 Consideracions rellevants amb la norma ISO 4126-10

Primer de tot cal comprovar les limitacions que determinen l'aplicació d'aquesta norma, tal i com es mostra a continuació.

$$T_{\text{red}} = \frac{329,0}{492,7} = 0,668 < 0,9 \quad (135)$$

$$p_{\text{red}} = \frac{1,000 \cdot 10^6}{4,156 \cdot 10^6} = 0,241 < 0,5 \quad (136)$$

Com es pot veure en les equacions anteriors, el model de la norma permet realitzar el disseny per al cas presentat anteriorment, ja que, tant la temperatura reduïda com la pressió reduïda estan per sota dels valors màxims permesos.

Un dels punts claus de la realització del càlcul amb la norma ISO 4126-10 és que considera el no equilibri durant l'alleujament de la vàlvula. La pròpia norma especifica que per a líquids o mescles bifàsiques amb un percentatge de vapor molt petit, s'ha de tenir en compte el factor N (no equilibri). Tot i això, també s'ha realitzat el càlcul de l'àrea requerida de la vàlvula per condicions d'equilibri, per així poder comparar el mètode d'integració directa, el qual no té en compte el desequilibri.

4.8.2.3 Consideracions rellevants de la norma GOST 12.2.085 (2017)

Primer de tot, partint de la taula 1 i sabent que tenim líquid a l'entrada de la vàlvula i a la sortida hi haurà una mescla bifàsica. S'han de comprovar les limitacions per determinar quin tipus de procediment de càlcul es realitzarà. A continuació es mostra la comprovació de les limitacions.

$$T_{\text{red}} = \frac{329,0}{492,7} = 0,668 < 0,9 \quad (137)$$

$$p_{\text{red}} = \frac{1,000 \cdot 10^6}{4,156 \cdot 10^6} = 0,241 < (1 + 1,25 \cdot (1 - 0,668)) = 1,415 \quad (138)$$

Com es pot veure en les equacions anteriors, la temperatura reduïda i la pressió reduïda compleixen les limitacions del primer cas de líquid – bifàsic. Per aquest motiu el mètode que determina la norma que s'ha d'emprar és la consideració de fluid incompressible utilitzant el mètode Omega, és a dir, el mètode descrit en la norma ISO 4126-10.

Aquest cas té una variació respecte el cas 1 – líquid saturat. Aquesta variació és que l'alimentació de la vàlvula de seguretat és multicomponent. Per aquest cas en concret, la norma GOST 12.2.085 (2017) dona una alternativa al càlcul del paràmetre Omega i és que, utilitza les propietats de la mescla realitzant un flash isentròpic al 90% de la pressió d'alleujament de la vàlvula.

4.8.3 Resultats i discussió

En aquest apartat es mostren els resultats que s'han obtingut al realitzar el disseny preliminar de la vàlvula d'alleujament de pressió en el cas presentat, tenint en compte les consideracions esmentades anteriorment respecte a cadascuna de les normatives.

A la taula 28 es mostren les diferents normatives emprades per al càlcul, amb el seu annex corresponent on es detalla el càlcul realitzat.

Taula 28. Normatives emprades per al càlcul i el seu annex corresponent amb el detall del càlcul realitzat.

Norma	Annex
API 520 Part 1 – 2020	A.7.1
ISO 4126-10 (Tenint en compte el desequilibri)	A.7.2
ISO 4126-10 (Sense tenir en compte el desequilibri)	A.7.3
GOST 12.2.085 (2017)	A.7.4

Tot seguit, a la taula 29 es mostren els valors de l'àrea requerida de la vàlvula per alleujar el medi definit anteriorment, segons cadascun dels mètodes emprats per al càlcul.

Taula 29. Valors de l'àrea requerida de la vàlvula segons els mètodes de càlcul.

Norma	Àrea requerida (mm ²)
API 520 Part 1 – 2020	1008
ISO 4126-10 (Tenint en compte el desequilibri)	960,2
ISO 4126-10 (Sense tenir en compte el desequilibri)	1293
GOST 12.2.085 (2017)	1002

Com es pot veure en els resultats mostrats anteriorment, hi ha 3 valors diferenciats entre ells. Per una banda, tenim el valor de la ISO 4126-10, que té en compte el desequilibri, ja que hi ha líquid a l'entrada de la vàlvula. Aquest és el valor més petit dels quatre mètodes utilitzats per al càlcul de l'àrea requerida i té una diferència d'aproximadament del 4% respecte el següent valor més proper.

Tot seguit, tenim dos valors molt similars amb una diferència d'aproximadament l'1% entre ells. Aquests valors s'han calculat amb l'API 520 Part 1 – 2020 i la GOST 12.2.085 (2017). En aquest cas la diferència entre aquests valors i el de la ISO 4126-10, que té en compte el desequilibri, és que en aquest últim mètode s'ha tingut en consideració el desequilibri del fluid per ser líquid. En canvi en els altres dos mètodes no s'ha tingut en compte, tot i que aquests valors s'aproximen bastant al de referència de la ISO 4126-10 tenint en compte el desequilibri.

Per últim, tenim el valor de la ISO 4126-10 sense tenir en compte el desequilibri, aquest càlcul té una diferència d'aproximadament del 35% respecte el valor calculat amb la mateixa norma que té en compte el desequilibri. En aquest cas, aquest últim valor sobredimensiona de forma destacada l'àrea requerida respecte el cas de contemplar que es disposa d'un fluid en desequilibri.

4.9 Cas 8 – Flux bifàsic multicomponent a l'entrada

4.9.1 Descripció de l'estudi

El vuitè cas d'estudi és el cas d'alleujament d'una mescla de diferents compostos en estat líquid i vapor. A continuació s'indica la composició molar del corrent:

- 21,55% Etilè
- 3,140% Età
- 70,84% Propilè
- 4,180% Propà
- 0,150% n-heptà
- 0,030% Metà

- 0,110% Hidrogen

A continuació, a la taula 30 es mostren les dades inicials del cas d'estudi.

Taula 30. Dades inicials del cas bifàsic.

Propietat	Valor
Flux màssic de descàrrega (kg/s)	7,334
Temperatura d'alleujament (K)	306,1
Pressió d'alleujament (Pa)	2,851E+06
Contrapressió de la vàlvula (Pa)	1,013E+05
Coeficient de descàrrega del gas	0,953
Coeficient de descàrrega del líquid	0,720

A partir d'aquestes dades, s'ha realitzat el disseny de la vàlvula de seguretat. Cal esmentar que els coeficients de descàrrega per al càlcul de l'àrea requerida de la vàlvula són els valors mitjans de la casa Crosby.

4.9.2 Suposicions i metodologia

Primer de tot, s'ha d'indicar que el càlcul de les propietats del fluid s'han obtingut del programari ASPEN HYSYS V10 utilitzant Peng Robinson com equació d'estat. A partir d'aquí s'han obtingut un conjunt de paràmetres essencials per al càlcul de la vàlvula. En la taula 31 es mostren aquests valor obtinguts.

Taula 31. Dades obtingudes d'Aspen Hysys V10.

Propietat	Valor	Unitats
Fracció de vapor	0,281	-
Temperatura crítica	346,6	K
Pressió crítica	5,651E+06	Pa
Densitat del vapor	52,04	kg/m ³
Volum específic del vapor	1,921E-02	m ³ /kg
Densitat del líquid	447,0	kg/m ³
Volum específic del líquid	2,237E-03	m ³ /kg
Densitat de la mescla	153,3	kg/m ³
Volum específic de la mescla	6,523E-03	m ³ /kg
Densitat de la mescla al 90% de la pressió d'entrada a la PRV	131,1	kg/m ³
Volum específic de la mescla al 90% de la pressió d'entrada a la PRV	7,629E-03	m ³ /kg
Coeficient isentròpic de fase gas	1,125	-
Calor de vaporització	4,446E+05	J/kg
Capacitat calorífica del líquid	3372	J/(kg·K)
Capacitat calorífica del gas	2256	J/(kg·K)
Factor de compressibilitat	0,714	-
Constant dels gasos	225,2	J/(kg·K)

4.9.2.1 Consideracions rellevants de la norma API 520 Part 1 – 2020

Primer de tot cal fer menció que les limitacions de la normativa respecte l'ús d'aquesta per al disseny de vàlvules d'alleujament de pressió és compleixen perfectament. La normativa indica que es pot realitzar el càlcul aplicant-la sempre i quant tinguis un fluid bifàsic a l'entrada, sortida o al recorregut de la vàlvula. En el nostre cas, a l'entrada de la vàlvula hi ha un fluid bifàsic, i per tant a la sortida de la vàlvula acabes obtenint un fluid bifàsic també.

La metodologia de la norma és l'ús del mètode d'integració directa, és a dir, la realització de diferents flash isentròpics que permeten l'obtenció dels paràmetres termodinàmics a varies pressions i d'aquesta manera determinar el flux màssic màxim a descarregar per la vàlvula.

4.9.2.2 Consideracions rellevants amb la norma ISO 4126-10

Primer de tot cal comprovar les limitacions que determinen l'aplicació d'aquesta norma, tal i com es mostra a continuació.

$$T_{\text{red}} = \frac{306,2}{345,6} = 0,886 < 0,9 \quad (139)$$

$$p_{\text{red}} = \frac{2,851 \cdot 10^6}{5,651 \cdot 10^6} = 0,505 > 0,5 \quad (140)$$

Com es pot veure en les equacions anteriors, el model de la norma permet realitzar el disseny per al cas esmentat anteriorment, ja que, es compleix la condició de la temperatura reduïda i la condició de la pressió reduïda es pot considerar que també. Tot i això, la norma et permet utilitzar-la sempre i quan una de les dues condicions sigui correcta.

Un dels punts claus de la realització del càlcul amb la norma ISO 4126-10 és el factor de desequilibri durant l'alleujament de la vàlvula. La pròpia norma especifica que per a líquids o mescles bifàsiques amb un percentatge de vapor molt petit, s'ha de tenir en compte el factor N (no equilibri). En el nostre cas d'estudi, com hi ha una fracció de vapor del 50% no es tindrà en compte aquest desequilibri i per tant es considera que el fluid està en equilibri durant l'alleujament del fluid.

4.9.2.3 Consideracions rellevants de la norma GOST 12.2.085 (2017)

En aquest cas, la norma GOST 12.2.085 (2017) per a fluids que són bifàsics durant tot el procés d'alleujament, recomana emprar el mètode Omega per al càlcul de l'àrea requerida.

Aquest cas té una variació respecte el cas 2 – bifàsic. Aquesta variació és que l'alimentació de la vàlvula de seguretat és multicomponent. Per aquest cas en concret, la norma GOST 12.2.085 (2017) dona una alternativa al càlcul del paràmetre Omega i és que, utilitza les propietats de la mescla realitzant un flash isentròpic al 90% de la pressió d'alleujament de la vàlvula.

4.9.3 Resultats i discussió

En aquest apartat es mostren els resultats que s'han obtingut al realitzar el disseny preliminar de la vàlvula d'alleujament de pressió en el cas d'un corrent multicomponent bifàsic, tenint en compte les consideracions presentades anteriorment respecte a cadascuna de les normatives.

A la taula 32 es mostren les diferents normatives emprades per al càlcul amb el seu annex corresponent que detalla el càlcul realitzat.

Taula 32. Normatives emprades per al càlcul i el seu annex corresponent amb el detall del càlcul realitzat.

Norma	Annex
API 520 Part 1 – 2020	A.8.1
ISO 4126-10	A.8.2
GOST 12.2.085 (2017)	A.8.3

Tot seguit, a la taula 33 es mostren els valors de l'àrea requerida de la vàlvula per alleujar el medi definit anteriorment segons cadascun dels mètodes emprats per al càlcul.

Taula 33. Valors de l'àrea requerida de la vàlvula segons els mètodes de càlcul.

Norma	Àrea requerida (mm ²)
API 520 Part 1 – 2020	776,4
ISO 4126-10	703,4
GOST 12.2.085 (2017)	762,7

Com es pot veure a la taula anterior, els valors de l'àrea requerida per aquest cas, segons cada normativa emprada, varien uns respecte als altres.

En aquest cas en concret, el valor que s'ajusta més a la realitat és el de la norma API 520 Part 1 – 2020, ja que aquest mètode utilitza els valors de les propietats en diferents pressions durant l'alleujament. Per aquest motiu es considera el mètode més ajustat al càlcul.

Per altra banda, es considera que la ISO 4126-10 i la GOST 12.2.085 (2017), en el cas d'un medi bifàsic a l'entrada i sortida de la vàlvula, són dos mètodes que s'aproximen al mètode d'integració directa, és a dir, al valor de referència. Tot i això es pot dir que aquests dos mètodes subdimensionen les vàlvules de seguretat per aquest escenari en concret.

5 Conclusions

En aquest treball s'ha realitzat una anàlisi de tres normatives diferents per a realitzar el càlcul de l'àrea requerida d'una vàlvula d'alleujament de pressió per a fluids amb dues fases, ja sigui a l'entrada de la vàlvula, durant l'alleujament o a la sortida.

Aquesta anàlisi s'ha realitzat amb la finalitat d'obtenir unes recomanacions útils de disseny per als enginyers de seguretat de processos. L'objectiu és evitar possibles accidents derivats de les variacions de càlcul d'aquest tipus de vàlvules, segons les principals normatives presentades en aquest treball.

A continuació, s'esmentaran les conclusions respecte a les limitacions d'ús i disseny generals de les normes emprades per al càlcul de l'àrea requerida.

- El mètode d'integració directa descrit a la norma API 520 Part 1 – 2020 es pot aplicar per a tots els casos amb fluids amb dues fases.
- Tant els mètodes descrits en les normes ISO 4126-10 i GOST 12.2.085 (2017) no són aplicables per a fluids supercrítics.
- El mètode més simplificat per a realitzar el càlcul de l'àrea requerida és la ISO 4126-10.

A continuació, es detallaran les conclusions obtingudes amb la realització dels diferents casos, és a dir, conclusions específiques per a cadascun dels possibles escenaris mostrats en l'apartat 4 del treball.

- Líquid saturat a l'entrada:
 - És molt important tenir en compte el factor de desequilibri degut al líquid en l'entrada de la vàlvula.
 - Es recomana emprar tant la norma ISO 4126-10 com la GOST 12.2.085 (2017).
 - El mètode d'integració directa sobredimensiona l'àrea requerida a la vàlvula de seguretat.
- Flux bifàsic a l'entrada:

- En aquest cas solament s'ha d'emprar el factor de desequilibri amb fraccions de vapor inferiors al 3% en pes a l'entrada de la vàlvula.
- Es recomana emprar la norma API 520 Part 1 – 2020 per al disseny de vàlvules de seguretat que descarreguen un fluid bifàsic.
- Tant la norma ISO 4126-10 com la GOST 12.2.085 (2017) subdimensionen l'àrea requerida per aquest cas, per tant no es recomanen l'ús.
- Líquid subrefredat a l'entrada:
 - La norma GOST 12.2.085 (2017) recomana emprar el mètode descrit per la ISO 4126-10.
 - La ISO 4126-10 té un mètode específic per al disseny d'aquest cas en concret. Segurament el disseny amb aquest mètode s'ajusta més a la realitat.
 - Es recomana emprar el mètode d'integració directa, tot i que aquest sobredimensiona lleugerament la vàlvula de seguretat, ja que té en compte la variació de les propietats del fluid durant l'alleujament de la sobrepressió.
- Casos supercrític a l'entrada:
 - Per els casos en els que el fluid està en estat supercrític, l'únic mètode que es pot emprar per realitzar el càlcul de l'àrea requerida és el mètode d'integració directa descrit en la norma API 520 Part 1 – 2020.
- Líquid saturat multicomponent a l'entrada:
 - En el cas de tenir un fluid multicomponent, es recomana realitzar el disseny amb el mètode la ISO 4126-10 tenint en compte el factor de desequilibri del fluid.
 - Els mètodes API 520 Part 1 – 2020 i la GOST 12.2.085 (2017) són mètodes vàlids per a realitzar el disseny de la vàlvula de seguretat, tot i això, cal indicar que aquests dos mètodes sobredimensionen lleugerament aquesta vàlvula.
- Flux bifàsic multicomponent a l'entrada:
 - Es recomana emprar la norma API 520 Part 1 – 2020 per al disseny de vàlvules de seguretat que descarreguen un fluid bifàsic.
 - Tant la norma ISO 4126-10 com la GOST 12.2.085 (2017) subdimensionen l'àrea requerida per aquest cas, per tant no es recomana l'ús.

6 Proposta d'ampliació de la recerca

Degut a la profunditat de la recerca realitzada en aquest treball s'han identificat possibles vies d'estudi per ampliar la recerca i obtenir uns resultats més sòlids al voltant del cas d'aquest tipus de vàlvules. Concretament les següents:

Es proposa investigar els diferents mètodes de càlcul del coeficient de descàrrega per flux bifàsic, ja que cadascuna de les normes esmentades anteriorment, indica un procediment diferent per a la seva determinació.

Un altre aspecte que es proposa és el càlcul de l'estabilitat de la vàlvula de seguretat tenint en compte la regla del 3% i la longitud crítica segons recomana l'API 520 Part 2 – 2020 amb el "simple balance method".

Per últim, es considera interessant estudiar les limitacions en quan a mesclades de líquids amb temperatures d'ebullició, entre els components extrems, més grans de 100 K.

7 Referències

- [1] "IEC 61511 - Part 1," 2016.
- [2] "API 520, Sizing, Selection, and Installation of Pressure-relieving Devices Part I-Sizing and Selection," 2020.
- [3] R. Henry and H. Fauske, "The two-phase critical flow of one component mixtures in nozzles, orifices, and short tubes.," *J Heat Transf*, vol. 93, no. 5, pp. 179–187, 1971.
- [4] VdTÜV-Merkblatt, "Bemessungsvorschlag für Sicherheitsventile für Gase in für gasen in flüssigem Zustand.," *Sicherheitsventile*, vol. 100, no. 2, Jan. 1973.
- [5] W. Y. Wong, "PRV sizing for exchanger tube rupture," *Hydrocarbon Processing*, vol. 71, no. 2, pp. 59–64, 1992.
- [6] "API 520, Sizing, Selection, and Installation of Pressure-relieving Devices in Refineries. Part I-Sizing and Selection.," 1993.
- [7] J. Leung, "Easily size relief devices and piping for two-phase flow.," *Chemical Engineering Progress*, pp. 28–50, Dec. 1996.
- [8] R. Ouderkirk, "Rigorously size relief valves for supercritical fluids.," *Chemical Engineering Progress*, vol. 98, no. 8, pp. 34–43, 2002.
- [9] Schmidt, "Sizing of nozzles, venturis, orifices, control and safety valves for initially sub-cooled gas/liquid two-phase flow- The HNE-DS method, Forsch.," *Ingenieurwesen*, vol. 71, pp. 47–58, 2007.
- [10] "API 520, Sizing, Selection, and Installation of Pressure-relieving Devices in Refineries. Part I-Sizing and Selection.," Dec. 2008.
- [11] F. Self and H. Do, "Calculation of relief rate to fluid expansion and external heat, Revision 4.," *API 2010 Summer Meeting*, Aug. 2010.
- [12] "ISO 4126-10. Safety devices for protection against excessive pressure-Sizing of safety valves for gas/liquid two-phase flow," 2010. [Online]. Available: www.iso.org
- [13] J. C. Leung, "Extension of Omega Method to Henry-Fauske Non-equilibrium Critical Flow Model and Comparison with ISO's HNE-DS Model," 2015.
- [14] "GOST 12.2.085 - 2017. Vàlvules de seguretat. Selecció i càlcul de la capacitat de flux.," 2017. [Online]. Available: www.gost.ru
- [15] L. Korelstein, "Comunicació personal." Aug. 11, 2021.
- [16] L. Korelstein, "Comunicació personal." Jul. 14, 2021.

8 Annex

A.1 Cas 1 – Líquid saturat a l'entrada

En aquest apartat es mostra el procediment de càlcul realitzat per al disseny d'una vàlvula de seguretat que descarrega líquid saturat.

A.1.1 API 520 – Part 1 (Mètode integració directa)

En aquest apartat es realitzarà el procediment de càlcul utilitzant el mètode d'integració directa.

Per tal de realitzar aquest mètode de càlcul, s'ha de realitzar el càlcul del flux màssic realitzant una divisió en petits intervals d'un 4% respecte la pressió d'alleujament de la vàlvula, tal i com esmenta la norma. Les equacions que s'empren per a realitzar el càlcul són les següents.

$$G^2 = (\rho_t^2) \cdot \left(-2 \cdot \int_{P_1}^{P_t} \frac{dP}{\rho} \right) \quad (3)$$

$$\int_{P_1}^{P_t} \frac{dP}{\rho} \approx \sum_{i=1}^t 2 \cdot \left(\frac{P_{i+1} - P_i}{\rho_{i+1} + \rho_i} \right) \quad (4)$$

A continuació es mostra una taula resum del resultats de la integració directa de cadascun dels intervals. Quan el flux màssic comença a disminuir es pot donar per finalitzat el càlcul, ja que el valor del flux màssic és el valor màxim (valor en negreta de la taula).

Taula A.1. Taula resum dels resultats de la integració directa de cadascun dels intervals.

Pressió (MPa)	Temperatura (K)	Qualitat màssica	Densitat (kg/m ³)	Flux màssic (kg/(s·m ²))
1,379	305,6	0,001	486,1	0
1,324	303,9	0,015	395,7	6260
1,269	302,1	0,029	329,0	7747
1,213	302,1	0,044	277,5	8409
1,158	298,5	0,058	236,7	8689
1,103	296,5	0,072	203,5	8751
1,048	294,5	0,086	176,1	8682
0,993	292,4	0,100	153,1	8523
0,938	290,3	0,113	133,4	8301
0,883	288,0	0,128	116,5	8033
0,827	285,6	0,142	101,8	7728

Un cop determinat el flux màssic es realitza el càlcul de l'àrea requerida tenint en compte els factors que es mostren a la següent taula.

Taula A.2. Factors per al càlcul de l'àrea requerida.

Variable		Valor
Coefficient de descàrrega	Fluid bifàsic	0,85
Factor vàlvules balancejades	No aplica	-
Factor de correcció de combinació	No hi ha disc de ruptura	1,00
Factor de la viscositat	Menys de 100 cP	1,00

$$A = \frac{277,8 \cdot 12,60 \cdot 3600}{0,85 \cdot 1,00 \cdot 1,00 \cdot 8751} = 1694 \text{ mm}^2 \quad (7)$$

A.1.2 ISO 4126-10 (Tenint en compte el desequilibri)

Com ja s'ha esmentat en l'apartat 4.2.2.2, com es compleixen les limitacions que estableix la norma, es pot realitzar el càlcul seguint el procediment que es mostra a continuació.

Primer de tot, es realitza el càlcul del coeficient de compressibilitat, tenint en compte que no hi ha retard d'ebullició i així realitzar una primera aproximació.

$$\omega_{eq} = \frac{0,001 \cdot 3,411 \cdot 10^{-2}}{1,343 \cdot 2,057 \cdot 10^{-3}} + \frac{2903 \cdot 1,379 \cdot 10^6 \cdot 305,6}{2,057 \cdot 10^{-3}} \cdot \left(\frac{3,411 \cdot 10^{-2} - 2,025 \cdot 10^{-3}}{3,249 \cdot 10^5} \right)^2 = 5,811 \quad (45)$$

Un cop determinat el coeficient de compressibilitat, es determina la relació de pressió crítica i la relació de contrapressió de la vàlvula.

$$\eta_{crit} = 0,55 + 0,217 \cdot \ln(5,811) - 0,046 \cdot [\ln(5,811)]^2 + 0,004 \cdot [\ln(5,811)]^3 = 0,811 \quad (46)$$

$$\eta = \frac{1,013 \cdot 10^5}{1,379 \cdot 10^6} = 0,073 \quad (44)$$

Com la relació de pressió crítica és major a la relació de contrapressió de la vàlvula, el flux arriba en estat crític i per tant s'ha de tenir en compte el factor de retard d'ebullició, que anteriorment s'havia suposat que era 1.

$$N = \left[0,001 + 2903 \cdot 1,379 \cdot 10^6 \cdot 305,6 \cdot \frac{3,411 \cdot 10^{-2} - 2,025 \cdot 10^{-3}}{(3,249 \cdot 10^5)^2} \cdot \ln\left(\frac{1}{0,811}\right) \right]^{2/5} = 0,362 \quad (48)$$

Un cop realitzat el càlcul del factor de retard d'ebullició, s'ha de tornar a calcular el coeficient de compressibilitat aplicant el factor calculat.

$$\omega = \frac{0,001 \cdot 3,411 \cdot 10^{-2}}{1,343 \cdot 2,057 \cdot 10^{-3}} + \frac{2903 \cdot 1,379 \cdot 10^6 \cdot 305,6}{2,057 \cdot 10^{-3}} \cdot \left(\frac{3,411 \cdot 10^{-2} - 2,025 \cdot 10^{-3}}{3,249 \cdot 10^5} \right)^2 \cdot 0,362 = 2,111 \quad (49)$$

Tot seguit, es realitza el procés iteratiu per obtenir el valor definitiu de la relació de pressió crítica, del factor de retard d'ebullició i del coeficient de compressibilitat. A la taula A.3. es mostren els valors finals per continuar el càlcul de la PSV.

Taula A.3. Dades del procés iteratiu.

Variable	Valor
Relació de pressió crítica	0,716
Factor de retard d'ebullició	0,436
Coefficient de compressibilitat	2,540

Un cop determinat el coeficient de compressibilitat del sistema, s'ha de calcular el coeficient de descàrrega. Per tal de determinar aquest coeficient primer s'ha de determinar la fracció buida a la secció transversal més estreta de la vàlvula.

$$\epsilon_{\text{seat}} = 1 - \frac{2,025 \cdot 10^{-3}}{2,057 \cdot 10^{-3} \cdot \left[2,540 \cdot \left(\frac{1}{0,716} - 1 \right) + 1 \right]} = 0,510 \quad (50)$$

Amb la fracció buida calculada, ja es pot realitzar el càlcul del coeficient de descàrrega.

$$K_{\text{dr,2ph}} = 0,953 \cdot 0,510 + (1 - 0,510) \cdot 0,720 = 0,839 \quad (51)$$

Abans de realitzar el càlcul del flux màssic descarregable per la vàlvula, s'ha de determinar el coeficient de flux.

$$C = \frac{\sqrt{2,510 \cdot \ln\left(\frac{1}{0,716}\right) - (2,540 - 1) \cdot (1 - 0,716)}}{2,540 \cdot \left(\frac{1}{0,716} - 1\right) + 1} = 0,319 \quad (52)$$

A partir del coeficient de descàrrega de la vàlvula i el coeficient de flux, ja es pot realitzar el càlcul del flux màssic descarregable.

$$\dot{m}_{\text{SV}} = 0,839 \cdot 0,319 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 1,379 \cdot 10^6}{2,057 \cdot 10^{-3}}} = 9811 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \quad (54)$$

Finalment amb el flux màssic descarregable i el flux màssic de descàrrega, ja es pot determinar l'àrea de la vàlvula i el diàmetre d'aquesta.

$$A_0 = \frac{12,60}{9811} \cdot 10^3 = 1284 \text{ mm}^2 \quad (55)$$

A.1.3 ISO 4126-10 (Sense tenir en compte el desequilibri)

Com ja s'ha esmentat en l'apartat 4.2.2.2, com es compleixen les limitacions que estableix la norma, es pot realitzar el càlcul seguint el procediment que es mostra a continuació.

Primer de tot, es realitza el càlcul del coeficient de compressibilitat, tenint en compte que no hi ha retard d'ebullició i així realitzar una primera aproximació.

$$\omega_{\text{eq}} = \frac{0,001 \cdot 3,411 \cdot 10^{-2}}{1,343 \cdot 2,057 \cdot 10^{-3}} + \frac{2903 \cdot 1,379 \cdot 10^6 \cdot 305,6}{2,057 \cdot 10^{-3}} \cdot \left(\frac{3,411 \cdot 10^{-2} - 2,025 \cdot 10^{-3}}{3,249 \cdot 10^5} \right)^2 = 5,811 \quad (45)$$

Un cop determinat el coeficient de compressibilitat, es determina la relació de pressió crítica i la relació de contrapressió de la vàlvula.

$$\eta_{\text{crit}} = 0,55 + 0,217 \cdot \ln(5,811) - 0,046 \cdot [\ln(5,811)]^2 + 0,004 \cdot [\ln(5,811)]^3 = 0,811 \quad (46)$$

$$\eta = \frac{1,013 \cdot 10^5}{1,379 \cdot 10^6} = 0,073 \quad (44)$$

Com la relació de pressió crítica és major a la relació de contrapressió de la vàlvula, el flux arriba en estat crític.

Un cop determinat el coeficient de compressibilitat del sistema, s'ha de calcular el coeficient de descàrrega. Per tal de determinar aquest coeficient primer s'ha de determinar la fracció buida a la secció transversal més estreta de la vàlvula.

$$\varepsilon_{\text{seat}} = 1 - \frac{2,025 \cdot 10^{-3}}{2,057 \cdot 10^{-3} \cdot \left[5,811 \cdot \left(\frac{1}{0,716} - 1 \right) + 1 \right]} = 0,582 \quad (50)$$

Amb la fracció buida calculada, ja es pot realitzar el càlcul del coeficient de descàrrega.

$$K_{\text{dr,2ph}} = 0,953 \cdot 0,582 + (1 - 0,582) \cdot 0,720 = 0,855 \quad (51)$$

Abans de realitzar el càlcul del flux màssic descarregable per la vàlvula, s'ha de determinar el coeficient de flux.

$$C = \frac{\sqrt{5,811 \cdot \ln\left(\frac{1}{0,811}\right) - (5,811 - 1) \cdot (1 - 0,811)}}{5,811 \cdot \left(\frac{1}{0,811} - 1\right) + 1} = 0,236 \quad (52)$$

A partir del coeficient de descàrrega de la vàlvula i el coeficient de flux, ja es pot realitzar el càlcul del flux màssic descarregable.

$$\dot{m}_{\text{SV}} = 0,855 \cdot 0,236 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 1,379 \cdot 10^6}{2,057 \cdot 10^{-3}}} = 7384 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \quad (54)$$

Finalment amb el flux màssic descarregable i el flux màssic de descàrrega, ja es pot determinar l'àrea de la vàlvula i el diàmetre d'aquesta.

$$A_0 = \frac{12,60}{7384} \cdot 10^3 = 1706 \text{ mm}^2 \quad (55)$$

A.1.4 GOST 12.2.085 (2017)

Com ja s'ha esmentat en l'apartat 4.2.2.3, com es compleixen les limitacions que estableix la norma, es pot realitzar el càlcul seguint el procediment que es mostra a continuació.

Primer de tot es realitza el càlcul del coeficient de transferència de calor del medi.

$$\Lambda = \frac{1,379 \cdot 10^6 \cdot (29,32^{-1} - 493,8^{-1})}{3,249 \cdot 10^5} = 0,136 \quad (88)$$

Tot seguit, es realitza el càlcul del coeficient de compressibilitat, tenint en compte que no hi ha retard d'ebullició i així realitzar una primera aproximació.

$$\omega = \frac{493,8}{29,32} \cdot \frac{2903}{0,779 \cdot 197,6} \cdot 0,136^2 = 5,889 \quad (94)$$

Un cop determinat el coeficient de compressibilitat, es determina la relació de pressió crítica.

$$\left[2 \cdot 5,889 - (5,889 - 1) \cdot \beta_{kp}\right]^2 - (5,889 + 1)^2 + 2 \cdot 5,889^2 \cdot \ln \beta_{kp} + 1 = 0 \quad (64)$$

$$\beta_{kp} = 0,805$$

Tot seguit es realitza el càlcul del factor de retard d'ebullició, és a dir, el factor de desequilibri que s'havia considerat 1 en un primer moment.

$$N = \left[0,001 + \frac{2902 \cdot 305,6}{\left(\frac{1}{29,32} - \frac{1}{493,8}\right) \cdot 1,379 \cdot 10^6} \cdot 0,136^2 \cdot \ln\left(\frac{1}{0,805}\right)\right]^{0,4} = 0,367 \quad (105)$$

Un cop realitzat el càlcul del factor de retard d'ebullició, s'ha de tornar a calcular el coeficient de compressibilitat aplicant el factor calculat.

$$\omega = \left\{ \frac{0,001 + (1-0,001) \cdot \frac{2903}{1842} \cdot \frac{1842}{0,779 \cdot 197,6} \cdot 0,136^2 + 0,017 \cdot (1-2 \cdot 0,136)}{0,001 + (1-0,001) \cdot \frac{29,32}{493,8}} \right\} \cdot 0,367 + \frac{0,017}{1,343} \cdot (1-0,367) = 2,14 \quad (104)$$

Tot seguit es realitza el procés iteratiu per obtenir el valor definitiu de la relació de pressió crítica, del factor de retard d'ebullició i del coeficient de compressibilitat. A la taula A.4. es mostren els valors finals per continuar el càlcul de la PSV.

Taula A.4. Dades del procés iteratiu.

Variable	Valor
Relació de pressió crítica	0,719
Factor de retard d'ebullició	0,433
Coeficient de compressibilitat	2,523

Els últims paràmetres que cal determinar abans de realitzar el càlcul de l'àrea requerida són la velocitat massica adimensional al flux crític i el flux massic. Es calculen de la següent manera.

$$K_{\Pi kp} = \frac{0,719}{\sqrt{2,523}} = 0,453 \quad (62)$$

$$G_{ideal}^* = 0,453 \cdot \sqrt{1,379 \cdot 10^6 \cdot 486,1} = 1,172 \cdot 10^4 \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}^2} \quad (60)$$

Un cop determinat el flux massic es realitza el càlcul de l'àrea requerida tenint en compte els factors que es mostren a la següent taula.

Taula A.5. Factors per al càlcul de l'àrea requerida.

Variable		Valor
Coeficient de descàrrega	Fluid bifàsic	0,85
Factor vàlvules balancejades	No aplica	-
Factor de correcció de combinació	No hi ha disc de ruptura	1,00
Factor de la viscositat	Menys de 100 cP	1,00

$$F = \frac{12,60}{0,85 \cdot 1 \cdot 1,172 \cdot 10^4} \cdot 10^6 = 1264 \text{ mm}^2 \quad (58)$$

A.2 Cas 2 – Flux bifàsic a l'entrada

En aquest apartat es mostra el procediment de càlcul realitzat per al disseny d'una vàlvula de seguretat que descarrega fluid bifàsic.

A.2.1 API 520 – Part 1 (Mètode integració directa)

En aquest apartat es realitzarà el procediment de càlcul utilitzant el mètode d'integració directa.

Per tal de realitzar aquest mètode de càlcul, s'ha de realitzar el càlcul del flux màssic realitzant una divisió en petits intervals d'un 4% respecte la pressió d'alleujament de la vàlvula, tal i com esmenta la norma. Les equacions que s'empren per a realitzar el càlcul són les següents.

$$G^2 = (\rho_t^2) \cdot \left(-2 \cdot \int_{P_1}^{P_t} \frac{dP}{\rho} \right) \quad (3)$$

$$\int_{P_1}^{P_t} \frac{dP}{\rho} \approx \sum_{i=1}^t 2 \cdot \left(\frac{P_{i+1} - P_i}{\rho_{i+1} + \rho_i} \right) \quad (4)$$

A continuació es mostra una taula resum del resultat de la integració directa de cadascun dels intervals. Quan el flux màssic comença a disminuir es pot donar per finalitzat el càlcul, ja que el valor del flux màssic és el valor màxim (valor en negreta de la taula).

Taula A.6. Taula resum dels resultats de la integració directa de cadascun dels intervals.

Pressió (MPa)	Temperatura (K)	Qualitat màssica	Densitat (kg/m ³)	Flux màssic (kg/(s·m ²))
1,379	305,6	0,500	55,36	0
1,324	303,9	0,506	52,57	2377
1,269	302,1	0,512	49,85	3230
1,213	302,1	0,518	47,19	3796
1,158	298,5	0,524	44,59	4201
1,103	296,5	0,524	42,04	4494
1,048	294,5	0,536	39,56	4702
0,993	292,4	0,541	37,12	4841
0,938	290,3	0,547	34,74	4923
0,883	288,0	0,553	32,42	4954
0,827	285,6	0,559	30,13	4941

Un cop determinat el flux màssic es realitza el càlcul de l'àrea requerida tenint en compte els factors que es mostren a la següent taula.

Taula A.7. Factors per al càlcul de l'àrea requerida.

Variable		Valor
Coeficient de descàrrega	Fluid bifàsic	0,85
Factor vàlvules balancejades	No aplica	-
Factor de correcció de combinació	No hi ha disc de ruptura	1,00
Factor de la viscositat	Menys de 100 cP	1,00

$$A = \frac{277,8 \cdot 12,60 \cdot 3600}{0,85 \cdot 1,00 \cdot 1,00 \cdot 4954} = 2992 \text{ mm}^2 \quad (7)$$

A.2.2 ISO 4126-10

Com ja s'ha presentat en l'apartat 4.3.2.2, degut a que es compleixen les limitacions que estableix la norma, es pot realitzar el càlcul seguint el procediment que es mostra a continuació.

Primer de tot, es realitza el càlcul del coeficient de compressibilitat, tenint en compte que no hi ha retard d'ebullició, ja que hi ha una fracció de vapor del 50%.

$$\omega = \frac{0,5 \cdot 3,411 \cdot 10^{-2}}{1,146 \cdot 1,806 \cdot 10^{-2}} + \frac{2903 \cdot 1,379 \cdot 10^6 \cdot 305,6}{1,806 \cdot 10^{-2}} \cdot \left(\frac{3,411 \cdot 10^{-2} - 2,025 \cdot 10^{-3}}{3,249 \cdot 10^5} \right)^2 = 1,484 \quad (45)$$

Un cop determinat el coeficient de compressibilitat, es determina la relació de pressió crítica i la relació de contrapressió de la vàlvula.

$$\eta_c^2 + (1,484^2 - 2 \cdot 1,484)(1 - \eta_c)^2 + 2 \cdot 1,484^2 \ln \eta_c + 2 \cdot 1,484^2 (1 - \eta_c) = 0 \quad (12)$$

$$\eta_c = 0,657$$

$$\eta = \frac{1,013 \cdot 10^5}{1,379 \cdot 10^6} = 0,073 \quad (44)$$

Com la relació de pressió crítica és major a la relació de contrapressió de la vàlvula, el flux arriba en estat crític.

Un cop determinat el coeficient de compressibilitat del sistema, s'ha de calcular el coeficient de descàrrega. Per tal de determinar aquest coeficient primer s'ha de determinar la fracció buida a la secció transversal més estreta de la vàlvula.

$$\varepsilon_{\text{seat}} = 1 - \frac{2,025 \cdot 10^{-3}}{1,806 \cdot 10^{-2} \cdot \left[1,484 \cdot \left(\frac{1}{0,657} - 1 \right) + 1 \right]} = 0,937 \quad (50)$$

Amb la fracció buida calculada, ja es pot realitzar el càlcul del coeficient de descàrrega.

$$K_{\text{dr,2ph}} = 0,953 \cdot 0,937 + (1 - 0,937) \cdot 0,720 = 0,938 \quad (51)$$

Abans de realitzar el càlcul del flux màssic descarregable per la vàlvula, s'ha de determinar el coeficient de flux.

$$C = \frac{\sqrt{1,484 \cdot \ln \left(\frac{1}{0,657} \right) - (1,484 - 1) \cdot (1 - 0,657)}}{1,484 \cdot \left(\frac{1}{0,657} - 1 \right) + 1} = 0,381 \quad (52)$$

A partir del coeficient de descàrrega de la vàlvula i el coeficient de flux, ja es pot realitzar el càlcul del flux màssic descarregable.

$$\dot{m}_{\text{SV}} = 0,937 \cdot 0,381 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 1,379 \cdot 10^6}{1,806 \cdot 10^{-2}}} = 4418 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \quad (54)$$

Finalment amb el flux màssic descarregable i el flux màssic de descàrrega, ja es pot determinar l'àrea de la vàlvula i el diàmetre d'aquesta.

$$A_0 = \frac{12,60}{4418} \cdot 10^3 = 2852 \text{ mm}^2 \quad (55)$$

A.2.3 GOST 12.2.085-2017

Finalment, es realitza el càlcul utilitzant la normativa GOST 12.2.085-2017.

Primer de tot es realitza el càlcul del coeficient de transferència de calor del medi.

$$\Lambda = \frac{1,379 \cdot 10^6 \cdot (29,32^{-1} - 493,8^{-1})}{3,249 \cdot 10^5} = 0,136 \quad (88)$$

Tot seguit es calcula la fracció de buit quan les dues fases tenen la mateixa velocitat, per poder calcular el paràmetre Omega.

$$\varepsilon = \left[1 + \frac{1-0,5}{0,5} \cdot \frac{29,32}{493,8} \right]^{-1} = 0,944 \quad (68)$$

Ara ja es pot realitzar el càlcul del paràmetre Omega a partir de la següent equació.

$$\omega = \frac{0,5 + (1-0,5) \cdot \frac{2903}{1842}}{0,5 + (1-0,5) \cdot \frac{29,32}{493,8}} \cdot \frac{1842}{0,779 \cdot 197,6} \cdot 0,136^2 + 0,944 \cdot (1 - 2 \cdot 0,136) = 1,227 \quad (91)$$

A continuació, cal determinar la relació de pressions crítiques, tal i com es mostra tot seguit.

$$\left[2 \cdot 1,227 \cdot (1,227 - 1) \cdot \beta_{kp} \right]^2 - (1,227 - 1)^2 + 2 \cdot 1,227^2 \cdot \ln \beta_{kp} + 1 = 0 \quad (64)$$

$$\beta_{kp} = 0,694$$

Els últims paràmetres que cal determinar abans de realitzar el càlcul de l'àrea requerida són la velocitat massica adimensional al flux crític i el flux massic. Es calculen de la següent manera.

$$K_{\Pi kp} = \frac{0,694}{\sqrt{1,227}} = 0,627 \quad (62)$$

$$G_{ideal}^* = 0,627 \cdot \sqrt{1,379 \cdot 10^6 \cdot 55,36} = 5478 \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}^2} \quad (60)$$

Un cop determinat el flux massic es realitza el càlcul de l'àrea requerida tenint en compte els factors que es mostren a la següent taula.

Taula A.8. Factors per al càlcul de l'àrea requerida.

Variable		Valor
Coeficient de descàrrega	Fluid bifàsic	0,85
Factor vàlvules balancejades	No aplica	-
Factor de correcció de combinació	No hi ha disc de ruptura	1,00
Factor de la viscositat	Menys de 100 cP	1,00

$$F = \frac{12,60}{0,85 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 5478} \cdot 10^6 = 2706 \text{ mm}^2 \quad (58)$$

A.3 Cas 3 – Líquid subrefredat a l'entrada

En aquest apartat es mostra el procediment de càlcul realitzat per al disseny d'una vàlvula de seguretat que descarrega líquid subrefredat.

A.3.1 API 520 – Part 1 (Mètode integració directa)

En aquest apartat es realitzarà el procediment de càlcul utilitzant el mètode d'integració directa.

Per tal de realitzar aquest mètode de càlcul, s'ha de realitzar el càlcul del flux màssic realitzant una divisió en petits intervals d'un 4% respecte la pressió d'alleujament de la vàlvula, tal i com esmenta la norma. Les equacions que s'empren per a realitzar el càlcul són les següents.

$$G^2 = (\rho_t^2) \cdot \left(-2 \cdot \int_{P_1}^{P_t} \frac{dP}{\rho} \right) \quad (3)$$

$$\int_{P_1}^{P_t} \frac{dP}{\rho} \approx \sum_{i=1}^t 2 \cdot \left(\frac{P_{i+1} - P_i}{\rho_{i+1} + \rho_i} \right) \quad (4)$$

A continuació es mostra una taula resum del resultat de la integració directa de cadascun dels intervals. Quan el flux màssic comença a disminuir es pot donar per finalitzat el càlcul, ja que el valor del flux màssic és el valor màxim (valor en negreta de la taula).

Taula A.9. Taula resum dels resultats de la integració directa de cadascun dels intervals.

Pressió (MPa)	Temperatura (K)	Qualitat màssica	Densitat (kg/m ³)	Flux màssic (kg/(s·m ²))
6,895	302,6	0,000	517,0	0
6,619	302,4	0,000	516,5	1,688E+04
6,343	302,2	0,000	516,1	2,385E+04
6,067	301,9	0,000	515,7	2,919E+04
5,792	301,7	0,000	515,2	3,369E+04
5,516	301,5	0,000	514,8	3,764E+04
5,240	301,3	0,000	514,3	4,120E+04
4,964	301,0	0,000	513,9	4,448E+04
4,688	300,8	0,000	513,4	4,752E+04
4,413	300,6	0,000	513,0	5,037E+04
4,137	300,3	0,000	512,6	5,306E+04
3,861	300,1	0,000	512,1	5,561E+04
3,585	299,8	0,000	511,7	5,804E+04
3,309	299,6	0,000	511,2	6,038E+04
3,034	299,4	0,000	510,8	6,261E+04
2,758	299,1	0,000	510,3	6,477E+04
2,482	298,9	0,000	509,9	6,685E+04
2,206	298,6	0,000	509,5	6,886E+04
1,931	298,3	0,000	509,0	7,081E+04
1,655	298,1	0,000	508,6	7,271E+04
1,379	297,8	0,000	508,1	7,455E+04
1,103	296,5	0,008	433,6	6,532E+04
0,827	285,6	0,084	151,6	2,377E+04

Un cop determinat el flux màssic es realitza el càlcul de l'àrea requerida tenint en compte els factors que es mostren a la següent taula.

Taula A.10. Factors per al càlcul de l'àrea requerida.

Variable		Valor
Coefficient de descàrrega	Líquid subrefredat	0,65
Factor vàlvules balancejades	No aplica	-
Factor de correcció de combinació	No hi ha disc de ruptura	1,00
Factor de la viscositat	Menys de 100 cP	1,00

$$A = \frac{277,8 \cdot 12,60 \cdot 3600}{0,65 \cdot 1,00 \cdot 1,00 \cdot 7,455 \cdot 10^4} = 260,0 \text{ mm}^2 \quad (7)$$

A.3.2 ISO 4126-10

Com ja s'ha esmentat en l'apartat 4.4.2.2, ja que es compleixen les limitacions que estableix la norma, es pot realitzar el càlcul seguint el procediment que es mostra a continuació.

Primer de tot, es realitza el càlcul de la relació de pressió crítica.

$$\eta_{\text{crit}} = \frac{1,283 \cdot 10^6}{6,895 \cdot 10^6} = 0,186 \quad (47)$$

Tot seguit es realitza el càlcul de la relació de pressió de la vàlvula per posteriorment determinar si el flux és crític o subcrític.

$$\eta_b = \frac{1,013 \cdot 10^5}{6,895 \cdot 10^6} = 0,015 \quad (44)$$

Com la relació de pressió de la vàlvula és més petita que la relació de pressió crítica, el flux és crític. Tot seguit es realitza el càlcul del coeficient de flux considerant líquid subrefredat.

$$C = \sqrt{1 - 0,186} = 0,902 \quad (53)$$

A partir del coeficient de descàrrega de la vàlvula i el coeficient de flux, ja es pot realitzar el càlcul del flux màssic descarregable.

$$\dot{m}_{SV} = 0,720 \cdot 0,902 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 6,895 \cdot 10^6}{1,934 \cdot 10^{-3}}} = 5,484 \cdot 10^4 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \quad (54)$$

Finalment amb el flux màssic descarregable i el flux màssic de descàrrega, ja es pot determinar l'àrea de la vàlvula i el diàmetre d'aquesta.

$$A_0 = \frac{12,60}{5,484 \cdot 10^4} \cdot 10^3 = 229,7 \text{ mm}^2 \quad (55)$$

A.4 Cas 4 – Vapor supercrític a l'entrada

En aquest apartat es mostra el procediment de càlcul realitzat per al disseny d'una vàlvula de seguretat que descarrega vapor supercrític.

A.4.1 API 520 – Part 1 (Mètode integració directa)

En aquest apartat es realitzarà el procediment de càlcul utilitzant el mètode d'integració directa.

Per tal de realitzar aquest mètode de càlcul, s'ha de realitzar el càlcul del flux màssic realitzant una divisió en petits intervals d'un 4% respecte la pressió d'alleujament de la vàlvula, tal i com esmenta la norma. Les equacions que s'empren per a realitzar el càlcul són les següents.

$$G^2 = (\rho_t^2) \cdot \left(-2 \cdot \int_{P_1}^{P_t} \frac{dP}{\rho} \right) \quad (3)$$

$$\int_{P_1}^{P_t} \frac{dP}{\rho} \approx \sum_{i=1}^t 2 \cdot \left(\frac{P_{i+1} - P_i}{\rho_{i+1} + \rho_i} \right) \quad (4)$$

A continuació es mostra una taula resum del resultat de la integració directa de cadascun dels intervals. Quan el flux màssic comença a disminuir es pot donar per finalitzat el càlcul, ja que el valor del flux màssic és el valor màxim (valor en negreta de la taula).

Taula A.11. Taula resum dels resultats de la integració directa de cadascun dels intervals.

Pressió (MPa)	Temperatura (K)	Qualitat màssica	Densitat (kg/m ³)	Flux màssic (kg/(s·m ²))
6,895	410,9	1,000	153,2	0
6,619	408,2	1,000	147,6	8,937E+03
6,343	405,3	1,000	141,8	1,227E+04
6,067	402,3	1,000	135,9	1,455E+04
5,792	399,1	1,000	129,9	1,622E+04
5,516	395,7	1,000	123,7	1,747E+04
5,240	392,1	1,000	117,4	1,839E+04
4,964	388,3	1,000	111,0	1,902E+04
4,688	384,3	1,000	104,6	1,941E+04
4,413	380,1	1,000	98,01	1,958E+04
4,137	375,6	1,000	91,42	1,955E+04
3,861	370,9	1,000	84,82	1,934E+04
3,585	365,9	1,000	78,23	1,896E+04
3,309	360,6	1,000	71,68	1,843E+04
3,034	354,9	1,000	65,18	1,775E+04
2,758	348,9	1,000	58,78	1,694E+04
2,482	342,4	1,000	52,47	1,600E+04
2,206	335,4	1,000	46,29	1,494E+04
1,931	327,8	1,000	40,24	1,376E+04
1,655	319,3	1,000	34,32	1,246E+04
1,379	309,7	1,000	28,55	1,103E+04
1,103	298,5	1,000	22,90	9,460E+03
0,827	285,6	1,000	17,34	7,717E+03

Un cop determinat el flux màssic es realitza el càlcul de l'àrea requerida tenint en compte els factors que es mostren a la següent taula.

Taula A.12. Factors per al càlcul de l'àrea requerida.

Variable		Valor
Coeficient de descàrrega	Fluid bifàsic	0,85
Factor vàlvules balancejades	No aplica	-
Factor de correcció de combinació	No hi ha disc de ruptura	1,00
Factor de la viscositat	Menys de 100 cP	1,00

$$A = \frac{277,8 \cdot 12,60 \cdot 3600}{0,85 \cdot 1,00 \cdot 1,00 \cdot 1,958 \cdot 10^4} = 757,0 \text{ mm}^2 \quad (7)$$

A.5 Cas 5 – Líquid supercrític a l'entrada

En aquest apartat es mostra el procediment de càlcul realitzat per al disseny d'una vàlvula de seguretat que descarrega líquid supercrític bifàsic.

A.5.1 API 520 – Part 1 (Mètode integració directa)

En aquest apartat es realitzarà el procediment de càlcul utilitzant el mètode d'integració directa.

Per tal de realitzar aquest mètode de càlcul, s'ha de realitzar el càlcul del flux màssic realitzant una divisió en petits intervals d'un 4% respecte la pressió d'alleujament de la vàlvula, tal i com esmenta la norma. Les equacions que s'empren per a realitzar el càlcul són les següents.

$$G^2 = (\rho_t^2) \cdot \left(-2 \cdot \int_{P_1}^{P_t} \frac{dP}{\rho} \right) \quad (3)$$

$$\int_{P_1}^{P_t} \frac{dP}{\rho} \approx \sum_{i=1}^t 2 \cdot \left(\frac{P_{i+1} - P_i}{\rho_{i+1} + \rho_i} \right) \quad (4)$$

A continuació es mostra una taula resum del resultat de la integració directa de cadascun dels intervals. Quan el flux màssic comença a disminuir es pot donar per finalitzat el càlcul, ja que el valor del flux màssic és el valor màxim (valor en negreta de la taula).

Taula A.13. Taula resum dels resultats de la integració directa de cadascun dels intervals.

Pressió (MPa)	Temperatura (K)	Qualitat màssica	Densitat (kg/m ³)	Flux màssic (kg/(s·m ²))
6,895	377,6	1,000	305,3	0
6,619	376,3	0,000	301,3	1,285E+04
6,343	374,9	0,000	297,2	1,798E+04
6,067	373,5	0,000	292,8	2,178E+04
5,792	372,0	0,000	288,2	2,485E+04
5,516	370,4	0,000	283,4	2,742E+04
5,240	368,6	0,000	278,3	2,961E+04
4,964	366,8	0,000	272,8	3,150E+04
4,688	364,7	0,000	267,1	3,311E+04
4,413	362,4	0,057	261,9	3,460E+04
4,137	358,7	0,260	230,1	3,230E+04
3,861	354,9	0,349	201,0	2,999E+04
3,585	350,9	0,407	175,0	2,777E+04
3,309	346,7	0,450	151,8	2,566E+04
3,034	342,1	0,484	131,0	2,361E+04
2,758	337,3	0,514	112,7	2,168E+04
2,482	332,1	0,540	96,40	1,982E+04
2,206	326,4	0,564	81,71	1,799E+04
1,931	320,2	0,586	68,41	1,616E+04
1,655	313,4	0,606	56,30	1,431E+04
1,379	305,6	0,626	45,21	1,242E+04
1,103	296,5	0,646	35,01	1,046E+04

Un cop determinat el flux màssic es realitza el càlcul de l'àrea requerida tenint en compte els factors que es mostren a la següent taula.

Taula A.14. Factors per al càlcul de l'àrea requerida.

Variable		Valor
Coeficient de descàrrega	Fluid bifàsic	0,85
Factor vàlvules balancejades	No aplica	-
Factor de correcció de combinació	No hi ha disc de ruptura	1,00
Factor de la viscositat	Menys de 100 cP	1,00

$$A = \frac{277,8 \cdot 12,60 \cdot 3600}{0,85 \cdot 1,00 \cdot 1,00 \cdot 3,460 \cdot 10^4} = 428,5 \text{ mm}^2 \quad (7)$$

A.6 Cas 6 – Vapor supercrític a l'entrada i bifàsic a la sortida

En aquest apartat es mostra el procediment de càlcul realitzat per al disseny d'una vàlvula de seguretat que descarrega vapor supercrític bifàsic.

A.6.1 API 520 – Part 1 (Mètode integració directa)

En aquest apartat es realitzarà el procediment de càlcul utilitzant el mètode d'integració directa.

Per tal de realitzar aquest mètode de càlcul, s'ha de realitzar el càlcul del flux màssic realitzant una divisió en petits intervals d'un 4% respecte la pressió d'alleujament de la vàlvula, tal i com esmenta la norma. Les equacions que s'empren per a realitzar el càlcul són les següents.

$$G^2 = (\rho_t^2) \cdot \left(-2 \cdot \int_{P_1}^{P_t} \frac{dP}{\rho} \right) \quad (3)$$

$$\int_{P_1}^{P_t} \frac{dP}{\rho} \approx \sum_{i=1}^t 2 \cdot \left(\frac{P_{i+1} - P_i}{\rho_{i+1} + \rho_i} \right) \quad (4)$$

A continuació es mostra una taula resum del resultat de la integració directa de cadascun dels intervals. Quan el flux màssic comença a disminuir es pot donar per finalitzat el càlcul, ja que el valor del flux màssic és el valor màxim (valor en negreta de la taula).

Taula A.15. Taula resum dels resultats de la integració directa de cadascun dels intervals.

Pressió (MPa)	Temperatura (K)	Qualitat massica	Densitat (kg/m ³)	Flux màssic (kg/(s·m ²))
5,516	377,0	1,000	198,0	0
5,295	374,5	1,000	191,9	9,131E+03
5,075	371,8	1,000	185,5	1,258E+04
4,854	368,8	1,000	178,6	1,497E+04
4,633	365,6	1,000	171,4	1,675E+04
4,413	362,4	0,913	162,0	1,788E+04
4,192	359,5	0,823	149,6	1,834E+04
3,971	356,5	0,792	137,8	1,853E+04
3,751	353,3	0,778	126,5	1,852E+04
3,530	350,1	0,771	115,8	1,834E+04

Un cop determinat el flux màssic es realitza el càlcul de l'àrea requerida tenint en compte els factors que es mostren a la següent taula.

Taula A.16. Factors per al càlcul de l'àrea requerida.

Variable		Valor
Coeficient de descàrrega	Fluid bifàsic	0,85
Factor vàlvules balancejades	No aplica	-
Factor de correcció de combinació	No hi ha disc de ruptura	1,00
Factor de la viscositat	Menys de 100 cP	1,00

$$A = \frac{277,8 \cdot 12,60 \cdot 3600}{0,85 \cdot 1,00 \cdot 1,00 \cdot 1,853 \cdot 10^4} = 799,9 \text{ mm}^2 \quad (7)$$

A.7 Cas 7 – Líquid saturat multicomponent a l'entrada

En aquest apartat es mostra el procediment de càlcul realitzat per al disseny d'una vàlvula de seguretat que descarrega líquid saturat multicomponent.

A.7.1 API 520 – Part 1 (Mètode integració directa)

En aquest apartat es realitzarà el procediment de càlcul utilitzant el mètode d'integració directa.

Per tal de realitzar aquest mètode de càlcul, s'ha de realitzar el càlcul del flux màssic realitzant una divisió en petits intervals d'un 4% respecte la pressió d'alleujament de la vàlvula, tal i com esmenta la norma. Les equacions que s'empren per a realitzar el càlcul són les següents.

$$G^2 = (\rho_t^2) \cdot \left(-2 \cdot \int_{P_1}^{P_t} \frac{dP}{\rho} \right) \quad (3)$$

$$\int_{P_1}^{P_t} \frac{dP}{\rho} \approx \sum_{i=1}^t 2 \cdot \left(\frac{P_{i+1} - P_i}{\rho_{i+1} + \rho_i} \right) \quad (4)$$

A continuació es mostra una taula resum del resultat de la integració directa de cadascun dels intervals. Quan el flux màssic comença a disminuir es pot donar per finalitzat el càlcul, ja que el valor del flux màssic és el valor màxim (valor en negreta de la taula).

Taula A.17. Taula resum dels resultats de la integració directa de cadascun dels intervals.

Pressió (MPa)	Temperatura (K)	Qualitat massica	Densitat (kg/m ³)	Flux màssic (kg/(s·m ²))
1,000	329,0	0,023	417,5	0
0,960	328,5	0,031	369,9	5273
0,920	327,9	0,039	329,0	6840
0,880	327,4	0,047	293,5	7704
0,840	326,8	0,055	262,3	8199
0,800	326,2	0,063	234,7	8460
0,760	325,6	0,072	210,2	8560
0,720	325,0	0,080	188,2	8543
0,680	324,3	0,088	168,4	8435
0,640	323,6	0,096	150,5	8257

Un cop determinat el flux màssic es realitza el càlcul de l'àrea requerida tenint en compte els factors que es mostren a la següent taula.

Taula A.18. Factors per al càlcul de l'àrea requerida.

Variable		Valor
Coefficient de descàrrega	Fluid bifàsic	0,85
Factor vàlvules balancejades	No aplica	-
Factor de correcció de combinació	No hi ha disc de ruptura	1,00
Factor de la viscositat	Menys de 100 cP	1,00

$$A = \frac{277,8 \cdot 7,334 \cdot 3600}{0,85 \cdot 1,00 \cdot 1,00 \cdot 8560} = 1008 \text{ mm}^2 \quad (7)$$

A.7.2 ISO 4126-10 (Amb factor d'equilibri)

Com ja s'ha esmentat en l'apartat 4.8.2.2, com es compleixen les limitacions que estableix la norma, es pot realitzar el càlcul seguint el procediment que es mostra a continuació.

Primer de tot, es realitza el càlcul del coeficient de compressibilitat, tenint en compte que no hi ha retard d'ebullició i així realitzar una primera aproximació.

$$\omega_{eq} = \frac{0,023 \cdot 7,330 \cdot 10^{-2}}{1,006 \cdot 2,395 \cdot 10^{-3}} + \frac{2409 \cdot 1 \cdot 10^6 \cdot 329,0}{2,395 \cdot 10^{-3}} \cdot \left(\frac{7,333 \cdot 10^{-2} - 1,655 \cdot 10^{-3}}{5,261 \cdot 10^5} \right)^2 = 6,830 \quad (45)$$

Un cop determinat el coeficient de compressibilitat, es determina la relació de pressió crítica i la relació de contrapressió de la vàlvula.

$$\eta_{crit} = 0,55 + 0,217 \cdot \ln(6,830) - 0,046 \cdot [\ln(6,830)]^2 + 0,004 \cdot [\ln(6,830)]^3 = 0,825 \quad (46)$$

$$\eta = \frac{1,013 \cdot 10^5}{1,000 \cdot 10^6} = 0,100 \quad (44)$$

Com la relació de pressió crítica és major a la relació de contrapressió de la vàlvula, el flux arriba en estat crític i per tant s'ha de tenir en compte el factor de retard d'ebullició, que anteriorment s'havia suposat que era 1.

$$N = \left[2,259 \cdot 10^{-2} + 2409 \cdot 1 \cdot 10^6 \cdot 329,0 \cdot \frac{7,333 \cdot 10^{-2} - 1,655 \cdot 10^{-3}}{(5,261 \cdot 10^5)^2} \cdot \ln\left(\frac{1}{0,825}\right) \right]^{2/5} = 0,329 \quad (48)$$

Un cop realitzat el càlcul del factor de retard d'ebullició, s'ha de tornar a calcular el coeficient de compressibilitat aplicant el factor calculat.

$$\omega = \frac{2,259 \cdot 10^{-2} \cdot 7,330 \cdot 10^{-2}}{1,006 \cdot 2,395 \cdot 10^{-3}} + \frac{2409 \cdot 1 \cdot 10^6 \cdot 329,0}{2,395 \cdot 10^{-3}} \cdot \left(\frac{7,333 \cdot 10^{-2} - 1,655 \cdot 10^{-3}}{5,261 \cdot 10^5} \right)^2 \cdot 0,329 = 2,707 \quad (49)$$

Tot seguit es realitza el procés iteratiu per obtenir el valor definitiu de la relació de pressió crítica, del factor de retard d'ebullició i del coeficient de compressibilitat. A la taula A.19. es mostren els valors finals per continuar el càlcul de la PSV.

Taula A.19. Dades del procés iteratiu.

Variable	Valor
Relació de pressió crítica	0,737
Factor de retard d'ebullició	0,373
Coefficient de compressibilitat	2,980

Un cop determinat el coeficient de compressibilitat del sistema, s'ha de calcular el coeficient de descàrrega. Per tal de determinar aquest coeficient, primer s'ha de determinar la fracció buida a la secció transversal més estreta de la vàlvula.

$$\varepsilon_{\text{seat}} = 1 - \frac{1,655 \cdot 10^{-3}}{2,395 \cdot 10^{-3} \cdot \left[2,980 \cdot \left(\frac{1}{0,737} - 1 \right) + 1 \right]} = 0,665 \quad (50)$$

Amb la fracció buida calculada, ja es pot realitzar el càlcul del coeficient de descàrrega.

$$K_{\text{dr,2ph}} = 0,953 \cdot 0,665 + (1 - 0,665) \cdot 0,720 = 0,875 \quad (51)$$

Abans de realitzar el càlcul del flux màssic descarregable per la vàlvula, s'ha de determinar el coeficient de flux.

$$C = \frac{\sqrt{2,980 \cdot \ln\left(\frac{1}{0,737}\right) - (2,980 - 1) \cdot (1 - 0,737)}}{2,980 \cdot \left(\frac{1}{0,737} - 1\right) + 1} = 0,302 \quad (52)$$

A partir del coeficient de descàrrega de la vàlvula i el coeficient de flux, ja es pot realitzar el càlcul del flux màssic descarregable.

$$\dot{m}_{\text{SV}} = 0,875 \cdot 0,302 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 1 \cdot 10^6}{2,395 \cdot 10^{-3}}} = 7638 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \quad (54)$$

Finalment amb el flux màssic descarregable i el flux màssic de descàrrega, ja es pot determinar l'àrea de la vàlvula i el diàmetre d'aquesta.

$$A_0 = \frac{7,334}{7638} \cdot 10^3 = 960,2 \text{ mm}^2 \quad (55)$$

A.7.3 ISO 4126-10 (Sense factor d'equilibri)

Com ja s'ha esmentat en l'apartat 4.8.2.2, al complir-se les limitacions que estableix la norma, es pot realitzar el càlcul seguint el procediment que es mostra a continuació.

Primer de tot, es realitza el càlcul del coeficient de compressibilitat, tenint en compte que no hi ha retard d'ebullició i així realitzar una primera aproximació.

$$\omega_{\text{eq}} = \frac{0,023 \cdot 7,330 \cdot 10^{-2}}{1,006 \cdot 2,395 \cdot 10^{-3}} + \frac{2409 \cdot 1 \cdot 10^6 \cdot 329,0}{2,395 \cdot 10^{-3}} \cdot \left(\frac{7,333 \cdot 10^{-2} - 1,655 \cdot 10^{-3}}{5,261 \cdot 10^5} \right)^2 = 6,830 \quad (45)$$

Un cop determinat el coeficient de compressibilitat, es determina la relació de pressió crítica i la relació de contrapressió de la vàlvula.

$$\eta_{\text{crit}} = 0,55 + 0,217 \cdot \ln(6,830) - 0,046 \cdot [\ln(6,830)]^2 + 0,004 \cdot [\ln(6,830)]^3 = 0,825 \quad (46)$$

$$\eta = \frac{1,013 \cdot 10^5}{1,000 \cdot 10^6} = 0,100 \quad (44)$$

Com la relació de pressió crítica és major a la relació de contrapressió de la vàlvula, el flux arriba en estat crític.

Un cop determinat el coeficient de compressibilitat del sistema, s'ha de calcular el coeficient de descàrrega. Per tal de determinar aquest coeficient primer s'ha de determinar la fracció buida a la secció transversal més estreta de la vàlvula.

$$\varepsilon_{\text{seat}} = 1 - \frac{1,655 \cdot 10^{-3}}{2,395 \cdot 10^{-3} \cdot \left[6,830 \cdot \left(\frac{1}{0,825} - 1 \right) + 1 \right]} = 0,717 \quad (50)$$

Amb la fracció buida calculada, ja es pot realitzar el càlcul del coeficient de descàrrega.

$$K_{\text{dr,2ph}} = 0,953 \cdot 0,717 + (1 - 0,717) \cdot 0,720 = 0,887 \quad (51)$$

Abans de realitzar el càlcul del flux màssic descarregable per la vàlvula, s'ha de determinar el coeficient de flux.

$$C = \frac{\sqrt{6,830 \cdot \ln\left(\frac{1}{0,825}\right) - (6,830 - 1) \cdot (1 - 0,825)}}{6,830 \cdot \left(\frac{1}{0,825} - 1\right) + 1} = 0,221 \quad (52)$$

A partir del coeficient de descàrrega de la vàlvula i el coeficient de flux, ja es pot realitzar el càlcul del flux màssic descarregable.

$$\dot{m}_{\text{SV}} = 0,887 \cdot 0,221 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 1 \cdot 10^6}{2,395 \cdot 10^{-3}}} = 5672 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \quad (54)$$

Finalment amb el flux màssic descarregable i el flux màssic de descàrrega, ja es pot determinar l'àrea de la vàlvula i el diàmetre d'aquesta.

$$A_0 = \frac{12,60}{5672} \cdot 10^3 = 2,22 \text{ m}^2 \quad (55)$$

A.7.4 GOST 12.2.085 (2017)

En aquest apartat es podrà veure el mètode de càlcul que recomana emprar la norma per al càlcul de l'àrea requerida de la vàlvula en les condicions indicades anteriorment.

En aquest cas, primer de tot s'ha de realitzar el càlcul del paràmetre Omega per a fluids multicomponent, tal i com es mostra a continuació.

$$\omega = 9 \cdot \left(\frac{417,5}{310,7} - 1 \right) = 3,094 \quad (98)$$

Tot seguit, es pot realitzar el càlcul de la relació de pressió crítica a partir del valor d'Omega calculat.

$$\left[2 \cdot 3,094 - (3,094 - 1) \cdot \beta_{kp} \right]^2 - (3,094 + 1)^2 + 2 \cdot 3,094^2 \cdot \ln \beta_{kp} + 1 = 0 \quad (64)$$

$$\beta_{kp} = 0,742$$

Els últims paràmetres que cal determinar abans de realitzar el càlcul de l'àrea requerida són la velocitat màssica adimensional al flux crític i el flux màssic. Es calculen de la següent manera.

$$K_{\Pi kp} = \frac{0,742}{\sqrt{3,094}} = 0,422 \quad (62)$$

$$G_{ideal}^* = 0,422 \cdot \sqrt{1,000 \cdot 10^6 \cdot 417,5} = 8615 \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}^2} \quad (60)$$

Un cop determinat el flux màssic es realitza el càlcul de l'àrea requerida tenint en compte els factors que es mostren a la següent taula.

Taula A.20. Factors per al càlcul de l'àrea requerida.

Variable		Valor
Coeficient de descàrrega	Fluid bifàsic	0,85
Factor vàlvules balancejades	No aplica	-
Factor de correcció de combinació	No hi ha disc de ruptura	1,00
Factor de la viscositat	Menys de 100 cP	1,00

$$F = \frac{7,334}{0,85 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 8615} \cdot 10^6 = 1002 \text{ mm}^2 \quad (58)$$

A.8 Cas 8 – Flux bifàsic multicomponent a l'entrada

En aquest apartat es mostra el procediment de càlcul realitzat per al disseny d'una vàlvula de seguretat que descarrega fluid bifàsic multicomponent.

A.8.1 API 520 – Part 1 (Mètode integració directa)

En aquest apartat es realitzarà el procediment de càlcul utilitzant el mètode d'integració directa.

Per tal de realitzar aquest mètode de càlcul, s'ha de realitzar el càlcul del flux màssic realitzant una divisió en petits intervals d'un 4% respecte la pressió d'alleujament de la vàlvula, tal i com esmenta la norma. Les equacions que s'empren per a realitzar el càlcul són les següents.

$$G^2 = (\rho_t^2) \cdot \left(-2 \cdot \int_{P_1}^{P_t} \frac{dP}{\rho} \right) \quad (3)$$

$$\int_{P_1}^{P_t} \frac{dP}{\rho} \approx \sum_{i=1}^t 2 \cdot \left(\frac{P_{i+1} - P_i}{\rho_{i+1} + \rho_i} \right) \quad (4)$$

A continuació es mostra una taula resum del resultats de la integració directa de cadascun dels intervals. Quan el flux màssic comença a disminuir es pot donar per finalitzat el càlcul, ja que el valor del flux màssic és el valor màxim (valor en negreta de la taula).

Taula A.21. Taula resum dels resultats de la integració directa de cadascun dels intervals.

Pressió (MPa)	Temperatura (K)	Qualitat massica	Densitat (kg/m ³)	Flux màssic (kg/(s·m ²))
2,851	306,2	0,281	153,3	0
2,737	304,6	0,293	144,2	5,646E+03
2,628	303,1	0,305	135,7	7,556E+03
2,523	301,6	0,316	127,9	8,761E+03
2,422	300,0	0,326	120,6	9,584E+03
2,325	298,5	0,336	113,8	1,016E+04
2,232	297,0	0,345	107,5	1,056E+04
2,143	295,5	0,354	101,6	1,083E+04
2,057	294,0	0,362	96,08	1,099E+04
1,975	292,5	0,370	90,96	1,109E+04
1,896	291,0	0,378	86,16	1,111E+04
1,820	289,6	0,385	81,65	1,109E+04
1,747	288,1	0,392	77,43	1,103E+04

Un cop determinat el flux màssic es realitza el càlcul de l'àrea requerida tenint en compte els factors que es mostren a la següent taula.

Taula A.22. Factors per al càlcul de l'àrea requerida.

Variable		Valor
Coefficient de descàrrega	Fluid bifàsic	0,85
Factor vàlvules balancejades	No aplica	-
Factor de correcció de combinació	No hi ha disc de ruptura	1,00
Factor de la viscositat	Menys de 100 cP	1,00

$$A = \frac{277,8 \cdot 7,334 \cdot 3600}{0,85 \cdot 1,00 \cdot 1,00 \cdot 1,111 \cdot 10^4} = 776,4 \text{ mm}^2 \quad (7)$$

A.8.2 ISO 4126-10

Com ja s'ha esmentat en l'apartat 4.9.2.2, com es compleixen les limitacions que estableix la norma, es pot realitzar el càlcul seguint el procediment que es mostra a continuació.

Primer de tot, es realitza el càlcul del coeficient de compressibilitat, tenint en compte que no hi ha retard d'ebullició, ja que hi ha una fracció de vapor del 28%.

$$\omega = \frac{0,281 \cdot 1,921 \cdot 10^{-2}}{1,125 \cdot 6,523 \cdot 10^{-3}} + \frac{3372 \cdot 2,851 \cdot 10^6 \cdot 306,2}{6,523 \cdot 10^{-3}} \cdot \left(\frac{1,921 \cdot 10^{-2} - 2,237 \cdot 10^{-3}}{4,446 \cdot 10^5} \right)^2 = 1,393 \quad (45)$$

Un cop determinat el coeficient de compressibilitat, es determina la relació de pressió crítica i la relació de contrapressió de la vàlvula.

$$\eta_c^2 + (1,393^2 - 2 \cdot 1,393)(1 - \eta_c)^2 + 2 \cdot 1,393^2 \ln \eta_c + 2 \cdot 1,393^2 (1 - \eta_c) = 0 \quad (12)$$

$$\eta_c = 0,649$$

$$\eta = \frac{1,013 \cdot 10^5}{2,851 \cdot 10^6} = 0,035 \quad (44)$$

Com la relació de pressió crítica és major a la relació de contrapressió de la vàlvula, el flux arriba en estat crític.

Un cop determinat el coeficient de compressibilitat del sistema, s'ha de calcular el coeficient de descàrrega. Per tal de determinar aquest coeficient primer s'ha de determinar la fracció buida a la secció transversal més estreta de la vàlvula.

$$\varepsilon_{\text{seat}} = 1 - \frac{2,237 \cdot 10^{-3}}{6,523 \cdot 10^{-3} \cdot \left[1,393 \cdot \left(\frac{1}{0,649} - 1 \right) + 1 \right]} = 0,805 \quad (50)$$

Amb la fracció buida calculada, ja es pot realitzar el càlcul del coeficient de descàrrega.

$$K_{\text{dr,2ph}} = 0,953 \cdot 0,805 + (1 - 0,805) \cdot 0,720 = 0,907 \quad (51)$$

Abans de realitzar el càlcul del flux màssic descarregable per la vàlvula, s'ha de determinar el coeficient de flux.

$$C = \frac{\sqrt{1,393 \cdot \ln\left(\frac{1}{0,649}\right) - (1,393 - 1) \cdot (1 - 0,649)}}{1,393 \cdot \left(\frac{1}{0,649} - 1\right) + 1} = 0,389 \quad (52)$$

A partir del coeficient de descàrrega de la vàlvula i el coeficient de flux, ja es pot realitzar el càlcul del flux màssic descarregable.

$$\dot{m}_{\text{SV}} = 0,907 \cdot 0,389 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 2,851 \cdot 10^6}{6,523 \cdot 10^{-3}}} = 1,043 \cdot 10^4 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \quad (54)$$

Finalment amb el flux màssic descarregable i el flux màssic de descàrrega, ja es pot determinar l'àrea de la vàlvula i el diàmetre d'aquesta.

$$A_0 = \frac{7,334}{1,043 \cdot 10^4} \cdot 10^3 = 703,4 \text{ mm}^2 \quad (55)$$

A.8.3 GOST 12.2.085-2017

Finalment, es realitza el càlcul utilitzant la normativa GOST 12.2.085-2017.

Primer de tot es realitza el càlcul del coeficient de transferència de calor del medi.

$$\Lambda = \frac{2,851 \cdot 10^6 \cdot (52,04^{-1} - 447,0^{-1})}{4,446 \cdot 10^5} = 0,109 \quad (88)$$

Tot seguit es calcula la fracció de buit quan les dues fases tenen la mateixa velocitat, per poder calcular el paràmetre Omega.

$$\varepsilon = \left[1 + \frac{1 - 0,281}{0,281} \cdot \frac{52,04}{447,0} \right]^{-1} = 0,770 \quad (68)$$

Ara ja es pot realitzar el càlcul del paràmetre Omega a partir de la següent equació.

$$\omega = \frac{0,281 + (1 - 0,281) \cdot \frac{3372}{2256}}{0,281 + (1 - 0,281) \cdot \frac{52,04}{447,0}} \cdot \frac{2256}{0,714 \cdot 225,2} \cdot 0,109^2 + 0,770 \cdot (1 - 2 \cdot 0,109) = 1,221 \quad (91)$$

A continuació, cal determinar la relació de pressions crítiques, tal i com es mostra tot seguit.

$$\left[2 \cdot 1,221 \cdot (1,221 - 1) \cdot \beta_{\text{kp}} \right]^2 - (1,221 - 1)^2 + 2 \cdot 1,221^2 \cdot \ln \beta_{\text{kp}} + 1 = 0 \quad (64)$$

$$\beta_{kp}=0,632$$

Els últims paràmetres que cal determinar abans de realitzar el càlcul de l'àrea requerida són la velocitat massica adimensional al flux crític i el flux massic. Es calculen de la següent manera.

$$K_{\Pi kp} = \frac{0,632}{\sqrt{1,221}} = 0,572 \quad (62)$$

$$G_{ideal}^* = 0,572 \cdot \sqrt{2,851 \cdot 10^6 \cdot 153,3} = 1,196 \cdot 10^4 \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}^2} \quad (60)$$

Un cop determinat el flux massic es realitza el càlcul de l'àrea requerida tenint en compte els factors que es mostren a la següent taula.

Taula A.23. Factors per al càlcul de l'àrea requerida.

Variable		Valor
Coeficient de descàrrega	Fluid bifàsic	0,85
Factor vàlvules balancejades	No aplica	-
Factor de correcció de combinació	No hi ha disc de ruptura	1,00
Factor de la viscositat	Menys de 100 cP	1,00

$$F = \frac{7,334}{0,85 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,196 \cdot 10^6} \cdot 10^6 = 721,4 \text{ mm}^2 \quad (58)$$