

**TESIS DOCTORAL**

**SUBENFRIADORES CRIOGÉNICOS  
NITRÓGENO - NITRÓGENO:  
APORTACIÓN A LA METODOLOGÍA  
PARA EL DISEÑO**



**Rafael Ruiz Mansilla**  
Ingeniería de Diseño Térmico  
Departament de Màquines i Motors Tèrmics  
Escola Tècnica Superior d'Enginyers Industrials de Barcelona  
Universitat Politècnica de Catalunya

**Septiembre 1994**

8.4.3.- Resultados para aislantes de polvos opacos evacuados

polvos opacos evacuados: $\lambda = 0,0004$ [W/(K m)]				
$\delta$ [cm]	$\dot{q}_{ext}$ [W]	$\dot{m}_{evap}$ [g/s]	$\dot{m}_{evap}$ [g/día]	[%/día]
1	1,44439	0,0072072	622,7038	22,4922
2	0,795574	0,0039698	342,987	12,3888
4	0,465073	0,0023206	200,5018	7,2422
6	0,352143	0,0017571	151,8157	5,4836
8	0,294316	0,0014686	126,8852	4,5831
10	0,258802	0,0012914	111,5743	4,0301
15	0,209712	0,0010464	90,411	3,2657
20	0,183832	0,0009173	79,2534	2,8627
25	0,167539	0,000836	72,2292	2,6089
30	0,156189	0,0007793	67,3358	2,4322

polvos opacos evacuados: $\lambda = 0,0005$ [W/(K m)]				
$\delta$ [cm]	$\dot{q}_{ext}$ [W]	$\dot{m}_{evap}$ [g/s]	$\dot{m}_{evap}$ [g/día]	[%/día]
1	1,801893	0,0089911	776,8298	28,0593
2	0,993423	0,004957	428,2833	15,4697
4	0,581026	0,0028992	250,4914	9,0478
6	0,440018	0,0021956	189,7001	6,852
8	0,367793	0,0018352	158,5624	5,7273
10	0,323429	0,0016138	139,4364	5,0365
15	0,262099	0,0013078	112,996	4,0814
20	0,229761	0,0011465	99,0545	3,5779
25	0,209402	0,0010449	90,277	3,2608
30	0,195218	0,0009741	84,162	3,04

Tabla 8.26 Evaporación con polvos opacos evacuados de  $\lambda=0,0004$  y  $0,0005$  W/(K m)

polvos opacos evacuados: $\lambda = 0,0006$ [W/(K m)]				
$\delta$ [cm]	$\dot{q}_{ext}$ [W]	$\dot{m}_{evap}$ [g/s]	$\dot{m}_{evap}$ [g/día]	[%/día]
1	2,158099	0,0107685	930,397	33,6062
2	1,190894	0,0059423	513,4168	18,5447
4	0,696866	0,0034772	300,4321	10,8517
5	0,595942	0,0029736	256,9216	9,2801
6	0,527835	0,0026338	227,5596	8,2195
8	0,441233	0,0022017	190,2239	6,8709
10	0,388031	0,0019362	167,2875	6,0425
15	0,314472	0,0015692	135,5749	4,897
20	0,275681	0,0013756	118,8514	4,2929
25	0,251257	0,0012537	108,3217	3,9126
30	0,234241	0,0011688	100,9856	3,6476

polvos opacos evacuados: $\lambda = 0,0007$ [W/(K m)]				
$\delta$ [cm]	$\dot{q}_{ext}$ [W]	$\dot{m}_{evap}$ [g/s]	$\dot{m}_{evap}$ [g/día]	[%/día]
1	2,513051	0,0125396	1083,4235	39,1335
2	1,387998	0,0069258	598,3921	21,6141
4	0,812595	0,0040547	350,3252	12,6538
5	0,69498	0,0034678	299,6189	10,8223
6	0,615596	0,0030717	265,3951	9,5861
8	0,514638	0,0025679	221,8703	8,014
10	0,452608	0,0022584	195,1278	7,0481
15	0,366831	0,0018304	158,1479	5,7123
20	0,321592	0,0016047	138,6444	5,0079
25	0,293106	0,0014625	126,3634	4,5643
30	0,273258	0,0013635	117,8068	4,2552

polvos opacos evacuados: $\lambda = 0,000864$ [W/(K m)]				
$\delta$ [cm]	$\dot{q}_{ext}$ [W]	$\dot{m}_{evap}$ [g/s]	$\dot{m}_{evap}$ [g/día]	[%/día]
1	3,092546	0,0154312	1333,2548	48,1575
2	1,710479	0,008535	737,4198	26,6358
4	1,00216	0,0050006	432,05	15,6057
5	0,857243	0,0042775	369,5737	13,3491
6	0,759407	0,0037893	327,3945	11,8256
8	0,634949	0,0031683	273,7386	9,8875
10	0,558462	0,0027866	240,7635	8,6964
15	0,452672	0,0022587	195,1553	7,0491
20	0,396866	0,0019803	171,0965	6,18
25	0,361723	0,0018049	155,9455	5,6328
30	0,337235	0,0016827	145,3885	5,2515

Tabla 8.27 Evaporación con polvos opacos evacuados, de  $\lambda = 0,0006; 0,0007$  y  $0,000864$  W/(K m)

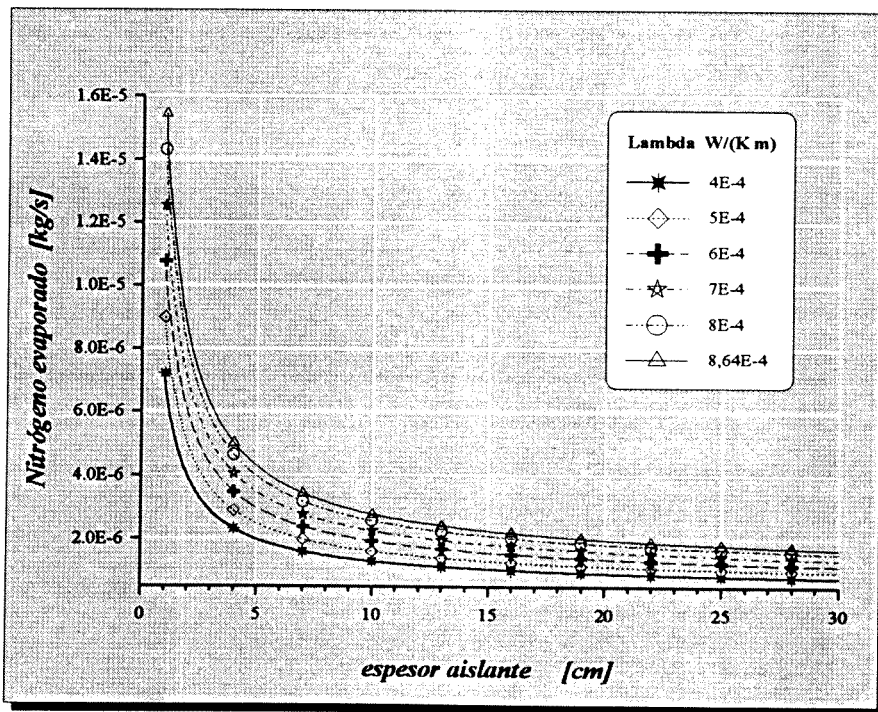


fig. 8.24 Caudal másico evaporado, con polvos opacos evacuados

#### 8.4.4.- Resultados para aislantes de fibras de vidrio evacuadas

fibras de vidrio evacuadas: $\lambda = 0,0008$ [W/(K m)]				
$\delta$ [cm]	$\dot{q}_{ext}$ [W]	$\dot{m}_{evap}$ [g/s]	$\dot{m}_{evap}$ [g/día]	[%/día]
1	2,866783	0,0143047	1235,9242	44,6419
2	1,584745	0,0079076	683,2134	24,6778
4	0,928217	0,0046316	400,1719	14,4543
6	0,703303	0,0035093	303,207	10,9519
8	0,588009	0,0029341	253,5019	9,1565
10	0,517161	0,0025805	222,9577	8,0533
15	0,419177	0,0020916	180,7152	6,5275
20	0,367494	0,0018337	158,4335	5,7227
25	0,334947	0,0016713	144,4021	5,2158
30	0,31227	0,0015582	134,6257	4,8627

fibras de vidrio evacuadas: $\lambda = 0,0009$ [W/(K m)]				
$\delta$ [cm]	$\dot{q}_{ext}$ [W]	$\dot{m}_{evap}$ [g/s]	$\dot{m}_{evap}$ [g/día]	[%/día]
1	3,219326	0,0160638	1387,9122	50,1317
2	1,781143	0,0088875	767,8841	27,7362
4	1,043734	0,005208	449,9733	16,2531
6	0,790956	0,0039467	340,9959	12,3168
8	0,661347	0,0033	285,1191	10,2986
10	0,58169	0,0029025	250,7775	9,0581
15	0,47151	0,0023527	203,2769	7,3424
20	0,413387	0,0020627	178,2188	6,4373
25	0,376783	0,0018801	162,4381	5,8673
30	0,351277	0,0017528	151,4423	5,4701

fibras de vidrio evacuadas: $\lambda = 0,001$ [W/(K m)]				
$\delta$ [cm]	$\dot{q}_{ext}$ [W]	$\dot{m}_{evap}$ [g/s]	$\dot{m}_{evap}$ [g/día]	[%/día]
1	3,570707	0,0178171	1539,3988	55,6034
2	1,977198	0,0098658	852,4071	30,7891
4	1,159147	0,0057839	499,7303	18,0504
5	0,991658	0,0049482	427,5223	15,4422
6	0,878556	0,0043838	378,7622	13,681
8	0,734652	0,0036658	316,7222	11,4401
10	0,646196	0,0032244	278,5873	10,0626
15	0,523831	0,0026138	225,8332	8,1571
20	0,459271	0,0022917	198,0005	7,1518
25	0,418612	0,0020888	180,4713	6,5187
30	0,390279	0,0019474	168,2567	6,0775

Tabla 8.28 Evaporación con fibras de vidrio evacuadas, de  $\lambda = 0,0008; 0,0009$  y  $0,001$  W/(K m)

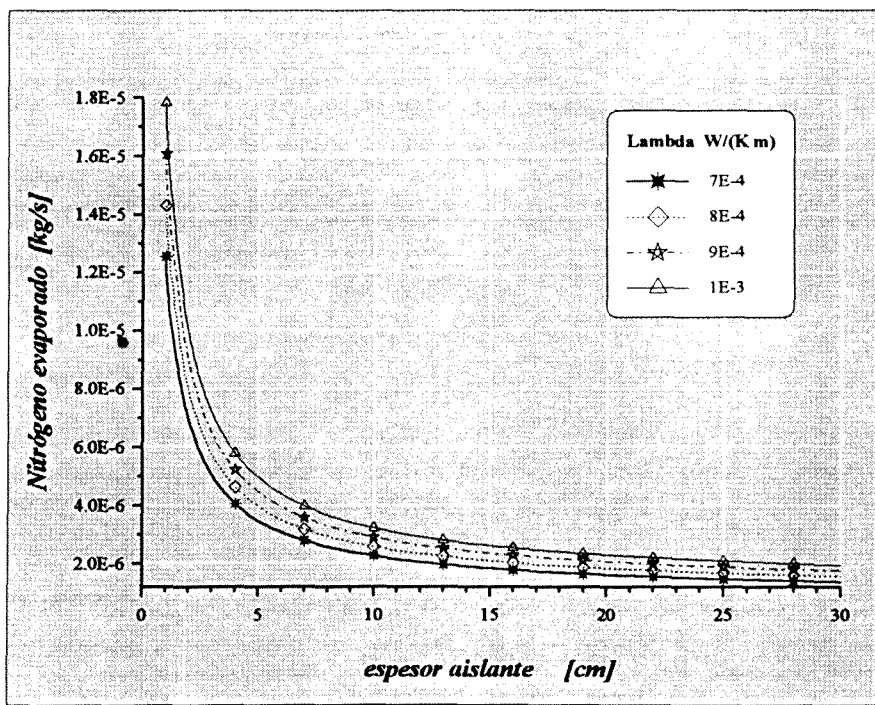


fig. 8.25 Caudal másico evaporado, con fibras de vidrio evacuadas

#### 8.4.5.- Resultados para aislantes de polvos evacuados

polvos evacuados: $\lambda = 0,003$ [W/(K m)]				
$\delta$ [cm]	$\dot{q}_{ext}$ [W]	$\dot{m}_{evap}$ [g/s]	$\dot{m}_{evap}$ [g/día]	[%/día]
1	10,380439	0,0517963	4475,2024	161,6454
2	5,833202	0,0291065	2514,8031	90,8353
4	3,447653	0,0172031	1486,3481	53,6872
6	2,620539	0,013076	1129,7637	40,8073
8	2,194459	0,0109499	946,0724	34,1724
10	1,931898	0,0096398	832,8776	30,0837
15	1,56784	0,0078232	675,9252	24,4146
20	1,375365	0,0068628	592,9457	21,4173
25	1,254001	0,0062572	540,6233	19,5274
30	1,169367	0,0058349	504,1363	18,2095

polvos evacuados: $\lambda = 0,00576$ [W/(K m)]				
$\delta$ [cm]	$\dot{q}_{ext}$ [W]	$\dot{m}_{evap}$ [g/s]	$\dot{m}_{evap}$ [g/día]	[%/día]
1	19,200732	0,0958078	8277,7967	298,9959
2	10,976949	0,0547728	4732,3693	170,9343
4	6,551032	0,0326883	2824,2731	102,0134
6	4,996554	0,0249318	2154,1082	77,8069
8	4,191476	0,0209146	1807,0243	65,2701
10	3,693859	0,0184316	1592,4921	57,5212
15	3,001923	0,014979	1294,1856	46,7463
20	2,63517	0,013149	1136,0715	41,0352
25	2,403583	0,0119934	1036,2297	37,4289
30	2,241934	0,0111868	966,54	34,9117

polvos evacuados: $\lambda = 0,0075$ [W/(K m)]				
$\delta$ [cm]	$\dot{q}_{ext}$ [W]	$\dot{m}_{evap}$ [g/s]	$\dot{m}_{evap}$ [g/día]	[%/día]
1	24,469018	0,122095510549,0543		381,0343
2	14,126502	0,0704884	6090,2009	219,9795
4	8,478163	0,0423043	3655,0957	132,0229
5	7,289118	0,0363712	3142,4758	113,507
6	6,479411	0,032331	2793,3959	100,8981
8	5,440988	0,0271494	2345,7124	84,7277
10	4,797993	0,023941	2068,5052	74,7149
15	3,902419	0,0194723	1682,4064	60,7689
20	3,427017	0,0171001	1477,4516	53,3659
25	3,126567	0,0156009	1347,9221	48,6873
30	2,916737	0,0145539	1257,4601	45,4198

Tabla 8.29 Evaporación con polvos evacuados, de  $\lambda=0,003$ ;  $0,00576$  y  $0,0075$  W/(Km)

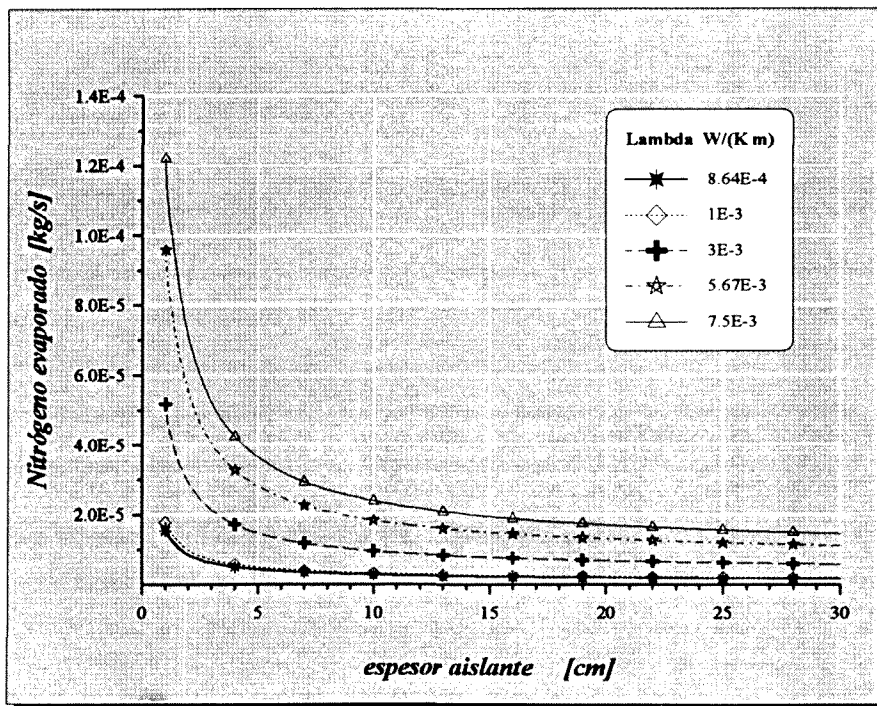


fig. 8.26 Caudal másico evaporado, con polvos evacuados



Para cualquiera de los tipos de aislantes analizados, se puede apreciar como la potencia que penetra desde el exterior (en este caso representada por el caudal de líquido evaporado como consecuencia de la misma), cae bruscamente con pequeños espesores de aislante, disminuyendo notablemente la pendiente, tendiendo a hacerse nula de forma rápida, de tal manera que todas las curvas son asintóticas a cero.

En cualquier caso la forma de esa caída depende de la calidad del aislante, siendo tanto más rápida y mayor cuanto mejor es el mismo, es decir cuanto menor es su conductividad térmica. Ello se puede apreciar en la siguiente gráfica en la que se ha representado un aislante medio de cada tipo de los anteriores (las caídas no se aprecian tan bruscas como en las anteriores, consecuencia de la escala logarítmica).

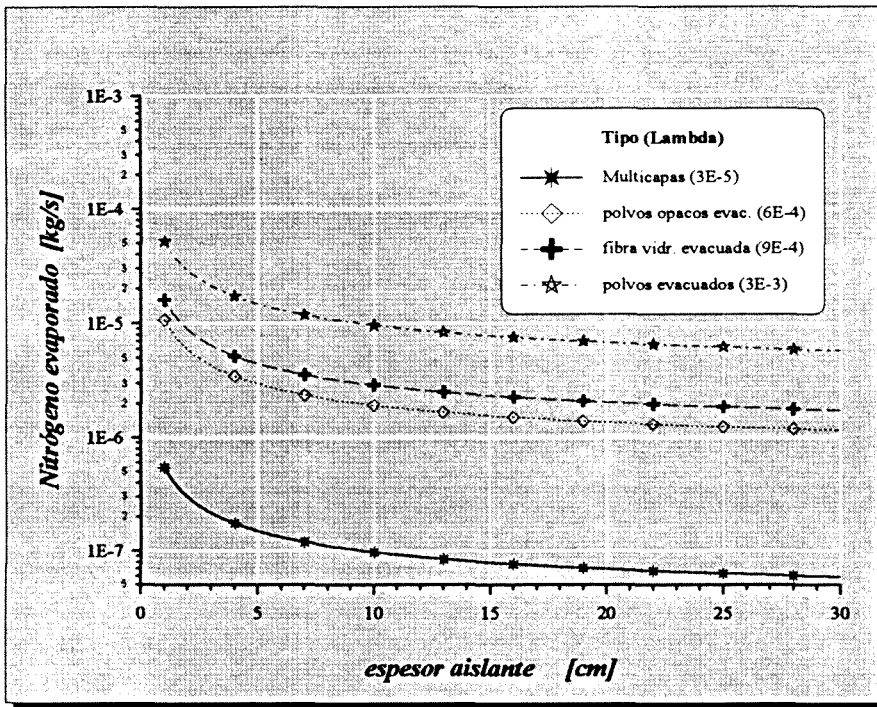


fig. 8.27 Comparación de los tipos de aislantes.

Ello en definitiva significa que son los primeros milímetros del espesor de aislamiento los más efectivos, y por tanto en consecuencia resultarán ser los más rentables en términos económicos.

De cara a fijar el espesor que se debe colocar, además de los ya comentados criterios de tipo práctico propuestos en la literatura y la industria (admisión de pérdidas entorno al

10 ÷ 20 %/día), citados oportunamente en el apartado 6.6 de la página 70, vamos a realizar el análisis económico también entonces mencionado.

Consideraremos para ello el aislante que se utilizará en el equipo, concretamente perlita expandida y al vacío (inferior a 0,133 Pa), de  $\lambda = 8,64E-4$  W/(K m). Para determinar su precio<sup>1</sup> hemos de calcular el volumen de la misma en función del espesor colocado, ya que su coste se sitúa sobre las 5800 pts/m<sup>3</sup>, con densidad media de 45 kg/m<sup>3</sup>.

Además se ha de considerar la variación de precio del recipiente exterior en función de su diámetro, y por tanto del espesor de aislante. Realizado el estudio y correlacionado el mismo se ha obtenido que para recipientes pulimentados la curva de costes resulta (fijaremos además un plazo de amortización de 3 años):

$$\text{Coste [pts]} = 72000 + 199,2 \delta \text{ [mm]}$$

En cuanto al coste del nitrógeno evaporado, su precio se sitúa entre las 40000 y las 130000 pts/m<sup>3</sup>. Se considerará este último valor como más desfavorable, y un funcionamiento de 8 h/día, 22 días/mes y 11 meses/año, lo que supone un total anual de unas 2000 horas. Con ello podemos construir la tabla y gráfica de costes.

perlita expandida evacuada: $\lambda = 0,000864$ [W/(K m)]							
$\delta$ [cm]	$\dot{q}_{ext}$ [W]	[%/día]	$\dot{m}_{n_2}$ [g/s]	[kg/año]	N <sub>2</sub> [pts]	Inst [pts]	total [pts]
1	3,092	16,1	0,01543	111,1	15907	24997	40904
2	1,710	8,8	0,00853	61,5	8798	25995	34793
3	1,240	6,4	0,00619	44,6	6380	26992	33373
4	1,002	5,2	0,00500	36,0	5155	27989	33144
5	0,857	4,4	0,00428	30,8	4409	28987	33396
6	0,759	3,9	0,00379	27,3	3906	29984	33890

Tabla 8.30 *Análisis de costes del aislamiento con perlita*

<sup>1</sup> A pesar de que los precios aquí indicados serán obsoletos, previsiblemente la tendencia de todos ellos será la misma, por lo que el resultado puede, salvo imponderables ser válido en el tiempo.

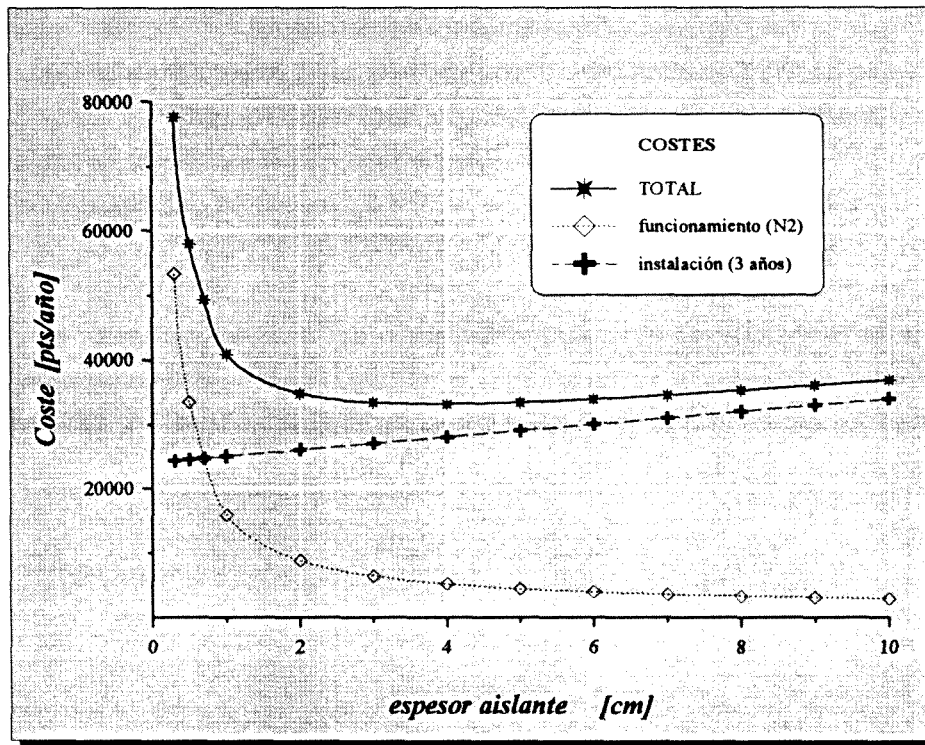


fig. 8.28 Curvas de costes de instalación, funcionamiento y total

Tal como se aprecia claramente en la gráfica la curva de coste total anual, desciende muy rápidamente, y si bien el mínimo se presenta próximo a los 40 mm de espesor de aislante, lo cierto es que se puede apreciar también que no hay prácticamente diferencias para espesores entre 30 y 60 mm (alrededor de 35000 pts/año), por lo que cualquier valor de este orden puede resultar adecuado.

Además según se desprende de la tabla, los porcentajes de pérdidas diarias se sitúan algo por debajo del 10 % tomado como valor aproximado de tipo práctico.

Con respecto a la influencia de estas aportaciones desde el exterior, sobre el rendimiento másico del equipo según se comentaba al final del apartado anterior, puede apreciarse en cuarta columna de la última tabla, que el orden de magnitud del caudal de nitrógeno evaporado como consecuencia de las mismas, en este caso es de  $5E-6$  kg/s, por lo que siendo el caudal de consumo mínimo, para la presión y subenfriamiento máximos, del orden de  $1,7E-2$ , resulta que el rendimiento másico solo sufre una ligera reducción, que

se situará como máximo entorno al 0,03 %, por lo que no merece la pena tenerla en consideración a efectos prácticos.

## 8.5.- EMPLAZAMIENTO. DISTANCIA MÁXIMA A CONSUMO

Como se ha puesto de manifiesto mediante los resultados de apartados anteriores, el rendimiento másico del equipo, disminuye al aumentar la presión, y también hace lo propio cuando las exigencias de subenfriamiento son elevadas. En consecuencia interesará minimizar ambas variables a las necesidades estrictas de cada caso.

Minimizada la presión, en base a las pérdidas de carga evaluadas en la instalación; con respecto al subenfriamiento necesario, el mismo únicamente dependerá de la línea entre el equipo y el consumo, por lo que deberá ser el mínimo valor que permita cubrir las aportaciones desde el exterior en la misma.

Podemos por tanto establecer a partir de una longitud y características de línea, el subenfriamiento adecuado a la misma, o bien dado un subenfriamiento determinar cual es la distancia máxima de la línea (ubicación óptima del equipo).

A continuación mostramos los resultados obtenidos sobre esta relación entre longitud y subenfriamiento, para el caso de una línea aislada con un aislante de conductividad 0,02 W/(K m) y 10 mm de espesor (se trata simplemente de un único ejemplo ilustrativo, ya que debe realizarse el cálculo para cada situación<sup>1</sup>, y en función del tipo y espesor de aislamiento).

---

<sup>1</sup> Evidentemente huelga decir que el primer paso para minimizar las aportaciones externas, es minimizar la longitud, colocando el equipo junto al consumo, sin embargo ello no siempre es posible y en estos casos resulta de especial interés los cálculos de este apartado.

$D_i=10$ [mm] $\delta=1$ [mm] $\lambda_{aisl}=0,02$ [W/(K m)] $\delta_{aisl}=10$ [mm]								
$P_{sum}$ [MPa]	$\Delta T$ [K]	$T_I$ [K]	$T_F$ [K]	$\dot{q}$ [W]	$\dot{m}_{cons}$ [kg/s]	$Re_D$	$L_{m\acute{a}x}$ [m]	$\Delta P$ [Pa]
0,2	1	82,65	83,64	44,3107	0,0214	21373,24	1840	225,5188
	2	81,65	83,63	87,3787	0,0212	20832,78	3620	435,5391
	3	80,65	83,62	129,1947	0,0209	20297,76	5340	630,6443
	4	79,65	83,61	170,2299	0,0207	19771,2	7020	813,7201
0,3	1	86,93	87,92	43,4189	0,0208	23388,38	1840	214,276
	2	85,93	87,91	85,6252	0,0206	22819,97	3620	413,2768
	3	84,93	87,91	127,0794	0,0203	22262,48	5360	599,8243
	4	83,93	87,9	167,301	0,0201	21712,23	7040	772,1613
	5	82,93	87,89	206,2802	0,0199	21168,91	8660	930,8483
0,4	1	90,24	91,23	43,1925	0,0203	24888,53	1860	208,1422
	2	89,24	91,23	84,7311	0,0201	24289,73	3640	398,9859
	3	88,24	91,22	125,5317	0,0198	23704,49	5380	577,5473
	4	87,24	91,22	165,1208	0,0196	23128,77	7060	742,1564
	5	86,24	91,21	203,4907	0,0194	22561,31	8680	893,3688
	6	85,24	91,21	241,0951	0,0191	22005,19	10260	1033,75
	7	84,24	91,2	277,4606	0,0189	21456,81	11780	1161,728
0,5	1	92,98	93,98	42,6143	0,0199	26112,01	1860	200,9688
	2	91,98	93,97	84,0575	0,0196	25487,57	3660	387,2238
	3	90,98	93,97	124,3185	0,0194	24875,32	5400	559,3363
	4	89,98	93,97	163,3866	0,0192	24274,54	7080	717,8637
	5	88,98	93,96	201,7089	0,019	23687,98	8720	865,3424
	6	87,98	93,96	238,3612	0,0187	23108,16	10280	998,2794
	7	86,98	93,96	274,2482	0,0185	22541,25	11800	1121,137
	8	85,98	93,95	308,9084	0,0183	21982,43	13260	1232,43
	9	84,98	93,95	342,7871	0,018	21435,15	14680	1334,487
	10	83,98	93,95	375,875	0,0178	20898,99	16060	1427,675

Tabla 8.31 *Distancias máximas hasta consumo, en función del subenfriamiento y la presión de suministro*

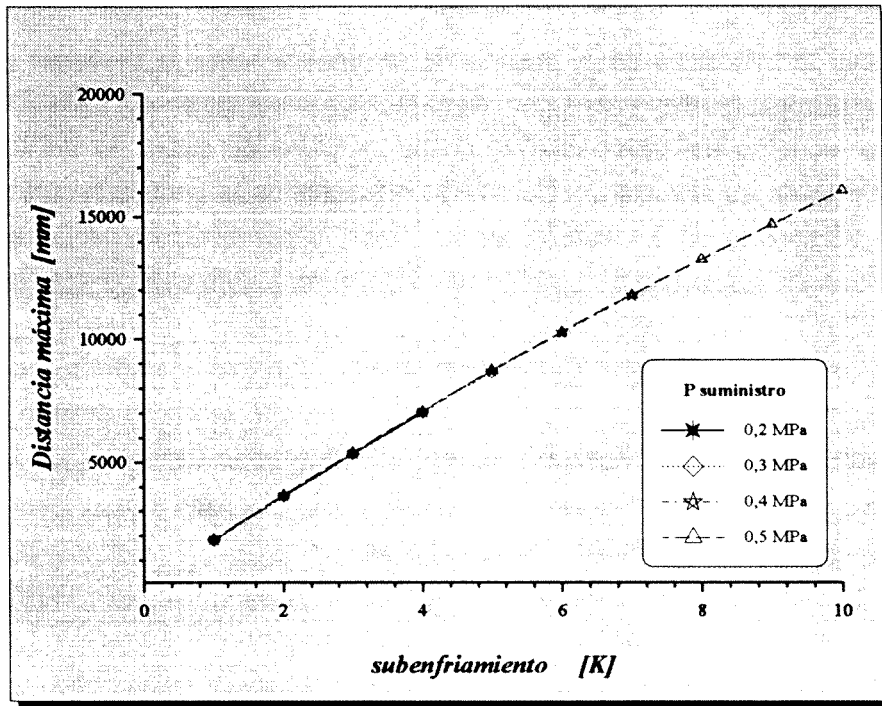


fig. 8.29 Posición o subenfriamiento óptimos para varias presiones

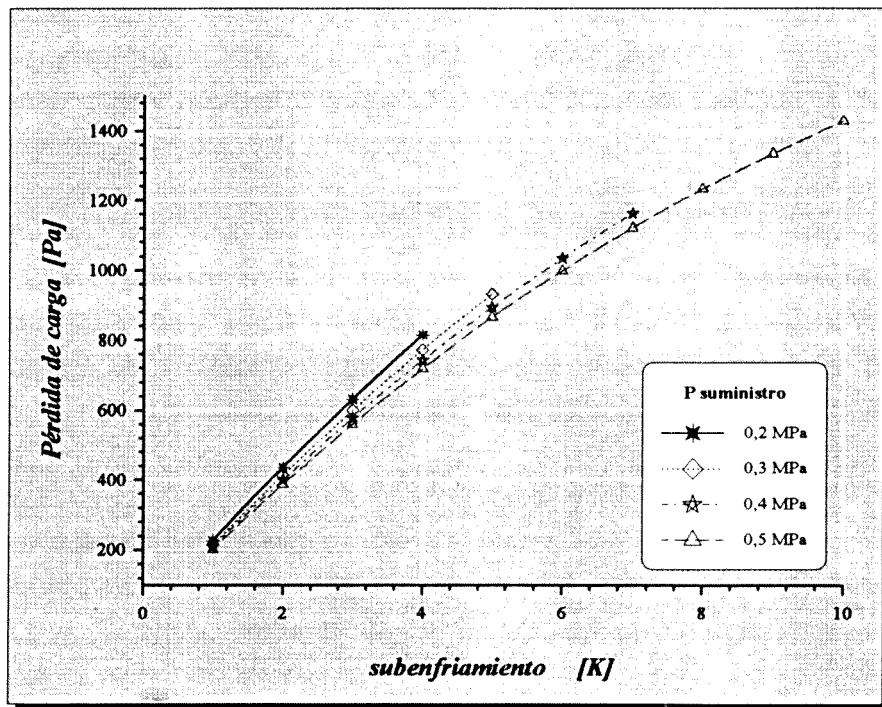


fig. 8.30 Pérdida de carga para la distancia máxima en función del subenfriamiento

Se observa que la influencia de la presión de suministro sobre la distancia máxima de separación entre subenfriador y consumo, es absolutamente menospreciable, ello es debido a que por lo reducido del valor relativo de las pérdidas de carga, la influencia de la variación de presión no alcanza a reflejarse lo suficiente en la temperatura de saturación (tal y como se aprecia en los valores de la tabla), y por tanto como las propiedades tampoco afectan en exceso no hay traducción visible en cuanto a variación de longitud.

Si que se observa en cambio que lógicamente cuanto mayor es el subenfriamiento al que se somete el fluido en el equipo, mayor es la distancia que se puede permitir, siendo la relación, como se observa en la gráfica de tipo prácticamente lineal.

En cualquier caso lo más destacable es la posibilidad de optimizar de una manera sencilla y rápida, y de forma particular la ubicación del subenfriador según las necesidades que cada caso requiera.

## 9.- CONTRASTACIÓN EMPÍRICA

### 9.1.- CONJUGACIÓN TEÓRICA Y EXPERIMENTAL

Se ha puesto de manifiesto a lo largo de los capítulos que es esta una tesis, centrada en el establecimiento de la metodología de diseño de este tipo de cambiadores criogénicos, en la que se ha querido entrar con detalle en la fenomenología de los diferentes procesos de convección que tienen lugar, proponiéndose en algunos casos correlaciones para la determinación de los coeficientes al respecto.

En consecuencia resulta evidente que la misma consta de una componente puramente analítica manifiesta. No obstante como no podía, a mi entender, concebirse de otra manera; se ha querido dotar a este trabajo de una componente experimental, y a tal efecto se ha procedido a la construcción de un prototipo de subenfriador, diseñado en base a la metodología propuesta, y sobre el que se han llevado a cabo toda una serie de pruebas y ensayos al objeto de contrastar los resultados calculados analíticamente, y expuestos a lo largo del capítulo anterior.

Debo puntualizar que tomo consciencia acerca del hecho, de que tratándose de una metodología de diseño que modela el comportamiento de estos cambiadores, y estando encaminada a optimizar el mismo, resulta insuficiente la construcción de un único equipo para someterla a una validación en profundidad, puesto que la versatilidad de aplicación que ofrece la misma desborda ampliamente las posibilidades de experimentación que ofrece este.

Sin embargo la posibilidad de experimentar, aunque sólo sea con un único equipo, permite la extensión de este trabajo, más allá de lo que serían meras propuestas de aplicación de la metodología planteada, cerrando de alguna manera el ciclo de la investigación, al conjugar debidamente el estadio analítico o de la razón, con el práctico de la experimentación.



De manera especial, por estar desarrollada en el ámbito de la ingeniería, considero que el valor de esta tesis se vería seriamente perjudicado, si no se diera la necesaria conjugación de los dos ámbitos de la ciencia citados.

Quiero en este punto remarcar mi reconocimiento para con la firma Carburos Metálicos, y en especial su departamento de I +D de la división industrial, por toda la colaboración personal y material que me han prestado; y gracias a la cual la parte experimental de este trabajo ha podido llevarse a cabo.

## 9.2.- OBJETIVOS DE LA EXPERIMENTACIÓN

Todo investigador desearía poder desarrollar sus estudios sin limitaciones de ningún tipo, de tiempo por un lado, y de forma muy especial de presupuesto. No obstante puesto que como siempre los recursos son escasos, tan sólo se disponía de la posibilidad de construir un único subenfriador.

Por este motivo se optó por diseñar el mismo de forma versátil, al objeto de cubrir el máximo del campo de presiones de suministro previsibles, siguiendo para ello la metodología propuesta, resultando especialmente útil como ya se ha puesto de manifiesto, el *software* elaborado al efecto.

Básicamente las pruebas experimentales se han enfocado, de cara a validar los resultados de los diseños aportados, esto es algo que se ha podido realizar de manera prácticamente directa, comparando los resultados teóricos proporcionados por los programas de cálculo, que resuelven los problemas directo e inverso, con los medidos experimentalmente en el banco de pruebas.

También, aunque de una forma indirecta podrían resultar validadas, las correlaciones propuestas en diferentes ámbitos desde este estudio, si bien para una contrastación absolutamente rigurosa, serían precisos mayores medios, así como equipos de medida y control más sofisticados y precisos, que hasta la fecha escapan de las posibilidades del que suscribe así como del laboratorio del que forma parte.

### 9.3.- CARACTERÍSTICAS DEL SUBENFRIADOR CONSTRUIDO

A continuación facilitamos las características físicas del equipo finalmente construido, y sobre el que se centra toda nuestra experimentación.

*Serpentín:* Tubo de acero inoxidable AISI 316

$D_o$	= 12 mm
$D_i$	= 10 mm
$D_{hel}$	= 65 mm
$\mathcal{P}$	= 30 mm
$N$	= 12 pasos
$L_{serp}$	= 2846 mm
$Z_{serp}$	= 360 mm
$\mathcal{L}$	= 34 mm

*Recipiente interior:* Acero inoxidable AISI 316

$D_{il}$	= 100 mm
$D_{ol}$	= 103 mm
$Z_{il}$	= 460 mm
$Z_{ol}$	= 463 mm
$Z_{liq}$	= 383 mm
$Z_{nul}$	= 23 mm

*Recipiente exterior:* Acero inoxidable AISI 316

$D_{iO}$	= 203 mm
$D_{oO}$	= 206 mm
$Z_{iO}$	= 519 mm
$Z_{oO}$	= 522 mm

*Válvula de expansión:* Electroválvula de 3/8 " gobernada por la sonda de nivel

*Válvulas de I/O:* de accionamiento manual, tipo asiento

*Aislante:* 50 mm de perlita expandida evacuada de  $\lambda = 0,000864 \text{ W/(K m)}$

Se dota también al equipo con una válvula de seguridad, que se abrirá en caso de sobrepresión excesiva.

Con estas características constructivas, la fórmula que relaciona el nivel de líquido, y la superficie de transmisión, obtenida a partir de las expresiones expuestas anteriormente en el apartado 5.3 de la página 46, resultará:

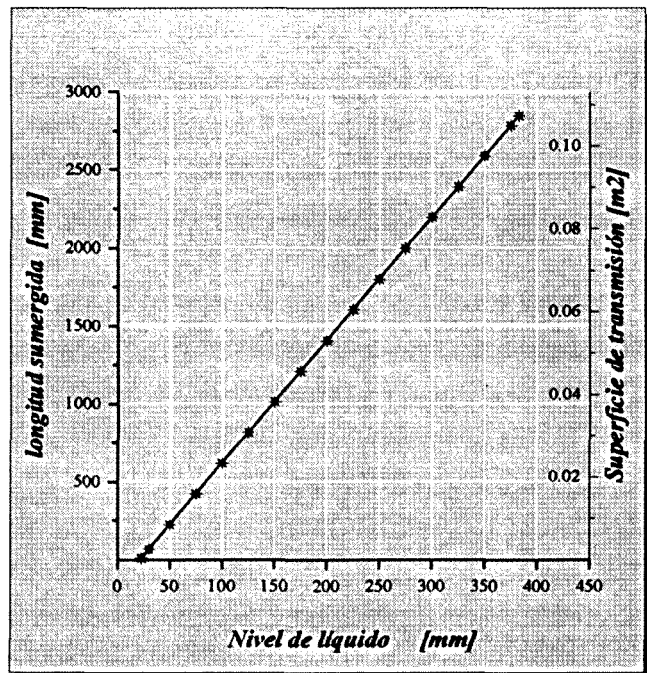
$$L_{serp} = \frac{(Z_{líq} - Z_{nui}) \left[ \mathcal{P} + \sqrt{\mathcal{P}^2 + (\pi D_{hel})^2} \right]}{\mathcal{P}} - D_{hel} + \pi \sqrt{\left( \frac{D_{hel}}{4} \right)^2 + \left( \frac{g\ell}{2} \right)^2}$$

Con lo que finalmente obtenemos al relación lineal:

$$L_{serp} = 7,8798 Z_{líq} - 170,65$$

$Z_{líq}$ [mm]	$L_{sumerg}$ [mm]	$A_o$ [mm <sup>2</sup> ]
30	65,7	2477
50	223,3	8418
100	617,3	23271
150	1011,3	38124
200	1405,3	52977
250	1799,3	67830
300	2193,3	82683
350	2587,3	97536
382,8	2845,7	107277

**Tabla 9.1** longitud sumergida, y superficie frente al nivel de líquido



**fig. 9.1** Superficie de transmisión frente al nivel de líquido

## 9.4.- INSTRUMENTACIÓN

En este apartado relacionaremos las características más relevantes del instrumental utilizado a lo largo de las pruebas.

### *Sondas de temperatura*

Todas las sondas utilizadas son del tipo Pt 100, de dilatada experiencia y contrastados resultados, en este tipo de aplicaciones.

Su funcionamiento, brevemente, se basa en la variación de la resistencia eléctrica de un metal (el Platino en este caso) con la temperatura, la medición de esta resistencia mediante un puente de Wheatstone, calibrado adecuadamente, permite leer en la escala directamente temperaturas en vez de resistencias.

Sean  $R_t$  y  $R_0$ <sup>1</sup> las resistencias eléctricas a temperaturas  $T$  y  $T_0$  respectivamente, la relación entre ambas depende del coeficiente de resistencia por temperatura  $\alpha_R$ , definido a partir de la expresión.

$$R_t = R_0 [ 1 + \alpha_R (T - T_0) ]$$

En el caso del platino este coeficiente es relativamente alto (del orden de 0,004 a temperatura ambiente), de tal manera que la sonda resulta muy sensible. La resistividad también es elevada (9,83 [ $\mu\Omega/cm$ ]) lo cual redonda también en favor de la sensibilidad.

El intervalo útil de temperaturas va de -200 a 950 °C, y su precisión es de 0,01 °C.

En nuestro caso el problema se centra, más que en el error de medida individual de las sondas, en el error comparativo entre ellas, dado que lo que más nos interesa evaluar es precisamente el subenfriamiento.

---

<sup>1</sup> el valor de esta resistencia en Ohms es el número que figura a continuación del material de la sonda, 100  $\Omega$  en nuestro caso.

En este sentido lo que se ha procedido a realizar es a una comprobación del adecuado calibrado de ambas, comprobando que tanto a temperatura ambiente como a temperaturas criogénicas todas marcaban de forma idéntica.

### *Control de nivel*

Con respecto al sistema de regulación de nivel, el equipo experimental se ha dotado de un equipo menos automatizado del que se comenta en el apéndice dedicado al efecto, el motivo radica en el hecho de que tratándose de un subenfriador de pruebas, se opta por eliminar todos los elementos automáticos no indispensables.

Por este motivo no se ha instalado sonda de nivel mínimo, ya que se puede realizar sin problemas un seguimiento de las temperaturas durante la puesta en marcha, procediéndose a la apertura del consumo cuando se tiene un nivel deseado.

Además el control no se realizará en base al subenfriamiento, como variable sobre la que se pueda establecer un valor de consigna, tampoco jugará este papel la propia temperatura de salida, como se propone en el apéndice de regulación. Se utiliza directamente la sonda de nivel máximo como elemento regulador, para lo cual simplemente esta se ha dotado de movilidad en sentido vertical, de manera que la podemos posicionar a cualquier altura.

La cuestión es que con esta única sonda, aunque con una mayor intervención personal, podemos realizar todas las funciones de regulación del subenfriamiento. El funcionamiento, como ya se comentó para la sonda de nivel máximo, consiste en posicionar la sonda a una cierta altura, si el nivel de líquido es inferior la solenoide abre la válvula y si es superior la cierra.

Es por tanto un sistema de regulación Todo-Nada, sin embargo falta por detallar como la sonda detecta si el líquido la baña o no. Se trata de un sistema de los llamados en bucle abierto, pues la variable regulada (nivel) no será la reguladora (medida), ya que lo que realmente se mide es la temperatura del extremo de la sonda.

En efecto la sonda de nivel no es más que una sonda de temperatura Pt 100, que además incorpora una pequeña resistencia eléctrica calefactora, con ello la temperatura medida será superior a la del medio que rodee la sonda. Si la sonda está rodeada de

gas, como el coeficiente de convección es reducido el salto entre la temperatura el mismo y la sonda será elevado, mientras que si está sumergida en nitrógeno líquido, la ebullición nucleada<sup>1</sup> hará que la temperatura de la sonda sea mucho más próxima a la del fluido saturado.

La cuestión reside en saber que valor de temperatura de consigna debe introducirse, para el adecuado funcionamiento del sistema, y para ello lo que se hizo fue una determinación experimental, lo que podríamos llamar la calibración de la sonda.

De forma manual en un recipiente abierto con nitrógeno líquido, se pudo constatar visualmente tras múltiples pruebas que la temperatura de consigna que mejor recogía la transición de la sonda de una zona a otra resultaba situarse alrededor de  $-171\text{ }^{\circ}\text{C}$  (102 K), por lo que se utilizó este como valor de consigna, comprobándose además que el diferencial del sistema (separación entre las señales de apertura y cierre) era de 2 K, valor que dada la rapidez en la transición, observada posteriormente a lo largo de las experiencias, resulta ser más que suficiente para nuestro propósito.

### *Medición de caudales*

Siendo inviable en este caso el uso de caudalímetros, se tuvo que optar por un sistema más artesanal para establecer el valor de los caudales máscos en juego, evidentemente no había que inventar nada, simplemente se trata de usar unas básculas electrónicas<sup>2</sup> y un cronómetro.

De cara al caudal de suministro, el Dewar de 150 l del que provenía el líquido estaba montado sobre una de estas básculas. Comparando la diferencia de pesos entre el inicio y el final de la experiencia, y dividiendo por la duración de la misma, tenemos el valor del caudal máscico gastado.

---

<sup>1</sup> Se tuvo ocasión de constatar visualmente el tipo de ebullición que se producía, al introducir la sonda en un vaso con  $\text{N}_2(l)$ , y esta efectivamente era de tipo nucleada, debido a la escasa potencia de la resistencia eléctrica ( $\sim 0,5\text{ W}$ ).

<sup>2</sup> Concretamente de la firma S.H.S.

Por lo que respecta al caudal de consumo, éste era recogido tras la expansión a presión atmosférica <sup>1</sup>, en un pequeño Dewar que era a su vez pesado en otra báscula cuya precisión era de 10 g.

## 9.5.- ALCANCE DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES

El objetivo perseguido con la experimentación realizada, no es otro que el de corroborar la metodología de diseño formulada, y si es necesario incorporar a la misma las correcciones empíricas oportunas aportadas tras el análisis de resultados. En este sentido el acento se colocará fundamentalmente en el subenfriador propiamente dicho, que no es otra cosa que el serpentín.

Por este motivo los ensayos realizados están encaminados a evaluar los subenfriamientos que el equipo es capaz de proporcionar a diferentes caudales de fluido, a distintas presiones, y para varios niveles de líquido expandido en el recipiente interior.

De esta forma no se analizará en este capítulo la cuestión del aislamiento del equipo, ni la idoneidad del emplazamiento, ya que ello además de ser elementos adicionales al subenfriador, requeriría de nuevos montajes y equipamientos.

### 9.5.1.- Rutina experimental. Descripción de los ensayos

Las variables que se controlan a lo largo de los ensayos, son en total seis, a saber:

$$T_I^2, T_F, Z_{llq}, M_{sum}, M_{cons} \text{ y } t$$

---

<sup>1</sup> motivo por el que se debe corregir a la alza, a efectos de calcular el rendimiento másico del equipo, ya que este se establece a la presión de funcionamiento del equipo y el vapor resultante de la expansión no puede ser recogido.

<sup>2</sup> Se controla en base a la actuación sobre la presión de suministro de suministro del Dewar, y a pesar es redundante se mide de forma directa a la entrada del equipo, pues es más fiable la lectura de la Pt 100 que la del manómetro.

Debe considerarse la imposibilidad de fijar a priori el valor del cualquiera de los caudales, pues como se ha dicho no se dispone de medida directa sobre los mismos. Si que pueden fijarse previamente sin embargo, tanto el nivel de líquido como la temperatura inicial o de entrada al equipo.

Por este motivo lo que se realizará es un doble barrido con respecto a la presión y al nivel de líquido y se controlará en régimen permanente cual es el subenfriamiento conseguido, y se procederá a posteriori a evaluar además los caudales existentes en cada caso.

Destacar además que las experiencias se centran en el aspecto térmico, quedando ciertamente marginado el tema fluidodinámico de la evaluación de las pérdidas de carga. Ello se debe a que lo que en realidad interesan son las pérdidas de carga de toda la instalación incluyendo las tuberías de suministro y consumo, así como las válvulas, dependiendo por tanto de cada instalación concreta y no únicamente del subenfriador, motivo adicional por el que se ha omitido su estudio experimental.

El procedimiento a seguir para cada una de las experiencias desarrolladas será en definitiva el siguiente:

- \* Se fijará una presión de suministro actuando sobre las válvulas del Dewar.
- \* Fijaremos una altura de nivel de líquido (empezaremos por el nivel inferior e iremos subiendo la sonda en ensayos sucesivos).
- \* Procederemos a la puesta en marcha del equipo
  - Abriremos únicamente la válvula manual de suministro hasta que el líquido alcance el nivel establecido por la posición de la sonda (bajará la temperatura de la misma y cerrará la válvula solenoide).
  - Una vez conseguido el nivel necesario en el vaso abriremos la válvula manual a consumo, se iniciará entonces un transitorio en el que deberemos ir controlando la evolución de las temperaturas, especialmente la de salida, puesto que esta irá descendiendo paulatinamente hasta alcanzar un valor determinado, señal de llegada al régimen estacionario.



- En estas condiciones de equilibrio, pondremos el cronómetro en marcha, en el mismo instante en que empezamos a recoger el líquido subenfriado y anotamos el peso inicial del Dewar.
- Transcurrido un cierto tiempo (el mayor posible para paliar la lectura de la báscula, y sin que pueda rebosar el pequeño Dewar donde se recoge el líquido subenfriado) se cerrarán las válvulas de suministro y consumo, anotándose en ese instante, tanto el tiempo transcurrido como los pesos de los Dewars.
- Además a lo largo de todo ese período deben vigilarse las posibles oscilaciones de temperaturas (con especial atención a la final), y analizar si son meras fluctuaciones<sup>1</sup> de medida o bien marcan una tendencia, en cuyo caso se daría por nula la experiencia puesto que supondría que no se partió de un estado estacionario como era necesario.

### 9.5.2.- Análisis de las posibles fuentes de error

Es necesario realizar una reflexión acerca de cuales son los posibles motivos de las desviaciones producidas, excluidos los imponderables errores estocásticos de carácter puramente estadístico.

Nos referimos a elementos absolutamente apreciables, y que en consecuencia son susceptibles de corrección, la cual si no se ha realizado en la instalación debe introducirse, si ello es posible en el análisis de los resultados, o cuanto menos tenerse en cuenta a la hora de realizar el mismo.

En este sentido enumeraremos una serie de aspectos que se han observado durante la experimentación.

---

<sup>1</sup> Estas fluctuaciones son consecuencia del uso de un sistema de regulación de nivel del tipo todo-nada, que produce oscilaciones puntuales en los caudales en tránsito por el subenfriador, las cuales a su vez se trasladan también a la temperatura de salida del mismo.

- \* El aislamiento de la tubería de suministro era insuficiente, de manera que con seguridad se producía en la misma una pequeña evaporación. Ello es de tener en cuenta, pues al no haberse dotado al equipo con un separador de previo, este vapor formado deberá ser recondensado en el serpentín, lo cual supone una ligera reducción de longitud efectiva de subenfriador propiamente dicho, que debe corregirse.
- \* La tubería a consumo esta sin aislar, por lo que el líquido evaporado como consecuencia de la transmisión en la misma no podrá recogerse para ser pesado. Por este motivo deberá corregirse la masa recogida de cara a la determinación de caudales.
- \* En el mismo sentido anterior habrá que actuar como consecuencia de realizar la recogida de caudal de consumo a presión atmosférica, y no a la de suministro, ya que a causa de esta expansión se producirá una evaporación parcial del líquido. En función del título tras la expansión deberá corregirse a la alza el caudal recogido en el Dewar.
- \* Deberá corregirse asimismo, el rendimiento másico en base a las aportaciones exteriores a través del aislamiento.
- \* Respecto a la medida de temperaturas, una vez alcanzado el régimen estacionario, se puede comprobar al realizar las lecturas que se producen pequeñas oscilaciones de tipo aleatorio en las mismas.

En este sentido cabría pensar que lo procedente sería realizar varias medidas, tomando como bueno el valor medio de las mismas, al objeto de reducir el error de éste de forma inversamente proporcional al número de repeticiones. Sin embargo debido a la ya comentada imposibilidad de fijar de forma precisa el caudal de suministro, la realización de repeticiones en condiciones idénticas de una misma prueba resulta difícil, ya que no se podría cerrar la válvula de suministro.

Como consecuencia lo que se ha realizado es dilatar las experiencias, anotando precisamente esas oscilaciones de las temperaturas, y el instante en que se producían, de esta manera se ha podido realizar una media que permite filtrar este problema, reduciéndose así el error de medida.

## 9.6.- RESULTADOS OBTENIDOS

### 9.6.1.- Magnitudes objeto de análisis

Con respecto a lo que serán los resultados a analizar, cabe destacar que nos centraremos únicamente en las dos magnitudes más relevantes del funcionamiento del equipo, como lo serán:

- \* el subenfriamiento
- \* el rendimiento másico

Tendremos un valor de estas variables para cada combinación de la terna

- \* Presión de suministro  $P_{sum}$  (o Temperatura de entrada  $T_i$ )
- \* Nivel de líquido  $Z_{liq}$
- \* Caudal de suministro  $\dot{m}_{sum}$

El hecho de que exista dependencia con tres magnitudes independientes a su vez entre si, supone una cierta dificultad a la hora de presentar los resultados, especialmente en lo que hace referencia al apartado gráfico, pues no se podrá visualizar simultáneamente en una única representación la evolución global de la magnitud a analizar, viéndonos obligados a realizar una doble parametrización, la cual comentaremos con más detalle llegado el momento.

A continuación se exponen toda una serie de datos, resultados de las diferentes experiencias a las que se ha sometido el prototipo de subenfriador. Se han establecido un total de tres marcas para referenciar las posiciones más representativas para la sonda de nivel, que por tanto significan tres longitudes de serpentín sumergidas y otras tantas superficies de transmisión.

Estos valores son suficientes para evaluar el funcionamiento a diferentes alturas de líquido pues corresponden cada uno a un nivel bajo, medio y alto, con lo que se cubre suficientemente el espectro.

En el siguiente cuadro se resumen los niveles, longitudes sumergidas y superficie de transmisión de cada una de estas marcas, para las que se tomarán posteriormente las medidas de subenfriamiento y caudales.

Marca	$Z_{liq}$ [mm]	$L_{sumerg}$ [m]	$A_o$ [m <sup>2</sup> ]
1	104	0,0649	0,024467
2	204	0,1437	0,054174
3	304	0,2225	0,083881

**Tabla 9.2** *Posiciones de referencia de la sonda de nivel en la experimentación*

Con respecto a la presión de suministro, se realizarán observaciones para los ya usuales valores de 0,1; 0,2; 0,3 y 0,4 MPa, mientras que para el caudal másico los valores no se pueden establecer con precisión a priori, por lo que al calcularse a posteriori no tiene sentido intentar establecer rango de trabajo estricto.

En consecuencia, para cada presión y nivel se han realizado una serie de medidas con diferentes caudales, y asimismo se ha determinado analíticamente, una estimación de cuales deberían ser los valores observados experimentalmente, en los apartados siguientes damos cuenta de todos estos resultados.

### 9.6.2.- Ilustración sobre el régimen transitorio

Como se ha comentado en la descripción de los ensayos, una vez se detecta mediante la sonda de nivel que se ha alcanzado la altura de líquido deseada, se procede a abrir la válvula a consumo, con lo que empezará a circular líquido por el serpentín para su subenfriamiento.

Si analizamos la temperatura de salida y el subenfriamiento producido durante los primeros instantes, podemos ver claramente que nos encontramos ante un régimen de

transición, ya que se aprecia que los valores sufren una evolución temporal que tiende a estabilizarse al cabo de un cierto tiempo.

A pesar de que el estudio realizado, y que la metodología establecida lo es bajo las condiciones de funcionamiento en régimen estacionario, se cree oportuno aunque sólo sea a nivel meramente ilustrativo, exponer algún ejemplo de estas evoluciones. Concretamente, y sin motivo particular para utilizar el mismo, tomaremos uno de los casos de 0,5 MPa de presión y con la sonda de nivel en la posición más baja (104 mm)

$P_{sum} = 0,5$ [MPa] $Z_{liq} = 104$ [mm] $\dot{m}_{sum} = 0,1778$ [kg/s] $\dot{m}_{cons} = 0,1644$ [kg/s]					
$t$ [min]	$T_f$ [K]	$T_i$ [K]	$\Delta T$ [K]	$M_{sum}$ [kg]	$M_{cons}$ [kg]
0	103	100	3		
½	98	94	4		
1	97	93	4		
1 ½	96	93	3		
2	96	92	4		
2 ½	95	92	3		
3	95	91	4		
3 ½	95	91	4		
4	94	90	4		
4 ½	94	90	4		
5	94	89	5		
5 ½	94	89	5		
6	94	89	5		
⋮	⋮	⋮	⋮		
7	94	89	5	177,2	6,51
8	94	89	5	⋮	⋮
9	94	89	5		
10	94	89	5	174,0	8,98

Tabla 9.3 Ilustración del régimen transitorio

### 9.6.3.- Resultados experimentales en régimen permanente

Con respecto a las tablas que se exponen a continuación, indicar que con referencia a la temperatura indicada, cada una corresponde al valor medio temporal de las observaciones realizadas a lo largo de cada experiencia <sup>1</sup>.

Con respecto al caudal másico de suministro el mismo se obtiene, como se ha dicho simplemente a partir de los pesos inicial y final del Dewar, y del período de duración de cada observación.

$$\dot{m}_{sum} = \frac{M_{DEW_i} - M_{DEW_f}}{\Delta t}$$

Por lo que hace referencia al caudal de consumo, se determina de idéntica forma pero pesando el pequeño Dewar utilizado para la recogida del líquido subenfriado. Si bien este caudal debe corregirse según se ha comentado a la alza, en base a dos términos:

- \* El conducto no está aislado por lo que deberá sumarse al valor medido el correspondiente a la masa de vapor producida como consecuencia de la transmisión de calor en esta tubería, que se añade a la del propio recipiente.
- \* La recogida es a presión atmosférica y no a la de trabajo del equipo, por lo que deberá corregirse en función del título del vapor, tras la expansión del líquido subenfriado a presión de suministro hasta 0,1 MPa. También en rigor, por este mismo motivo deberá multiplicarse por la relación de densidades entre ambas condiciones, aunque como vimos prácticamente no variaba.

En consecuencia el caudal a consumo se determinará a partir del caudal recogido mediante

$$\dot{m}_{cons} = \left( \frac{M_{wet_f} - M_{wet_i}}{\Delta t} + \frac{\dot{q}_{tub} + \dot{q}_{ext}}{\Delta h_{lg}} \right) \frac{1}{1-X} \frac{\rho_{l_{sum}}}{\rho_{l_{a1}}}$$

<sup>1</sup> Resultado de la integración de las oscilaciones de estas temperaturas a lo largo del tiempo, y dividido por la duración total de la observación.

Obsérvese que para cualquier longitud, como a medida que el subenfriamiento aumenta, el título del vapor disminuye, y por tanto el término correspondiente, en la corrección anterior pierde importancia, no obstante siempre queda una fracción de vapor, pues la longitud del serpentín es finita, y los caudales a enfriar apreciables, por lo que nunca se alcanza una temperatura excesivamente próxima a la de saturación a presión atmosférica.

$P_{sum} = 0,2$ [MPa]								
$L_{sumerg}$ [m]	$\Delta t$ [s]	$\Delta M_{sum}$ [kg]	$\dot{m}_{sum}$ [kg/s]	$\Delta M_{cons}$ [kg]	$X$ [p.u.]	$\dot{m}_{cons}$ [kg/s]	$\eta_{más}$ [%]	$\Delta T$ [K]
0,649	300	4	0,01333	3,48	0,053	0,01298	97,37	1,73
	330	4,8	0,01455	4,18	0,054	0,01413	97,16	1,58
	360	5,4	0,01500	4,74	0,053	0,01465	97,64	1,67
	330	5,4	0,01636	4,75	0,054	0,01595	97,49	1,61
	240	4,4	0,01833	3,88	0,052	0,01780	97,10	1,74
	240	5	0,02083	4,45	0,055	0,02037	97,77	1,47
	180	4	0,02222	3,59	0,055	0,02184	98,29	1,52
1,437	330	4,6	0,01394	4	0,037	0,01331	95,51	3,22
	360	5,6	0,01556	4,93	0,039	0,01498	96,28	3,04
	270	4,6	0,01704	4,06	0,038	0,01636	96,03	3,11
	240	4,6	0,01917	4,14	0,036	0,01862	97,12	3,34
	210	4,2	0,02000	3,72	0,040	0,01919	95,93	2,91
	240	5,2	0,02167	4,66	0,041	0,02097	96,80	2,85
	240	3,2	0,01333	2,77	0,028	0,01259	94,44	4,10
2,225	210	3,4	0,01619	3	0,029	0,01544	95,35	3,96
	240	4	0,01667	3,51	0,031	0,01582	94,93	3,76
	210	3,6	0,01714	3,16	0,030	0,01624	94,72	3,87
	180	3,4	0,01889	2,99	0,029	0,01782	94,35	4,02
	210	4,4	0,02095	3,89	0,030	0,01982	94,61	3,87
	210	3,6	0,01714	3,16	0,030	0,01624	94,72	3,87

Tabla 9.4 Resultados experimentales para  $P_{sum} = 0,2$  MPa

$P_{sum} = 0,3 \text{ [MPa]}$								
$L_{sumerg}$ [m]	$\Delta t$ [s]	$\Delta M_{sum}$ [kg]	$\dot{m}_{sum}$ [kg/s]	$\Delta M_{cons}$ [kg]	$X$ [p.u.]	$\dot{m}_{cons}$ [kg/s]	$\eta_{m\acute{a}s}$ [%]	$\Delta T$ [K]
0,649	240	3	0,01250	2,45	0,079	0,01185	94,78	3,20
	210	2,8	0,01333	2,32	0,082	0,01280	96,02	2,90
	210	3	0,01429	2,48	0,083	0,01364	95,48	2,86
	240	4	0,01667	3,35	0,082	0,01597	95,80	2,95
	210	3,6	0,01714	3,01	0,080	0,01634	95,34	3,11
	180	4	0,02222	3,39	0,084	0,02133	95,98	2,73
1,437	240	3	0,01250	2,45	0,054	0,01153	92,25	5,60
	210	3	0,01429	2,47	0,058	0,01323	92,62	5,20
	210	3,6	0,01714	3	0,061	0,01595	93,07	4,96
	210	3,8	0,01810	3,19	0,057	0,01685	93,14	5,30
	180	3,4	0,01889	2,87	0,058	0,01767	93,56	5,20
	180	4	0,02222	3,36	0,062	0,02065	92,93	4,82
2,225	240	3,2	0,01333	2,64	0,035	0,01213	90,95	7,40
	210	3	0,01429	2,46	0,040	0,01293	90,54	6,92
	210	3,2	0,01524	2,66	0,038	0,01390	91,19	7,12
	210	3,6	0,01714	3,03	0,037	0,01571	91,66	7,20
	180	3,4	0,01889	2,85	0,045	0,01731	91,64	6,47
	180	3,8	0,02111	3,18	0,043	0,01920	90,92	6,63

Tabla 9.5 Resultados experimentales para  $P_{sum} = 0,3 \text{ MPa}$



$P_{sum} = 0,4 \text{ [MPa]}$								
$L_{sumerg}$ [m]	$\Delta t$ [s]	$\Delta M_{sum}$ [kg]	$\dot{m}_{sum}$ [kg/s]	$\Delta M_{cons}$ [kg]	$X$ [p.u.]	$\dot{m}_{cons}$ [kg/s]	$\eta_{már}$ [%]	$\Delta T$ [K]
0,649	240	3	0,01250	2,35	0,099	0,01164	93,13	4,36
	210	2,8	0,01333	2,21	0,101	0,01249	93,69	4,10
	210	3	0,01429	2,37	0,100	0,01332	93,26	4,21
	210	3,4	0,01619	2,67	0,107	0,01503	92,83	3,54
	180	3,4	0,01889	2,74	0,102	0,01774	93,91	4,02
	180	3,8	0,02111	3,07	0,106	0,01987	94,12	3,64
1,437	240	3	0,01250	2,37	0,060	0,01125	90,01	8,02
	180	2,6	0,01444	2,05	0,071	0,01301	90,09	6,98
	180	2,8	0,01556	2,21	0,068	0,01393	89,55	7,23
	210	3,6	0,01714	2,91	0,057	0,01544	90,09	8,27
	210	3,8	0,01810	3,04	0,072	0,01636	90,42	6,84
	180	3,6	0,02000	2,88	0,069	0,01795	89,74	7,12
2,225	210	2,6	0,01238	2,05	0,032	0,01081	87,34	10,65
	240	3,2	0,01333	2,52	0,048	0,01176	88,21	9,20
	210	3	0,01429	2,36	0,045	0,01251	87,54	9,42
	180	3	0,01667	2,4	0,048	0,01474	88,45	9,17
	180	3,4	0,01889	2,71	0,050	0,01659	87,82	8,96
	180	3,8	0,02111	3,07	0,048	0,01864	88,31	9,20

Tabla 9.6 Resultados experimentales para  $P_{sum} = 0,4 \text{ MPa}$

$P_{sum} = 0,5 \text{ [MPa]}$								
$L_{sumerg}$ [m]	$\Delta t$ [s]	$\Delta M_{sum}$ [kg]	$\dot{m}_{sum}$ [kg/s]	$\Delta M_{cons}$ [kg]	$X$ [p.u.]	$\dot{m}_{cons}$ [kg/s]	$\eta_{más}$ [%]	$\Delta T$ [K]
0,649	240	3	0,01250	2,24	0,121	0,01142	91,37	5,23
	210	2,8	0,01333	2,1	0,119	0,01215	91,15	5,41
	210	3	0,01429	2,26	0,131	0,01319	92,35	4,32
	180	2,8	0,01556	2,1	0,128	0,01419	91,19	4,60
	180	3,2	0,01778	2,47	0,123	0,01644	92,49	5,10
	180	3,6	0,02000	2,73	0,133	0,01831	91,55	4,11
1,437	240	3	0,01250	2,26	0,080	0,01100	88,00	9,10
	210	3	0,01429	2,3	0,084	0,01273	89,10	8,70
	210	3,4	0,01619	2,61	0,078	0,01424	87,95	9,32
	210	3,6	0,01714	2,75	0,089	0,01515	88,39	8,23
	180	3,4	0,01889	2,64	0,079	0,01669	88,35	9,21
	180	3,8	0,02111	2,95	0,089	0,01875	88,81	8,32
2,225	240	3	0,01250	2,27	0,051	0,01070	85,62	11,90
	210	2,8	0,01333	2,12	0,048	0,01134	85,02	12,20
	210	3,2	0,01524	2,42	0,059	0,01299	85,27	11,10
	210	3,6	0,01714	2,76	0,046	0,01452	84,68	12,32
	180	3,4	0,01889	2,6	0,062	0,01615	85,48	10,83
	180	4	0,02222	3,08	0,058	0,01891	85,10	11,20

Tabla 9.7 Resultados experimentales para  $P_{sum} = 0,5 \text{ MPa}$

## 9.7.- ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

### 9.7.1.- Estimación analítica de resultados para contrastar

Evidentemente el objeto de la experimentación es la obtención de unos resultados, que puedan servir de base para la evaluación de los aportados analíticamente, mediante los cálculos que se realizan a partir de la metodología establecida en este documento. En caso necesario servirá de base para establecer las correcciones oportunas sobre la misma, al objeto de sacar el máximo partido de la experimentación, incorporándola a aquella a fin de subsanar las posibles desviaciones iniciales.

Es por ello que para poder comparar con los resultados experimentales, se implementan las siguientes tablas, correspondientes a los cálculos previos realizados para cada una a las diferentes presiones de trabajo, y en la que para los tres niveles de líquido, se hace un barrido sobre los caudales de suministro, estimándose entonces para cada terna de valores, la temperatura de salida, el subenfriamiento, los caudales en tránsito (de consumo y expandido), y finalmente el rendimiento másico del equipo.

Con respecto a esta última magnitud, cabe destacar de antemano su carácter, de cara al análisis comparativo. En este sentido decir que es una magnitud que se diferencia de forma cualitativa del subenfriamiento, ya que éste es una prestación del equipo, y solución por tanto del problema inverso planteado, mientras que aquella lejos de ser una magnitud solución de este problema de tipo térmico, corresponde simplemente a un resultado que resume de alguna manera el balance de masas establecido en el equipo.

Por este motivo se prestará especial atención al subenfriamiento, pues será el llamado a establecer la base para evaluar la bondad del prototipo diseñado, y permitiendo corregir la formulación que forma parte de la metodología establecida, aunque ello no supone en absoluto olvidarnos del rendimiento másico, pues evidentemente es una magnitud de carácter económico importantísima en el funcionamiento de los subenfriadores de este tipo.

		$P_{sum} = 0,2$ [MPa]			$T_l = 83,65$ [K]		
$L_{sumerg}$ [m]	$T_F$ [K]	$\Delta T$ [K]	$\dot{q}_{sep}$ [W]	$\dot{m}_{cons}$ [kg/s]	$\dot{m}_{rep}$ [kg/s]	$\dot{m}_{sum}$ [kg/s]	$\eta_{m\acute{a}s}$ [%]
0,649	81,68	1,97	51,997	0,012701	0,000278	0,01298	97,86
	81,72	1,93	55,094	0,013766	0,000295	0,014061	97,9
	81,76	1,89	58,082	0,014832	0,000311	0,015143	97,95
	81,8	1,85	60,97	0,015898	0,000326	0,016225	97,99
	81,84	1,81	63,766	0,016965	0,000341	0,017306	98,03
	81,87	1,78	66,477	0,018032	0,000356	0,018388	98,06
	81,91	1,74	69,109	0,019099	0,00037	0,019469	98,1
	81,94	1,71	71,667	0,020167	0,000384	0,020551	98,13
	81,97	1,68	74,156	0,021236	0,000397	0,021633	98,16
82,02	1,63	78,941	0,023373	0,000423	0,023796	98,22	
1,437	80,2	3,45	89,359	0,012501	0,000479	0,01298	96,31
	80,26	3,39	95,146	0,013552	0,000509	0,014061	96,38
	80,32	3,33	100,769	0,014603	0,00054	0,015143	96,44
	80,38	3,27	106,239	0,015656	0,000569	0,016225	96,49
	80,43	3,22	111,566	0,016709	0,000597	0,017306	96,55
	80,48	3,17	116,76	0,017763	0,000625	0,018388	96,6
	80,53	3,12	121,828	0,018817	0,000652	0,019469	96,65
	80,57	3,08	126,778	0,019872	0,000679	0,020551	96,7
	80,62	3,03	131,616	0,020928	0,000705	0,021633	96,74
80,7	2,95	140,979	0,023041	0,000755	0,023796	96,83	
2,225	79,27	4,38	112,309	0,012378	0,000601	0,01298	95,37
	79,33	4,32	120,03	0,013418	0,000643	0,014061	95,43
	79,39	4,26	127,573	0,01446	0,000683	0,015143	95,49
	79,45	4,2	134,95	0,015502	0,000723	0,016225	95,55
	79,5	4,15	142,169	0,016545	0,000761	0,017306	95,6
	79,55	4,1	149,239	0,017589	0,000799	0,018388	95,65
	79,6	4,05	156,167	0,018633	0,000836	0,019469	95,7
	79,65	4	162,962	0,019678	0,000873	0,020551	95,75
	79,7	3,95	169,628	0,020724	0,000908	0,021633	95,8
79,79	3,86	182,597	0,022818	0,000978	0,023796	95,89	

Tabla 9.8 Estimación analítica de los resultados experimentales, para  $P_{sum} = 0,2$  MPa

$P_{sum} = 0,3$ [MPa] $T_f = 87,93$ [K]							
$L_{sumerg}$ [m]	$T_f$ [K]	$\Delta T$ [K]	$\dot{q}_{serp}$ [W]	$\dot{m}_{cons}$ [kg/s]	$\dot{m}_{rep}$ [kg/s]	$\dot{m}_{sum}$ [kg/s]	$\eta_{más}$ [%]
0,649	84,36	3,56	90,453	0,012115	0,000509	0,012624	95,97
	84,44	3,49	96,086	0,013135	0,000541	0,013676	96,05
	84,5	3,42	101,546	0,014157	0,000571	0,014728	96,12
	84,57	3,36	106,845	0,015179	0,000601	0,01578	96,19
	84,63	3,3	111,996	0,016202	0,00063	0,016832	96,26
	84,69	3,24	117,009	0,017226	0,000658	0,017884	96,32
	84,74	3,19	121,893	0,01825	0,000686	0,018936	96,38
	84,79	3,14	126,657	0,019275	0,000713	0,019988	96,43
	84,84	3,09	131,306	0,020301	0,000739	0,02104	96,49
	84,93	2,99	140,29	0,022355	0,000789	0,023144	96,59
1,437	81,76	6,17	151,518	0,011771	0,000853	0,012624	93,25
	81,86	6,07	161,775	0,012766	0,00091	0,013676	93,34
	81,95	5,98	171,785	0,013761	0,000967	0,014728	93,44
	82,04	5,89	181,564	0,014758	0,001022	0,01578	93,53
	82,12	5,81	191,126	0,015757	0,001075	0,016832	93,61
	82,2	5,73	200,485	0,016756	0,001128	0,017884	93,69
	82,28	5,65	209,652	0,017756	0,00118	0,018936	93,77
	82,35	5,58	218,637	0,018758	0,00123	0,019988	93,85
	82,42	5,51	227,449	0,01976	0,00128	0,02104	93,92
	82,55	5,38	244,586	0,021768	0,001376	0,023144	94,05
2,225	80,18	7,75	186,763	0,011573	0,001051	0,012624	91,67
	80,27	7,65	200,136	0,01255	0,001126	0,013676	91,76
	80,36	7,57	213,257	0,013528	0,0012	0,014728	91,85
	80,45	7,48	226,141	0,014507	0,001273	0,01578	91,93
	80,53	7,4	238,8	0,015488	0,001344	0,016832	92,02
	80,61	7,32	251,245	0,01647	0,001414	0,017884	92,09
	80,69	7,24	263,485	0,017453	0,001483	0,018936	92,17
	80,76	7,17	275,531	0,018437	0,001551	0,019988	92,24
	80,83	7,1	287,39	0,019423	0,001617	0,02104	92,31
	80,97	6,96	310,576	0,021396	0,001748	0,023144	92,45

Tabla 9.9 Estimación analítica de los resultados experimentales, para  $P_{sum} = 0,3$  MPa

		$P_{sum} = 0,4 \text{ [MPa]}$			$T_I = 91,24 \text{ [K]}$		
$L_{sumerg}$ [m]	$T_F$ [K]	$\Delta T$ [K]	$\dot{q}_{serp}$ [W]	$\dot{m}_{cons}$ [kg/s]	$\dot{m}_{rep}$ [kg/s]	$\dot{m}_{sum}$ [kg/s]	$\eta_{más}$ [%]
0,649	86,39	4,85	119,088	0,011638	0,000698	0,012336	94,34
	86,49	4,75	126,667	0,012622	0,000742	0,013364	94,44
	86,58	4,66	134,027	0,013607	0,000786	0,014393	94,54
	86,66	4,58	141,186	0,014593	0,000828	0,015421	94,63
	86,74	4,5	148,158	0,01558	0,000868	0,016449	94,72
	86,81	4,43	154,956	0,016568	0,000908	0,017477	94,8
	86,88	4,36	161,592	0,017558	0,000947	0,018505	94,88
	86,95	4,29	168,074	0,018548	0,000985	0,019533	94,96
	87,02	4,22	174,412	0,019539	0,001022	0,020561	95,03
	87,14	4,1	186,686	0,021523	0,001094	0,022617	95,16
1,437	82,89	8,35	196,163	0,011186	0,00115	0,012336	90,68
	83,01	8,23	209,737	0,012135	0,00123	0,013364	90,8
	83,13	8,11	223,014	0,013085	0,001308	0,014393	90,91
	83,24	8	236,012	0,014037	0,001384	0,015421	91,03
	83,35	7,89	248,748	0,01499	0,001459	0,016449	91,13
	83,45	7,79	261,238	0,015945	0,001532	0,017477	91,24
	83,54	7,7	273,493	0,016901	0,001604	0,018505	91,33
	83,64	7,6	285,527	0,017858	0,001674	0,019533	91,43
	83,73	7,51	297,349	0,018817	0,001744	0,020561	91,52
	83,9	7,34	320,397	0,020738	0,001879	0,022617	91,69
2,225	80,81	10,43	238,886	0,010935	0,001402	0,012336	88,64
	80,92	10,31	256,338	0,011861	0,001504	0,013364	88,75
	81,03	10,21	273,5	0,012788	0,001604	0,014393	88,85
	81,14	10,1	290,385	0,013717	0,001703	0,015421	88,95
	81,24	10	307,01	0,014648	0,001801	0,016449	89,05
	81,34	9,9	323,384	0,01558	0,001897	0,017477	89,15
	81,43	9,81	339,519	0,016513	0,001992	0,018505	89,24
	81,52	9,71	355,425	0,017448	0,002085	0,019533	89,33
	81,61	9,63	371,114	0,018384	0,002177	0,020561	89,41
	81,78	9,46	401,86	0,02026	0,002357	0,022617	89,58

Tabla 9.10 Estimación analítica de los resultados experimentales, para  $P_{sum} = 0,4 \text{ MPa}$

		$P_{sum} = 0,5 \text{ [MPa]}$			$T_i = 93,98 \text{ [K]}$		
$L_{sumerg}$ [m]	$T_F$ [K]	$\Delta T$ [K]	$\dot{q}_{serp}$ [W]	$\dot{m}_{cons}$ [kg/s]	$\dot{m}_{rep}$ [kg/s]	$\dot{m}_{sum}$ [kg/s]	$\eta_{más}$ [%]
0,649	88,06	5,93	141,802	0,011228	0,000861	0,012089	92,88
	88,17	5,82	150,958	0,01218	0,000916	0,013096	93
	88,27	5,71	159,862	0,013133	0,00097	0,014103	93,12
	88,37	5,61	168,535	0,014088	0,001023	0,015111	93,23
	88,47	5,52	176,993	0,015044	0,001074	0,016118	93,34
	88,55	5,43	185,25	0,016001	0,001124	0,017126	93,43
	88,64	5,34	193,319	0,01696	0,001173	0,018133	93,53
	88,72	5,26	201,211	0,017919	0,001221	0,01914	93,62
	88,8	5,19	208,936	0,01888	0,001268	0,020148	93,71
	88,94	5,04	223,919	0,020804	0,001359	0,022162	93,87
1,437	83,79	10,19	230,418	0,010688	0,001401	0,012089	88,41
	83,93	10,05	246,601	0,011597	0,001499	0,013096	88,55
	84,07	9,92	262,454	0,012508	0,001596	0,014103	88,69
	84,2	9,79	277,996	0,013421	0,00169	0,015111	88,81
	84,32	9,66	293,246	0,014335	0,001783	0,016118	88,94
	84,44	9,55	308,221	0,015252	0,001874	0,017126	89,06
	84,55	9,43	322,933	0,01617	0,001963	0,018133	89,17
	84,66	9,32	337,397	0,017089	0,002051	0,01914	89,28
	84,77	9,22	351,623	0,01801	0,002138	0,020148	89,39
	84,97	9,02	379,404	0,019856	0,002307	0,022162	89,59
2,225	81,29	12,69	278,013	0,010397	0,001692	0,012089	86,01
	81,42	12,56	298,598	0,011279	0,001817	0,013096	86,13
	81,55	12,44	318,871	0,012163	0,00194	0,014103	86,24
	81,67	12,32	338,846	0,013049	0,002061	0,015111	86,36
	81,78	12,2	358,537	0,013937	0,002181	0,016118	86,47
	81,9	12,09	377,957	0,014826	0,002299	0,017126	86,57
	82	11,98	397,118	0,015717	0,002416	0,018133	86,68
	82,11	11,87	416,03	0,01661	0,002531	0,01914	86,78
	82,21	11,77	434,702	0,017504	0,002644	0,020148	86,88
	82,41	11,58	471,362	0,019295	0,002867	0,022162	87,06

Tabla 9.11 Estimación analítica de los resultados experimentales, para  $P_{sum} = 0,5 \text{ MPa}$

### 9.7.2.- Gráficas comparativas

Se muestran en las páginas sucesivas, mediante un conjunto de gráficas, los resultados analíticos, expuestos en las tablas del apartado anterior.

Se representan únicamente en ordenadas como se dijo, las curvas de subenfriamiento y rendimiento másico. Se parametriza en primer lugar en base a la presión de suministro dado lugar a cuatro gráficas, y en cada una se vuelve a parametrizar en función de las tres longitudes de serpentín sumergido (o los equivalentes, niveles de líquido y superficies de transmisión de calor), quedando por tanto representada en abcisas la tercera magnitud en juego, el caudal másico de suministro (si bien figura además el volumétrico).

Además de estas curvas, se incluyen en las gráficas los puntos correspondientes a las observaciones experimentales, de esta manera se pueden comparar las desviaciones entre cada nube de puntos obtenida y su curva paramétrica correspondiente (indicado convenientemente en la leyenda de cada gráfica)

Ello facilitará el análisis de resultados que se realiza en el apartado siguientes, así como el establecimiento de conclusiones al respecto.



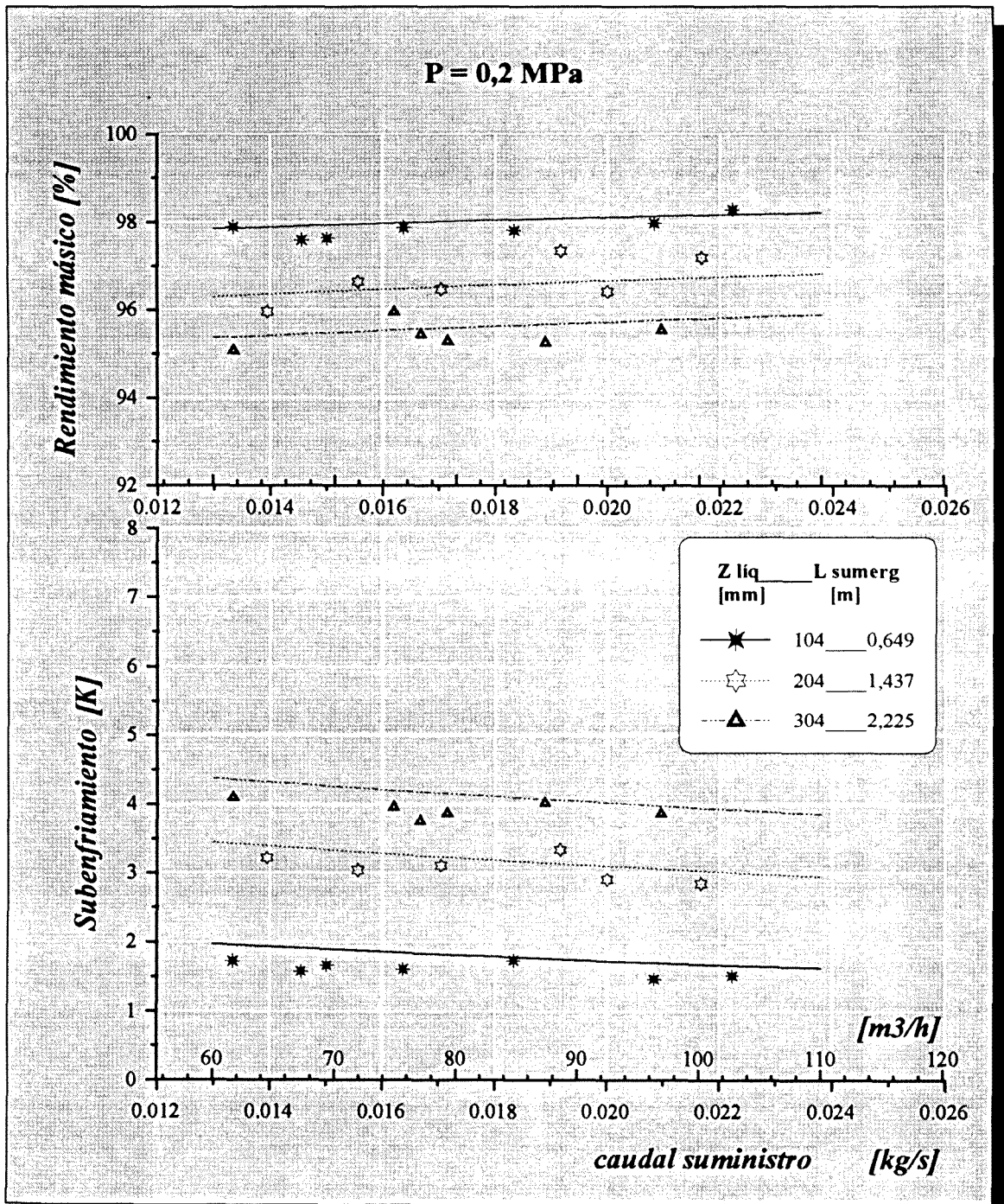


fig. 9.2 Comparación entre las curvas calculadas, y la dispersión de puntos observados experimentalmente para  $P_{sum} = 0,2 \text{ MPa}$

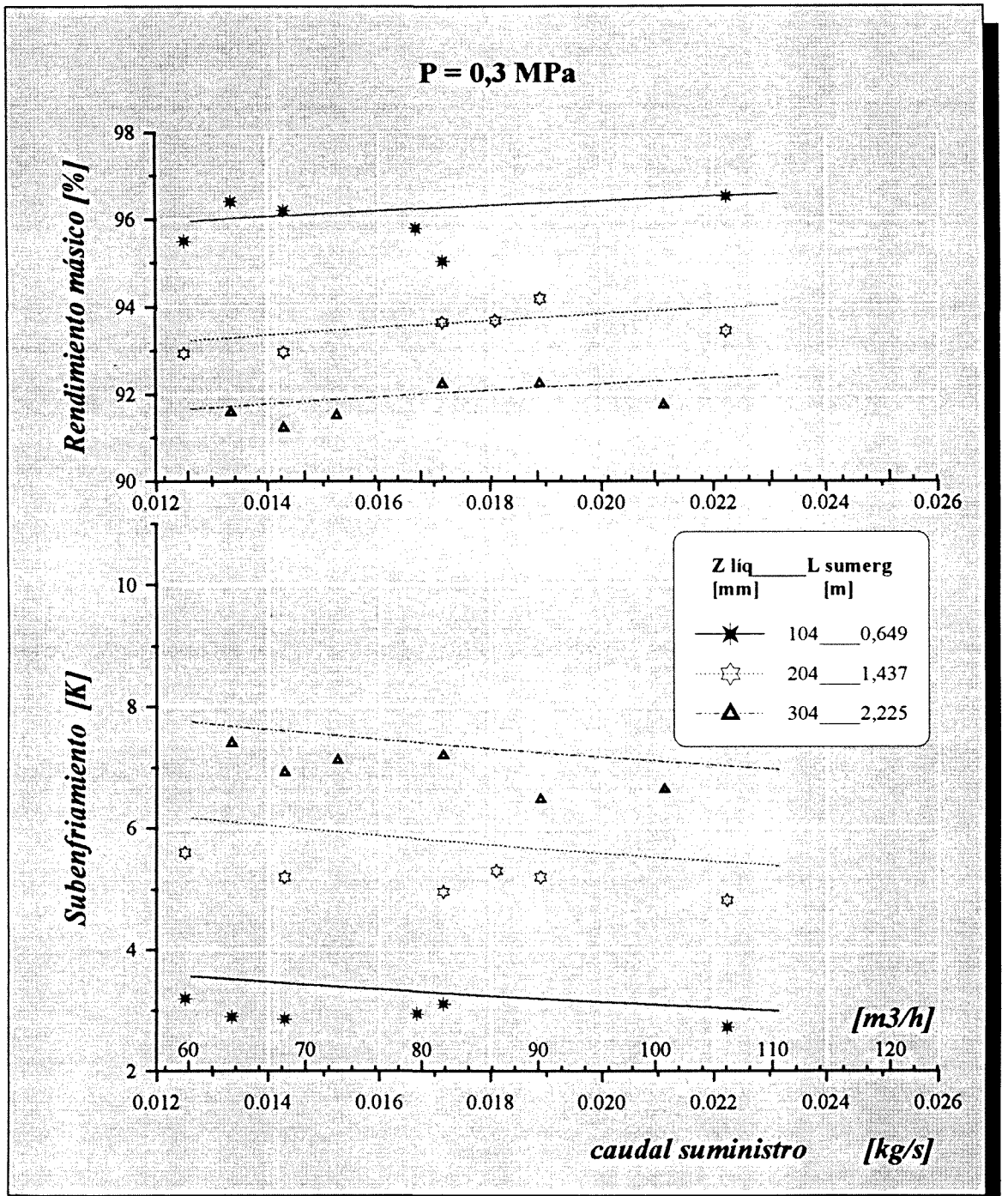


fig. 9.3 Comparación entre las curvas calculadas, y la dispersión de puntos observados experimentalmente para  $P_{sum} = 0,3 \text{ MPa}$

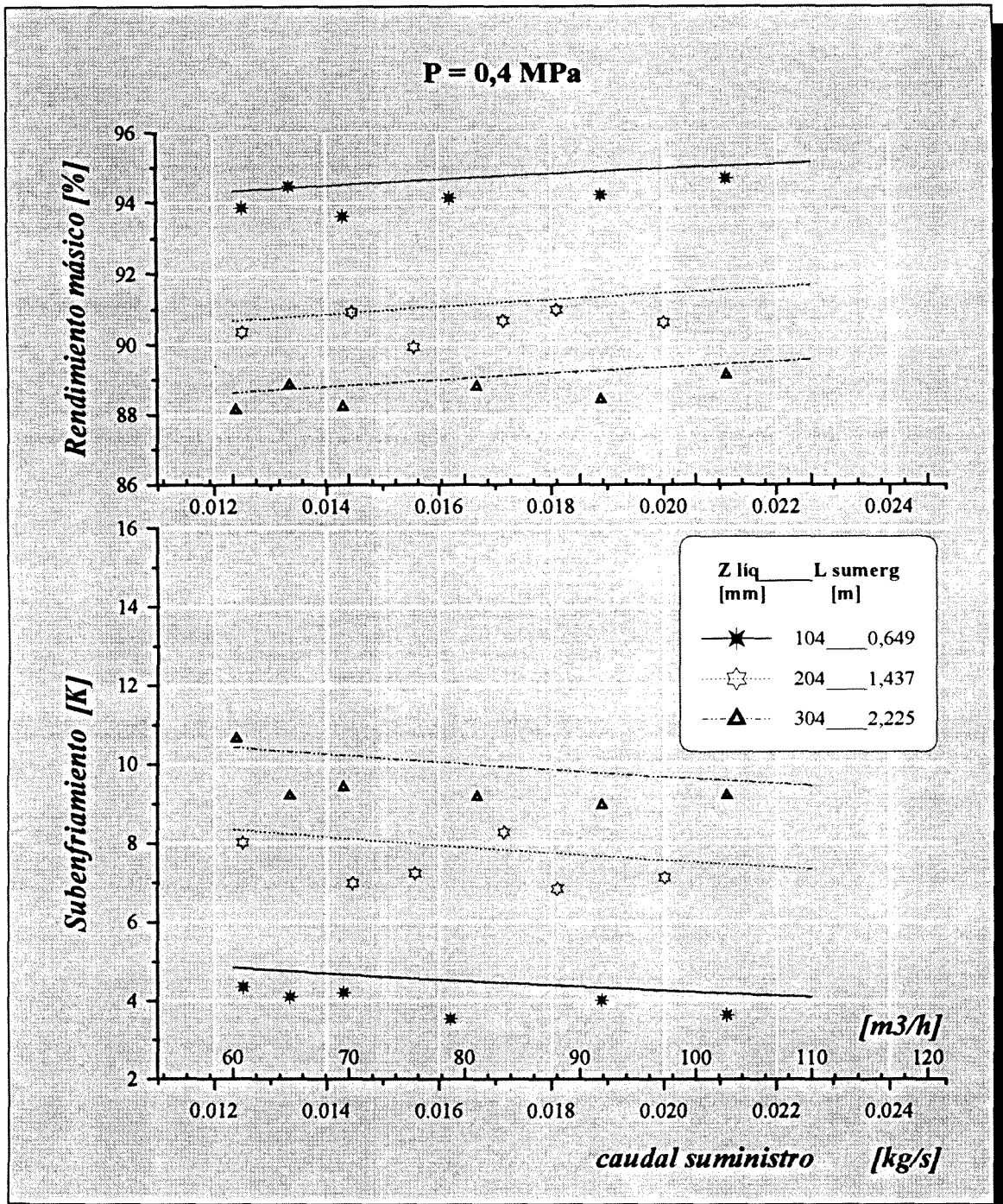


fig. 9.4 Comparación entre las curvas calculadas, y la dispersión de puntos observados experimentalmente para  $P_{sum} = 0,4 \text{ MPa}$

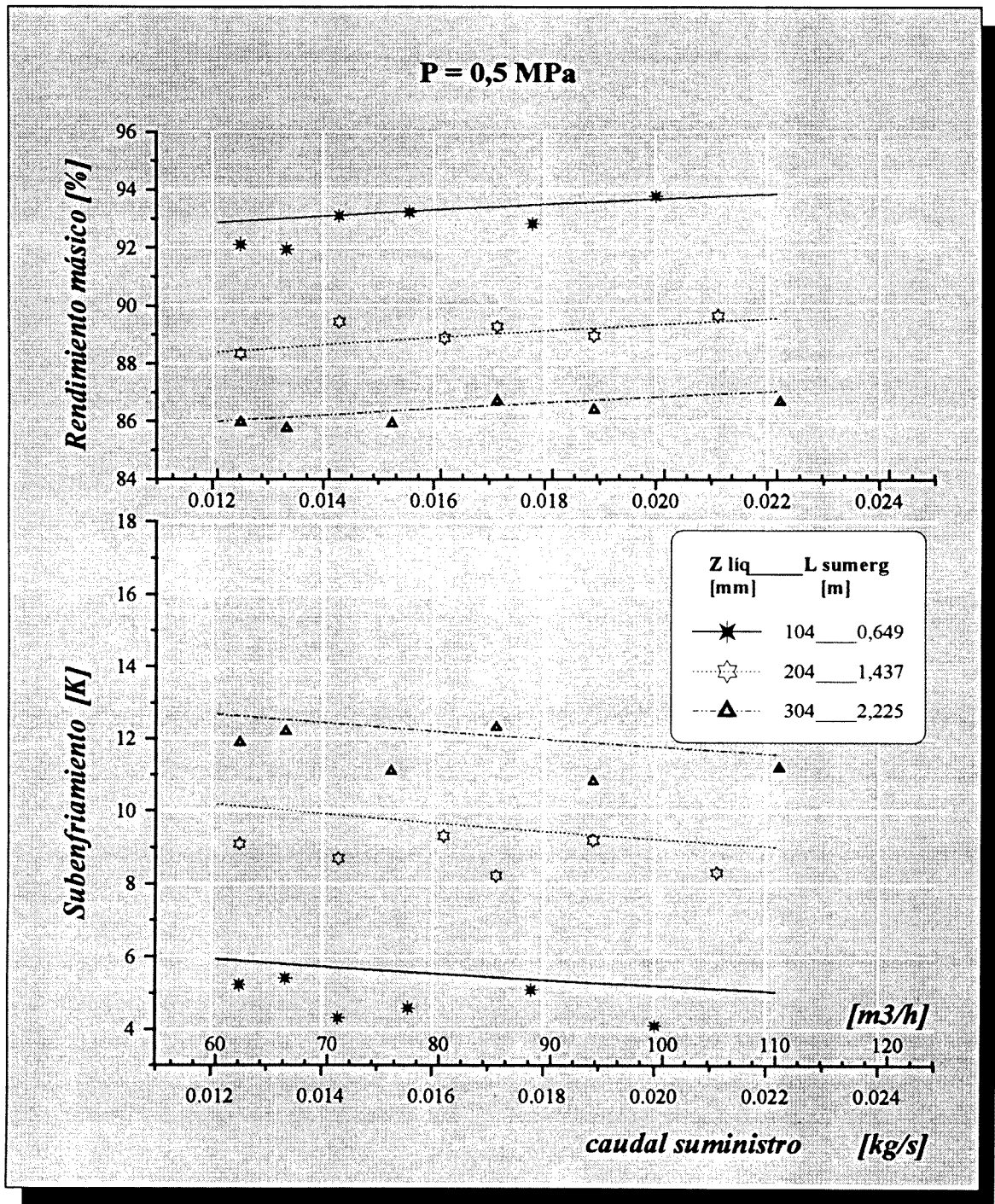


fig. 9.5 Comparación entre las curvas calculadas, y la dispersión de puntos observados experimentalmente para  $P_{sum} = 0,5 \text{ MPa}$

### 9.7.3.- Análisis de resultados. Conclusiones

De forma breve comentaremos las gráficas desde una perspectiva global, y en este sentido, puede observarse con respecto a las curvas teóricas de subenfriamiento, como las nubes de puntos correspondientes a cada una de ellas, se sitúan en todos los casos sin excepción, algo por debajo de lo predicho por la analítica.

Quiere decir esto que con independencia de que en algún caso puntual puedan existir algunas observaciones experimentales que supongan un subenfriamiento superior al teórico, el valor medio de las desviaciones que en un caso de concordancia total entre teoría y experiencia práctica debiera ser nulo, en este caso resulta ser negativo<sup>1</sup>.

Cabe destacar que el orden de magnitud de estas desviaciones es lo suficientemente pequeño a mi entender, como para que los resultados predichos, y por extensión la metodología de diseño planteada, puedan calificarse de satisfactorios, si bien pueden realizarse las modificaciones oportunas para corregir las mismas.

Efectivamente debemos comentar, que las tendencias decreciente con respecto a las variaciones de caudal, y crecientes con la presión de suministro y la longitud del serpentín, se respetan de forma notablemente fiel en todos los casos <sup>2</sup>, lo que supone una clara concordancia con lo previsto.

Se puede observar en este sentido que el la desviación en términos absolutos aumenta a medida que lo hace la presión de suministro, por lo que el valor relativo de este error no sufre oscilaciones, no presentando una tendencia absolutamente definida, lo cual abona la idea del origen estocástico de la dispersión de las nubes de puntos.

En cuanto al comportamiento del error con respecto a la superficie de transmisión (longitud de serpentín o nivel de líquido), es cuanto menos aventurado el establecer una relación clara entre ellos, ya que se presentan oscilaciones de tipo aleatorio tanto por lo que hace referencia a su valor absoluto como al relativo. Especialmente en el nivel

---

<sup>1</sup> Carece de interés el valor exacto del mismo, para el conjunto de curvas, por lo que simplemente cabe decir que su orden se sitúa según el caso entre -0,5 y -1 K.

<sup>2</sup> Si bien en algunos casos no es inmediato de apreciar en la parametrización establecida, debido a la imposibilidad de representar gráficamente en 4D.

intermedio, ya que los valores en los niveles mínimo y máximo, parecen corroborar el hecho de que al aumentar el subenfriamiento disminuye el error relativo, aunque en términos absolutos se observe poca variación.

Con el objetivo de apreciar esto, se ha procedido a realizar un cuadro de tipo matricial, en el que se expone para cada combinación presión-nivel de líquido, el valor medio del subenfriamiento previsto, y el valor medio de la desviación respecto a los valores experimentales, este último tanto en términos relativos como absolutos.

Subenfriamiento medio error absoluto [K] error relativo [%]		$P_{sum}$ [MPa]			
		0,2	0,3	0,4	0,5
$Z_{liq}$ [mm]	104	1,8	3,4	4,4	5,4
		-0,19	-0,4	-0,55	-0,74
		-10,7	-11,8	-12,7	-13,7
	204	3,2	5,7	7,8	9,6
		-0,12	-0,59	-0,45	-0,84
		-2,89	-10,38	-5,77	-8,77
	304	4,15	7,35	9,95	12
		-0,22	-0,45	-0,6	-0,53
		-5,36	-6,1	-6,03	-4,4

**Tabla 9.12** Comparativa de las desviaciones entre los resultados experimentales y estimados para los distintos niveles y presiones

Puede observarse como efectivamente para el nivel de líquido intermedio la variación de valores con la presión es un tanto irregular, sin embargo el riguroso respeto para con los valores experimentales ha supuesto su transcripción a este documento tal cual.

Si bien un análisis estadístico profundo desecharía algunas medidas y probablemente corregiría estas alteraciones, ello no se ha querido realizar en este caso para poner de manifiesto la siempre complicada tarea experimental.

Aparte de la desviación estándar de origen estadístico, consecuencia de errores estocásticos o no, de la nube de puntos respecto a su valor medio, a lo que debemos prestar atención en cualquier caso es al hecho de obtener subenfriamientos algo inferiores a lo previsto, y evidentemente a pesar de su reducido orden de magnitud, ello nos impulsa a reflexionar sobre su posible origen.

Efectivamente podemos encontrar una causa de origen no estocástico, que a priori podría justificar parte de esta desviación del error medio. La misma ya se comentaba como primera fuente de error dentro del apartado 9.5.2 de la página 234, esto es que el aislamiento de la tubería de suministro de unos 85 cm de longitud era de armaflex de 20 mm de espesor, y conductividad 0,025 W/(K m), con lo que se producirá una cierta entrada de calor a lo largo de la misma, ello provoca una pequeña evaporación de líquido, lo que unido al hecho de no existir separador de vapor a la entrada del equipo, hace que el mismo deba ser recondensado en el serpentín.

Ello supone dos alteraciones respecto a las hipótesis de partida de la metodología:

- \* En primer lugar que el coeficiente de convección en el interior será diferente al menos en un tramo de serpentín. Ciertamente el mismo será mucho mayor como consecuencia de la condensación del vapor, si bien precisamente gracias a este incremento de coeficiente, es previsible que la longitud de este tramo sea corta<sup>1</sup>.
- \* Si hay un tramo de condensación significa que la longitud efectiva de serpentín dedicada a subenfriamiento, es en rigor menor de la que se ha considerado para trazar las curvas teóricas. Esto supone que la nube de puntos no corresponde de forma rigurosa con la curva paramétrica de longitud con la que la comparamos, sino con otra de longitud algo inferior.

En consecuencia a partir de estas desviaciones podríamos incluso estimar la longitud de este tramo de condensación, con el objeto de establecer cuanto menos de manera orientativa el orden de magnitud de la proporción sobre la desviación observada que es imputable a este efecto .

---

<sup>1</sup> Esto se corrobora por la escasa magnitud de la desviación.

Con esta intención podemos realizar una cuantificación de esas aportaciones exteriores en la tubería de suministro, ello nos permitirá estimar la potencia transmitida en el serpentín que no se dedica a subenfriamiento, y posteriormente la longitud correspondiente a la recondensación. Si deducimos de la longitud sumergida este valor, podemos determinar un nuevo subenfriamiento, con respecto al cual las desviaciones de los valores experimentales resultarán menores, al ser lógicamente inferiores a los originales.

Realizados los cálculos oportunos, mostramos un resumen de los resultados obtenidos en la tabla siguiente.

$P_{sum}$ [MPa]	$\dot{q}$ [W]	$L_{recond}$ [mm]
0,2	17,23	39,8
0,3	16,89	24,5
0,4	16,63	17,1
0,5	16,42	13,2

**Tabla 9.13** *Potencia en la tubería de suministro y longitud del tramo de recondensación*

Se observa que si bien la potencia en la tubería varía muy poco, pues el salto térmico con el ambiente es en todos los casos elevado, cuando se traduce en longitud de serpentín, aparecen grandes variaciones, debido a que ahora el salto térmico con el líquido del vaso y el coeficiente varían notablemente.

En cualquier caso parece que el valor relativo, de la desviación atribuible a la no separación del vapor a la entrada del equipo, afectará en mayor medida a las longitudes cortas y a las presiones bajas, sin embargo en términos reales esta justificación no resulta excesivamente importante ya que las longitudes de recondensación son en todo momento cortas, concretamente se reducen las desviaciones entre un 0,07 y 0,43 % de promedio, entre la presión y longitud máxima y mínima respectivamente.

Por este motivo no podemos atribuir completamente a este hecho toda la desviación producida, ya que aun resta un porcentaje importante, sin justificar, de tal manera que los resultados que aporta la metodología subdimensionan el cambiador, pues los



subenfriamientos son inferiores a los medidos. Ello conduce a recapitular sobre la formulación utilizada y nos obligará a establecer las modificaciones oportunas, que corrijan los resultados analíticos de manera que se adapten al máximo a los experimentales.

Por este motivo debe recordarse acerca del coeficiente de ebullición nucleada, que para la determinación del mismo se realizaron unas propuestas de correlación, por lo que cabe dentro de lo posible que parte de la desviación sea imputable a ello, debe tenerse en cuenta de manera especial en este momento, que los errores admitidos según los propios autores para algunas de las correlaciones encontradas en la literatura, alcanzan en algunos casos hasta el  $\pm 30\%$ , debido a las enormes fluctuaciones observadas en la experimentación.

En este caso tenemos la doble fortuna de que las desviaciones observadas respecto a los valores teóricos son siempre del mismo signo, y además de un orden de magnitud inferior, por lo que resultará más sencilla la incorporación de las modificaciones dentro de la metodología de diseño formulada, ya que todo parece indicar que bastará con corregir a la baja los coeficientes utilizados.

Si bien ha resultado sencillo el determinar que se debe modificar y en que sentido, a la hora de cuantificar esta corrección, aparecen las dificultades, ya que la forma de establecer los valores concretos de los coeficientes y exponentes para las nuevas correlaciones no resulta sencilla.

En primer lugar, y ello de por sí es complicación suficiente, porque las desviaciones aparecen como función de un mínimo de tres variables independientes. Pero además la relación existente con ellas es compleja, y viene dada por el programa informático que recoge la resolución del problema inverso.

Ello supone que nos armaremos de paciencia, realizaremos múltiples pases del programa y analizaremos las tablas de covariancia de las desviaciones, similares a la anteriormente mostrada Tabla 9.12, hasta hallar unos valores que minimicen el conjunto de las desviaciones medias, o bien si se opta por un criterio conservador, que todas resulten ligeramente positivas, pues de este modo la metodología conducirá a su vez a diseños algo sobredimensionados.

Antes de mostrar esos resultados finales, quisiera reflexionar acerca de lo que sucede con los caudales y rendimiento másico, si bien debo insistir en el carácter no determinante, de esta magnitud, acerca de la bondad de los cálculos térmicos, pero sí influyente para con la calidad funcional del diseño conseguido.

Puesto que es una magnitud ligada al subenfriamiento que se desea conseguir, el que aparezcan desviaciones en ella, es a su vez consecuencia de las mismas comentadas para aquel, de manera que si el subenfriamiento es inferior a lo previsto (desviación negativa), el rendimiento debiera ser lógicamente superior (desviación positiva). Basta una rápida ojeada a las nubes de puntos de esta magnitud para apreciar que en general sucede lo contrario y la desviación sigue siendo negativa, lo cual significa que sencillamente o hay pérdidas de caudal de consumo y/o el caudal expandido es mayor.

Lo cierto es que suceden ambas cosas simultáneamente, ya que las curvas de rendimiento analítico corresponden al valor teórico máximo, es decir aquel que no considera las pérdidas por transmisión con el ambiente, por lo que tenemos ahí un primer motivo para que ello suceda. Pero además debe considerarse que durante el tiempo que dura cada experiencia, parte del nitrógeno que se pretende recoger en el vaso va evaporando, tanto por la transmisión con el ambiente, como a consecuencia del choque térmico que en mayor o menor medida se produce con el propio Dewar de recogida.

Además debemos tener en cuenta las comentadas pérdidas en la tubería a consumo, y el que la recogida de líquido subenfriado se realiza a la presión atmosférica y no a la de suministro.

Todo ello supone en definitiva que la masa de nitrógeno de consumo pesada es menor a la obtenida en realidad, pues se producen pérdidas, por lo que tenemos aquí un segundo motivo para que la desviación sea negativa y no positiva.

Corregir este defecto en la experimentación sería ciertamente algo complicado desde el punto de vista práctico, de igual manera que también lo es el estimar estas pérdidas, no siendo necesario su cálculo, puesto que en definitiva las correcciones que a continuación se efectúan sobre las correlaciones de ebullición nucleada, y que son incorporadas a la metodología de diseño, se han de basar únicamente en el estudio de las desviaciones del subenfriamiento.

## 9.8.- RESULTADOS DEFINITIVOS DE LA METODOLOGÍA

### 9.8.1.- Correlaciones finales de tipo semiempírico

A continuación mostramos, con los valores establecidos definitivamente para sus coeficientes, las correlaciones para ebullición nucleada tal y como quedarán finalmente recogidas en la metodología de diseño.

Se han establecido con el criterio de minimizar el conjunto de desviaciones medias, consiguiendo que sean todas positivas, al objeto de que la metodología proporcione resultados ligeramente conservadores y sobredimensionados.

$$\left. \frac{\dot{q}}{A} \right|_{NB} = 7,2E-10 \frac{(\Delta T \lambda)^{1,9765}}{(h_{lg} \rho_g \alpha)^{1,513}} \left( \frac{\sigma}{g \rho} \right)^{-0,038} \left( \frac{\rho}{\mu} \right)^{0,623} \frac{P^{1,751}}{(g \sigma \rho)^{0,8783}}$$

O bien en forma directa:

$$\log_{10} \left. \frac{\dot{q}}{A} \right|_{NB} = 2,6 + 1,8 \log_{10} \Delta T$$

A continuación se muestran las tablas con los resultados finales para el subenfriador construido, aportados por la metodología tras la corrección de tipo empírico a la que se ha sometido. Posteriormente se adjuntan también las gráficas comparativas entre estos resultados y los experimentales.

$P_{sum} = 0,2 \text{ [MPa]}$ $T_I = 83,65 \text{ [K]}$							
$L_{sumerg}$ [m]	$T_F$ [K]	$\Delta T$ [K]	$\dot{q}_{serp}$ [W]	$\dot{m}_{cons}$ [kg/s]	$\dot{m}_{rep}$ [kg/s]	$\dot{m}_{sum}$ [kg/s]	$\eta_{más}$ [%]
0,650	81,95	1,70	45,06	0,012738	0,000241	0,012979	98,14
	82,00	1,65	47,44	0,013807	0,000254	0,014061	98,19
	82,04	1,61	49,70	0,014877	0,000266	0,015143	98,24
	82,08	1,57	51,87	0,015947	0,000278	0,016225	98,29
	82,12	1,53	53,95	0,017017	0,000289	0,017306	98,33
	82,16	1,49	55,94	0,018088	0,0003	0,018388	98,37
	82,20	1,45	57,86	0,01916	0,00031	0,01947	98,41
	82,23	1,42	59,70	0,020231	0,00032	0,020551	98,44
	82,26	1,39	61,48	0,021304	0,000329	0,021633	98,48
	82,32	1,33	64,86	0,023449	0,000347	0,023796	98,54
1,437	80,59	3,06	79,72	0,012553	0,000427	0,01298	96,71
	80,66	2,99	84,39	0,013609	0,000452	0,014061	96,79
	80,73	2,92	88,88	0,014667	0,000476	0,015143	96,86
	80,79	2,86	93,19	0,015726	0,000499	0,016225	96,92
	80,85	2,80	97,36	0,016785	0,000521	0,017306	96,99
	80,91	2,74	101,39	0,017845	0,000543	0,018388	97,05
	80,97	2,69	105,28	0,018906	0,000564	0,01947	97,10
	81,02	2,63	109,04	0,019967	0,000584	0,020551	97,16
	81,07	2,58	112,69	0,021029	0,000603	0,021632	97,21
	81,16	2,49	119,67	0,023155	0,000641	0,023796	97,31
2,225	79,67	3,98	102,56	0,01243	0,000549	0,012979	95,77
	79,74	3,91	109,04	0,013477	0,000584	0,014061	95,85
	79,82	3,83	115,30	0,014525	0,000617	0,015142	95,93
	79,89	3,76	121,37	0,015575	0,00065	0,016225	95,99
	79,96	3,70	127,26	0,016625	0,000681	0,017306	96,06
	80,02	3,63	132,98	0,017676	0,000712	0,018388	96,13
	80,08	3,57	138,53	0,018728	0,000742	0,01947	96,19
	80,14	3,51	143,93	0,01978	0,000771	0,020551	96,25
	80,19	3,46	149,19	0,020834	0,000799	0,021633	96,31
	80,30	3,35	159,30	0,022943	0,000853	0,023796	96,42

Tabla 9.14 Resultados finales de la metodología planteada, para  $P_{sum} = 0,2 \text{ MPa}$

$P_{sum} = 0,3 \text{ [MPa]}$							
$T_j = 87,93 \text{ [K]}$							
$L_{sumerg}$ [m]	$T_F$ [K]	$\Delta T$ [K]	$\dot{q}_{serp}$ [W]	$\dot{m}_{cons}$ [kg/s]	$\dot{m}_{rep}$ [kg/s]	$\dot{m}_{sum}$ [kg/s]	$\eta_{más}$ [%]
0,649	84,78	3,15	80,25	0,012172	0,000451	0,012624	96,43
	84,86	3,06	84,78	0,013199	0,000477	0,013676	96,51
	84,94	2,99	89,12	0,014227	0,000501	0,014728	96,60
	85,01	2,92	93,30	0,015255	0,000525	0,01578	96,67
	85,08	2,85	97,33	0,016284	0,000548	0,016832	96,74
	85,14	2,79	101,21	0,017314	0,000569	0,017884	96,82
	85,20	2,73	104,97	0,018345	0,000591	0,018936	96,88
	85,26	2,67	108,60	0,019377	0,000611	0,019988	96,94
	85,31	2,62	112,12	0,020409	0,000631	0,02104	97,00
	85,41	2,52	118,84	0,022475	0,000669	0,023144	97,11
1,437	82,35	5,58	138,16	0,011847	0,000777	0,012624	93,85
	82,46	5,47	146,79	0,01285	0,000826	0,013676	93,96
	82,57	5,36	155,14	0,013855	0,000873	0,014728	94,07
	82,67	5,26	163,23	0,014862	0,000918	0,01578	94,18
	82,77	5,16	171,07	0,01587	0,000962	0,016832	94,28
	82,86	5,06	178,69	0,016879	0,001005	0,017884	94,38
	82,95	4,98	186,10	0,017889	0,001047	0,018936	94,47
	83,04	4,89	193,30	0,018901	0,001087	0,019988	94,56
	83,12	4,81	200,31	0,019913	0,001127	0,02104	94,64
	83,27	4,66	213,81	0,021941	0,001203	0,023144	94,80
2,225	80,77	7,16	173,91	0,011645	0,000979	0,012624	92,24
	80,88	7,05	185,57	0,012632	0,001044	0,013676	92,37
	81,00	6,93	196,92	0,01362	0,001108	0,014728	92,48
	81,10	6,83	207,98	0,01461	0,00117	0,01578	92,59
	81,21	6,72	218,77	0,015601	0,001231	0,016832	92,69
	81,30	6,62	229,30	0,016594	0,00129	0,017884	92,79
	81,40	6,53	239,59	0,017588	0,001348	0,018936	92,88
	81,49	6,44	249,64	0,018583	0,001405	0,019988	92,97
	81,58	6,35	259,48	0,01958	0,00146	0,02104	93,06
	81,74	6,18	278,52	0,021577	0,001567	0,023144	93,23

Tabla 9.15 Resultados finales de la metodología planteada, para  $P_{sum} = 0,3 \text{ MPa}$

$L_{sumerg}$ [m]	$P_{sum} = 0,4$ [MPa]			$T_I = 91,24$ [K]			
	$T_F$ [K]	$\Delta T$ [K]	$\dot{q}_{serp}$ [W]	$\dot{m}_{cons}$ [kg/s]	$\dot{m}_{rep}$ [kg/s]	$\dot{m}_{sum}$ [kg/s]	$\eta_{más}$ [%]
0,649	86,91	4,33	107,02	0,011709	0,000627	0,012336	94,92
	87,02	4,22	113,26	0,012701	0,000664	0,013365	95,03
	87,12	4,12	119,27	0,013694	0,000699	0,014393	95,14
	87,21	4,03	125,06	0,014688	0,000733	0,015421	95,25
	87,30	3,94	130,66	0,015683	0,000766	0,016449	95,34
	87,38	3,86	136,07	0,016679	0,000797	0,017476	95,44
	87,46	3,78	141,32	0,017676	0,000828	0,018504	95,53
	87,53	3,71	146,41	0,018675	0,000858	0,019533	95,61
	87,60	3,64	151,35	0,019674	0,000887	0,020561	95,69
	87,73	3,51	160,82	0,021674	0,000942	0,022616	95,83
1,437	83,61	7,63	181,00	0,011275	0,001061	0,012336	91,40
	83,75	7,49	192,69	0,012235	0,00113	0,013365	91,55
	83,89	7,35	204,02	0,013196	0,001196	0,014392	91,69
	84,02	7,22	215,04	0,01416	0,001261	0,015421	91,82
	84,15	7,09	225,75	0,015125	0,001324	0,016449	91,95
	84,27	6,97	236,19	0,016092	0,001385	0,017477	92,08
	84,38	6,86	246,35	0,01706	0,001445	0,018505	92,19
	84,49	6,75	256,27	0,01803	0,001503	0,019533	92,31
	84,59	6,65	265,95	0,019001	0,001559	0,02056	92,42
	84,79	6,45	284,65	0,020948	0,001669	0,022617	92,62
2,225	81,51	9,73	224,79	0,011018	0,001319	0,012337	89,31
	81,65	9,58	240,32	0,011955	0,00141	0,013365	89,45
	81,79	9,45	255,49	0,012894	0,001498	0,014392	89,59
	81,93	9,31	270,31	0,013835	0,001585	0,01542	89,72
	82,06	9,18	284,81	0,014778	0,00167	0,016448	89,85
	82,18	9,06	299,00	0,015723	0,001754	0,017477	89,96
	82,30	8,94	312,90	0,01667	0,001835	0,018505	90,08
	82,41	8,83	326,52	0,017618	0,001915	0,019533	90,20
	82,52	8,72	339,87	0,018568	0,001993	0,020561	90,31
	82,73	8,51	365,82	0,020472	0,002145	0,022617	90,52

Tabla 9.16 Resultados finales de la metodología planteada, para  $P_{sum} = 0,4$  MPa

		$P_{sum} = 0,5 \text{ [MPa]}$			$T_i = 93,98 \text{ [K]}$		
$L_{sumerg}$ [m]	$T_F$ [K]	$\Delta T$ [K]	$\dot{q}_{serp}$ [W]	$\dot{m}_{cons}$ [kg/s]	$\dot{m}_{rep}$ [kg/s]	$\dot{m}_{sum}$ [kg/s]	$\eta_{más}$ [%]
0,649	88,65	5,33	128,55	0,011308	0,00078	0,012088	93,55
	88,78	5,20	136,21	0,012269	0,000827	0,013096	93,69
	88,90	5,09	143,60	0,013232	0,000871	0,014103	93,82
	89,01	4,98	150,75	0,014196	0,000915	0,015111	93,94
	89,11	4,87	157,66	0,015162	0,000957	0,016119	94,06
	89,21	4,77	164,36	0,016128	0,000997	0,017125	94,18
	89,30	4,68	170,86	0,017096	0,001037	0,018133	94,28
	89,39	4,59	177,18	0,018065	0,001075	0,01914	94,38
	89,48	4,51	183,32	0,019036	0,001112	0,020148	94,48
	89,63	4,35	195,12	0,020979	0,001184	0,022163	94,66
1,437	84,60	9,39	214,35	0,010785	0,001303	0,012088	89,22
	84,77	9,21	228,48	0,011707	0,001389	0,013096	89,39
	84,93	9,05	242,24	0,012631	0,001473	0,014104	89,56
	85,09	8,90	255,62	0,013557	0,001554	0,015111	89,72
	85,23	8,75	268,68	0,014485	0,001633	0,016118	89,87
	85,37	8,61	281,41	0,015415	0,001711	0,017126	90,01
	85,51	8,48	293,84	0,016347	0,001786	0,018133	90,15
	85,64	8,35	305,98	0,017281	0,00186	0,019141	90,28
	85,76	8,23	317,86	0,018216	0,001932	0,020148	90,41
	85,99	7,99	340,85	0,020091	0,002071	0,022162	90,66
2,225	82,07	11,91	263,47	0,010486	0,001603	0,012089	86,74
	82,24	11,75	282,04	0,01138	0,001716	0,013096	86,90
	82,40	11,59	300,21	0,012277	0,001826	0,014103	87,05
	82,55	11,43	318,00	0,013177	0,001934	0,015111	87,20
	82,70	11,29	335,44	0,014078	0,00204	0,016118	87,34
	82,84	11,14	352,55	0,014981	0,002144	0,017125	87,48
	82,98	11,01	369,33	0,015887	0,002246	0,018133	87,61
	83,11	10,87	385,80	0,016794	0,002346	0,01914	87,74
	83,24	10,75	401,98	0,017703	0,002444	0,020147	87,87
	83,48	10,50	433,50	0,019526	0,002636	0,022162	88,11

Tabla 9.17 Resultados finales de la metodología planteada, para  $P_{sum} = 0,5 \text{ MPa}$

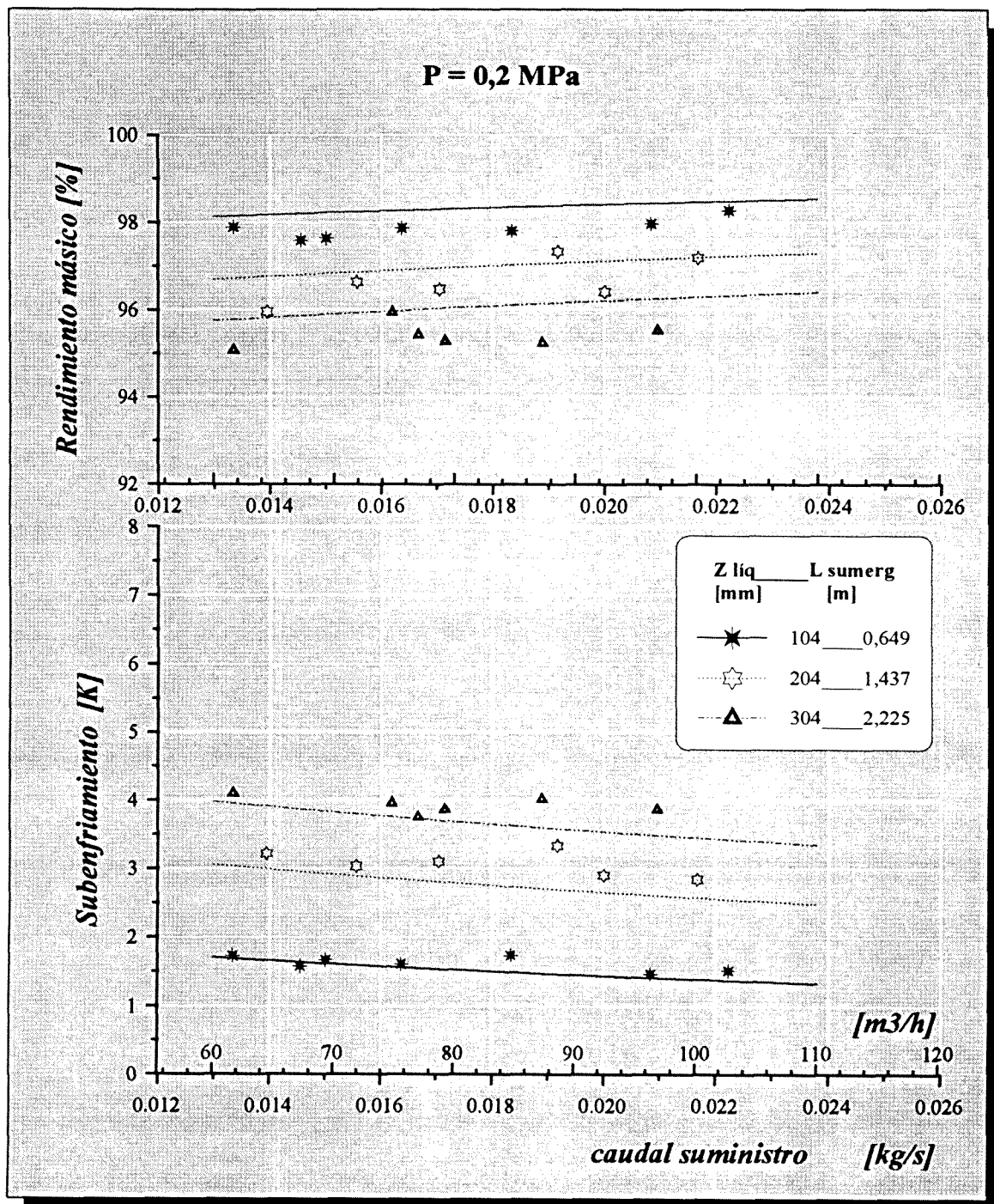


fig. 9.6 Comparación entre las curvas definitivas, proporcionadas por la metodología y la dispersión de puntos experimentales para  $P_{sum} = 0,2 \text{ MPa}$



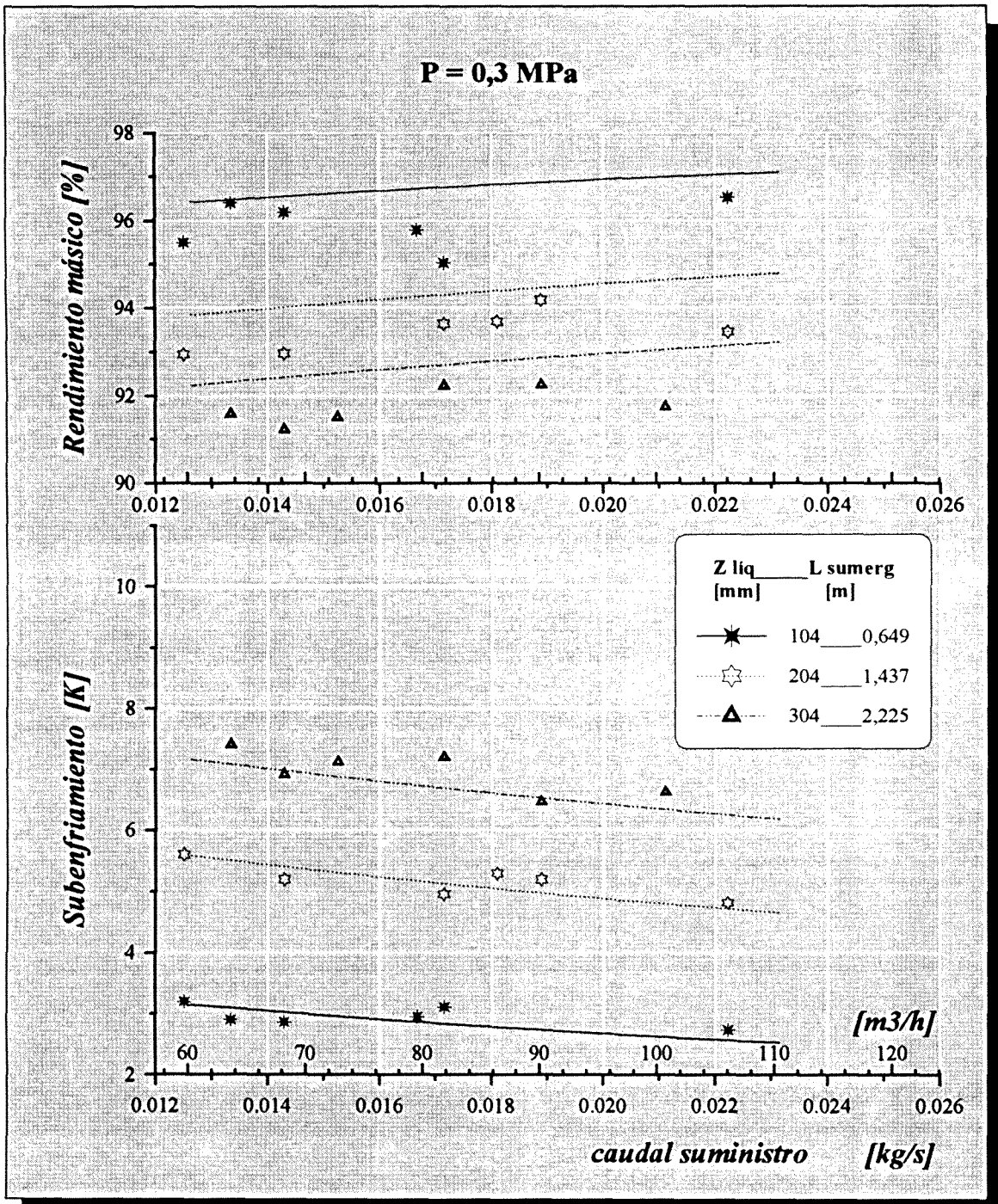


fig. 9.7 Comparación entre las curvas definitivas, proporcionadas por la metodología y la dispersión de puntos experimentales para  $P_{sum} = 0,3 \text{ MPa}$

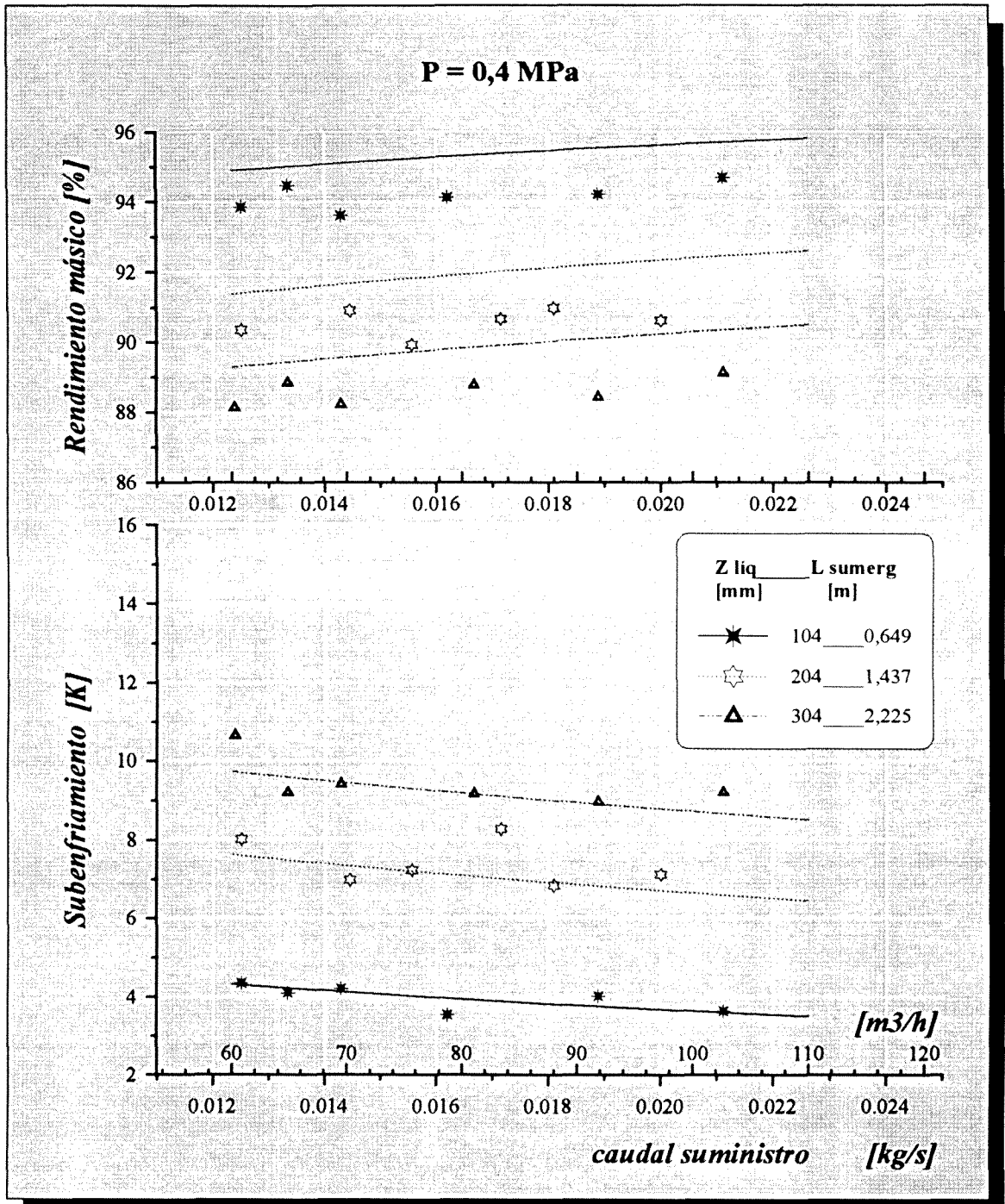


fig. 9.8 Comparación entre las curvas definitivas, proporcionadas por la metodología y la dispersión de puntos experimentales para  $P_{sum} = 0,4 \text{ MPa}$

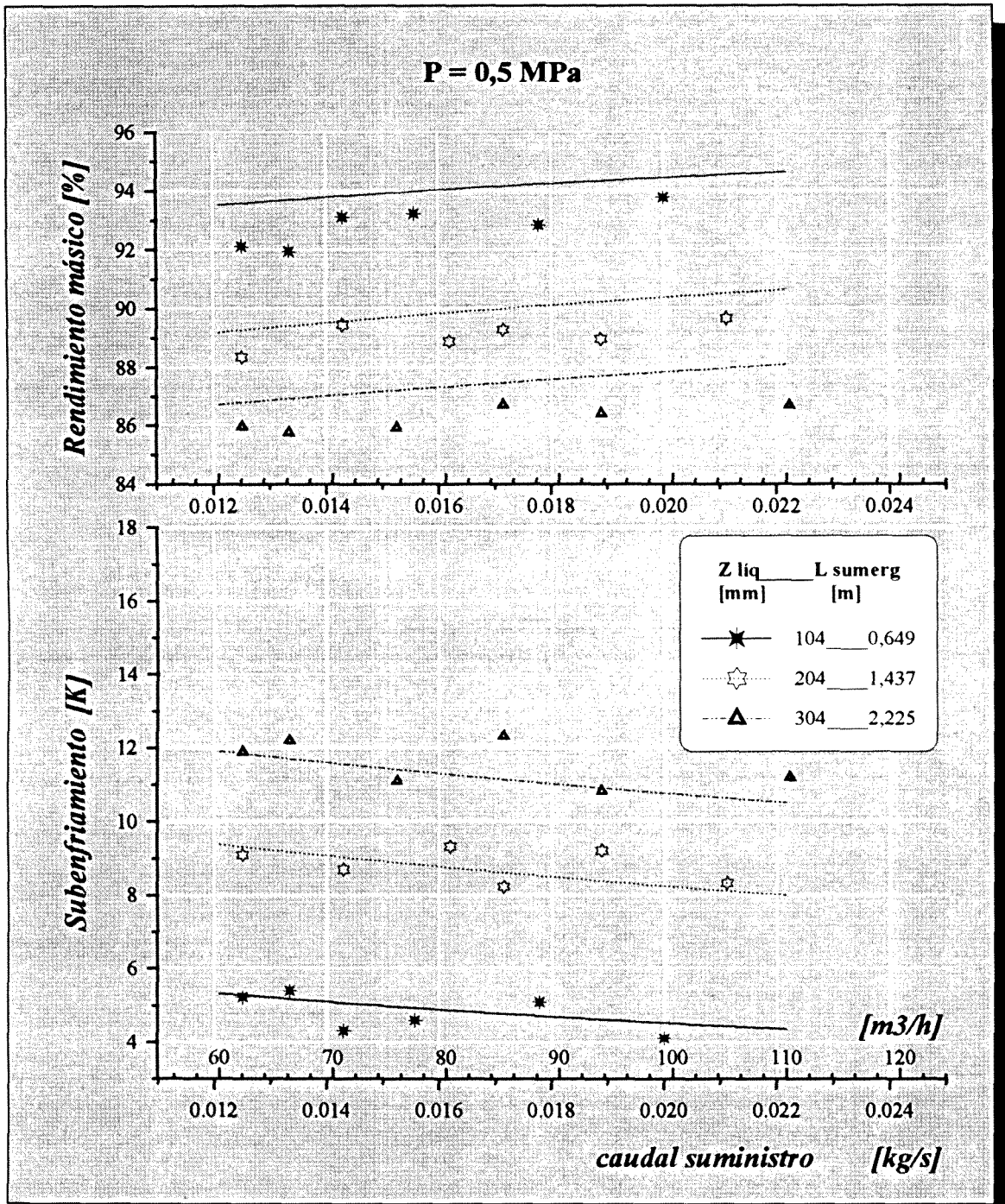


fig. 9.9 Comparación entre las curvas definitivas, proporcionadas por la metodología y la dispersión de puntos experimentales para  $P_{sum} = 0,5 \text{ MPa}$

## 9.8.2.- Análisis final de los resultados obtenidos

La tabla que recoge las desviaciones entre los resultados experimentales y los cálculos definitivos, resulta ser en este caso:

Subenfriamiento medio <i>error absoluto [K]</i> <i>error relativo [%]</i>		$P_{sum}$ [MPa]			
		0,2	0,3	0,4	0,5
$Z_{liq}$ [mm]	104	1,5	2,8	3,9	4,8
		0,09	0,04	0,01	0,01
		6,0	1,7	0,3	0,2
	204	2,8	5,1	7,0	8,7
		0,22	0,06	0,25	0,08
		7,8	1,3	3,6	0,9
	304	3,7	6,7	9,1	11,2
		0,24	0,23	0,22	0,4
		6,5	3,5	2,5	3,5
MEDIA error absoluto = 0,16 K MEDIA error relativo = 3,4 %					

**Tabla 9.18** Comparativa de las desviaciones entre los resultados finales aportados por la metodología y los experimentales, para distintos niveles y presiones

Como se aprecia, tras la corrección se producen dos variaciones respecto a las desviaciones observadas con anterioridad, la primera es cuantitativa ya que todas ellas son notablemente inferiores a las que se tenían antes de contemplar los resultados experimentales, y la segunda es cualitativa, ya que ahora se ha conseguido que éstas sean en todos los casos positivos, lo cual supone un cierto margen de seguridad para los cálculos aportados por la metodología.



## 10.- CONCLUSIONES FINALES. PERSPECTIVAS DE FUTURO

### 10.1.- RECAPITULACIÓN Y CONCLUSIONES DEFINITIVAS

Tal como se ha puesto de manifiesto, a lo largo de este trabajo, en el establecimiento de una metodología de diseño de subenfriadores como el que nos ocupa, en aras a las optimización de las prestaciones del mismo, intervienen multitud de variables y parámetros.

Resulta difícil comentar de forma resumida a lo que conducen los resultados obtenidos, por el volumen de datos que la metodología aporta y la cantidad de variables en juego, no obstante trataremos de extraer lo más destacado de ellos.

Se han puesto de manifiesto en el capítulo 8, correspondiente a cálculos y resultados, las diferentes sensibilidades de las prestaciones del equipo, resumidas en el subenfriamiento, para con el resto de magnitudes. En este sentido cabe señalar que gracias a la caída de tipo pseudo-exponencial observada en el mismo con respecto a la longitud del serpentín, se puede establecer una longitud óptima que proporciona prestaciones adecuadas para todo el rango de presiones, tal como se resume en las figuras 8.15 a 8.18 de las páginas 191 a 192. El mismo tipo de descenso se observa en la potencia transferida, para las diferentes presiones de trabajo.

El análisis del rendimiento másico<sup>1</sup> realizado en el apartado 8.3 pone claramente de manifiesto, su gran variación con respecto a la presión de suministro, lo cual se refleja de forma patente en la figura 8.21 de la pág. 204. Como consecuencia se deduce el interés de minimizar la presión de trabajo, ajustándose a aquel valor estrictamente necesario para cubrir las pérdidas de carga de la instalación.

---

<sup>1</sup> Magnitud que marca el Norte desde el punto de vista de la optimización del diseño.

Por añadidura, la metodología de diseño debe minimizar también el valor de las citadas pérdidas de carga para el equipo, conjugando adecuadamente las proporciones y dimensiones del serpentín de intercambio. A tal efecto se pueden utilizar como base de análisis las figuras 8.5 a 8.9 de las páginas 170 a 174, además de las ya citadas anteriormente.

Con el mismo objetivo de maximizar el rendimiento másico, se ha podido comprobar el interés de reducir al mínimo el subenfriamiento del equipo, lo cual resulta evidente pues aquel es consecuencia de éste. En este sentido lo que se ha realizado, es un estudio acerca de la ubicación óptima del cambiador, lo que es equivalente a la determinación del citado subenfriamiento mínimo en función de la colocación del equipo respecto al punto de consumo.

Además se ha establecido el proceso de cálculo de las ganancias térmicas del equipo, como consecuencia de la transmisión con el exterior, que permite la determinación del aislamiento óptimo del mismo.

Respecto a los métodos de cálculo, el análisis de los coeficientes de transmisión superficial realizado en el capítulo 7, pone de manifiesto la enorme sensibilidad de los mismos con respecto al salto de temperaturas, por lo que se ha procedido a la discretización de la superficie de intercambio, con la integración numérica posterior que ello conlleva, para la resolución del problema.

Con respecto a la formulación utilizada, cabe reseñar la dificultad para la obtención de correlaciones específicas para nuestras necesidades. No habiéndose encontrado una adecuada para el caso de la ebullición nucleada, se ha procedido a realizar una inspirándonos en formulaciones de otros autores.

La comparación descrita en el capítulo 8, de los resultados obtenidos con los de origen experimental que se han tenido ocasión de obtener, apunta a que deberían corregirse las correlaciones iniciales al objeto de conseguir la convergencia entre ambos.

Una vez realizadas estas correcciones, queda establecida definitivamente la metodología de diseño, objetivo fundamental de esta tesis, pudiendo afirmarse como conclusión más destacada, que los resultados aportados por la misma conducen a diseños adecuados para

cubrir las necesidades térmicas solicitadas, procurando a la vez el máximo rendimiento másico en el funcionamiento.

## 10.2.- PERSPECTIVAS DE FUTURO

Resulta evidente que por muy complejo y completo que sea, cualquier trabajo científico deja por definición puertas abiertas a investigaciones futuras.

En este caso yo diría que estas son múltiples y de diversa índole debido a los diferentes aspectos que se abordan en el estudio. Quisiera no obstante destacar entre otras, las siguientes como fundamentales:

- \* El análisis realizado sobre el fenómeno de ebullición ha conducido al establecimiento de unas correlaciones específicas para la pareja fluido-superficie que nos ocupaba, en este sentido indicar que lógicamente su campo de validez no puede ir más allá de los rangos a los que se ha ceñido la experimentación.

Se podría profundizar en este terreno, ya que es un campo abonado para la investigación, incluso más allá del mero ámbito de la criogenia, pudiendo inicialmente establecerse correlaciones específicas, para a posteriori tratar de aunarlas y conferirles un carácter de universalidad. Abona esta idea el que actualmente éste es un aspecto en el que se están derrochando múltiples esfuerzos, sobre todo más allá de nuestras fronteras.

- \* Por otro lado una técnica que está cobrando cierta importancia en los últimos tiempos, es el tema de la programación multiobjetivos.

En el cálculo de cambiadores de calor, siempre aparecen un gran número de magnitudes en juego, y su conjugación conduce en ocasiones a resultados para las diferentes prestaciones y/o características de funcionamiento, que resultan ser de intereses contradictorios. Siendo el binomio que mejor refleja esto, el de la pérdida de carga y la potencia térmica, puede extenderse el problema a muchas otras



magnitudes. En nuestro caso intervienen además entre otras la presión de suministro, la posición del subenfriador, la geometría, etc.

En un caso más general se podrían contemplar como objetivos adicionales, la optimización de parámetros vinculados a los procesos de ensuciamiento, o incluso sería objeto de estudio, la aplicación al caso de integración dentro de redes de recuperadores.

## APÉNDICES

### APÉNDICE A. SOFTWARE. PROGRAMAS DE CÁLCULO.

#### A.1.- INTRODUCCIÓN

En este apéndice se pretende recoger algo más que el mero listado de los principales programas desarrollados al objeto de implementar adecuadamente la metodología de diseño, que se ha expuesto a lo largo de este documento.

En este sentido se evita expresamente la impresión lineal de las instrucciones que configuran el *software*<sup>1</sup>, ya que el objetivo de este apéndice es el de servir de complemento a los capítulos anteriores, y de manera muy especial al número 6, correspondiente al planteo de la resolución, puesto que precisamente el *software* aquí comentado no supone sino la forma efectiva en que el mismo se ha llevado a la práctica.

Comentábamos en repetidas ocasiones a lo largo del documento, que debido a la sensibilidad de los coeficientes de convección, especialmente por lo que hacía referencia a la diferencia de temperaturas entre pared y fluido exterior, debía abordarse el cálculo del cambiador en base a una integración numérica del mismo, en la que se requería de diferentes bucles iterativos, para el cálculo en cada tramo de las temperaturas de pared. Pues bien, será en este apéndice donde gracias al análisis descendente que realicemos de los programas, tengamos ocasión de ver como se desarrollan explícitamente los mismos.

---

<sup>1</sup> Se ofrece como alternativa a estos listados, una opción mucho más enriquecedora y potente como lo es la disponibilidad de los propios programas.

## A.2.- CÁLCULO DE LA LONGITUD DEL SERPENTÍN

Recoge la metodología planteada para la resolución del problema directo, partiendo de la geometría y las prestaciones térmicas requeridas, determina la longitud necesaria del serpentín, y la pérdida de carga que tendrá lugar en su interior.

De forma más específica el inicio y final del proceso de cálculo vendrá dado por las siguientes magnitudes

### *Datos de entrada:*

- Diámetro interior del tubo
- Espesor del tubo
- Diámetro del eje del serpentín
- Paso del serpentín
- Presión de suministro
- Presión del nitrógeno del vaso
- Subenfriamiento requerido
- Caudal de suministro
- Precisión en las iteraciones
- Paso de integración (longitud de tramo)

### *Datos de salida:*

- Propiedades del nitrógeno saturado en cada punto
- Perfil de temperaturas del nitrógeno en el serpentín
- Perfil de temperaturas de las paredes del tubo
- Caudales de suministro, consumo, expandido y evaporado
- Velocidad y números adimensionales
- Potencia térmica transferida
- Longitud necesaria de serpentín
- Pérdida de carga

Puesto que los programas se han desarrollado en lenguaje C, y más concretamente se ha utilizado el compilador Turbo C++ (ver. 1.01) de Borland\*, los mismos poseen de por sí un alto grado de estructuración, ya que así lo requiere este lenguaje de programación.

Es por ello que, junto con el hecho de que las diferentes instrucciones utilizadas son fácilmente comprensibles<sup>1</sup>, se realiza únicamente un escueto análisis descendente del programa principal y las principales subrutinas que lo complementan.

## PROGRAMA DE CÁLCULO DE LA LONGITUD DEL SERPENTÍN

### Programa principal

Declaración de variables

Inicialización de parámetros y constantes

Leer calcular para un único diámetro o para varios?

Leer datos

Si diámetro único entonces

    Calcular serpentín

    Escribir resultados

sino

Para diámetro inicial hasta diámetro final

            Calcular serpentín

            Escribir resultados

            Opción seguir calculando o terminar sesión

finpara

finsi

Fin Programa principal

---

<sup>1</sup> Aunque su composición pueda resultar algo extraña a un profano, entiendo que cuanto menos por lo que hace referencia la función de las mismas, resulta fácil de comprender.

**Sub: Calcular serpentín**

Declaración de variables  
Inicialización de variables  
Hallar caudales máxicos

**Mientras**  $T_{\text{salida}}$  del tramo estudiado  $>$   $T_{\text{salida}}$  serpentín **hacer**  
Inicializar temp. de entrada y salida del tramo

**Repetir**

Actualizar temperatura salida del último tramo  
Inicializar temperaturas media, externa e interna pared del tramo

**Repetir**

Actualizar temperaturas de pared  
Hallar coeficiente de convección interior  
Hallar coeficiente de convección exterior  
Calcular potencia transferida en el tramo de tubo  
Hallar temperaturas de pared nuevas

**hasta que**  $| T_{\text{pared}} \text{ supuestas} - T_{\text{pared}} \text{ calculadas} | < \text{error}$

Hallar la nueva temperatura de salida del tramo

**hasta que**  $| T_{\text{salida}} \text{ supuesta} - T_{\text{salida}} \text{ calculada} | < \text{error}$

Aumentar la longitud de tubo con el nuevo tramo  
Incrementar potencia total del tubo  
Calcular la pérdida de carga del tramo  
Incrementar la pérdida de carga del tubo

**finmientras****Fin sub: Calcular serpentín**

**Sub: Calcular caudales máscicos**

Declaración de variables  
Hallar la potencia por unidad de caudal transferida en el serpentín  
Calcular entalpías de entrada y salida (líquido y vapor)  
Calcular el rendimiento máscico mediante las entalpías anteriores  
Hallar caudales de nitrógeno expandido, evaporado y a consumo

**Fin sub: Calcular caudales máscicos****Sub: Calcular coeficiente de convección local interior**

Declaración de variables  
Hallar velocidad media en el tramo  
Hallar número de Reynolds medio en el tramo  
Hallar número de Prandtl medio en el tramo  
Hallar el número de Nusselt :

**Si** ( Reynolds  $< 2300$  ) **entonces**

Aplicar expresión de Stephan

**sino**

Aplicar expresión de Gnielinski

**finsi**

Despejar coeficiente convección interior

**Fin sub: Calcular coeficiente de convección local interior****Sub: Calcular coeficiente de convección local exterior**

Declaración de variables  
Calcular  $\dot{q}/A]_{nuc}$  mediante la correlación propuesta  
Calcular  $h_{nuc}$   
Calcular  $Nu_D$  ebullición incipiente (CLAM)  
Calcular  $h_{inc}$  y  $\dot{q}/A]_{inc}$

si  $\dot{q}/A]_{\text{nuc}} > \dot{q}/A]_{\text{inc}}$  entonces  
 $h_{\text{ext}} = h_{\text{nuc}}$   
sino  
 $h_{\text{ext}} = h_{\text{nuc}}$   
finsi

**Fin sub:** Calcular coeficiente de convección local exterior

**Sub:** Calcular la pérdida de carga

Declaración de variables

si  $Re < 5E6$  entonces

Hallar coeficiente de fricción mediante la expresión de Churchill

finsi

Corregir el coeficiente de fricción por la curvatura del helicoide

Hallar la pérdida de carga para el tramo

**Fin sub:** Calcular la pérdida de carga

## FIN: PROGRAMA DE CÁLCULO DE LA LONGITUD

### A.3.- CÁLCULO DE LA TEMPERATURA DE SALIDA

Es un programa complementario al anterior, y recoge la metodología planteada para la resolución del problema inverso, partiendo de la geometría y longitud de serpentín sumergida, o lo que es lo mismo el nivel de líquido del vaso, determina las prestaciones térmicas del subenfriador, y la pérdida de carga que tendrá lugar en el interior del serpentín.

Si de alguna manera el primer programa era una herramienta de asistencia en el momento del diseño, este será una de ayuda posterior para la comprobación del buen funcionamiento del diseño realizado, no ya en las condiciones de trabajo para las que se construyó, sino para predecir los resultados que se obtendrán del mismo cuando cambien.

En consecuencia este programa está especialmente enfocado de cara a dos aspectos,

- \* La obtención de resultados que puedan servir de base, para la posterior optimización de los parámetros de diseño.
- \* Poder ofrecer resultados que permitan la contrastación con los aquellos obtenidos mediante la experimentación.

Puesto que el problema se aborda mediante la integración numérica tramo a tramo del serpentín, lo cierto es que prácticamente no se establecen grandes diferencias entre las resoluciones de los problemas directo e inverso.

A efectos prácticos además de las lógicas diferencias entre datos de entrada y salida<sup>1</sup>, cambia fundamentalmente la condición a verificar para dar por concluido el proceso iterativo de construcción del serpentín, ya que en este caso al no conocerse la temperatura de salida no se pueden determinar a priori los diferentes caudales de fluido.

En consecuencia buena parte de las subrutinas de cálculo implementadas para el primer programa, son utilizadas también en este, por lo que no repetiremos aquí su contenido, limitando por tanto el análisis descendente en este apartado a lo que sería el programa principal.

## **PROGRAMA DE CÁLCULO DE PRESTACIONES**

### **Programa principal**

Declaración de variables

Inicialización de parámetros y constantes

---

<sup>1</sup> Se intercambian evidentemente de lugar longitud y prestaciones.



Leer calcular para una única longitud o para varias?

Leer datos

Si longitud única entonces

Calcular prestaciones

Escribir resultados

sino

Para longitud inicial hasta longitud final

Calcular prestaciones

Escribir resultados

Opción seguir calculando o terminar sesión

finpara

finsi

Fin Programa principal

Sub: Calcular prestaciones

Declaración de variables

Inicialización de variables

Suponer  $T_{\text{salida}}$  serpentín

Repetir

Actualizar variables

Hallar caudales máxicos

Mientras  $L_{\text{acumulada}}$  de los tramos estudiados  $< L_{\text{serpentín}}$  hacer

Inicializar temp. de entrada y salida del tramo

Decrementar la presión inicial con la pérdida de carga

Repetir

Actualizar temperatura salida del último tramo

Inicializar temperaturas media, externa e interna pared del tramo

**Repetir**

Actualizar temperaturas de pared  
 Hallar coeficiente de convección interior  
 Hallar coeficiente de convección exterior  
 Calcular potencia transferida en el tramo de tubo  
 Hallar temperaturas de pared nuevas

**hasta que** |  $T_{\text{pared}} \text{ supuestas} - T_{\text{pared}} \text{ calculadas}$  | < error

Hallar la nueva temperatura de salida del tramo

**hasta que** |  $T_{\text{salida}} \text{ supuesta} - T_{\text{salida}} \text{ calculada}$  | < error

Aumentar la longitud de tubo con el nuevo tramo  
 Incrementar potencia total del tubo  
 Calcular la pérdida de carga del tramo  
 Incrementar la pérdida de carga del tubo

**finmientras**

**hasta que** |  $T_{\text{Final}} \text{ supuesta} - T_{\text{Final}} \text{ calculada}$  | < error

**Fin sub:** Calcular prestaciones

**Sub:**

:

(ver subrutinas apartado anterior)

**Finsub:**

**FIN: PROGRAMA DE CÁLCULO DE PRESTACIONES**

## A.4.- AISLAMIENTO

El objeto de este programa de carácter complementario, no es sino la estimación de la potencia que se aporta desde el medio exterior al líquido expandido que se encuentra en el recipiente interior. Ello lógicamente en función del grosor y tipo de aislante, tal como se relaciona en el capítulo de planteo correspondiente a este apartado.

A partir de esta potencia se puede determinar el exceso de nitrógeno evaporado, como consecuencia de ello y estudiar el espesor óptimo de aislante que conviene colocar en cada caso concreto.

El resumen del análisis descendente del programa utilizado resulta

### PROGRAMA DE CÁLCULO DEL AISLAMIENTO

#### Programa principal

Declaración de variables

Inicialización de parámetros y constantes

Leer datos

Si espesor único entonces

Calcular potencia

Escribir resultados

sino

Para espesor inicial hasta espesor final

Calcular potencia

Escribir resultados

Opción seguir calculando o terminar sesión

finpara

finsi

Fin Programa principal

**Sub: Calcular potencia**

Declaración de variables

Inicialización de variables

Calcular resistencias térmicas de conducción de recipientes y aislante

Suponer  $T_{ii}$  (interior recipiente interior)Suponer  $T_{oo}$  (exterior recipiente exterior)**Repetir**

Actualizar variables

Calcular coeficiente de ebullición

Calcular coeficiente de transmisión superficial exterior

Hallar la potencia térmica transmitida

Hallar  $T_{ii}$  y  $T_{oo}$ 

**hasta que** ( |  $T_{ii}$  supuesta -  $T_{ii}$  calculada | < error    y  
 |  $T_{oo}$  supuesta -  $T_{oo}$  calculada | < error )

**Fin sub: Calcular potencia****Sub:**

:

(ver subrutinas apartado anteriores)

**Finsub:****FIN: PROGRAMA DE CÁLCULO DEL AISLAMIENTO****A.5.- POSICIONADO ÓPTIMO**

Es este un sencillo programa complementario a la metodología de diseño, que permite determinar cual es la distancia máxima que puede separar el equipo del punto final de consumo. Ello claro está, en función de las características de la línea y del aislante

utilizado, así como de las condiciones de temperatura y presión, además del caudal de nitrógeno procedente del subenfriador.

Su manejo permite además indirectamente establecer el subenfriamiento mínimo, necesario para cubrir una distancia de separación determinada, por lo que de esta manera se optimiza el rendimiento másico del equipo para esas condiciones.

El algoritmo en este caso resulta ser similar al del cálculo del serpentín, puesto que en definitiva se trata de la resolución de un problema directo.

## PROGRAMA DE CÁLCULO DE LA DISTANCIA MÁXIMA

### Programa principal

Declaración de variables

Inicialización de parámetros y constantes

Leer datos

Si subenfriamiento único entonces

Calcular distancia

Escribir resultados

sino

Para subenfriamiento inicial hasta subenfriamiento final

Calcular distancia

Escribir resultados

Opción seguir calculando o terminar sesión

finpara

finsi

Fin Programa principal

Sub: Calcular distancia

Declaración de variables

Inicialización de variables

Calcular resistencias térmicas de conducción de tuberías y aislante

**Mientras**  $T_{\text{salida}}$  del tramo estudiado  $>$   $T_{\text{entrada}}$  serpentín **hacer**  
Inicializar temp. de entrada y salida del tramo

**Repetir**

Actualizar temperatura salida del último tramo

Inicializar temperaturas media, externa e interna paredes del tramo

**Repetir**

Actualizar temperaturas de paredes

Hallar coeficiente de convección interior

Hallar coeficiente de transmisión superficial exterior

Calcular potencia transferida en el tramo de tubo

Hallar temperaturas de pared nuevas

**hasta que** |  $T_{\text{pared}}$  supuestas -  $T_{\text{pared}}$  calculadas |  $<$  error

Hallar la nueva temperatura de salida del tramo

**hasta que** |  $T_{\text{salida}}$  supuesta -  $T_{\text{salida}}$  calculada |  $<$  error

Aumentar la longitud de tubo con el nuevo tramo

Incrementar potencia total del tubo

Calcular la pérdida de carga del tramo

Incrementar la pérdida de carga del tubo

**finmientras**

**Fin sub:** Calcular distancia

**Sub:**

:

(ver subrutinas apartados anteriores)

**Finsub:**

**FIN: PROGRAMA DE CÁLCULO DE LA DISTANCIA MÁXIMA**



## **APÉNDICE B. SISTEMA DE REGULACIÓN**

Ha de remarcarse el hecho, de que el sistema de regulación debe entenderse en esta tesis como una herramienta de apoyo al diseño del equipo, y no específicamente a la metodología del mismo, por lo que no se considera oportuno extenderse excesivamente en detalles sobre la implementación del mismo.

No obstante teniendo en cuenta que la metodología de diseño se encamina a garantizar de forma óptima un subenfriamiento en el fluido, y considerando que el sistema de regulación juega un papel necesario en este aspecto, no podemos dejar de exponer los aspectos más relevantes de las funciones y elementos del mismo.

En este sentido, la sistema de regulación del equipo contemplará el control sobre los siguientes aspectos:

- \* Nivel mínimo de nitrógeno durante la puesta en marcha.
- \* Subenfriamiento del nitrógeno líquido en funcionamiento normal.
- \* Nivel máximo de nitrógeno en el vaso

### **B.1.- CONTROL DEL NIVEL MÍNIMO EN LA PUESTA EN MARCHA**

En cada puesta en marcha de la instalación de la línea, el recipiente interior del equipo subenfriador se encontrará inicialmente vacío, es decir no se dispone aun de fluido frío con el que realizar el subenfriamiento. Si circulase nitrógeno líquido para consumo por el serpentín en estas condiciones no se enfriaría por debajo de la temperatura de saturación y llegaría siempre vapor al dosificador en el punto de consumo.

Se requiere pues de un proceso que subsane esta problemática, del transitorio inicial, para ello el sistema de regulación cerrará el paso de fluido hacia el consumo mediante una



válvula, y lo vehiculará todo hacia el recipiente interior del equipo, con la intención de llenarlo hasta alcanzar una altura mínima suficiente para garantizar un mínimo subenfriamiento del nitrógeno en la línea a consumo.

Esta altura mínima determina la longitud de serpentín sumergida en el fluido frío y por tanto la superficie mínima de intercambio de calor que en ese momento se dispondrá en el subenfriador, lo cual en definitiva garantizará un cierto subenfriamiento mínimo.

Con este fin el bucle de control dispone el emplazamiento de un sensor de nivel de nitrógeno líquido, al nivel fijado por la altura mínima antes referida. Si el nivel de  $N_2 (l)$  expandido en el vaso es inferior a esta, la válvula de paso a consumo permanecerá cerrada y si es mayor estará abierta.

## B.2.- CONTROL EN RÉGIMEN DE FUNCIONAMIENTO NORMAL

La cantidad de  $N_2 (l)$  expandido a presión atmosférica que sumerge una cierta longitud de serpentín, sufre mermas mediante evaporación como consecuencia de las ganancias de calor que recibe, las cuales proceden de dos frentes distintos, a saber:

- \* Medio ambiente, a través del aislante y los propios conductos que unen los recipientes interior y exterior.
- \* Nitrógeno líquido que se enfría, a través del serpentín.

Ello significaría una disminución en la superficie de intercambio térmico del subenfriador, y por tanto de la potencia transferida, consecuencia de lo cual el subenfriamiento disminuiría paulatinamente y la temperatura del  $N_2 (l)$  a la salida aumentaría.

Para evitar que ello suceda, se han de compensar estas mermas, reponiendo el caudal de  $N_2$  evaporado, y para ello se desvía previa expansión una parte del caudal principal de nitrógeno líquido hacia el recipiente interior.

El bucle de control a establecer debe garantizar que el caudal expandido sea estrictamente el necesario para mantener el nivel del vaso (superficie de transmisión), en el valor adecuado, a fin de fijar la temperatura final y el subenfriamiento en el valor deseado.

Se podría realizar de dos formas, en base fijar a otras tantas magnitudes, la temperatura de salida o el subenfriamiento:

- \* control de la temperatura de salida del nitrógeno líquido subenfriado, mediante una sonda de temperatura a la salida del serpentín, tal que si la temperatura es mayor que la deseada abra el paso de nitrógeno hacia el recipiente para aumentar el nivel, y en caso de ser menor o igual cierre el paso.
- \* para el control del subenfriamiento del nitrógeno líquido se mide la diferencia de temperaturas del nitrógeno entre la entrada y la salida del serpentín, y si esta es menor que el valor deseado se abre paso de nitrógeno para aumentar el nivel o si no se cierra la válvula.

Para el primer sistema el usuario ha de tener un mayor conocimiento de datos que para el segundo, puesto que para fijar la consigna de temperatura de salida, en orden a obtener un subenfriamiento ha de saber cual es la temperatura de entrada al serpentín, que a su vez es función de la presión de suministro.

Para el segundo método basta saber cual es el subenfriamiento mínimo para que no vaporice nitrógeno líquido en lo que queda de línea hasta el dosificador e introducirlo como consigna, por lo que esta será la magnitud seleccionada para establecer el bucle de regulación.

Como la masa de nitrógeno a enfriar es reducida tiene poca inercia térmica, por lo que el control se puede realizar mediante un sistema de regulación Todo/Nada.

### B.3.- CONTROL DE NIVEL MÁXIMO

Simplemente se trata de una medida de seguridad que corte el suministro de N<sub>2</sub> expandido, caso de que el nivel de líquido supere una cierta cota. Ello tiene por único objeto, el

evitar que por cualquier motivo pudiera producirse salida de líquido a través del tubo de alivio de vapor.

Para ello se dispondrá de una sonda de nivel en el punto fijado como cota máxima, la cual no será sino la propia altura del serpentín, que vigilará permanentemente que no se exceda la misma.

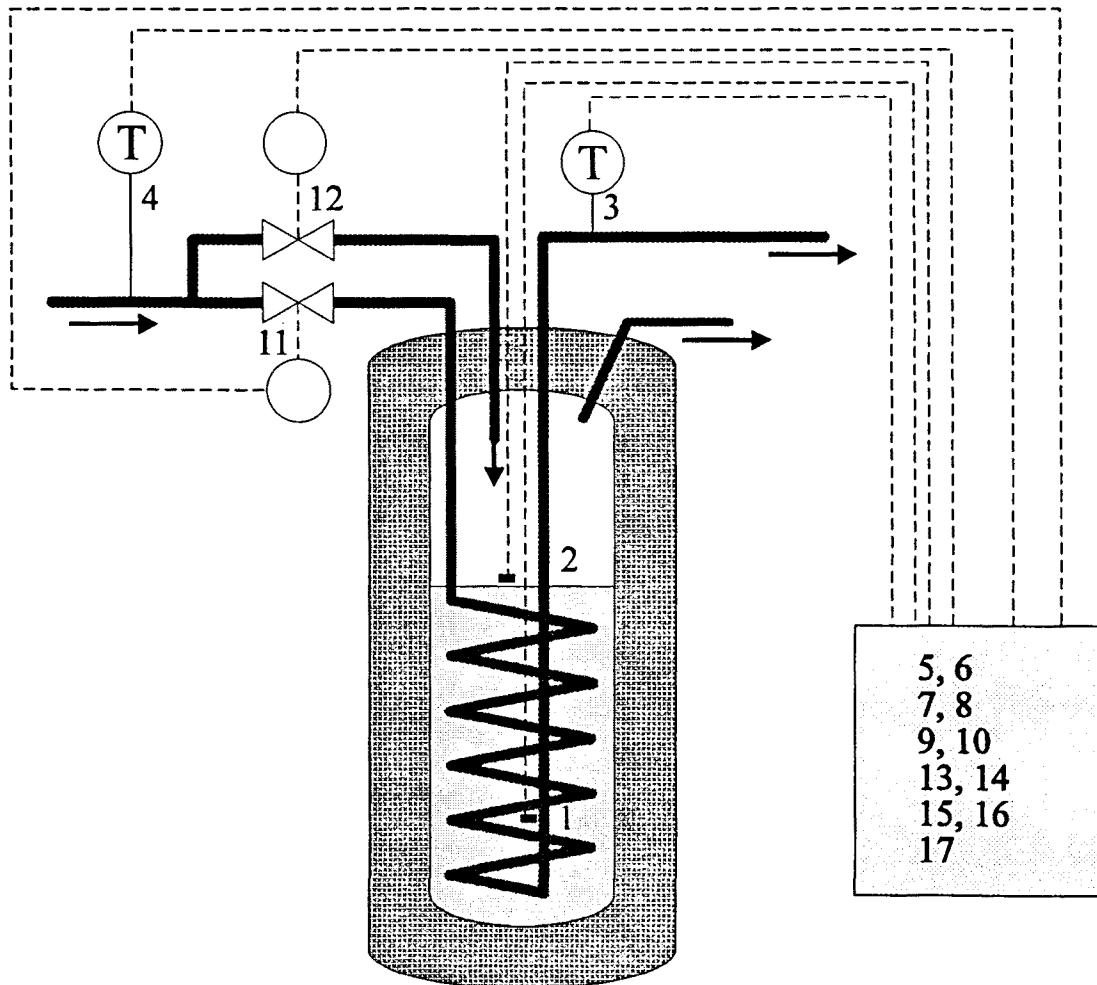
#### B.4.- ESQUEMA DE PRINCIPIO

Para cubrir las necesidades de regulación comentadas se deben instalar una serie de elementos de campo, conectados al sistema regulador, podemos identificarlos en la ilustración con la numeración siguiente:

NÚMERO	DESCRIPCIÓN DEL ELEMENTO
1,2	Sondas nivel mínima, máxima
3,4	Sondas temperatura salida, entrada
11,12	Válvulas solenoide consumo, expansión
5 ÷ 10, 13 ÷ 17	Cuadro de control

Respecto a las sondas de nivel, simplemente señalar que cualquiera de los diferentes sistemas empleados (ultrasonidos, capacitivo, inductivo, resistencia, galgas extensométricas,...) se puede aplicar, ya que la precisión requerida no es determinante en este caso.

Para las sondas de temperatura se presenta la posibilidad de utilizar bien termopares, termoresistencias o bien termistores (NTC o PTC), debiendo tenerse en cuenta el rango de temperaturas en que han de trabajar.



**fig. B.1** Esquema de principio de los elementos que configuran el sistema de regulación del subenfriador

En cuanto a las válvulas, decir que el coeficiente que caracteriza a las mismas es el denominado  $K_v$ , que representa el caudal de agua en  $m^3/h$  que ha de atravesar la válvula que la presión diferencial sea de 1 bar. Si la válvula como en nuestro caso está totalmente abierta este coeficiente se denominará  $K_{vs}$ , la ecuación que relaciona presión y pérdida de carga a través de este coeficiente es la siguiente (unidades S.I.):

$$\dot{Q} = K_{vs} \sqrt{\Delta P \frac{1000}{\rho}}$$

En este sentido cabe diferenciar que las misiones en cuanto a pérdidas de carga a provocar son diametralmente opuestas en ambas, puesto que la de consumo debe ser despreciable por lo que se escogerá con un  $K_{Vs}$  elevado (3,3), mientras que la del fluido secundario producirá la expansión hasta la presión atmosférica, y su  $K_{Vs}$  será menor (0,22) <sup>1</sup>.

### B.5.- ESQUEMA ELÉCTRICO

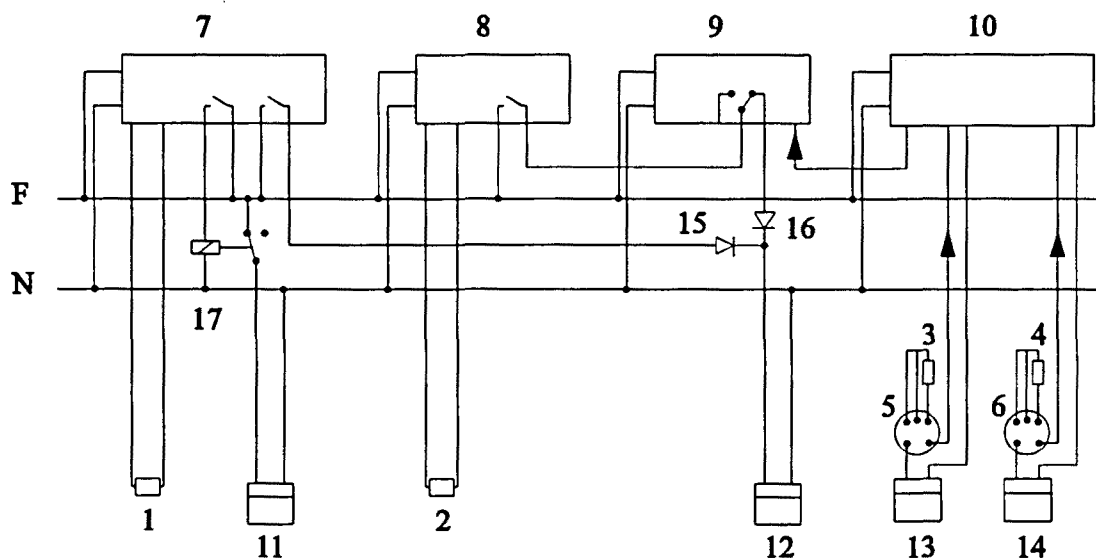


fig. B.2 Esquema eléctrico del sistema de regulación

En la tabla expuesta a continuación se detalla cada elemento del esquema anterior

<sup>1</sup> Valores determinados en relación con la fórmula y adaptados en base a las características de válvulas comerciales disponibles.

NUMERO	DESCRIPCIÓN DEL ELEMENTO
1, 2	Sondas de nivel mínima, máxima
3, 4	Sondas temperatura salida, entrada
5, 6	Transmisores temperatura 4...20 mA
7, 8	Unidad control nivel mínimo, máximo
9	Regulador todo/nada
10	Diferenciador de señales
11, 12	Válvulas solenoide consumo, expansión
13, 14	Fuentes de tensión continua, 24 V
15, 16	Diodos, control máxima, todo/nada
17	Relé

**Tabla B.1** *Identificación de los elementos que figuran en el esquema eléctrico del sistema de regulación*

Señalar que no siendo el objeto fundamental de esta tesis, considero que sería extenderse en exceso el incluir toda la lógica de control establecida el efecto, si bien es una labor realizada que daría cierre a este apéndice.



## APÉNDICE C. NOMENCLATURA Y UNIDADES

### CARACTERES LATINOS

<i>a</i>	estimador para regresión
<i>b</i>	estimador para regresión
<i>B</i>	constante característica de la superficie
<i>c</i>	estimador para regresión
<i>C</i>	calor específico [J/(kg K)]
$\dot{C}$	capacidad calorífica [W/K]
<i>C</i>	parámetro relativo al calor específico
<i>C<sub>f</sub></i>	coeficiente de fricción
<i>C<sub>i</sub></i>	coeficiente para el estudio de la convección natural laminar
<i>C<sub>t</sub></i>	coeficiente para el estudio de la convección natural turbulenta
<i>d</i>	estimador para regresión
<i>D</i>	diámetro (m)
<i>f()</i>	función
<i>F</i>	coeficiente corrector de la MLDT
<i>F</i>	parámetro de la capa límite en convección natural
<i>g</i>	aceleración gravitacional (9,81 m/s <sup>2</sup> )
<i>G()</i>	función de la geometría en método CLAM para cilindros inclinados
<i>Gr<sub>D</sub></i>	Nº de Grassof medio para cilindros,...
<i>Gr<sub>L</sub></i>	Nº de Grassof medio para placa (L como dimensión característica)
<i>Gr<sub>x</sub></i>	Nº de Grassof local
<i>h</i>	entalpía [kJ/kg]
<i>h</i>	coeficiente de transmisión superficial [W/(m <sup>2</sup> K)]
<i>H()</i>	función de la geometría en método CLAM para cilindros inclinados
<i>h<sub>c</sub></i>	coeficiente de convección [W/(m <sup>2</sup> K)]
<i>h<sub>rad</sub></i>	coeficiente de transmisión superficial por radiación [W/(m <sup>2</sup> K)]
<i>k</i>	constante de Boltzman 1,38E-23 [J/molécula K]
<i>K</i>	parámetro relativo a la pendiente de la curva de saturación P-T
<i>K<sub>v</sub></i>	coeficiente característico de la válvula



$K_{vs}$	Id. para la válvula completamente abierta
$L$	longitud característica en convección
$\mathcal{L}$	distancia en la unión helicoide-retorno
$m$	exponente para los números de Nusselt medios
$\dot{m}$	caudal másico [kg/s]
$M$	masa [kg]
$n$	número de pasos
$n$	exponente característico de la superficie de ebullición
$N$	número de unidades de transferencia (NTU)
$N$	densidad de puntos de nucleación
$N$	número entero de pasos por exceso
$Nu_D$	Nº de Nusselt medio para tubos
$Nu_L$	Nº de Nusselt medio para placa (L como dimensión característica)
$p$	parámetro geométrico
$P$	parámetro que caracteriza la eficacia en cambiadores
$P$	presión [MPa]
$\mathcal{P}$	paso del helicoide
$Pr$	Nº de Prandtl
$\dot{Q}$	caudal volumétrico [m <sup>3</sup> /s]
$\dot{q}$	potencia térmica [W]
$r$	coeficiente de correlación
$r$	radio, distancia al eje de la pieza
$R$	Resistencia eléctrica [ $\Omega$ ]
$R$	radio de curvatura
$R$	cociente de capacidades caloríficas
$\mathfrak{R}$	constante universal 8,313 [J/mol K]
$\mathbb{R}$	resistencia térmica [K/W]
$\mathbb{R}'$	resistencia térmica unitaria [K m <sup>2</sup> /W]
$r^2$	coeficiente de determinación
$Ra$	Nº de Rayleigh
$R_a$	rugosidad según ISO 4287/1:1984
$Re_D$	Nº de Reynolds medio para cilindros,...
$Re_L$	Nº de Reynolds medio para placa (L como dimensión característica)
$Re_x$	Nº de Reynolds local
$s$	separación mínima fondo-serpentín
$t$	tiempo [s]

$T$	temperatura [K]
$U$	coeficiente global de transmisión [W/(m <sup>2</sup> K)]
$v$	velocidad [m/s]
$V$	volumen [m <sup>3</sup> ]
$x$	posición del tramo calculado del serpentín
$X$	título del vapor
$Z$	nivel de líquido en el vaso

### CARACTERES GRIEGOS

$\alpha$	difusividad térmica
$\alpha$	ángulo del casquete esférico del fondo
$\alpha_R$	coefic. de resistencia eléctrica por temperatura [K <sup>-1</sup> ]
$\beta$	coeficiente de dilatación térmica [1/K]
$\varepsilon$	emisividad
$\delta$	grosor, espesor [mm]
$\Delta$	incremento de ...
$\Delta_{lx}$	espesor local de capa límite laminar
$\Delta_{tx}$	espesor local de capa límite turbulenta
$\epsilon$	error o desviación [%]
$\epsilon$	eficiencia
$\eta$	rendimiento
$\Theta$	ángulo de inclinación del cilindro respecto a la horizontal
$\lambda$	conductividad térmica [W/(K m)]
$\mu$	viscosidad dinámica [kg/(m s)]
$\rho$	densidad [kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	constante de Stephan-Boltzman
$\sigma$	tensión superficial [N/m]
$\Sigma$	sumatorio
$\nu$	viscosidad cinemática [m <sup>2</sup> /s]
$\Phi$	ángulo de la superficie con la vertical (método CLAM)
$\xi$	función característica en la ebullición nucleada
$\varphi$	ángulo de contacto de la burbuja
$\pi$	nº PI
$\Omega$	ángulo para distancia mínima helicoide-fondo

**SUPRAÍNDICES**

- H* para superficies horizontales  
*máx* valor máximo  
*T* capa delgada (en método CLAM)  
*V* para superficies verticales  
— valor medio

**SUBÍNDICES**

- 0 referido a la pared o a su temperatura  
*a.tor.* arco toroidal  
*AISL* relativo al aislante  
*b* referido a la burbuja  
*c* referido al fluido frío  
*c.esf.* casquete esférico  
*cil* relativo al cilindro  
*cond* conducción  
*cons* consumo  
*cr* referido a las condiciones del punto crítico  
*ctte* valor constante  
*eb* ebullición  
*ef* valor efectivo  
*f* a temperatura de película  
*F* valor final o de salida  
*g* en propiedades, referido al vapor  
*h* hidráulico  
*h* referido al fluido caliente  
*hel* referido al helicoide  
*i* referido a la superficie interior  
*I* valor inicial o de entrada  
*ii* relativo a la superficie interior del recipiente interior  
*iO* relativo a la superficie interior del recipiente exterior  
*l* en propiedades, referido al líquido

<i>l</i>	en capa límite, zona laminar
<i>lg</i>	referido al cambio de fase a presión constante
<i>lis</i>	para superficie lisa
más	valor másico
máx	valor máximo
mín	valor mínimo
NB	ebullición nucleada
o	referido a la superficie exterior
<i>oI</i>	relativo a la superficie exterior del recipiente interior
<i>oO</i>	relativo a la superficie exterior del recipiente exterior
p	a presión constante
r	propiedad reducida
<i>rad</i>	correspondiente a radiación
ref	valor de referencia
rep	reposición
<i>rug</i>	para superficie rugosa
sat	en condiciones de saturación
serp	relativo al serpentín
<i>sf</i>	relativo a la pareja superficie-fluido
sum	suministro
<i>sumerg</i>	relativo a la zona sumergida de serpentín
<i>t</i>	en capa límite, zona turbulenta
v	para válvula en cualquier posición intermedia
vent	relativo al conducto de venteo
vs	para válvula completamente abierta
x	magnitud de valor local
$\infty$	valor no perturbado
$\infty^*$	relativo al entorno radiante



**APÉNDICE D. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- ADE 63      ADENIS, P. B. ; *Fragilité et fragilisation des métaux et alliages* ; Paris : Ed. Dunod, 1963
- AFG 74      AFGAN, J.A. and SCHLÜNGER, D. F.; *Heat Exchangers: Design an Theory Source Book* ; New York: McGraw-Hill; 1974
- ARK 81      ARKHAROV, A. *Theory on design of cryogenic systems*, Moscu : MIR Publishers, 1981.
- ARP 84      ARPACI, V. S. and LARSEN, P.S.; *Convection Heat Transfer* ; Prentice Hall; Englewood Cliffs; 1984
- ARP 66      ARPACI, V. S.; *Conduction Heat Transfer* ; Addison-Wesley Reading; 1966
- ASH 89      ASHRAE, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, *Fundamentals Volume (S.I. ed.)* ; Atlanta: 1989
- ASH 86      ASHRAE, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, *Refrigeration handbook*, Atlanta: 1986
- ASM 74      American Society of Mechanical Engineers, *rules for construction of pressure vessels, section viii, division 1, 2* , New York: United Engineering Center, 1974.
- AST 69      American Society for Testing and Materials, *ASTM standards :1969 : with related material vol. 14: Thermal and cryogenic insulating materials, ...*; Philadelphia : ASTM, 1969

- AVN 79 AVNER, S. H. *Introduccion a la metalurgia* , México : McGraw Hill, 1979.
- BER 92 BERGLES, A. E.; *What is the Real Mechanism of CHF in Pool Boiling* ; proceedings fo the Engineering Foundation Conference on Pool an External Flow Boiling; California, U.S.A.: United Engineering Trustees, Inc., ASME 1992
- BER 62 BERENSON, P. J.; *Experiments on pool boiling heat transfer*, Int. J. heat mass transfer, vol 5, 1962
- BIE 79 BIER, K., GORENFLO, D., SALEM, M. and TANES, Y.; *Effect of Presssure an Surface Roughness on Pool Boiling of Refrigerants* ; Int. J. Refrigeration. vol. 2; 1979
- BIE 78 BIER, K., GORENFLO, D., SALEM, M. and TANES, Y.; *Pool Boiling Heast Transfer and Size of Active Nucleation Centers for Horizontals Plates with Different Surface Roughness* ; Proc. of 6th Int. Heat Transfer Conf. vol. 1; 1978
- BON 85 BONNIN, A.J. *Elasticidad teoria*, Barcelona: ETSEIB - CPDA, 1985
- BOR 90 BORLAND, *Programacion en turbo C*, Madrid : McGraw Hill, 1990
- BOR 69 BORISHANSKI, V. M.; *Correlation of Effect of Pressure on Critical Heat Flux an Heat Transfer and Hydraulics in Two-Phase Flow* , New York: Pergamon, 1969
- BOS 85 BOSSER, J. *Vademecum de mecanica de fluidos y maquinas hidraulicas*, Barcelona: ETSEIB - CPDA , 1985.
- BRA 86 BRATON, N. G., *Cryogenic recycling and processing*, Florida: CRC Press, 1986
- BRE 80 BRENTANI, E.G. and SMITH, R.V.; *Nucleate and Flilm Boiling Design Correlations for O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> and He*, Advances in cryogenic engineering

- vol. 10, New York: Plenum Press, 1980, Proceedings of the 3<sup>o</sup> International Cryogenic Materials Conference
- BRO 67      BROWN, W. T.; *Study of Flow Surface Boiling* ; Ph. D. Thesis, M.I.T. MA., 1967
- BUR 69      BURK, E.; *Influence of Prandtl Number on Heat Transfer and Pressure Drop of artificial Roughened Channels* ; Wärme und Stoffübertragung, vol. 2; 1969
- CAS 68      CASTRO, R. y DE CADENET, J.J., *Metallurgie du soudage des aciers inoxydables*, Paris : Ed. Dunot, 1968
- CLA 63      CLARK, J. A.; *Cryogenic Thecnology* ; New York: Wiley, 1963
- CLA 80      CLARK, A. F. AND REED, R. P. ; *Advances in cryogenic engineering vol 26: Materials* / edited by A. F.; New York : Plenum Press, 1980; Proceedings of the 3<sup>o</sup> International Cryogenic Materials Conference
- CLA 59      CLARK, H. B., STRENGE, P. S. and WESTWATER, J. W.; *Active Sites for Nucleation* ; Chem. Eng. Prog. Symp., vol. 55, 1959
- COL 33      COLBURN, A. P.; *A Method of Correlating Forced Convection Heat Transfer Data and a Comparison with Liquid Frictions* ; Trans. AIChE, vol. 29; 1933
- COL 72      COLLINS, J. G., " *Convective boiling and condensation*", McGraw Hill, New York, 1972
- CON 70      CONTE, R. R.; *Elements de cryogenie*, Paris : Ed. Masson et cie.; 1970
- COO 82      COOPER, M. G.; *Correlations for Nucleate Boiling - Formulation Using Reduced Properties* ; Physicochem. Hydrodyn., vol 3, 1982



- COO 84 COOPER, M. G.; *Heat Flow Rates in Saturated Nucleate Pool Boiling - A wide-Rangin Examination Using Reduced Properties* ; Advances in Heat Transfer vol. 16, New York: Academic Press, 1984
- CHA 82 CHAPMAN, A. J.; *Heat Transfer* ; 4rd ed.; New York: Mc Millan; 1982
- CHE 61 CHEN, M. M.; *J. Heat Transfer, Trans. ASME, C83:55* 1961.
- CHE 63 CHEN, J. C.; *Correlation for Boiling Heat Transfer to Saturatet Fluid in Convective Flow* ; I.& E.C. Process Design and Development, vol. 5 1963
- CHU 84 CHURCHILL, S. W.; *Friction-Factor Equation Spans all Fluid-Flow Regimes* , Chem. Eng. Vol. 84, 1977
- CHU 72 CHURCHILL, S. W. and USAGI, R. A.; *A General Expression for the Correlation of Rates of Heat Transfer and Other Phenomena* ; AIChE Journal vol. 18, No 6; 1972
- DEM 69 DEMESTRE, M. *Proprietes des Aciers Inoxydables Austenitiques aux Basses Temperatures*, Paris : Chambre sundicale des producteurs aciers fins et speciaux, 1969
- DHI 92 DHIR, V. K, and BERGLES, A. E.; *Pool and External Flow Boiling* ; proceedings fo the Engineering Foundation Conference on Pool an External Flow Boiling; California, U.S.A.: United Engineering Trustees, Inc., ASME 1992
- DIT 30 DITTUS, F. W. and BOELTER, L. M. K.; *Heat Transfer in Automobile Radiators of the Tubular Type* ; Berkeley: Univ. California, Pub. in Eng. vol. 2; 1930
- FOR 59 FORSTER, K. and GREIF, R.; *Heat Transfer to a Boiling Liquid: Mechanism and Correlations* ; J. Heat Transfer, 81, 1959
- FRA 89 FRAAS, A. P.; *Heat exchanger design* , 2nd ed. New York : John Wiley & Sons, cop. 1989

- FRI 35      FRITZ, W.; *Berechnung des Maximalvolumens von Dampfblasen* ;  
Phisikalische Zeitschrift. vol. 36; 1935
- FUJ 92      FUJITA, Y.; *The Stata of the Art - Nucleate Boiling Mechanism* ;  
proceeding of Pool an External Flow Boiling; U.S.A.: Uniter Engineering  
Trustees, Inc., ASME 1992
- GAE 63      GAERTNER, R. F.; *Distribution of Active Sites in the Nucleate Boiling of  
Liquids* ; Chem. Eng. Symp. vol. 59, 1963
- GEB 71      GEBHART, B.; *Heat Transfer* ; 2nd ed.; New York: McGraw-Hill; 1971
- GIB 74      GIBLIN, R.; *Transmisión de la Chaleur par Convection Naturelle* ;  
Collection de l'A.N.R.T.; pARIS: eYROLLES; 1974
- GIL 58      GILMOUR, C. H.; *Nucleate Boiling - A Correlation* ; Chem. Eng.  
Prog., 54, 1958
- GNI 76      GNIELINSKY, V.; *New Equations for Heat and Mass Transfer in  
Turbulent Pipe and Channel Flow* ; Int. Chem. Eng., vol. 16, 1976
- GOR 91      GORENFLO, D.; *Pool Boiling* ; in VDI-WÄRMEATLAS, 6th ed., part  
Ha: Nucleate boiling. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1991
- GRA 72      GRAY, D. E.; *American Institue of Physics Handbook*, 3rd ed.; New  
York: McGraw-Hill; 1972
- GUP 86      GUPTA, J. P.; *Fundamentals of heat exchanger and pressure vessel  
technology* ; Washington : Hemisphere, cop. 1986
- HAN 89      HANSEN, J. A. and HENRIKSEN, K. *Nitrogen in organic wastes applied  
to soils* ; London : Academic Press, cop. 1989: International solid waste  
professional library vol. XIV

- HAR 60 HARPE, A. de la, LEHONGRE, S., MOLLARD, J. and JOHANNES, C.; *Boiling Heat Transfer and Pressure Drop of Liquid Helium under Forced Circulation in a Helically coiled Tube* , Adv. Cryog. Eng., 14, 1960
- HAU 83 HAUSEN, H.; *Transfer and Pressure Drop in Counter Flow and Cross Flow* ; New York: McGraw Hill Co., 1983
- HEN 69 HENLEY, E. J., EDWARD M. R. *Material and energy balance computations* ; New York : John Wiley and Sons, 1969, Col. Chemical engineering outlines vol. XXX
- HOL 82 HOLMAN, J. P.; *Heat Transfer* ; 5th ed.; New York: McGraw-Hill; 1982
- ISA 89 ISALSKI, W. H. *Separation of gases* ; Oxford : Clarendon Press, 1989 col.: Monographs on cryogenics; 5
- ISA 77 ISACHENKO, V. P., OSIPOVA, V. A. and SUKOMEL, A. S.; *Heat Transfer* , 3rd Ed.; Moscow: Mir Publishers, 1977
- JAC 73 JACOBSEN, R. T. STEWART, R. B. MCCARTY, R.D., AND HANTLEY, H. J. M., *Thermophysical properties of nitrogen from the fusion line to 1944 K, for pressures to 10342 bar*", Boulder, Colorado : Tech. Note 648, National Bureau of Standards, 1973
- JAC 72 JACOBSEN, R. T. STEWART, R. B. McCARTY, R.D., AND HANTLEY, H. J. M., *An equation of state for oxygen and nitrogen* Advances in Cryogenic Engineering 248, 1972
- KAG 69 KAGANER, M. G. *Thermal insulation in cryogenic engineering*, Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations, 1969
- KAT 68 KATTO, Y. and YOKOYA, S.; *Principal Mechanism of Boiling Crisis in Pool Boiling* ; Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 11; 1968
- KAU 70 KAUZMANN, W. *Propiedades térmicas de la materia* ; vol. 1: *Teoría cinética de los gases* ; Barcelona: Ed. Reverté, 1971

- KAU 71 KAUZMANN, W. *Propiedades térmicas de la materia* ; vol. 2: *Termodinámica y estadística : aplicada a los gases* ; Barcelona: Ed. Reverté, 1971
- KAY 80 KAYS, W. M. and CRAWFORD, M. E.; *Convective Heat and Mass Transfer* 2nd ed.; New York: McGraw-Hill; 1980
- KER 50 KERN, D. Q.; *Process Heat Transfer* ; New York: McGraw-Hill, 1950
- KER 78 KERNIGHAN, B.; *The C programming language* , USA: Prentice-Hall, 1978
- KIS 77 KISIELEWSKI, R., "*Cryogenic recycling international*", La Cros, Wisconsin, 1977
- KUT 52 KUTATELATZE, S. S.; *Heat Transfer in Condensation and Boiling* ; USA: AEC, 1952
- LEI 92 LEINER, W. and GORENFLO, D.; *Methods of Predicting the Boiling Curve and a New Equation Based on Thermodynamic Similarity* , proceeding of Pool an External Flow Boiling; U.S.A.: Uniter Engineering Trustees, Inc., 1992
- LEV 59 LEVY, S.; *Generalized Correlation of Boiling Heat Transfer* , J. Heat Transfer, 81, 1959
- LIV 82 LIVSHITS, B. G., KRAPOSHIN, V.S. AND LINETSKI, Y. L. *Propiedades físicas de metales y aleaciones* ; Moscú : Mir, 1982
- LOC 49 LOCKART, R. W. AND MARTINELLI, R. C., *Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes*, Chem. Eng. Prog, 45, 1949
- MAH 77 MAHAN, B. H.; *Química, curso universitario* ; Fondo Educativo Interamericano, 1977

- MAS 86 MASARNAU, J., MONTSERRAT, J. i SALLA, J. M.; *Taules i grafiques de termodinamica*, Barcelona: ETSEIB - CPDA, 1986
- MCC 64 McCLINTOCK, M.; *Cryogenics* , London : Reinhold, cop. 1964
- MCL 62 McLEAN, DONALD; *Mechanical properties of metals* ; New York : John Wiley & Sons, cop. 1962; Col. Wiley series on the science and technology of materials No. XV
- MER 79 MERTE, H. and CLARK, J. A.; *Boiling heat-transfer data for liquid nitrogen at standard and near-zero gravity* , Advances in Cryogenic Engineering 225, 1979
- MIE 91 MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGIA, *Reglamento de aparatos a presion*, MADRID, 1991
- MIK 69 MIKIC, B. B. and ROHSENOW, W. M.; *New Correlation of Pool Boiling Data Including the Effect of Heating Surface Characteristics* ; J. Heat Transfer, 91, 1969
- MOO 44 MOODY, L. F.; *Friction Factors for Flow in Circular Pipes* , Trans. A.S.M.E., 66, 1944
- MOS 63 MOSTINSKY, I. L.; *Cálculo de la transferencia de calor y los flujos internos de calor en un líquido en ebullición basado en la ley de los estados correspondientes* ; Teploenergetica, vol. 4, 1963
- OZI 73 OZISIC, M. N.; *Radiative Transfer and Interactions with Conduction and Convection* ; New York: Wiley-Interscience; 1973
- OZI 80 OZISIC, M. N.; *Heat Conduction* ; New York: Wiley-Interscience; 1980
- PAU 92 PAUL, D. D., GHIAASIAAN, S. M. and ABDEL KHALIK, S. I.; *On the Contribution of Various Mechanisms to Nucleate Pool Boiling Heat Transfer* ; proceedings fo the Engineering Foundation Conference on Pool

- an External Flow Boiling; California, U.S.A.: United Engineering Trustees, Inc., ASME, 1992
- PER 73 PERRY, R. H. and CHILTON, C. H.; *Chemical engineers' handbook* ; USA: Mc Graw-Hill Inc., 1973
- PET 70 PETTUKHOV, B. S.; *Heat Transfer an Friction in Turbulent Pipe Flow with Variable Physical Properties* ; Advances in Heat Transfer, vol. 6; New York: Academic Press, 1970
- RAI 75 RAITHBY, G.D., HOLLANDS, K.G.T., *A general method of obtaining aproximate solutions to laminar and turbulent free convection problems*, Advanced in heat transfer, Vol. 11.; New York: Academic Press., 1975
- REY 80 W. C. REYNOLDS, H. C. PERKINS; *Ingeniería termodinámica*, Mexico: McGraw Hill, 1980
- RIC 61 RICHARDS, R. J., STEWARD, W. G. and JACOBS, R. B.; *Survey of Literature on Heat Transfer to Cryogenic Fluids* ; NBS TN 122, Boulder Labs, 1961
- ROH 52 ROHSENOW, W. M.; *A Method of Correlating Heat Transfer Data for Surface Boiling of Liquids* ; ASME 74, 1952
- ROH 73 ROHSENOW, W. M. and HARTNETT; *Handbook of heat transfer* ; New York: McGraw Hill, 1973
- ROH 85 ROHSENOW, W. M., HARTNETT, J. P. and GANIC E. N.; *Handbook of multiphase systems*, USA, McGraw Hill, 1985
- ROH2 85 ROHSENOW, W. M., HARTNETT, J. P. and GANIC E. N.; *Handbook of heat transfer fundamentals, 2 ed.*, USA : McGraw Hill, 1985
- ROH3 85 ROHSENOW, W. M., HARTNETT, J. P. and GANIC E. N.; *Handbook of heat transfer applications, 2 ed.*, USA : McGraw Hill, 1985

- RUI 76 RUIZ RUBIO, C.; *Proyecto y construcción de recipientes a presión*, Bilbao: Ed. URMO S.A., 1976
- RUI 94 RUIZ, R. y BONALS, LL. A.; *Transmissió de calor. Teoria* ; col. Aula Teòrica; Barcelona: Edicions UPC; 1994
- RUS 67 RUSSELL B. S., *Cryogenic engineering*, New York :Van Nostrand Company ltd., 1967
- SAK 92 SAKASHITA, H. and KUMADA, T.; *Heat Transfer Correlation an Method for Predicting Boiling Curves of Saturated Nucleate Boiling* ;proceeding of Pool an External Flow Boiling; U.S.A.: Uniter Engineering Trustees, Inc., ASME 1992
- SCH 72 SCHLICHTING, H.; *Teoría de capa límite* ; Bilbao: Urmo S. A. de ediciones, 5ª ed., 1972
- SCH 83 SCHLÜNDER & al.; *Heat Exchanger Design Handbook Vol 1, 2, 3 & 4* ; Düsseldorf: VDI Verlag; 1983
- SHA 76 SHAMES, I. H.; *La Mecánica de los Fluidos* ; Madrid: Ed. Castillo; 1976
- SHI 91 SHI, M. H. and LIU H. Y.; *The effects of thermal properties of the wall on nucleate pool boiling heat transfer* , Multiphase flow and heat transfer: 2nd. Int. Symposium; USA: Hemisphere Publishing Corp., 1991
- SHI 79 SHI, M. H.; *An investigation on nucleate pool boiling* , J. Nanjing Institute of Technology, No 1, 1979
- SIE 36 SIEDER, E. N. and TATE, G. E.; *Heat Transfer and Pressure Drop of Liquid in Tubes* , Ind. Chem. Eng. vol 28, 1936
- SIE 92 SIEGEL, R. and HOWELL J. R.; *Thermal radiation heat transfer* ; 3rd ed.; Washington: Hemisphere Publishing Corporation, 1992

- SIG T 86 SIGALES, B.; *Tablas de calor y frio industrial* ; Barcelona: ETSEIB - CPDA, 1986.
- SIG 90 SIGALES, B.; *Convecció Sense Canvi de Fase* ; Transmissió de calor 3; Barcelona: Edicions de la UPC, 1990
- SIG 87 SIGALES, B.; *Cambiadores de calor* ; Barcelona: ETSEIB - CPDA, 1987
- SIG 86 SIGALES, B.; *Transmision de calor vol.2* ; Barcelona: ETSEIB - CPDA, 1986
- SOU 87 SOUMERAI, H.; *Practical thermodynamic tools for heat exchanger design engineers*; New York : John Wiley & Sons, 1987
- SPA 72 SPARROW, E.M. and CESS, R. D.; *Radiatio Heat Transfer*, Augmented ed.; New York: McGraw-Hill; 1972
- SPA 76 SPALDING, D. B., *Developments in heat and mass transfer*; Oxford : Pergamon Press, cop. 1976
- SPA 89 SPALDING, D. B., GADDIS, E. S. and TABOREK, J.; *Heat exchanger design handbook*, vol: 1 : *Heat exchanger theory*; New York: Hemisphere, 1983-1989
- SPI 80 SPIEGEL, M. R.; *Manual de Fórmulas y Tablas Matemáticas* ; Colombia: Ed. McGraw-Hill Latinoamericana, S.A., 1981
- STE 79 STEPHAN, K. and PREUSSER, P.; *Wärmeübergang und Maximale Wärmestromdichte beim Behältersieden binärer Flüssigkeitsgemische* , Chem. Ing. Tech. 51, 1979
- SYC 87 V.V. SYCHEV, A.A. VASSERMAN, A.D. KOZLOV, *Thermodynamic properties of nitrogen* ; USA: Hemisphere Publishing Corporation, 1987
- TAY 67 TAYLOR, M. F.; *A Method od Correlating Local and Average Friction Coefficients for Both Laminar an Turbulen Flow of gases through a*



- smooth tube with surface to fluid bulk temperature ratios from 0.35 to 7.35*,  
Int. J. Heat Mass Transfer, 10, 1967
- TIE 73 TIEN, C. L. and CUMMINGTON, G. R.; *Cryogenic insulation heat transfer* ; Advanced in heat transfer, Vol. 9.; New York: Academic Press., 1973
- VAR 83 VARGAFTIK, N. B.; *Handbook of physical properties of liquids and gases : pure substances and mixtures* ; 2nd ed, Washington : Hemisphere Publishing Corporation, 1983
- VAR 75 VARGAFTIK, N. B.; *Tables on the Thermophysical properties of liquids and gases* ; Washington : Hemisphere Publishing Corporation, 1983
- VAS 68 VASSERMAN, A. A. and RABINOVICH; *Thermophysical properties of liquid air and its components* ; Standard Press, 1968
- VAS 65 VASSERMAN, A. A.; *Thermophysical properties of air and its components* ; Nauka Press, 1965
- WEL 76 WELTY, J. R. WICKS, C. E. and WILSON, R. E.; *Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer* ; 2nd ed.; New York: Wiley; 1976
- WEL 78 WELTY, J. R.; *Transferencia de calor aplicada a la ingeniería*; México: Limusa; 1978
- WHI 91 WHITE, F. M.; *Heat and Mass Transfer* ; Ed. Addison-Wesley, 1991
- WIE 86 WIEBELT, J. A.; *Engineering Radiation Heat Transfer* ; New York: Holt, Rinehart & Winston; 1986
- WIL 83 WILLIAMSON, K.D., EDESKUTY, F. J., *Liquid cryogenics vol. I* ; Florida: CRC Press Inc., 1983
- WIL2 83 WILLIAMSON, K.D., EDESKUTY, F. J., *Liquid cryogenics vol. II*, Florida: CRC Press inc, 1983

- WOL 83      WOLF, H.; *Heat transfer* ; Cambridge (U.S.A.): Harper and Row; 1983
- WON 81      WONNACOTT, T. H. and WONNACOTT, R. J.; *Introducción a la estadística* ; México: Ed. Limusa S. A., 1981
- YAN 91      YAN, F. and GIOT, M.; *A nucleation model for superheated liquids in adiabatic vessels and pipes* , Multiphase flow and heat transfer: 2nd. Int. Symposium; USA: Hemisphere Publishing Corp., 1991
- YAN 88      YANG, S. R. and KIM, R. H.; *A Mathematical Model of the Pool Boiling Nucleation Site Density in Terms of the Surface Characteristics* ; Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 33, 1988
- ZAB 89      ZABARA CZORNA, O.; *Soldadura y técnicas afines. Tomo I* ; Madrid, Librería editorial Bellisco, 1989
- ZUB 61      ZUBER, N. and FRIED, E.; *Two Phase Flow and Boiling Heat Transfer to Cryogenic Liquids* ; Combust. Liquid Rocket Conf., 1961









