

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA,  
ELECTRÓNICA Y SISTEMAS**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA  
ELÉCTRICA**



**TESIS**

**“DISEÑO DE INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBO Y CORAZA PARA  
AMPLIACIÓN DE CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN DE CAL HIDRATADA –  
CAL & CEMENTO SUR SA”**

**PRESENTADO POR:  
FREDY HUANCA BUTRÓN**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

**PUNO – PERÚ**

**2016**

*Universidad Nacional del Altiplano*

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y SISTEMAS  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA

“DISEÑO DE INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBO Y  
CORAZA PARA AMPLIACIÓN DE CAPACIDAD DE  
PRODUCCIÓN DE CAL HIDRATADA – CAL & CEMENTO  
SUR SA”

TESIS PRESENTADA POR:  
FREDY HUANCA BUTRÓN

**PARA OPTAR EL TÍTULO DE: INGENIERO  
MECÁNICO ELECTRICISTA**

APROBADA POR EL JURADO REVISOR CONFORMADO POR:

PRESIDENTE :   
ING. LEONEL MARINO CASTILLO ENRÍQUEZ

PRIMER MIEMBRO :   
ING. JOSE MANUEL RAMOS CUTIPA

SEGUNDO MIEMBRO :   
ING. HENRY SHUTA LLOCLLA

DIRECTOR DE TESIS :   
ING. WALTER OSWALDO PAREDES PAREJA

ASESOR DE TESIS :   
ING. ARMANDO TITO CRUZ CABRERA

Puno – Perú  
2016

AREA : MECÁNICA  
TEMA : TRANSFERERENCIA DE CALOR

## AGRADECIMIENTO

*El presente trabajo de tesis primeramente me gustaría agradecerle a ti Dios por bendecirme para llegar hasta donde he llegado, porque hiciste realidad este sueño anhelado. A la UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO por darme la oportunidad de estudiar y ser un profesional. Al director de tesis, Ing. Walter Paredes Pareja por su esfuerzo y dedicación, quien con sus conocimientos, su experiencia, su paciencia y su motivación ha logrado en mí que pueda terminar mis estudios con éxito. También me gustaría agradecer a mis profesores durante toda mi carrera profesional porque todos han aportado con un granito de arena a mi formación, por sus consejos, su enseñanza y más que todo por su amistad.*

*De igual manera agradecer a mi profesor de Investigación y de Tesis de Grado, Ing. Armando Tito Cruz Cabrera, por su visión crítica de muchos aspectos cotidianos de la vida, por su rectitud en su profesión como docente, por sus consejos, que ayudan a formarte como persona e investigador. Y por último a mi jefe de trabajo al Ing. Jorge Gamarra la Barrera (Jefe de mantenimiento mecánico CALCESUR) quien me brindó su apoyo y confianza incondicional para la ejecución de dicho proyecto, al Ing. José Ramírez Medina (Jefe de control de calidad CALCESUR) quienes son como unos padres para mí, los cuales me han motivado durante mi formación profesional.*

*Son muchas las personas que han formado parte de mi vida profesional a las que me encantaría agradecerles su amistad, consejos, apoyo, ánimo y compañía en los momentos más difíciles de mi vida. Algunas están aquí conmigo y otras en mis recuerdos y en mi corazón, sin importar en donde estén quiero darles las gracias por formar parte de mí, por todo lo que me han brindado y por todas sus bendiciones.*

*Para ellos: Muchas gracias y que Dios los bendiga*

## DEDICATORIA

*A mi madre (Feliciano):*

*Porque hay madres que luchan por sus hijos un día y ellas valen, hay madres que luchan por sus hijos un año y ellas lo son todo, y también hay madres que luchan por sus hijos toda la vida y ellas son imprescindibles.*

*Y tú Madre vales mucho, eres todo para mí, y serás imprescindible para toda nuestra vida.*

*A mi Padre (Concepción):*

*Que es ejemplo para que uno con sacrificio, empeño y perseverancia consiga su objetivo, y gracias a su paciencia y humildad me ha llevado hacia el camino de mi Profesión*

*A mis Hermanos:*

*Yhony, Nery luz*

*Quienes son mis verdaderos amigos a quienes les agradecemos por su apoyo moral y material para cumplir con nuestros objetivos profesionales*

*A mi Esposa (Erika):*

*Mi querida esposa que siempre está ahí, en las buenas y en las malas, sin importar el momento y sin condiciones, me brinda todo su amor, el mismo que te correspondo con creces gigantes, porque es tanto el amor que siento por ti, que no me alcanzarías las palabras para decírtelo, solo siéntelo y vívelo esposa amada.*

*A mis Hijas (Luhanna - Xihmenna):*

*Agradecer a mis hijas, porque ellas tuvieron que soportar largas horas sin la compañía de su papá, sin poder entender, a su corta edad, por qué prefería estar frente a la pantalla de la computadora y no acostado y/o jugando con ellas. A pesar de ello, cada vez que podíamos, al reunirnos, aprovechábamos hermosos momentos, en los que su sola sonrisa me llenaba de ánimo y fuerzas.*

***Fredy Huanca Butrón***

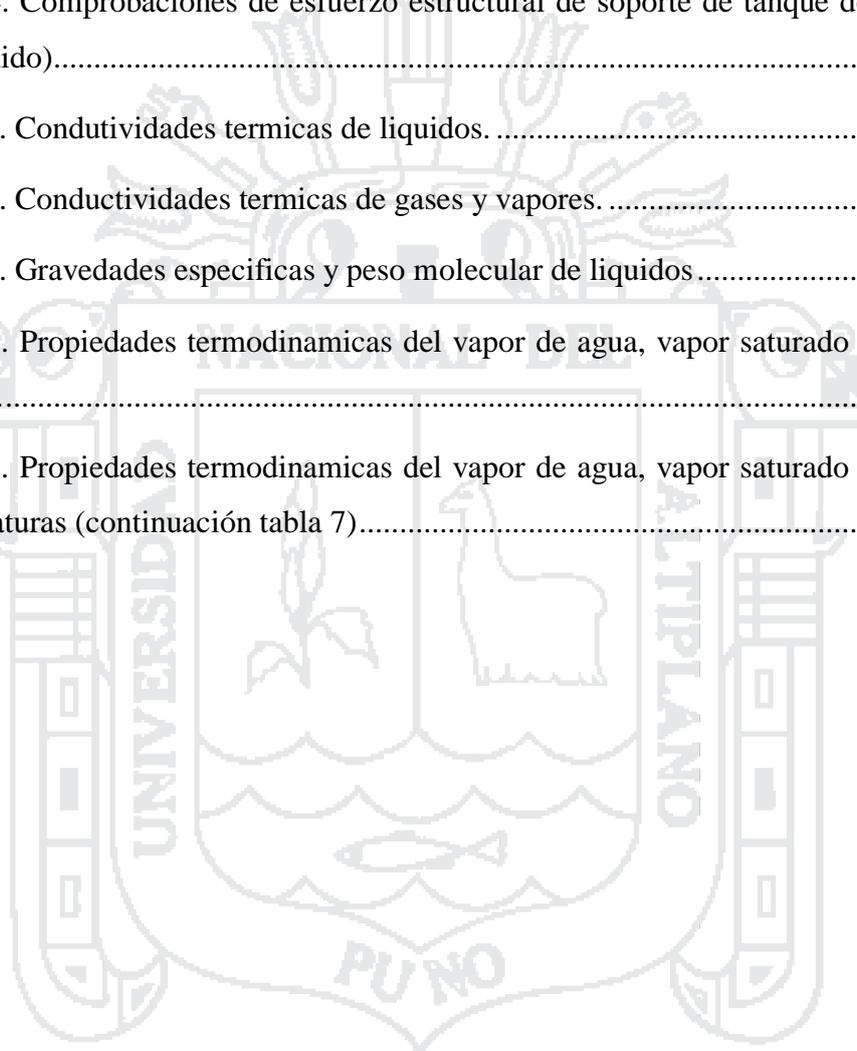
## ÍNDICE

AGRADECIMIENTO.....	3
DEDICATORIA .....	4
ÍNDICE .....	5
ÍNDICE DE TABLAS .....	7
ÍNDICE DE FIGURAS .....	8
LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS.....	11
RESUMEN .....	14
ABSTRACT .....	15
INTRODUCCIÓN .....	16
CAPITULO I.....	18
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	18
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	19
1.2 JUSTIFICACION DEL PROBLEMA.....	19
1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	22
1.3.1 OBJETIVO GENERAL .....	22
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	22
CAPÍTULO II.....	24
MARCO TEÓRICO.....	24
2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	25
2.2 SUSTENTO TEÓRICO. ....	26
2.2.1. MODELOS MATEMÁTICOS .....	26
2.2.2 METODOLOGIA DE CÁLCULO DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR DE TUBO Y CORAZA.....	26
2.3 GLOSARIO DE TÉRMINOS BÁSICOS. ....	45
2.4 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN .....	61
2.4.1 HIPÓTESIS GENERAL.....	61
2.4.2 HIPÓTESIS ESPECÍFICAS .....	61
CAPÍTULO III.....	62
DISEÑO METODOLÓGICO DE INVESTIGACIÓN .....	62
3.1 TIPO DE DISEÑO DE INVESTIGACIÓN .....	63
3.2 POBLACIÓN Y MUESTRA DE INVESTIGACIÓN.....	63
3.3 UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA POBLACIÓN .....	64
3.4 MATERIALES EXPERIMENTALES .....	72
3.5 RESTRICCIONES .....	72
3.6 MÉTODO Y TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS .....	72
3.6.1 MÉTODO .....	72
3.6.2 TECNICAS.....	72
3.6.3 OBSERVACIONES DIRECTAS .....	73
3.4 CÁLCULOS JUSTIFICATIVOS PARA EL DISEÑO .....	73
3.5 SELECCIÓN DE EQUIPOS Y ACCESORIOS.....	74
3.6 MONTAJE E INSTALACIÓN DE EQUIPOS Y ACCESORIOS.....	74

3.3.1 PUESTA EN MARCHA Y DESARROLLO DE PRUEBAS .....	75
CAPÍTULO IV .....	76
ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	76
4.1 DESCRIPCIÓN .....	77
4.2 CÁLCULOS JUSTIFICATIVOS .....	81
4.3 CÁLCULO ESTRUCTURAL PARA SOPORTE DE TANQUE DE AGUA 6 M3.....	97
4.3.1. ESTRUCTURA .....	97
CONCLUSION.....	149
RECOMENDACIONES .....	150
BIBLIOGRAFIA .....	151
ANEXOS.....	153
MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBO Y CORAZA.....	156
OPERACIÓN .....	158
MANTENIMIENTO.....	160
COSTOS Y PRESUPUESTO DE OBRA.....	164
A.....	164
OBRAS CIVILES.....	164
B.....	165
OBRAS METALMECÁNICAS.....	165
C.....	167
OBRAS ELÉCTRICAS .....	167
D.....	168
SUMINISTRO DE MATERIALES .....	168
PLANO DE INSTALACIÓN, FLOWSHEET, DATOS Y GRÁFICOS PARA CÁLCULOS .....	170
TABLAS Y FIGURAS OBTENIDAS DEL TEXTO DONALD KERN .....	173
NOMENCLATURA DEL CAPÍTULO IV.....	206
PLANOS DE FABRICACIÓN Y FLOWSHEET.....	209

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1. Despacho mensual de cal hidratada .....	21
Tabla 2. Plan anual de despachos para el año 2015 .....	22
Tabla 3. Resultado pruebas de laboratorio.....	77
Tabla 4. Comprobaciones de esfuerzo estructural de soporte de tanque de agua E.L.U. (Resumido).....	143
Tabla 5. Conductividades termicas de liquidos.....	173
Tabla 6. Conductividades termicas de gases y vapores.....	174
Tabla 7. Gravedades especificas y peso molecular de liquidos.....	180
Tabla 8. Propiedades termodinamicas del vapor de agua, vapor saturado seco: tabla de presion.....	187
Tabla 9. Propiedades termodinamicas del vapor de agua, vapor saturado seco: tabla de temperaturas (continuación tabla 7).....	188



## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Flujo a través de un haz de tubos.....	27
Fig. 2. Diámetros equivalentes. ....	31
Fig. 3. Relaciones de temperatura en un intercambiador 1-2. ....	32
Fig. 4. Relaciones de temperatura en un intercambiador 1-2 con arreglo convencional de boquillas.....	39
Fig. 5. Influencia de la temperatura de aproximación en FT con fluidos que tienen igual rango, en un intercambiador 1-2. ....	40
Fig. 6. Influencia de la temperatura de aproximación en FT con fluidos que tienen rangos desiguales, en un intercambiador 1-2.....	40
Fig. 7. PUGMILL (hidratador). ....	45
Fig. 8. Flujo de calor a través de una pared. ....	49
Fig. 9. Casquillos. ....	54
Fig. 10. Arreglos comunes para los tubos de intercambiadores. ....	55
Fig. 11. Detalle de deflector segmentado. ....	57
Fig. 12. Intercambiador 1-2 con tubos en U (Patterson foundry & machine Co.) para mayor detalle ver plano 01CS-CH-GRAL-REV.00 (ver Pág. 60 y/o anexo) .....	59
Fig. 13. Imagen panorámica CAL & CEMENTO SUR SA. ....	64
Fig. 14. Planta molienda e hidratación de CAL & CEMENTO SUR SA. ....	65
Fig. 15. Tolvas de alimentación con motor vibratorio.....	65
Fig. 16. Faja balanza .....	66
Fig. 17. Ventilador extractor de vapor de agua.....	66
Fig. 18. Termografía a voluta de ventilador. ....	67
Fig. 19. Chimenea extractora de vapor de agua.....	67
Fig. 20. Termografía a chimenea extractora de vapor. ....	68
Fig. 21. Tanque de agua 5 m <sup>3</sup> .....	68
Fig. 22. Bombas de agua 100 lpm. ....	68

Fig. 23. Flujo de proceso hidratación de cal. ....	69
Fig. 24. Sala Eléctrica. ....	70
Fig. 25. Ubicación tanque de agua e intercambiador de calor. ....	71
Fig. 26. Curva de Tiempo de reacción vs Temperatura de agua. ....	77
Fig. 27. Montaje de silo alterno de cal hidratada. ....	154
Fig. 28. Reemplazo de cangilones elevador 850. ....	154
Fig. 29. Nuevo flow sheet sistema de transporte hidratación de cal. ....	155
Fig. 30. Conduktividades térmicas de hidrocarburos líquidos. ....	175
Fig. 31. Calores específicos de líquidos. ....	176
Fig. 32. Calores específicos de gases a 1 atm. ....	177
Fig. 33. Calores específicos de líquidos hidrocarburos líquidos. ....	178
Fig. 34. Calores específicos de vapores de hidrocarburos a 1 atm. ....	179
Fig. 35. Gravedades específicas de hidrocarburos. ....	181
Fig. 36. Constantes de equilibrio para hidrocarburos. ....	182
Fig. 37. Entalpías de hidrocarburos puros. ....	183
Fig. 38. Entalpías de hidrocarburos ligeros. ....	184
Fig. 39. Entalpías de fracciones de petróleo. ....	185
Fig. 40. Calores latentes de vaporización. ....	186
Fig. 41. Viscosidades de líquidos. ....	189
Fig. 42. Viscosidades de gases. ....	191
Fig. 43. Valores de $[(k(c/\mu))]^{(1/3)}$ para hidrocarburos. ....	192
Fig. 44. Factor F de temperatura calórica. ....	193
Fig. 45. Factores de corrección MLDT. ....	194
Fig. 46. Factores de corrección MLDT para intercambiadores 2-4. ....	195
Fig. 47. Factores de corrección MLDT para intercambiadores 3-6. ....	196
Fig. 48. Factores de corrección MLDT para intercambiadores 4-8. ....	197

Fig. 49. Factores de corrección MLDT para intercambiadores 5-10..... 198

Fig. 50. Factores de corrección MLDT para intercambiadores 6-12..... 199

Fig. 51. Curva de transferencia de calor lado de tubos..... 200

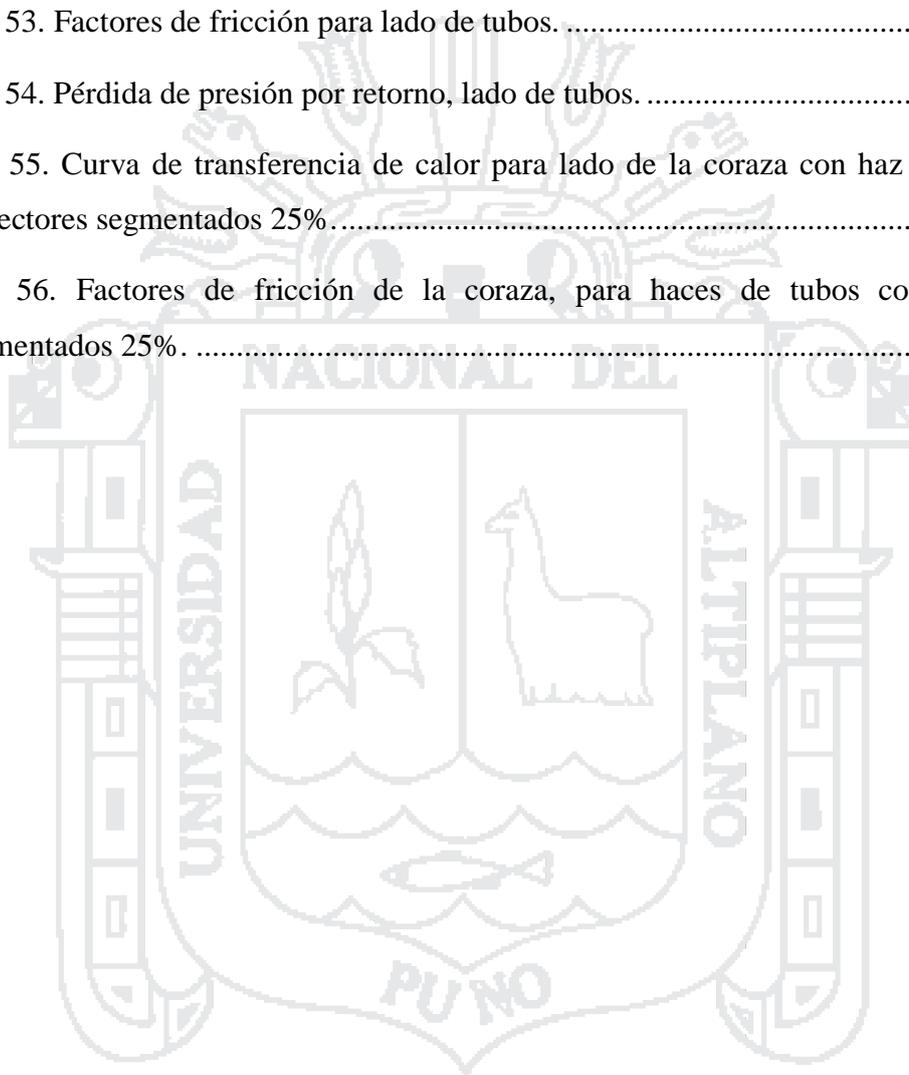
Fig. 52. Curva de transferencia de calor, agua en los tubos..... 201

Fig. 53. Factores de fricción para lado de tubos. .... 202

Fig. 54. Pérdida de presión por retorno, lado de tubos. .... 203

Fig. 55. Curva de transferencia de calor para lado de la coraza con haz de tubos con deflectores segmentados 25%..... 204

Fig. 56. Factores de fricción de la coraza, para haces de tubos con deflectores segmentados 25%. .... 205



**LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS**

<i>A</i>	Superficie de transferencia de calor,	<i>pie</i> <sup>2</sup>
<i>a</i>	Área de flujo,	<i>pie</i> <sup>2</sup>
<i>a''</i>	Superficie externa por pie lineal,	<i>pie</i> <sup>2</sup>
<i>B</i>	espacio de los deflectores	<i>pulg</i>
<i>C</i>	Calor específico del fluido caliente, en derivaciones	$\frac{BTU}{lb^{\circ}F}$
<i>C</i>	Sección libre entre tubos,	<i>pulg</i>
<i>c</i>	Calor específico del fluido,	$\frac{BTU}{lb^{\circ}F}$
<i>D</i>	Diámetro interior de los tubos,	<i>pie</i>
<i>d<sub>o</sub></i>	Diámetro exterior de los tubos,	<i>pulg</i>
<i>D<sub>e</sub>, D'<sub>e</sub></i>	Diámetro equivalente para transferencia de calor y caída de presión,	<i>pie</i>
<i>d<sub>e</sub>, d'<sub>e</sub></i>	Diámetro equivalente para transferencia de calor y caída de presión,	<i>pie</i>
<i>D<sub>s</sub></i>	Diámetro interior de la coraza,	<i>pie</i>
<i>F<sub>T</sub></i>	Factor de diferencia de temperatura adimensional	
<i>f</i>	Factor de fricción adimensional para AP en	$\frac{lb}{pulg^2}$ , $\frac{pie^2}{pulg^2}$
<i>G</i>	Masa velocidad,	$\frac{lb}{h * pie^2}$
<i>g</i>	Aceleración de gravedad,	$\frac{pie}{h^2}$
<i>g'</i>	Aceleración de gravedad,	$\frac{pie}{seg^2}$
<i>h, h<sub>i</sub>, h<sub>o</sub></i>	Coefficiente de transferencia de calor, en forma general fluido interior y fluido exterior, respectivamente,	$\frac{BTU}{h * pie^2 * ^{\circ}F}$

$h_{i0}$	Valor de $h_i$ cuando se refiere al diámetro exterior del tubo,	$\frac{BTU}{h \cdot \text{pie}^2 \cdot ^\circ F}$
$DI$	Diámetro interior,	<i>pulg</i>
$Q$	Flujo de calor,	$\frac{BTU}{h}$
$j_H$	Factor de transferencia de calor, adimensional	
$k_c$	Constante calórica, adimensional	
$k$	Conductividad térmica,	$\frac{BTU}{h \cdot \text{pie}^2 \cdot ^\circ F / \text{pie}}$
$L$	Longitud,	<i>pie</i>
$MLDT$	Media logarítmica de la diferencia de temperaturas,	$^\circ F$
$N$	Número de deflectores en la coraza	
$N_t$	Número de tubos	
$n$	Número de pasos de tubos	
$DI$	Diámetro interior,	<i>pulg</i>
$P_T$	Espacio de los tubos,	<i>pulg</i>
$\Delta P_T, \Delta P_t, \Delta P_r$	Caídas totales de presión, lado de los tubos y retorno respectivamente,	$\frac{\text{lb}}{\text{pulg}^2}$
$R_d, R_i, R_o$	Factores de obstrucción, combinados, interior y exterior respectivamente	$\frac{h \cdot \text{pie}^2 \cdot ^\circ F}{BTU}$
$R_e, R_e'$	Número de Reynolds para transferencia de calor y caída de presión adimensional	
$S$	Grupo de temperaturas, $\frac{(t_2 - t_1)}{(T_1 - t_1)}$ , adimensional	
$T, T_1, T_2$	Temperatura en general, entrada y salida del fluido caliente,	$^\circ F$
$T_c$	Temperatura calórica del fluido caliente,	$^\circ F$
$t_c$	Temperatura calórica del fluido frio,	$^\circ F$

$t, t_1, t_2$	Temperatura en general, entrada y salida del fluido frio,	$^{\circ}F$
$T_w$	Temperatura de la pared del tubo,	$^{\circ}F$
$\Delta t$	Diferencia verdadera de temperatura, $Q = U_D A \Delta t$	$^{\circ}F$
$\Delta T_c, \Delta T_h$	Diferencia de temperatura en las terminales frías y calientes,	$^{\circ}F$
$U, U_c, U_D$	Coeficiente total de transferencia de calor, coeficiente limpio, coeficiente de diseño,	$\frac{BTU}{h * \pi e^2 * ^{\circ}F}$
$V$	Velocidad pps,	$\frac{\pi e}{seg}$
$v$	Volumen específico,	$\frac{\pi e^3}{lb}$
$W$	Peso del flujo en general, peso del flujo del fluido caliente,	$\frac{lb}{h}$
$w$	Peso del flujo del fluido frio,	$\frac{lb}{h}$
$\phi$	Razón de viscosidad, $(\frac{\mu}{\mu_w})^{0.14}$	
$\mu$	Viscosidad, centipoises x 2.42 = $\frac{lb}{\pi e * h}$	
$\mu_w$	Viscosidad a la temperatura de la pared del tubo, centipoises x 2.42 = $\frac{lb}{\pi e * h}$	
$\rho$	Densidad,	$\frac{lb}{\pi e^3}$
$w$	Peso del flujo del fluido frio,	$\frac{lb}{h}$
Suscritos < excepto los anotados arriba >		
$s$	<i>Coraza</i>	
$t$	<i>Tubo</i>	

## RESUMEN

Las inversiones mineras en las principales empresas de nuestro país en estos últimos años han sido de gran importancia y magnitud, colocando al Perú en las primeras posiciones debido a la gran demanda de mineral (cobre) que se exporta al mercado mundial. Como resultado de las ampliaciones mineras han generado la demanda de cal hidratada para sus procesos mineros, siendo CAL & CEMENTOS SUR SA, principal productor y proveedor de cal hidratada, donde se presentó el inconveniente de abastecimiento debido a la capacidad instalada de cal hidratada en sus operaciones limitada, para lo que se propone la ampliación del mismo en base a la transferencia de calor aplicada en el PUGMILL para una reacción exotérmica, se presenta el intercambiador de calor de tubo y coraza para bajo costo de operación y bajos costos de mantenimiento.

**Palabras clave:** cal hidratada, transferencia de calor, PUGMILL, reacción exotérmica, intercambiador de calor de tubo y coraza

**ABSTRACT**

Mining investments in major companies in our country in recent years have been of great importance and magnitude, placing Peru in the first positions due to the high demand for mineral (copper) that is exported to the world market. As a result of mining expansions have generated demand for hydrated lime for its mining processes, being CAL & CEMENTO SUR SA, the leading producer and supplier of hydrated lime , where the drawback of supply was presented due to the installed capacity of hydrated lime in their limited operations , for which the extension thereof is proposed based on the heat transfer in the PUGMILL applied to an exothermic reaction, the heat exchanger tube and caraza for low operating cost and low maintenance costs is presented .

**Keywords:** hydrated lime, heat transfer PUGMILL, exothermic reaction, heat exchanger, shell and tube

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de tesis tiene por objetivo la aplicación de procesos de transferencia de calor en la producción de cal hidratada, con el fin de incrementar en la capacidad de producción de cal hidratada en un 25%, debido a la gran demanda existente en el mercado minero, eso debido a las ampliaciones mineras existentes al sur del país.

El presente trabajo de tesis, inició con la inquietud de querer mejorar el proceso de producción de cal hidratada y ello conllevó al planteamiento de calentar agua con el vapor de agua del proceso exotérmico saliente al exterior por la chimenea del pugmill (amasadora).

Las primeras pruebas de laboratorio se llevaron a cabo de la manera más simple, pero fueron bastante significativas, calentando agua y probando el proceso exotérmico a un gradiente de temperaturas de 5°C superiores en cada prueba hasta llegar a los 30°C e iniciando a los 13°C, dando como resultado positivo las pruebas en cuestión. Para los cálculos matemáticos para el proceso de transferencia de calor de tubo y coraza se llevaron a cabo según el texto de DONALD KERN procesos de transferencia de calor, y el cálculo estructural para el soporte del tanque de 5mts<sup>3</sup> se llevó a cabo usando el software CYPECAD, así mismo la simulación de paso de vapor por el intercambiador, se llevó a cabo usando el software SOLIDWORKS cuyos resultados se presentarán en las láminas correspondientes.

Las instalaciones de planta Cal y Cemento Sur SA, fueron ideales para la presentación del presente trabajo de tesis, puesto que a la infraestructura existente se realizaron mejoras en los procesos y antes de la implementación del intercambiador de calor de tubo y coraza se vio por conveniente la ampliación de capacidades de transporte de cal hidratada, por lo que se realizó la mejora de los transportadores helicoidales TH845 y TH848, así como el cambio de cangilones en el elevador de cangilones EC850,

reemplazo de zaranda vibratoria 866, instalación de transportador helicoidal bidireccional 872 y la instalación de un nuevo silo de almacenamiento de cal hidratada de 60TN incluyendo un sistema de descarga neumático y embolsado de big bags (sacos para envasados). Todos estos trabajos de mejoras e instalaciones nuevas, se realizaron con ingeniería del área de mantenimiento mecánico al cual pertenecí, así como personal mecánico de planta y el apoyo de personal contratista.

Los resultados de los cambios en los sistemas de transporte antes de la aprobación e instalación del intercambiador de calor propuesto, fueron evidenciados en la mejora de la capacidad de transporte de cal hidratada, dándome mayores ánimos para la conclusión del proyecto presentado.

El CAPÍTULO I: Trata acerca de la del problema presentado en planta Cal & Cemento Sur SA luego de presentarse las ampliaciones de plantas de las unidades mineras al cual se abastece, también habla acerca de la justificación del planteamiento del problema.

El CAPÍTULO II: trata acerca de las teorías usadas como fundamentos para la ejecución del presente trabajo de tesis.

El CAPÍTULO III: trata acerca de la metodología usada, población de muestra, restricciones, y modelos matemáticos empleados.

El CAPÍTULO IV: trata acerca de los cálculos justificativos usados tanto para el diseño de intercambiador de calor y la parte estructural planteado.

Además en los anexos se puede encontrar el manual de mantenimiento y operación, así como los planos de fabricación.



**CAPITULO I**  
**PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE**  
**INVESTIGACIÓN**

## 1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La ejecución de los diversos proyectos mineros en el Perú permitió que las inversiones en el sector sumen US\$ 4,250'092,978 al cierre del primer semestre del 2014, según cifras oficiales del Ministerio de Energía y Minas (MEM). Según rubro, las inversiones en equipamiento de plantas ascendieron a US\$ 469,75 millones, mientras que en equipos mineros se invirtió la suma de US\$ 251,11 millones. Las inversiones en exploración minera llegaron a US\$ 322,37 millones y en actividades de explotación se tuvieron otros US\$ 464,10 millones; en tanto que en materia de infraestructura minera se registraron US\$ 635,08 millones en los primeros seis meses del presente año. El rubro “otros” tuvo inversiones por US\$ 1 954,85 millones en el primer semestre, al mismo tiempo que las inversiones en “preparación” sumaron US\$ 152,82 millones. Todas estas inversiones mineras generan ampliación en sus operaciones y como consecuencia de ello el requerimiento de materiales (cal hidratada), propios de sus operaciones.

Cal & Cemento Sur S.A., empresa subsidiaria de Yura S.A., tiene como actividad principal la producción y comercialización de cemento así como de cal. Cuya planta está ubicada en el distrito de Caracoto, provincia de San Román, departamento de Puno. Abastece a la zona alto andina del sudeste y sur del país así como a la zona de selva de la región sur oriental.

## 1.2 JUSTIFICACION DEL PROBLEMA

Dentro de la producción de la línea de cal, CEMENTO SUR SA produce una variedad de productos tanto como para la industria manufacturera, minería e industrias en general.

Siendo un producto la cal hidratada suministrado principalmente a las unidades mineras más importantes del sur de nuestro país.

Actualmente, la demanda de cal hidratada se incrementó de manera considerable por parte de nuestros clientes las unidades mineras Cerro Verde, San Rafael, otros y teniendo negociaciones favorable con otras unidades mineras para suministro de **cal hidratada de hasta 900 TM**, siendo nuestra producción actual de cal hidratada:

Producción real cal hidratada = 3 TMH

Producción real cal hidratada = 60 TMDía

Producción real cal hidratada = 1440 TMMes

Producción real cal hidratada = 17280 TMAño

Teniendo en planta una capacidad instalada de cal hidratada de:

Capacidad instalada cal hidratada = 5 TMDía

Capacidad instalada cal hidratada = 115 TMDía

Capacidad instalada cal hidratada = 2870 TMMes

Capacidad instalada cal hidratada = 34500 TMAño

Teniendo un despacho total de cal hidratada durante el año 2014 hasta el mes de agosto lo mostrado en la tabla 1.

	<b>Producción TM</b>
Enero	245.625
Febrero	0
Marzo	920.97
Abril	978.055

Mayo	1449.521
Junio	1000.875
Julio	1937.79
Agosto	1115.158
<b>total</b>	<b>7647.994</b>

Tabla 1. Despacho mensual de cal hidratada

Fuente: Cal & Cemento Sur SA

Debiendo continuar con los despachos de cal hidratada según lo mostrado en el plan anual de despachos tabla 2, el restante del año y del 2015 se ve por conveniente mejorar nuestra producción de cal hidratada en un 25% para la atención oportuna hacia nuestros clientes.

	SMCV Tm	San Rafael Tm	PQuímicos Tm	Otros Tm	negociación otras unidades mineras	<b>TOTAL</b> Tm
agosto-14	800	60	30			<b>890</b>
septiembre-14	800	60	30			<b>890</b>
octubre-14	800	60	30			<b>890</b>
noviembre-14	800	60	30			<b>890</b>
diciembre-14	800	60	30			<b>890</b>
enero-15	900	60	15	90	900	<b>1965</b>
febrero-15	900	60	15	90	900	<b>1965</b>
marzo-15	900	60	15	90	900	<b>1965</b>
abril-15	900	60	15	90	900	<b>1965</b>

mayo-15	900	60	15	90	900	<b>1965</b>
junio-15	900	60	15	90	900	<b>1965</b>
julio-15	900	60	15	90	900	<b>1965</b>
agosto-15	900	60	15	90	900	<b>1965</b>
septiembre-15	900	60	15	90	900	<b>1965</b>
octubre-15	900	60	15	90	900	<b>1965</b>
noviembre-15	900	60	15	90	900	<b>1965</b>
diciembre-15	900	60	15	90	900	<b>1965</b>

Tabla 2. Plan anual de despachos para el año 2015

Fuente: Cal & Cemento Sur SA

### 1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

#### 1.3.1 OBJETIVO GENERAL

↪ Implementar el INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBO Y CORAZA PARA AMPLIACIÓN DE PRODUCCIÓN DE CAL HIDRATADA.

#### 1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

↪ La fabricación y posterior instalación del intercambiador de calor de tubo y coraza, contribuirá en el aumento de producción de cal hidratada para despacho a nuestros principales clientes: SMCV, SAN RAFAEL, PQuimicos entre otros.

↪ Para el proceso de cal hidratada, la inyección de agua a ciertas temperaturas establecerá el tiempo de residencia en el hidratador, pues a menor temperatura de inyección de agua (13°C) el tiempo de residencia de la cal dentro del hidratador será mayor y por ende baja producción, y por otro lado a mayor temperatura de inyección de agua (30°C), menor será el tiempo de residencia de la cal dentro del hidratador y por ende mayor producción.

↪ Según los antecedentes presentados en el presente trabajo de tesis, y las pruebas de laboratorio desarrolladas y expuestas en el capítulo III del presente trabajo de tesis, cuyas pruebas se desarrollaron dentro de las instalaciones de la planta, dan fe de que al calentar el agua de inyección al hidratador, la producción aumentará.





**CAPÍTULO II**  
**MARCO TEÓRICO**

## 2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Este trabajo de tesis tiene aplicaciones similares en otros trabajos de investigación, pero no aplicativos para las condiciones presentadas en planta CAL & CEMENTO SUR SA.

Entre los que detallo:

- DIMENSIONAMIENTO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBO Y CORAZA PARA FLUIDOS NO NEWTONIANOS POR LOS MÉTODOS DE KERN Y TINKER

Autor : Everaldo J. Montes, Fabián A. Ortega, Ricardo D. Andrade y Alba M. Durango

Año : marzo 2006

Fuente: [https://www.researchgate.net/publication/220014216\\_Dimensionamiento\\_de\\_un\\_intercambiador\\_de\\_calor\\_de\\_tubo\\_y\\_coraza\\_para\\_fluidos\\_no\\_newtonianos\\_por\\_los\\_métodos\\_de\\_Kern\\_y\\_Tinker](https://www.researchgate.net/publication/220014216_Dimensionamiento_de_un_intercambiador_de_calor_de_tubo_y_coraza_para_fluidos_no_newtonianos_por_los_métodos_de_Kern_y_Tinker)

Conclusiones :

- Los coeficientes de transferencia de calor convectivos para la coraza, calculados por los métodos estudiados, presentaron diferencias significativas del orden de 70%
- El mismo intercambiador dimensionado por los dos métodos presentará diferentes especificaciones.

- FABRICACIÓN Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBO Y CORAZA

Autor : Ing. Rafael Flores González

Año : 2007 México D.F.

Fuente : [http://azul.bnct.ipn.mx/tesis/repositorio/1716\\_2007\\_ESIME-ZAC\\_MAESTRÍA](http://azul.bnct.ipn.mx/tesis/repositorio/1716_2007_ESIME-ZAC_MAESTRÍA)

Conclusiones :

- La comparación entre los resultados teóricos y experimentales muestran una diferencia muy pequeña, principalmente de los coeficientes de transferencia de calor, con esto se demuestra que realizando un buen diseño y fabricación de intercambiador de calor se logra un óptimo desempeño del equipo.

## 2.2 SUSTENTO TEÓRICO.

Como consecuencia del proceso de hidratación (reacción exotérmica), resulta la expulsión de vapor de agua mayor a 90°C a 3825 msnm, para lo cual se ha tomado como punto de partida para calentar agua por proceso de transferencia mediante un intercambiador de calor para la ampliación de producción de cal hidratada.

### 2.2.1. MODELOS MATEMÁTICOS

Se plantearon los siguientes modelos matemáticos, obtenidos de la bibliografía Donald Kern

### 2.2.2 METODOLOGIA DE CÁLCULO DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR DE TUBO Y CORAZA

**Coefficiente de película del lado de la coraza.** Los coeficientes de transferencia de calor fuera del haz de tubos se refieren como coeficientes del lado de la coraza. Cuando el haz de tubos emplea deflectores para dirigir el flujo del fluido por la coraza a través de los tubos, desde la parte superior a la parte inferior, los coeficientes de transferencia de calor son mayores que para el flujo libre a lo largo de los ejes de los tubos. Los mayores coeficientes de transferencia de calor se originan por un aumento en la turbulencia. En un

arreglo cuadrado, como se ve en la Fig. 1, la velocidad del fluido está sometida a continuas fluctuaciones debido a la reducción en área entre los tubos adyacentes comparada con el área de flujo entre las hileras sucesivas.

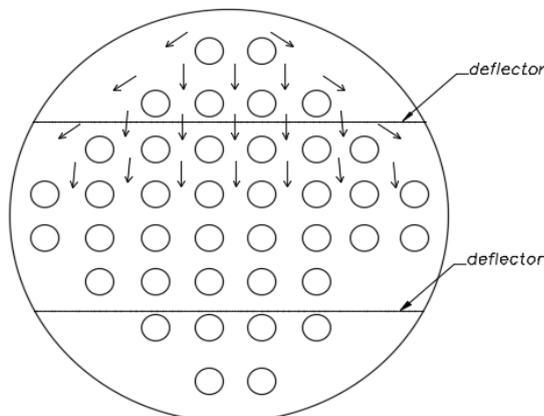


Fig. 1. Flujo a través de un haz de tubos.

Fuente: Procesos de transferencia de calor - Donald Kern

En el arreglo triangular Fig. 2b, hay todavía mayor turbulencia debida a que el fluido que fluye entre los tubos adyacentes a alta velocidad golpea directamente en la hilera siguiente. Esto indicaría que, cuando la caída de presión y limpieza son de pocas consecuencias, el arreglo triangular es superior para alcanzar valores altos del coeficiente de película en el lado de la coraza. Este es actualmente el caso (arreglo triangular), y bajo condiciones comparables de flujo y tamaño de tubo, los arreglos triangulares dan coeficientes cercanos *al 25% mayor que el arreglo en cuadro*

Algunos factores no tratados en el presente trabajo de tesis tienen influencia en la razón de transferencia de calor en el lado de la coraza. Suponga que la longitud del haz está dividida por seis deflectores. Todo el flujo viajara a través del haz siete veces. Si se instalaran diez deflectores en la misma dirección del haz, se requeriría que el haz fuera cruzado un total de once veces, los espaciados más cerrados causan mayor turbulencia.

Además de los efectos del espaciado de los deflectores, los coeficientes del lado de la coraza son también afectados por el espaciado de los tubos, tamaño de ellos, tolerancias y características del flujo del fluido. Aún más, no hay verdadera área de flujo mediante la cual la masa velocidad pueda ser computada puesto que el área de flujo varía *a través* del diámetro del haz de tubos con las diferentes tolerancias para los tubos en cada hilera longitudinal de ellos. *La correlación obtenida para los fluidos que fluyen dentro de los tubos obviamente no es aplicable a los fluidos fluyendo sobre un banco de tubos con deflectores segmentados*, de hecho, eso se comprueba por experimentos. Sin embargo, al establecer un método de correlación se retuvo el factor de transferencia de calor.

$$j_H = \left(\frac{hD}{k}\right) \left(\frac{c\mu}{k}\right)^{-\frac{1}{3}} (\mu/\mu_w)^{-0.14} VS. DG/\mu$$
, de acuerdo con la sugestión de McAdams<sup>2</sup>, pero usando valores ficticios para diámetro equivalente  $D_e$  y la masa velocidad  $G_s$  según la discusión siguiente. La Fig. 28 (Donald Q. Kern) es una correlación de datos industriales que da resultados satisfactorios para los hidrocarburos, compuestos orgánicos, agua, soluciones acuosas y gases, cuando el banco de tubos emplea deflectores con espaciados aceptables entre deflectores a través de los datos, pero es una curva segura, tal, que la desviación de los puntos de prueba de la curva varía de 0 a aproximadamente 20% arriba. Ya que la línea que expresa la ecuación posee curvatura, no puede evaluarse en la forma simple de la Ec:  $\frac{h_i D}{k} = 0.0115 \left(\frac{DG}{\mu}\right)^{0.90} \left(\frac{c\mu}{k}\right)^{1/3}$ , puesto que la constante de proporcionalidad y el exponente del número de Reynolds varían en la práctica. Sin embargo, para valores de **Re** se 2000 a 1000000, los datos se representan con bastante exactitud por la ecuación.

$$\frac{h_o D_e}{k} = 0.36 \left(\frac{D_e G_s}{\mu}\right)^{0.55} \left(\frac{c\mu}{k}\right)^{1/2} \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14}$$

De donde:  $h_o$ ,  $D_e$ , y  $G_s$  se definen después. Los cálculos usando la **Fig. 28 (DONALD Q. KERN)**, concuerdan muy bien con los métodos de Colburn<sup>4</sup> y Short<sup>5</sup> y los datos experimentales de Breidenbach<sup>6</sup> y O'Connell sobre cierto número de intercambiadores de calor comerciales. Se observará en la **Fig. 28 (DONALD Q. KERN)**, que no hay discontinuidad a un Número de Reynolds de 2 100 como ocurre con fluidos dentro de tubos con fluidos que fluyen en tubos. El diferente diámetro equivalente usado en la correlación de datos de la coraza y tubo, excluye la comparación entre los fluidos que fluyen en tubos y los que lo hacen a través de los tubos basándose solamente en el número de Reynolds. Todos los datos de la **Fig. 28 (DONALD Q. KERN)**, se refiere a flujo turbulento.

**Masa-velocidad lado de la coraza.** La velocidad lineal y de masa de fluido cambia continuamente a través del haz de tubos, ya que el ancho de la coraza y el número de tubos varía de cero en la parte superior y en el fondo a un máximo en el centro de la coraza. La amplitud del área de flujo en la correlación representada por la **Fig. 28 (DONALD Q. KERN)**, se tomó en la hilera hipotética de tubos que poseen la máxima área de flujo y que corresponde al centro de la coraza. La longitud del área de flujo se tomó igual al espaciado de los deflectores  $B$ . el paso de los tubos es la suma del diámetro del tubo y el claro  $C'$ . Si el diámetro interior de la coraza se divide por el paso del tubo, se obtiene un número ficticio, pero no necesariamente entero de tubos que debe suponerse existen en el centro de la coraza. Actualmente en muchas distribuciones no hay hileras de tubos en el centro de la coraza, sino que en su lugar existen dos hileras con máximas en ambos lados de la línea media y que tienen algunos tubos más que los computados para el centro. Estas desviaciones se desprecian. Para cada tubo o fracción se considera que hay  $C'$   $X$  1 Pulg<sup>2</sup> de área transversal de flujo por pulgada de espacio de deflector. El área transversal de flujo para el lado de la coraza  $a_s$  está dada por.

$$a_s = \frac{DIC' B}{144PT} \quad pies^2 \quad (2.1)$$

Y como antes, la masa velocidad es.

$$G_s = \frac{W}{a_s} \quad \frac{lb}{hpie^2} \quad (2.2)$$

**Diámetro equivalente lado de la coraza.** Por definición, el radio hidráulico correspondiente al área de un circuito equivalente al área de un canal no circular y consecuentemente en un plano a ángulos rectos a la dirección del flujo. El radio hidráulico empleado para correlacionar los coeficientes de la coraza para un haz que tiene deflectores, no es el verdadero radio hidráulico. La dirección del flujo en la coraza es en parte a lo largo y en parte a ángulo recto al eje mayor de los tubos del haz. El área de flujo a ángulos rectos respecto al eje mayor es variable de hilera a hilera. Un radio hidráulico basado en el área de flujo a través de cualquier hilera, no podría distinguir entre un arreglo en cuadro o en un arreglo triangular (para nuestro caso de tesis). Para poder obtener correlaciones simples combinando tanto el tamaño como la cercanía de los tubos y su tipo de arreglo, se logra una excelente correlación si el radio hidráulico se calcula a lo largo en lugar de a través del eje mayor de los tubo, el diámetro equivalente para la coraza se toma entonces, como cuatro veces el radio hidráulico obtenido por el arreglo dispuesto en el cabezal de tubos. Refiriéndonos a la Fig. 7 donde el achurado cubre el área libre, para *arreglo en cuadrado*.

$$D_e = \frac{4 / \text{área libre}}{\text{perímetro humedo}} \quad pies \quad (2.3)$$

O

$$d_e = \frac{4x(PT^2 - \frac{\pi d_o^2}{4})}{\pi d_o} \quad pulg \quad (2.4)$$

Donde  $P_T$  es el espaciado de los tubos,  $d_o$  es el diámetro exterior del tubo ambos en pulgadas. Para arreglo triangular mostrado en la figura Fig. 2 el perímetro húmedo del elemento corresponde a medio tubo

$$d_e = \frac{4\left(\frac{0.86}{2} \times PT^2 - \frac{1}{2}\pi d_0^2\right)}{\frac{1}{2}\pi d_0^2} \quad \text{pulg} \quad (2.5)$$

Los diámetros equivalentes para los arreglos comunes se incluyen en la **Fig. 28 (DONAL Q. KERN)** podría aparecer que este método de evaluar el radio hidráulico y el diámetro equivalente, no distingue entre los porcentajes relativos de flujo a ángulo recto al flujo axial, esta apreciación es correcta. Es posible, usando la misma coraza, tener igual masa velocidad, diámetros equivalentes, y números de Reynolds, usando una cantidad de flujo mayor y un espaciado también mayor de los deflectores o una cantidad pequeña de fluido y menor espaciado en los deflectores, aun las proporciones de flujo a ángulo recto a flujo axial difieran.

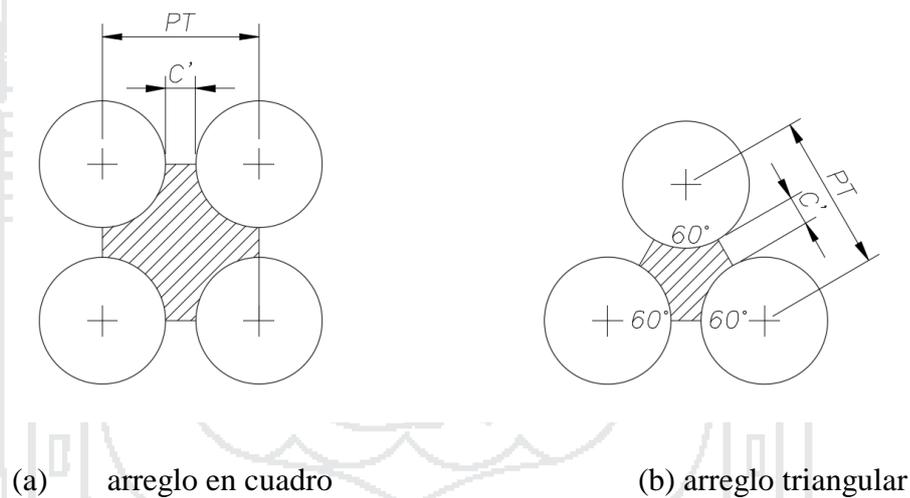


Fig. 2. Diámetros equivalentes.

Fuente: Procesos de transferencia de calor - Donald Kern

Aparentemente, donde el rango de espaciado de los deflectores está restringido entre el diámetro interior y un quinto del diámetro interior de la coraza, la importancia del error no es tan grande que permite su correlación.

**La diferencia verdadera de la temperatura  $\Delta t$  en un intercambiador 1-2.** Una gráfica típica de temperatura vs longitud para un intercambiador que tiene un paso en la

coraza y dos en los tubos, se muestra en la Fig. 3 para arreglo de tobera indicado. Respecto al fluido de la coraza, un paso en los tubos está en contracorriente y el otro en paralelo. El intercambiador 1-2 es una combinación de ambas y la MLTD para contracorriente o flujo paralelo no puede ser la diferencia verdadera de temperatura para un arreglo contracorriente-paralelo. Así que es necesario desarrollar una verdadera ecuación para el cálculo de la diferencia verdadera de temperatura  $\Delta t$  que reemplace a la MLDT en contracorriente. El método empleado aquí es una modificación de la derivación de Underwood<sup>8</sup> y se presenta en la forma final propuesta por Nagle<sup>9</sup> y Borman, Muller y Nagle<sup>10</sup>.

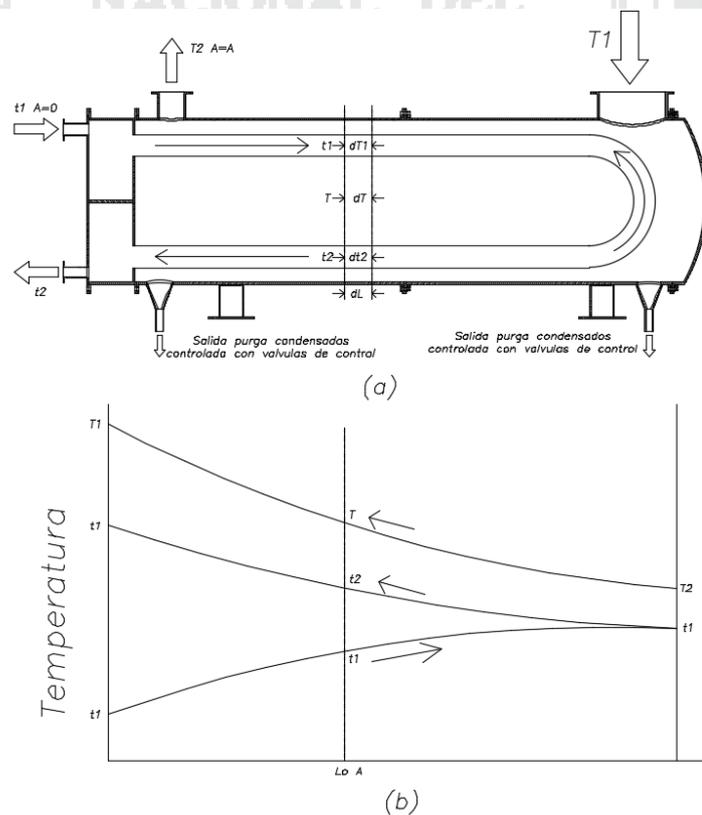


Fig. 3. Relaciones de temperatura en un intercambiador 1-2.

Fuente: Procesos de transferencia de calor - Donald Kern

La temperatura del fluido en la coraza puede sufrir cualquiera de dos variaciones cuando se desplaza de la entrada a la salida cruzando el haz de tubos varias veces en su

trayectoria: (1) se induce tal turbulencia que el flujo de la coraza se encuentre completamente mezclado a cualquier longitud X de la tobera de entrada, o (2) se induce tan poca turbulencia que hay una atmósfera de temperatura selectiva alrededor de los tubos en cada paso de tubos individualmente. Los deflectores y la naturaleza turbulenta del flujo a través del haz de tubos parece eliminar (2) de manera que (1) se toma como la primera de las suposiciones para derivar la diferencia verdadera de temperatura en un intercambiador 1-2. Las suposiciones son:

1. La temperatura del fluido en coraza está a una temperatura isotérmica promedio en cualquier sección transversal
2. El área de calentamiento en cada paso es igual
3. El coeficiente total de transferencia de calor es constante.
4. La razón de flujo de cada uno de los fluidos es constante.
5. El calor específico de cada flujo es constante.
6. No hay cambios de fase de evaporación o condensado en una parte del intercambiador.
7. Las pérdidas de calor son despreciables.

El balance total de calor, siendo  $\Delta t$  la diferencia verdadera de temperatura es:

$$Q = UA\Delta t = WC(T_1 - T_2) = wc(t_2 - t_1) \quad (2.6)$$

De la cual:

$$\Delta t = \left(\frac{T_1 - T_2}{WC}\right)_{real} = \left(\frac{t_2 - t_1}{wc}\right)_{real} \quad (2.7)$$

De donde en la Fig. 3. a sea T la temperatura del fluido de la coraza a cualquier sección transversal de la misma  $L=X$  entre  $L=0$  y  $L=L$ . sea  $t^1$  y  $t^2$  las temperaturas en el primero y segundo paso los tubos, respectivamente, y a la misma sección transversal T.

sea  $a''$  la superficie externa por pie de longitud. En el incremento de la superficie  $dA=a''dL$  la temperatura de la coraza cambia por  $-dT$  sobre el área  $dA$

$$-WCdT = U \frac{dA}{2} (T - t^I) + U \frac{dA}{2} (T - t^{II}) \quad (2.8)$$

$$-WCdT = U \frac{dA}{2} \left( T - \frac{t^I + t^{II}}{2} \right) \quad (2.9)$$

$$- \int \frac{UdA}{WC} = \int \frac{dT}{\left( T - \frac{t^I + t^{II}}{2} \right)} \quad (2.10)$$

Pero en esta ecuación  $T$ ,  $t^I$  y  $t^{II}$  son variables dependientes. El balance de calor  $L = X$  a la entrada del fluido caliente es:

$$WC(T - T_2) = wc(t^{II} - t^I) \quad (2.11)$$

Y el balance de calor por paso

$$wc dt^I = U \frac{dA}{2} (T - t^I) \quad (2.12)$$

$$wc dt^{II} = U \frac{dA}{2} (T - t^{II}) \quad (2.13)$$

Dividiendo la Ec. (2.13) por (2.12)

$$\frac{dt^{II}}{dt^I} = - \frac{T - t^{II}}{T - t^I} \quad (2.14)$$

Eliminar  $t^{II}$  y  $dt^{II}$  de la Ec. (2.11) y (2.13)

$$t^{II} = \frac{WC}{wc} (T_2 - T) + t^I \quad (2.15)$$

Diferenciando Ec. (2.14) con la entrada de fluido caliente,  $T_I$  constante

$$dt^{II} = - \frac{WC}{wc} dT + dt^I \quad (2.15)$$

Sustituyendo la Ec. (2.13) y acomodando

$$\frac{WC}{wc} \frac{dT}{dt^I} = 1 + \frac{T - t^I - \left(\frac{WC}{wc}\right)(T_2 - T)}{T - t^I} \quad (2.17)$$

El número de variables de la Ec. (2.15) ha sido reducido de tres ( $T$ ,  $t^I$ ,  $t^{II}$ ) a dos ( $T$ ,  $t^I$ ), para una solución es necesario eliminar ya sea  $T$  o  $t^I$ . Simplemente por el uso de parámetros como en el caso del intercambiador de doble tubo, téngase:

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} = \frac{wc}{WC} \quad (2.17a) \quad y \quad S = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - T_2} \quad (2.17b)$$

Redondeando la Ec. (2.8)

$$WC \frac{dT}{dA} = \frac{U}{2}(T - t^I) + \frac{U}{2}(T - t^{II}) = 0 \quad (2.18)$$

Simplificando y sustituyendo  $WC = wc/R$ ,

$$\frac{dT}{dA} + \frac{URT}{wc} - \frac{URT}{2wc}(t^I - t^{II}) = 0 \quad (2.19)$$

Diferenciando con respecto a  $A$ ,

$$\frac{d^2T}{dA^2} + \frac{UR}{wc} \frac{dT}{dA} - \frac{U^2R}{2wc} \left( \frac{dt^I}{dA} - \frac{dt^{II}}{dA} \right) = 0 \quad (2.20)$$

Sustituyendo las Ecs. (2.12) y (2.13),

$$\frac{d^2T}{dA^2} + \frac{UR}{wc} \frac{dT}{dA} - \frac{U^2R}{(2wc)^2} (t^{II} - t^I) = 0 \quad (2.21)$$

Puesto que el cambio de calor es sensible, existe una proporcionalidad directa entre el porcentaje de aumento o disminución de temperatura y  $Q$ :

$$\frac{T - T_2}{T_1 - T_2} = \frac{t^I - t^{II}}{t_1 - t_2} \quad (2.22)$$

O

$$t^{II} - t^I = \frac{T - T_2}{R} \quad (2.23)$$

$$\frac{d^2T}{dA^2} + \frac{UR}{wc} \frac{dT}{dA} - \frac{U^2R}{(2wc)^2} = -\frac{U^2T_2}{(2wc)^2} \quad (2.24)$$

Diferenciando de nuevo respecto a  $A$ .

$$\frac{d^3T}{dA^3} + \frac{UR}{wc} \frac{d^2T}{dA^2} - \frac{U^2dT}{(2wc)^2 dA} = 0 \quad (2.25)$$

La solución de esta ecuación puede encontrarse en cualquier texto de ecuaciones diferenciales. La ecuación es.

$$T = K_1 + K_2 e^{-\left(\frac{UA}{2wc}\right)(R + \sqrt{R^2 + 1})} + K_3 e^{-\left(\frac{UA}{2wc}\right)(R - \sqrt{R^2 + 1})} \quad (2.26)$$

Donde  $T = T_2$ ,  $A$  deberá aumentarse de 0 a  $A$ , donde la solución de la Ec. (2.24)

$K_1 = T_2$  de manera que la Ec. (2.26) se transforma en:

$$-K_2 e^{-\left(\frac{UA}{2wc}\right)(R+\sqrt{R^2+1})} = K_3 e^{-\left(\frac{UA}{2wc}\right)(R-\sqrt{R^2+1})} \quad (2.27)$$

Tomando logaritmos en ambos lados y simplificando.

$$\frac{UA}{wc} = \frac{1}{\sqrt{R^2+1}} \ln\left(-\frac{K_2}{K_3}\right) \quad (2.28)$$

Diferenciando la Ec. (2.25);

$$\frac{dT}{dA} - K_2 \frac{U}{2wc} (R + \sqrt{R^2 + 1}) e^{-\left(\frac{UA}{2wc}\right)(R+\sqrt{R^2+1})} - K_3 \frac{U}{2wc} (R - \sqrt{R^2 + 1}) e^{-\left(\frac{UA}{2wc}\right)(R-\sqrt{R^2+1})} \quad (2.29)$$

Sustituyendo el valor de  $dT/dA$  de la Ec. (2.20) y puesto que

$$A = 0, t^I = t_1, t^{II} = t_2 \text{ y } T = T_1, t^I + t^{II} = t_1 + t_2$$

$$R(t_1 + t_2) - 2RT_1 = -K_2(R + \sqrt{R^2 + 1}) - K_3(R - \sqrt{R^2 + 1}) \quad (2.30)$$

De la Ec. (2.26)  $A=0$  y  $T=T_1$  y  $K_1=T_2$

$$T_1 - T_2 = K_2 + K_3 \quad (2.31)$$

Multiplicando los dos lados de la Ec. (2.13) por  $(R + \sqrt{R^2 + 1})$ ,

$$(R + \sqrt{R^2 + 1})(T_1 - T_2) = K_2(R + \sqrt{R^2 + 1}) + K_3(R + \sqrt{R^2 + 1}) \quad (2.32)$$

Sumando las Ecs. (2.31) y (2.32) y despejando  $K_3$

$$K_3 = \frac{R(t_1+t_2)+(T_1-T_2)(R+\sqrt{R^2+1})-2RT_1}{2\sqrt{R^2+1}} \quad (2.33)$$

Volviendo a la Ec. (2.30)

$$-K_2 = K_3 - (T_1 - T_2) = \frac{(R-\sqrt{R^2+1})(T_1-T_2)-2\sqrt{R^2+1}(T_1-T_2)-2RT_1+R(t_1+t_2)}{2\sqrt{R^2+1}} \quad (2.34)$$

Puesto que  $R = (T_1 - T_2)/(t_2 - t_1)$

$$-\frac{K_2}{K_3} = \frac{(R-\sqrt{R^2+1})(t_1-t_2)-(T_1-t_1)-(T_1-t_2)}{(R+\sqrt{R^2+1})(t_1-t_2)-(T_1-t_1)-(T_1-t_2)} \quad (2.35)$$

Dividiendo por  $T_1 - t_1$  y sustituyendo  $S = \frac{(t_2-t_1)}{T_1-t_1}$  y  $1 - S = \frac{(T_1-t_2)}{T_1-t_1}$

$$-\frac{K_2}{K_3} = \frac{2-S(R+1-\sqrt{R^2+1})}{2-S(R+1+\sqrt{R^2+1})} \quad (2.36)$$

Sustituyendo en la Ec. (2.27)

$$\left(\frac{UA}{wc}\right)_{real} = \frac{1}{\sqrt{R^2+1}} \ln \frac{2-S(R+1-\sqrt{R^2+1})}{2-S(R+1+\sqrt{R^2+1})} \quad (2.37)$$

La Ec. (2.37) es la expresión para la diferencia verdadera de temperatura en un intercambiador 1-2 de flujo paralelo contracorriente. ¿Cómo compara con la MLDT para contracorriente, empleando las mismas temperaturas de proceso? Para contracorriente

$$Q = wc(t_2 - t_1) = \frac{UA(T_1-t_2)-(T_2-t_1)}{\ln(T_1-t_2)/(T_2-t_1)} \quad (2.38)$$

De la que:

$$\left(\frac{UA}{wc}\right)_{contracorriente} = \frac{t_2-t_1}{\frac{(T_1-t_2)}{\ln(T_1-t_2)/(T_2-t_1)}} = \frac{\ln(1-S)}{R-1} \quad (2.39)$$

La razón de la diferencia real de la temperatura a la MLDT es

$$\frac{\frac{t_2-t_1}{\left(\frac{UA}{wc}\right)_{real}}}{\frac{t_2-t_1}{\left(\frac{UA}{wc}\right)_{contracorriente}}} = \frac{\left(\frac{UA}{wc}\right)_{contracorriente}}{\left(\frac{UA}{wc}\right)_{real}} \quad (2.40)$$

Llamando a la relación fraccionaria entre la diferencia verdadera de temperatura y la MLDT  $F_T$

$$F_T = \frac{\sqrt{R^2+1} \ln(1-S)/(1-RS)}{(R-1) \ln \frac{2-S(R+1-\sqrt{R^2+1})}{2-S(R+1+\sqrt{R^2+1})}} \quad (2.41)$$

La ecuación de Fourier para un intercambiador 1-2 puede escribirse ahora:

$$Q = UA\Delta t = UAF_T(MLDT) \quad (2.42)$$

Para reducir la necesidad de resolver las Ecs. (2.37) o (2.41), en la **Fig. 18 del apéndice (DONALD Q. KERN)**, se encuentran graficados factores de corrección  $F_T$  para la MLDT como funciones de S y R como parámetro. Cuando el valor de S y R se acerca a la posición vertical de la curva, es difícil leer el dato y  $F_T$  deberá computarse de la Ec. (2.41) directamente. Cuando un intercambiador tiene un paso en la coraza y cuatro, seis, ocho, o más pasos pares en los tubos, tales como un intercambiador 1-4, 1-6, 1-8, de la Ec. (2.10) para un intercambiador 1-4 es

$$-\int \frac{UdA}{WC} = \int \frac{dT}{T - (t^I + t^{II} + t^{III} + t^{IV})/4}$$

Para un intercambiador 1-6

$$-\int \frac{UdA}{WC} = \int \frac{dT}{T - (t^I + t^{II} + t^{III} + t^{IV} + t^V + t^{VI})/6}$$

Se puede demostrar que los valores de  $F_T$  para intercambiadores 1-2, 1-8 son menores de 2% aparte en los casos extremos y en general considerablemente menores. Es por lo mismo, costumbre describir cualquier intercambiador que tenga un paso en la coraza y *dos o más números pares* de pasos en los tubos en flujo paralelo-contracorriente como un intercambiador 1-2 y usar los valores de  $F_T$  obtenidos de la Ec. (2.41). La razón de que  $F_T$  sea menor que 1.0 se debe naturalmente al hecho de que el paso de los tubos en paralelo con el fluido de la coraza, no contribuye de manera efectiva a la diferencia de temperatura como sucede con el flujo a contracorriente.

Hay una limitación importante al uso de la **Fig. 18. (DONALD Q. KERN)** Aun cuando cualquier intercambiador que tenga valor de  $F_T$ , arriba de cero puede teóricamente operar, esto no es prácticamente cierto. La imposibilidad en la práctica de llenar todas las suposiciones empleadas en la derivación, y particularmente 1, 3 y 7, pueden causar serias discrepancias en el cálculo de  $\Delta t$  resultas de estas discrepancias, si el valor de  $t_i$  en la Fig. 3.a al final del paso en paralelo, se requiere que se aproxime a  $T_2$ , más cercanamente que el valor derivado de  $t_i$ , esto será una violación a las reglas del flujo paralelo, es decir, la salida de una de las corrientes  $t_i$  no puede alcanzar la salida de la otra,  $T_2$ , sino mediante un área infinita. De acuerdo con esto, no es aconsejable o práctico usar un intercambiador 1-2 cuando el factor de corrección  $F_r$ , calculado, sea menor de 0.75. En lugar de él, se requiere algún otro arreglo que asemeje más al flujo en contracorriente.

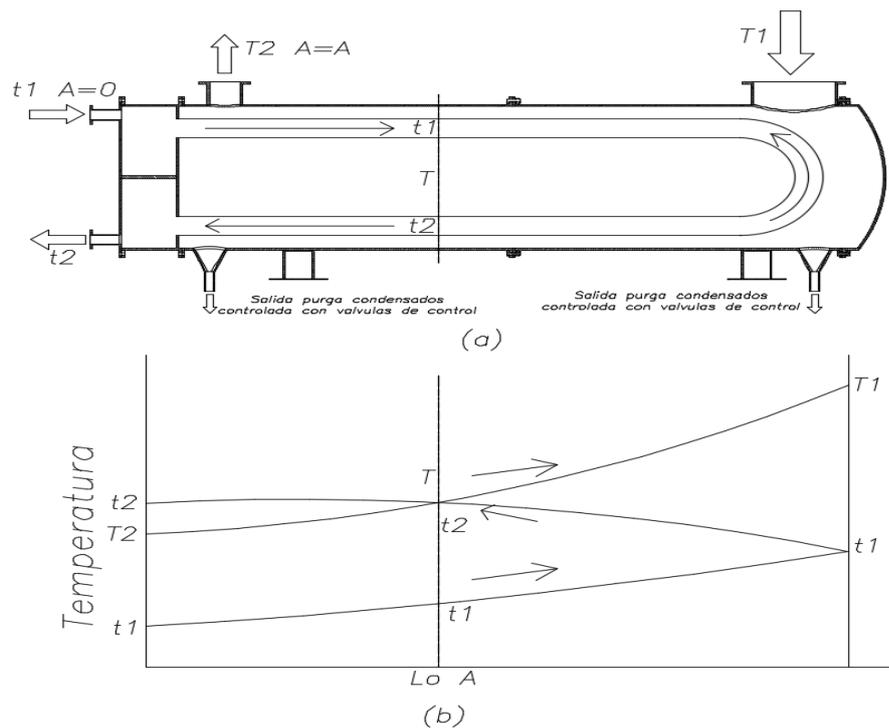


Fig. 4. Relaciones de temperatura en un intercambiador 1-2 con arreglo convencional de boquillas.

Fuente: Procesos de transferencia de calor - Donald Kern

Las relaciones de temperatura para el caso donde la orientación de las boquillas de la coraza se ha invertido, se muestra en la Fig. 4 para las mismas temperaturas de entrada y salida graficadas en la Fig. 3. Underwood<sup>11</sup> ha mostrado que los valores de  $F_T$ , para ambos son idénticos (Sin embargo, los valores de  $t_i$  difieren en ambos casos). Ya que un intercambiador 1-2 es una combinación de pasos en paralelo y contracorriente, puede esperarse que la salida de una de las corrientes de proceso no pueda aproximar la entrada de la otra muy cercanamente. De hecho, es costumbre en equipo paralelo-contracorriente llamar a  $T_2 - t_2$  la *aproximación*, y si  $t_2 > T_2$ , entonces  $t_2 - T_2$ , se llama la temperatura de cruce.

Es útil investigar varias temperaturas de proceso típicas y notar la influencia de diferentes aproximaciones y cruces sobre el valor de  $F_T$ . Para un servicio dado la

reducción de  $F_T$  a menos de la unidad en la Ec. (2.41) se compensa aumentando la superficie.

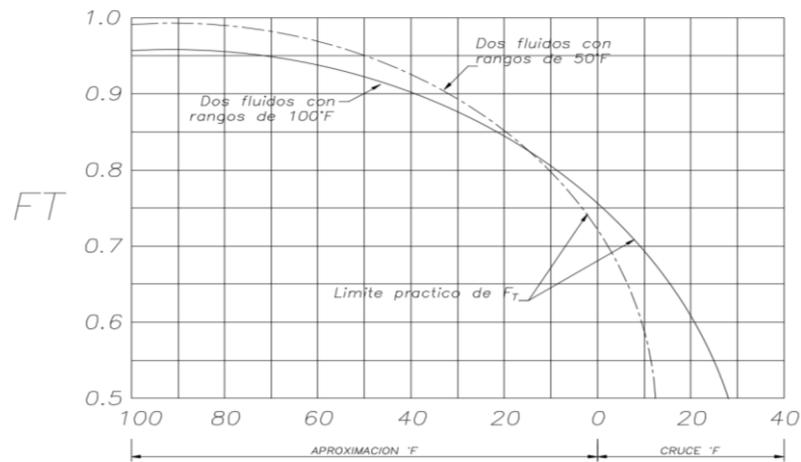


Fig. 5. Influencia de la temperatura de aproximación en  $F_T$  con fluidos que tienen igual rango, en un intercambiador 1-2.

Fuente: Procesos de transferencia de calor - Donald Kern

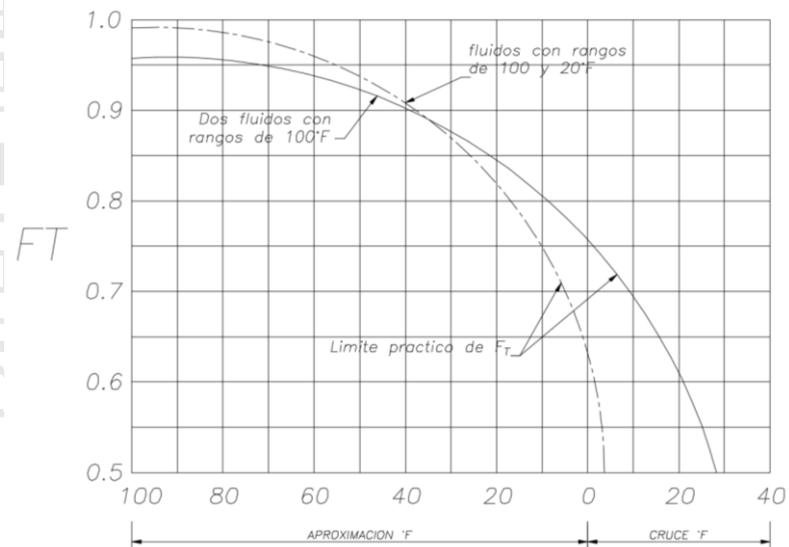


Fig. 6. Influencia de la temperatura de aproximación en  $F_T$  con fluidos que tienen rangos desiguales, en un intercambiador 1-2.

Fuente: Procesos de transferencia de calor - Donald Kern

Así, si las temperaturas de proceso se fijan, es aconsejable emplear un intercambiador paralelo-contracorriente contra un intercambiador a contracorriente, puesto que esto aumenta el costo del equipo más allá del valor de sus ventajas mecánicas.

En la Fig. 5 dos pares de fluidos con iguales rangos de 100 y 50°F son estudiados. Las temperaturas de operación del fluido frío se fijan, mientras que las temperaturas del fluido caliente son variables, por lo tanto, cambia la aproximación en cada caso. Note las condiciones bajo las que  $F_T$ , rápidamente disminuye, particularmente al acercarse al mínimo práctico  $F_T = 0.75$  y la influencia de las relaciones entre  $T_2$ , y  $t_2$ , Se demuestra el cálculo para varios puntos.

En la Fig. 6 se muestran los resultados de los cálculos cuando un fluido tiene un rango cinco veces mayor que el otro.

**Caída de presión lado de la coraza.** La caída de presión a través de la coraza de un intercambiador es proporcional al número de veces que el fluido cruza el haz entre los deflectores. También es proporcional a la distancia a través del haz, cada vez que lo cruza. Usando una modificación de la Ecuación:

$$\text{razon de corte} = \frac{du}{dy} = \frac{V}{Y}$$

Se ha obtenido una correlación usando el producto de la distancia a través del haz, tomando  $D$ , en pies como el diámetro interior de la coraza y el número de veces que el haz se cruza como  $N + 1$ , donde  $N$  es el número de deflectores. Si  $L$  es la longitud del tubo en pies, Número de cruces

$$N + 1 = \frac{\text{longitud del tubo } plg}{\text{espaciado de los deflectores } plg} = 12 X \frac{L}{B} \quad (2.43)$$

Si la longitud del tubo es 16'0" y los deflectores se espacian 18 pulg, habrá 11 cruces o 10 deflectores. Siempre habrá un número impar de cruces si las dos boquillas de la coraza están en lados opuestos de la misma, y un número par si las dos boquillas están en el mismo lado de la coraza. Con un espaciado de los deflectores estrecho, a intervalos convenientes como de 6 pulg o menores, se puede omitir un deflector si el número de cruces no es un número entero. El diámetro equivalente usado para calcular la caída de presión es el mismo que para la transferencia de calor, se desprecia la fricción adicional de la coraza. La ecuación isotérmica para la caída de presión para fluidos que se calientan o enfrían y que incluye las pérdidas de entrada y salida es

$$\Delta P_s = \frac{f G_s^2 D_s (N+1)}{2g\rho D_e \phi_s} = \frac{f G_s^2 D_s (N+1)}{5.22 \times 10^{10} D_e \phi_s} \quad \frac{lb}{pie^2} \quad (2.44)$$

Donde  $s$  es la gravedad específica del fluido. La Ec. (2.44) da la caída de presión en libras por pie cuadrado. La unidad común en ingeniería es libras por pulgada cuadrada. Para permitir la solución directa de  $\Delta P_s$ , en  $lb/plg^2$ , se han graficado en la **Fig. 29 (Anexo DONALD Q. KERN)** factores de fricción dimensionales para el lado de la coraza, pie cuadrado por pulgada cuadrada. Para obtener la caída de presión en unidades consistentes mediante la Ec. (2.44) multiplique  $f$  de la **Fig. 20 (Anexo DONALD Q. KERN)** por 144.

**Caída de presión en los tubos.** La Ecuación  $\Delta F = \frac{4fG^2L}{2g\rho^2D}$  puede usarse para obtener la caída de presión en los tubos, pero se aplica principalmente a un fluido isotérmico. Sieder y Tate han correlacionado los factores de fricción para fluidos que se calientan o enfrían en tubos. Esas correlaciones graficadas en forma dimensional aparecen en la **Fig. 26 (Anexo DONALD Q. KERN)** y se usan en la ecuación:

$$\Delta P_t = \frac{f G_t^2 L n}{5.22 \times 10^{10} D_e S \theta_t} \quad \frac{lb}{pie^2} \quad (2.45)$$

Donde  $n$  es el número de pasos,  $L$  la longitud del tubo, y  $Ln$  es la longitud total de la trayectoria en pies. No se dan las desviaciones, pero la curva ha sido aceptada por la Tubular **Exchanger Manufacturers Association**. Al fluir de un paso al otro, pasando por el carrete y el cabezal flotante, el fluido cambia de dirección bruscamente por 180°, aun cuando el área de flujo en el carrete y la cubierta del cabezal flotante no deberán ser menor que el área de flujo combinada de todos los tubos en un solo paso. El cambio de dirección introduce una caída de presión adicional  $\Delta P_r$ , llamada pérdida de regreso y se consideran cuatro cabezas de velocidad por paso como pérdida. La cabeza velocidad  $V^2/2g'$  ha sido graficada en la **Fig. 27 (Anexo DONALD Q. KERN)** contra la masa velocidad para un fluido con gravedad específica de 1, y la pérdida de regreso para cualquier fluido será

$$\Delta P_r = \frac{4n}{s} \frac{V^2}{2g'} \quad \frac{lb}{pulg^2} \quad (2.46)$$

Donde:

$V =$  velocidad, (pie/seg)

$s =$  gravedad específica

$g' =$  aceleración de la gravedad, pie/plg<sup>2</sup>

La caída de presión total del lado de los tubos  $\Delta P_T$ , será:

$$\Delta P_r = \Delta P_t + \Delta P_r \quad (2.47)$$

**Análisis del rendimiento de un intercambiador 1-2 existente.** Cuando todas las ecuaciones pertinentes se usan para calcular la adaptabilidad de un intercambiador existente para ciertas condiciones de proceso, esta investigación se llama apreciación de un intercambiador. Hay tres puntos de significación en la apreciación de la adaptabilidad de un intercambiador existente para un nuevo uso:

- ✓ ¿Qué coeficiente  $U_c$  puede lograrse por los dos fluidos como resultado de su flujo y sus coeficientes de película individuales *h<sub>io</sub>* y *h<sub>o</sub>*?
- ✓ Del balance de calor  $Q = WC(T_1 - T_2) = wc(t_2 - t_1)$ , del área conocida, y de la diferencia verdadera de temperatura para las temperaturas del proceso se obtiene un valor de diseño o coeficiente de obstrucción  $U_D$ . Donde  $U_C$  debe exceder a  $U_D$  suficientemente de manera que el factor de obstrucción, que es una medida de exceso de superficie, permita la operación del intercambiador por un periodo de servicio razonable.
- ✓ **Las caídas de presión permitidas para los dos fluidos no debe excederse.** Cuando estas condiciones han sido alcanzadas, el intercambiador en existencia es apropiado para condiciones de proceso, para las que ha sido apreciado. Al iniciar los cálculos el primer punto a atacar es determinar si el flujo caliente o frío deberá pasar por la coraza. No hay una regla rápida para esto. Una corriente puede ser grande y la otra pequeña, el espaciado de los deflectores puede ser tal que en cierta vez el área de flujo del lado de la coraza a, sea grande. Afortunadamente cualquier selección se puede corroborar intercambiando las dos corrientes y viendo qué arreglo da los mayores valores de  $U_c$  sin exceder la caída de presión permitida. Particularmente y en preparación para métodos posteriores hay alguna ventaja, sin embargo. De empezar los cálculos por el lado de los tubos, y será conveniente establecer este hábito. Los pasos detallados para apreciar un intercambiador se bosquejan en seguida. Los suscritos s y t se usan para distinguir entre coraza y tubos, y para este bosquejo se supone que el flujo caliente está en la coraza. Colocando como siempre el flujo caliente a la izquierda, se retiene el método común de computar la MLDT.

Además se realizará el cálculo estructural del soporte del tanque de agua con fines de resistencias mecánicas y optimización de materiales, pero no se abarcará ampliamente

en el tema pues no es de interés de estudio e investigación, pero sí de resistencias mecánicas y seguridad de operación.

### 2.3 GLOSARIO DE TÉRMINOS BÁSICOS.

**Cal Hidratada:** El hidróxido de calcio, dihidróxido de calcio o cal hidratada con fórmula  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , se obtiene por hidratación del óxido de calcio (cal viva) en unos equipos denominados hidratadores (Fig.7). También se puede obtener, como subproducto procedente de residuos cálcicos de procesos de fabricación de diversas sustancias, por precipitación de la mezcla de una solución de cloruro de calcio con una de hidróxido de sodio o haciendo reaccionar carburo de calcio con agua. En este último caso, durante el proceso se libera acetileno, que se aprovecha para las lámparas o equipos de soldadura autógena, u oxicorte que funcionan con este gas. Si se calienta a  $512\text{ }^\circ\text{C}$ , el hidróxido de calcio se descompone en óxido de calcio y agua. La solución de hidróxido de calcio en agua es una base fuerte que reacciona violentamente con ácidos y ataca varios metales. Se enturbia en presencia de dióxido de carbono por la precipitación de carbonato de calcio



Fig. 7. PUGMILL (hidratador).

Fuente: foto hidratador – Cal & Cemento Sur SA

**Transferencia de calor.** La ciencia de la termodinámica trata de las transiciones cuantitativas y reacomodos de energía como calor en los cuerpos de materia, la ciencia de transferencia de calor es la relación con la razón de intercambio de calor entre cuerpos calientes y fríos llamados fuente y receptor, cuando se vaporiza una libra de agua o se condensa una libra de vapor, el cambio de energía en los procesos es idéntico, la velocidad a la que cualquiera de estos procesos puede hacerse progresar con una fuente o receptor independiente es, sin embargo, inherente muy diferente. Generalmente, la vaporización es un fenómeno mucho más rápido que la condensación.

**Teorías de calor.** El estudio de la transferencia de calor se facilitará grandemente mediante una cabal comprensión de la naturaleza del calor. Sin embargo esta es una ventaja que no está fácilmente disponible para estudiantes de transferencia de calor o termodinámica, ya que se han descubierto muchas manifestaciones del calor, lo que ha impedido que una teoría simple las cubra a todas ellas. Las leyes que pueden aplicarse a transiciones de masa pueden ser inaplicables a transiciones moleculares o atómicas, y aquellas que son aplicables a las bajas temperaturas pueden no serlo a las temperaturas altas. Para propósitos de ingeniería es necesario comenzar el estudio con información básica acerca de unos cuantos fenómenos. Las fases de una sustancia simple, sólida, líquida y gaseosa, están asociadas con su contenido de energía. En la fase sólida, las moléculas o átomos están muy cercanos, dando esto rigidez. En la fase líquida existe suficiente energía térmica para extender la distancia de las moléculas adyacentes, de manera que se pierde la rigidez. En la fase gas, la presencia de energía térmica adicional resulta en una separación relativamente completa de los átomos o moléculas, de manera que pueden permanecer en cualquier lugar de un espacio cerrado. También se ha establecido que, dondequiera que ocurra un cambio de fase fuera de la región crítica, se involucra una gran cantidad de energía en esa transición.

Aún en tiempos antiguos, ya se daba por entendido que la luz y el calor eran diferentes. El fuego se consideraba como uno de los elementos, sin embargo, los sabios se dieron cuenta que mientras el fuego se consumía, sus flamas propagaban luz y calor y aún después de que el fuego se apagara, las ascuas o residuos del fuego seguían propagando calor. Joseph Black (1728 - 1799) fue el primer químico moderno en ofrecer una explicación sobre el calor. Él notó que al llenar una tetera de agua y hielo y colocarla al fuego, la temperatura del hielo no cambiaba hasta que este se derretía. Basándose en su observación, Black sugirió que el calor fluye como un fluido. Lavoisier fue el primer científico en formalizar el concepto de calor-fluido, en lo que él llamó la teoría "calorífica". La palabra Calorífico en Latín significa calor. Él se imaginó el calor como un fluido insípido, inoloro, invisible e ingrávido al cual llamó fluido calorífico. Él también sugirió que los cuerpos calientes contienen más del fluido calorífico que los cuerpos fríos.

El primer esfuerzo por hacer una escala de temperatura estándar ocurrió alrededor de 170 AD (Antes de Cristo), cuando Galen propuso una temperatura neutral estándar compuesta de cantidades iguales de agua hirviendo y hielo. Los primeros dispositivos para medir la temperatura se llamaban termoscopios. El primer termómetro sellado que utilizaba un líquido como medio termométrico fue creado en 1641 para Ferdinand II, Gran Duque de Toscana. Este termómetro utilizaba un dispositivo sellado de alcohol en un vaso que tenía marcas en el tallo cada 50 grados. En 1724, Gabriel Fahrenheit, un fabricante de instrumentos de Ámsterdam, utilizó el mercurio como líquido termométrico.

Mientras tanto, existían diferentes teorías que se basaban en la observación que el movimiento o moción mecánico tiende a producir calor. Los científicos habían observado que los componentes de la energía mecánica, energía cinética y energía potencial eran intercambiables. El hecho de que la fricción producía calor y que también era un modo de

conversión de energía, les hizo creer que la energía mecánica se estaba convirtiendo en calor. En 1798, Benjamín Thompson, un inglés que pasó sus primeros años en la América pre-revolucionaria, era ministro para la Guerra y policía en el estado alemán de Baviera. Uno de sus deberes era vigilar la perforación de los cañones en el arsenal estatal. Thompson se impresionó por la enorme cantidad de calor que se generaba en este proceso y no podía entender de donde venía. Él observó que los alrededores de los cañones cada vez se ponían más calientes y que este proceso de calentamiento continuaba mientras la máquina perforadora estuviera operando. Basándose en estas observaciones, Thompson postuló que parte del trabajo mecánico hecho por la máquina perforadora era convertido en calor. En esta época, este fue un concepto bastante revolucionario y la mayoría de las personas no lo aceptaron. Thompson también observó que el calor podía producirse meramente del movimiento, sin ninguna combustión química. Tales observaciones dieron lugar a la creencia que el calor era causado debido al movimiento invisible de partículas invisibles de materia. Durante esta época, John Dalton presentó la idea de los átomos, y después estudió más seriamente el concepto de energía cinética de calor. En 1849, un físico inglés llamado James Prescott Joule confirmó que el trabajo o esfuerzo podía convertirse en calor. Él descubrió que la misma cantidad de esfuerzo siempre genera la misma cantidad de calor. Joule formuló el "esfuerzo equivalente de calor" (work equivalent of heat), que declara que 1 metro newton de esfuerzo es equivalente a 0.241 calorías de calor. Una caloría es la cantidad de calor requerida para aumentar la temperatura de un gramo de agua por un grado centígrado. Actualmente medimos el calor y el esfuerzo en la misma unidad, para que un metro newton o un joule de esfuerzo sean equivalentes a un joule de calor. Joule concluyó que cada caloría produce 4.18 joules de calor. En 1850, el físico alemán Clausius postuló que la cantidad esencial que se conserva no es ni calor, ni esfuerzo, sino una combinación de los dos, que se conoce como energía.

En 1860, James Clerk Maxwell formalizó el concepto de calor y la temperatura diciendo que este era la suma total de energías cinéticas de las partículas de un cuerpo y que la temperatura era el promedio de las energías cinéticas de todas las partículas de un cuerpo.

**Mecanismos de transferencia de calor.** Hay tres formas diferentes en las que el calor puede pasar de la fuente al receptor, aun cuando muchas de las aplicaciones en la ingeniería son combinaciones de dos o tres. Estas son, conducción, convección y radiación. **Conducción.** La conducción es la transferencia de calor a través de un material fijo tal como la pared estacionaria mostrada en la Fig. 7 La dirección del flujo de calor será a ángulos rectos a la pared, si las superficies de las paredes son isotérmicas y el cuerpo es homogéneo e isotrópico. Supóngase que una fuente de calor existe a la izquierda de la pared y que existe un receptor de calor en la superficie derecha. Es conocido y después se confirmará por una derivación, que el flujo de calor por hora es proporcional al cambio de temperatura a través de la pared y al área de la pared  $A$ .

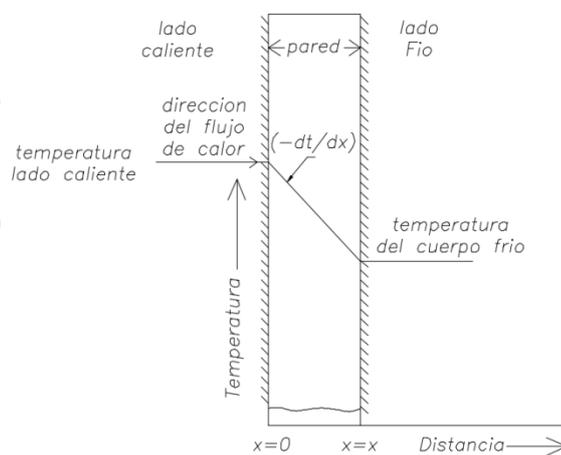


Fig. 8. Flujo de calor a través de una pared.

Fuente: Procesos de transferencia de calor - Donald Kern

Si  $t$  es la temperatura en cualquier punto de la pared y  $x$  es el grueso de la pared en dirección del flujo de calor, la cantidad de flujo de calor  $dQ$  es dada por

$$dQ = kA \left( -\frac{dt}{dx} \right) \quad \text{Btu/hr} \quad (2.48)$$

El término  $-dt/dx$  se llama gradiente de temperatura y tiene un signo negativo si se supuso una temperatura mayor en la cara de la pared en donde  $x = 0$  y menor en la cara donde  $x = X$ . En otras palabras, la cantidad instantánea de transferencia de calor es proporcional al área y a la diferencia de temperatura  $dt$  que impulsa el calor a través de la pared de espesor  $dx$ . La constante de proporcionalidad  $k$  es peculiar a la conducción de calor por conductividad y se le conoce por conductividad térmica. Esta conductividad se evalúa experimentalmente y está básicamente definida por la Ec. ( 2.48). La conductividad térmica de los sólidos tiene un amplio rango de valores numéricos dependiendo de si el sólido es relativamente un buen conductor del calor, tal como un metal, o un mal conductor como el asbesto. Estos últimos sirven como aislantes. Aun cuando la conducción de calor se asocia usualmente con la transferencia de calor a través de los sólidos, también es aplicable a gases y líquidos, con sus limitaciones.

**Convección.** La convección es la transferencia de calor entre partes relativamente calientes y frías de un fluido por medio de mezcla. Supóngase que un recipiente con un líquido se coloca sobre una llama caliente. El líquido que se encuentra en el fondo del recipiente se calienta y se vuelve menos denso que antes, debido a su expansión térmica. El líquido adyacente al fondo también es menos denso que la porción superior fría y asciende a través de ella, transmitiendo su calor por medio de mezcla conforme asciende. La transferencia de calor del líquido caliente del fondo del recipiente al resto, es convección natural o convección libre. Si se produce cualquiera otra agitación, tal como la provocada por un agitador, el proceso es de convección forzada. Este tipo de transferencia

de calor puede ser descrito en una ecuación que imita la forma de la ecuación de conducción y es dada por

$$dQ = hAdt \quad (2.49)$$

La constante de proporcionalidad  $h$  es un término sobre el cual tiene influencia la naturaleza del fluido y la forma de agitación, y debe ser evaluado experimentalmente. Se llama coeficiente de transferencia de calor. Cuando la Ec. (2.49) se escribe en su forma integrada,  $Q = kA\Delta t$ , se le conoce como la ley del enfriamiento de Newton.

**Radiación.** La radiación involucra la transferencia de energía radiante desde una fuente a un receptor. Cuando la radiación se emite desde una fuente a un receptor, parte de la energía se absorbe por el receptor y parte es reflejada por él. Basándose en la segunda ley de la termodinámica Boltzmann estableció que la velocidad a la cual una fuente da calor es

$$dQ = \sigma \epsilon dA T^4 \quad (2.50)$$

Esto se conoce como la ley de la cuarta potencia,  $T$  es la temperatura absoluta.  $\sigma$  es una constante dimensional, pero  $\epsilon$  es un factor peculiar a la radiación y se llama *emisividad*. La emisividad, igual que la conductividad térmica  $k$  o el coeficiente de transferencia de calor  $h$ , debe también determinarse experimentalmente.

**Procesos de transferencia de calor.** Se ha descrito a la transferencia de calor como el estudio de las velocidades a las cuales el calor se intercambia entre fuentes de calor y receptores, tratados usualmente de manera independiente.

Los procesos de transferencia de calor se relacionan con las razones de intercambio térmico, tales como los que ocurren en equipo de transferencia de calor, tanto en ingeniería

mecánica como en los procesos químicos. Este enfoque realza la importancia de las diferencias de temperatura entre la fuente y el receptor, lo que es, después de todo, el potencial por el cual la transferencia de calor se lleva a efecto.

Un problema típico de procesos de transferencia de calor involucra las cantidades de calor que deben transferirse, las razones a las cuales pueden transferirse debido a la naturaleza de los cuerpos, la diferencia de potencial, la extensión y arreglo de las superficies que separan la fuente y el receptor, y la cantidad de energía mecánica que debe disiparse para facilitar la transferencia de calor. Puesto que la transferencia de calor considera un intercambio en un sistema, la pérdida de calor por un cuerpo deberá ser igual al calor absorbido por otro dentro de los confines del mismo sistema. En los capítulos siguientes se estudiarán primero y en forma individual, los tres fenómenos de transferencia de calor, y después, la manera en la cual su combinación con fuentes y receptores simultáneos tienen influencia sobre un aparato determinado. Un gran número de los ejemplos que siguen, se ha seleccionado de procesos muy relacionados para permitir comparaciones graduales. Esto no deberá considerarse como limitación de la amplitud de los principios involucrados

**Teorías del calor:** El estudio de la transferencia de calor se facilitará grandemente mediante una cabal comprensión de la naturaleza del calor. Sin embargo, esta es una ventaja que no está fácilmente disponible para estudiantes de transferencia de calor o termodinámica, ya que se han descubierto muchas manifestaciones del calor, lo que ha impedido que una teoría simple las cubra a todas ellas.

Las leyes que pueden aplicarse a transiciones de masa pueden ser inaplicables a transiciones moleculares o atómicas, y aquellas que son aplicables a las bajas temperaturas pueden no serlo a las temperaturas altas. Para propósitos de ingeniería es necesario'

comenzar el estudio con información básica acerca de unos cuantos fenómenos. Las fases de una sustancia simple, sólida, líquida y gaseosa, están asociadas con su contenido de energía. En la fase sólida, las moléculas o átomos están muy cercanos, dando esto rigidez.

En la fase líquida existe suficiente energía térmica para extender la distancia de las moléculas adyacentes, de manera que se pierde la rigidez. En la fase de gas, la presencia de energía térmica adicional resulta en una separación relativamente completa de los átomos o moléculas, de manera que pueden permanecer en cualquier lugar de un espacio cerrado.

También se ha establecido que, dondequiera que ocurra un cambio de fase fuera de la región crítica, se involucra una gran cantidad de energía en esa transición.

**Intercambiador de calor:** Los intercambiadores de calor son equipos de transferencia de calor. Pueden clasificarse según su construcción o el servicio que prestan. En la Fig. 1.5 se muestra el intercambiador de calor de tubo y coraza. A continuación se da una breve descripción de los principales componentes de este equipo

**El elemento tubular.** La satisfacción de muchas demandas industriales requiere el uso de un gran número de horquillas de doble tubo. Estas consumen considerable área superficial así como presentan un número considerable de puntos en los cuales puede haber fugas. Cuando se requieren superficies grandes de transferencia de calor, pueden ser mejor obtenidas por medio del equipo de tubo coraza. El equipo de tubo y coraza involucra la expansión de un tubo en un espejo y la formación de un sello que no fuga bajo condiciones razonables de operación.

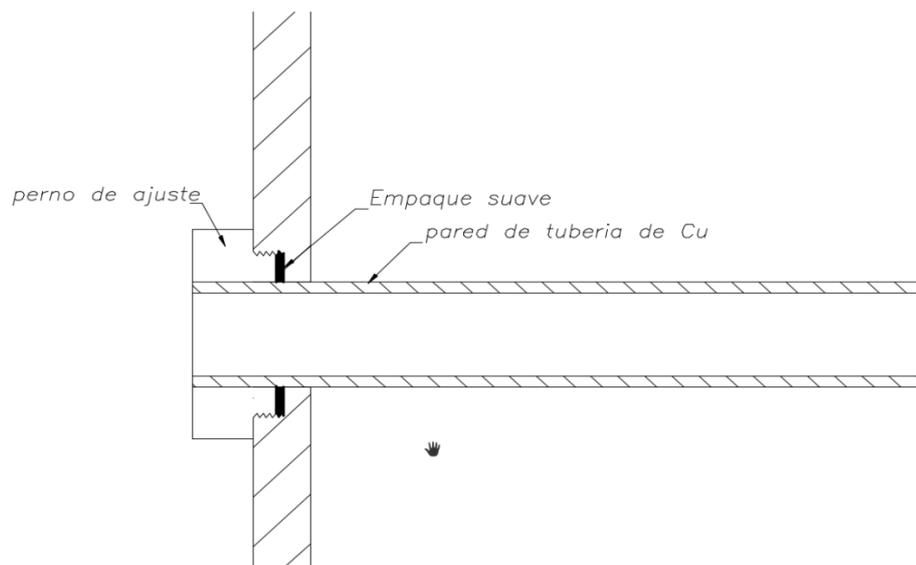
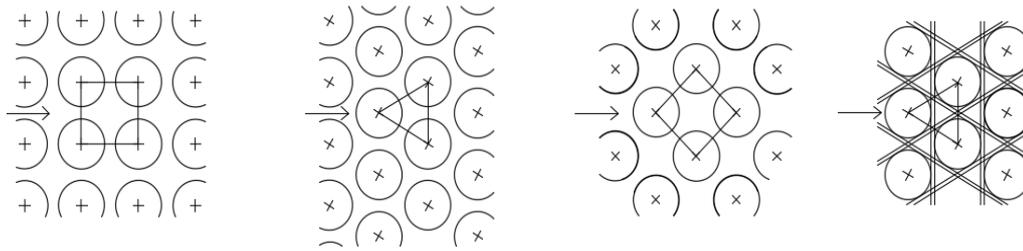


Fig. 9. Casquillos.

Fuente: Procesos de transferencia de calor - Donald Kern

Para el presente proyecto de tesis se tiene la instalación de los tubos según se muestra en la figura Fig. 8, por la facilidad de remoción para efectos de mantenimiento (reemplazo de tubería y limpieza), estos tubos se empacan en el espejo mediante un casquillo y empaquetaduras de  $3/32''$  (2.38mm) con la finalidad de evitar fugas.

**Tubos para el intercambiador de calor**, no deberán confundirse con tubos de acero u otro tipo de tubería de hierro, este tubo para intercambiador de calor se encuentra disponible en varios metales, los que incluyen acero, cobre, aluminio y aceros inoxidables, además se pueden obtener en diferentes espesores. Pero para nuestro caso se referirá a BWG de tubo para efectos de cálculo. En la **tabla 10 (DONALD Q. KERN)** del apéndice se enlistan los tamaños de tubo que generalmente están disponibles, de los cuales los de  $3/4''$  y  $1''$  de diámetro exterior son los más comunes en el diseño de intercambiadores de calor. Los datos de la **tabla 10 (DONALD Q. KERN)** han sido arreglados de tal manera que puedan ser útiles en los cálculos de transferencia de calor.



(a) Arreglo en cuadro (b) Arreglo triangular (c) Arreglo en cuadro rotado (d) Arreglo triangular con espacios para limpieza

Fig. 10. Arreglos comunes para los tubos de intercambiadores.

Fuente: Procesos de transferencia de calor - Donald Kern

**Espaciado de los tubos.** Los orificios de los tubos no pueden taladrarse muy cerca uno del otro, ya que una franja demasiado estrecha de metal entre los tubos adyacentes, debilita estructuralmente el cabezal de tubos o espejo. La distancia más corta entre dos orificios adyacentes es el claro o ligadura, y esto a la fecha, son casi estándar. Los tubos se colocan en arreglos ya sea triangulares o cuadrados como se muestra en la Fig. 9. La ventaja del espaciado cuadrado es que los tubos son accesibles para limpieza externa y tiene pequeña caída de presión cuando el flujo fluye en la dirección indicada en la Fig. 9 a. El espaciado de los tubos  $P_t$  es la distancia menor de centro a centro en tubos adyacentes. Los espaciados más comunes para arreglos cuadrados son de  $\frac{3}{4}$ " DE en un espacio cuadrado de 1" y de 1" DE en un espacio de cuadrado de  $1\frac{1}{4}$ ". Para arreglos triangulares estos son, de  $\frac{3}{4}$ " DE en espaciado triangular de  $\frac{15}{16}$ ",  $\frac{3}{4}$ " DE en un arreglo triangular de 1", y 1" DE en un arreglo de  $1\frac{1}{4}$ ". En la Fig. (9 c). El arreglo en cuadro ha sido rotado  $45^\circ$ , y permanece esencialmente lo mismo que en la Fig. (9 a) En la Fig. (9 d) se muestra una modificación del espaciado triangular que permite una limpieza mecánica. Si en los tubos se separan lo suficiente, es posible dejar los pasajes para limpieza indicados. Dicho esto para nuestro diseño se empleará el espaciado de los tubos según muestra la Fig. (9 d).

Además en un arreglo de tubos triangular, los tubos proporcionan el área de transferencia de calor requerido. Se determinó un arreglo de tubos lisos, triangular de  $30^\circ$ , debido a que éste arreglo permite la mayor área de transferencia de calor.

**Coraza.** Es la envolvente cilíndrica que contiene al arreglo de los tubos y a través de ella circula un fluido, tiene dos boquillas para la entrada y salida del fluido. El material seleccionado para este componente fue el acrílico, con la finalidad de visualizar el flujo del fluido. Las corazas de hasta 12" de diámetro IPS se fabrican de tubo de acero, como se dan en la **tabla 11 (DONALD Q. KERN)**. Sobre 12" e incluyendo 24" el diámetro exterior real y el diámetro nominal del tubo son los mismos. El espesor estándar para corazas con diámetros interiores de 12" a 24" inclusive, es de  $3/8$ ". Lo que es satisfactorio para presiones de operación por el lado de la coraza hasta 300 lb/pulg<sup>2</sup>. Se puede obtener mayores espesores para presiones superiores. Las corazas mayores a 24" de diámetro se fabrican roladas.

**Mamparas o deflectores.** Es claro que se logran coeficientes de transferencia de calor más altos cuando el líquido se mantiene en estado de turbulencia. Para inducir turbulencia fuera de los tubos, es costumbre emplear deflectores que hacen que el líquido fluya a través de la coraza a ángulos rectos con el eje de los tubos. Esto causa considerable turbulencia aun cuando por la coraza fluya una cantidad pequeña de líquido o gas. La distancia centro a centro entre los deflectores se llama espaciado de deflectores. Puesto que los deflectores pueden espaciarse ya sea muy junto o muy separado, la masa velocidad no depende enteramente del diámetro de la coraza. Únicamente el espaciado de los deflectores no es mayor que una distancia igual al diámetro interior de la coraza, o menor que la distancia igual a un quinto del diámetro interior de la coraza, los deflectores se mantienen firmemente mediante espaciadores, que consiste en un pasador atornillado en la cabeza los

tubos o espejo y un cierto número de trozos de tubos que forman hombreras entre deflectores adyacentes.

Hay varios tipos de deflectores que se emplean en los intercambiadores de calor, pero los más comunes son los deflectores segmentados que son hojas de metal perforadas cuyas alturas son generalmente un 75% del diámetro interior de la coraza, estos se conocen como deflectores con 25% de corte (usado para nuestro caso de diseño). Se utilizan para dirigir el fluido a través del arreglo de los tubos en el lado de la coraza. También funcionan como soportes para los tubos evitando hundimiento de éstos y daños por vibraciones.

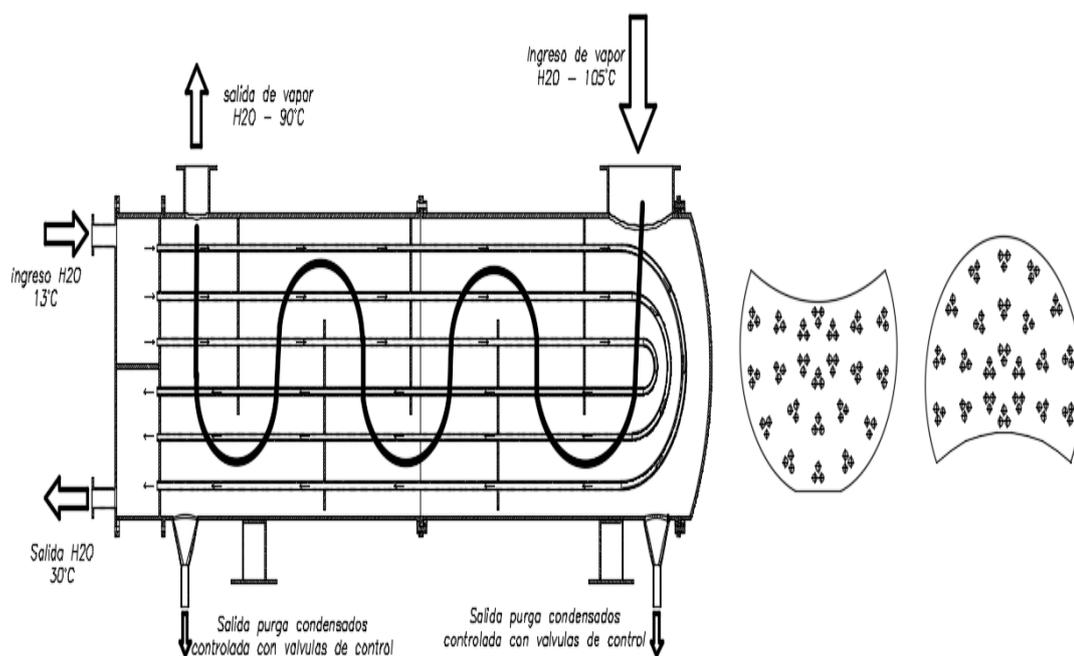


Fig. 11. Detalle de deflector segmentado.

Fuente: Procesos de transferencia de calor - Donald Kern

Elaboracion: Propia

**Espejos fijos.** Son elementos circulares que sirven para soportar los tubos y separar los fluidos que circulan a través de los tubos y la coraza. También se utilizan como bridas, para unir el cabezal con la coraza.

**Cabezal:** El cabezal está compuesto por el canal y la tapa.

5A. Canal. Es una sección tubular donde se ensambla la tapa semi-elipsoidal y la boquilla de entrada del fluido hacia los tubos.

5B. Tapa semi-elipsoidal. Es la sección donde entra el fluido y éste se distribuye hacia los tubos. Los cabezales elipsoidales son los más utilizados y recomendados para diámetros pequeños.

**Boquillas de coraza y cabezal:** Son los conductos por los cuales entra y sale el fluido del intercambiador.

**Bridas del cabezal:** Son los elementos que unen al cabezal y los espejos.

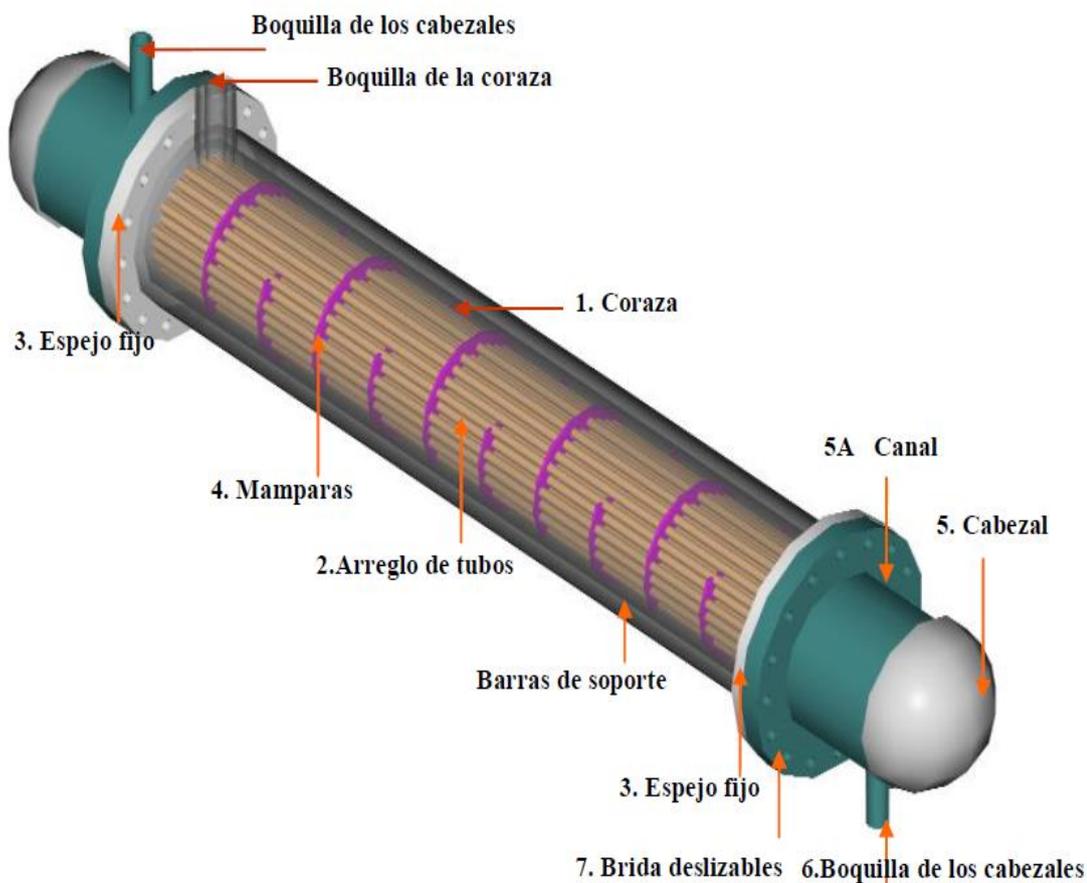
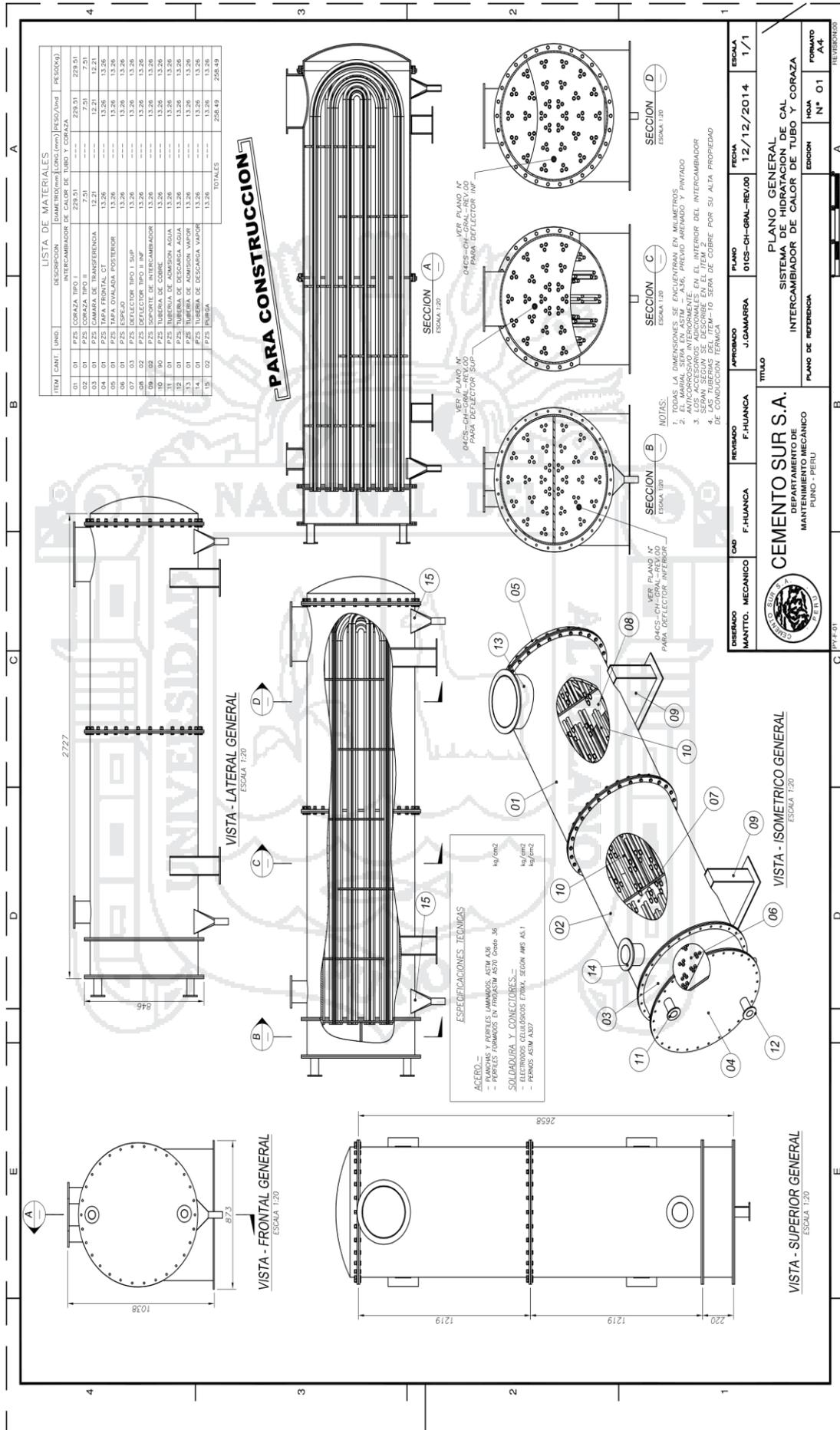


Fig. 12. Intercambiador 1-2 con tubos en U (Patterson foundry & machine Co.) para mayor detalle ver plano 01CS-CH-GRAL-REV.00 (ver Pág. 60 y/o anexo)

Fuente: Internet



## 2.4 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

### 2.4.1 HIPÓTESIS GENERAL

Mediante la implementación del intercambiador de calor de tubo y coraza, se logrará aumentar de manera eficiente la producción de cal hidratada, además de mitigar las emisiones de vapor al medio ambiente y reducir el número de paradas para realizar limpiezas y otras tareas de mantenimiento.

### 2.4.2 HIPÓTESIS ESPECÍFICAS

Con el diseño e instalación del intercambiador de calor, nos permitirá conseguir una mejor eficiencia en nuestra producción de cal hidratada

Con el intercambiador de calor de tubo y coraza se podrán realizar pruebas para distintos tipos de cal hidratada para ofrecer al mercado, pues la calidad de cal que ingresa al hidratador puede ser variada y la inyección de agua será desde 13°C hasta 30°C

Con el diseño de intercambiador de calor de tubo y coraza, se podrá mitigar el vapor de agua que se emana al medio ambiente.



**CAPÍTULO III**  
**DISEÑO METODOLÓGICO DE INVESTIGACIÓN**

### **3.1 TIPO DE DISEÑO DE INVESTIGACIÓN**

El presente trabajo de tesis es del tipo descriptivo e investigación acción descriptivo porque se refiere a la presentación de todos los resultados del estudio; e investigación acción debido al tratamiento matemático planteado que permite un validamiento cuantitativo de los resultados, este método se aplica con el propósito de establecer las conclusiones y generalizar los resultados de la investigación.

En cuanto se refiere al aspecto descriptivo, se determinaron las mejoras que habrá de generar la instalación del intercambiador de calor, ello gracias a que se estableció propuestas bien definidas para cumplir con los objetivos que me planteé.

Para cumplir mi primer objetivo, se recurrió a las bibliografías establecidas, catálogos, tablas, diagramas, con la finalidad de diseñar el intercambiador.

Para cumplir mi segundo objetivo, se presentaron los resultados de laboratorio, los cuales permitieron conocer de manera satisfactoria los resultados de lo propuesto.

Finalmente, para cumplir con mi tercer objetivo, el vapor de agua será direccionada mediante tuberías al intercambiador de calor y posterior a ello al tanque de agua y mitigación de vapor de agua por contacto directo (ver Pág. 173 – 174).

### **3.2 POBLACIÓN Y MUESTRA DE INVESTIGACIÓN**

La población a beneficiarse en forma directa serán todos trabajadores, empleados, funcionarios de la empresa y población en general (canon minero), pues este intercambiador minimizará los tiempos de paradas por limpieza y aumentará sus ingresos económicos, además se deja como punto de partida para quien quiera profundizar y realizar la aplicación para otro tipo de proceso.

### 3.3 UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA POBLACIÓN

CAL Y CEMENTO SUR SA, ubicado en el departamento de Puno, provincia de San Román, distrito de Caracoto en la ruta de la carretera Juliaca-Puno Km 11, Fig. 12, teniendo la necesidad realizar la ampliación de producción de cal hidratada por las razones descritas en el CAPÍTULO I, es que se plantea la implementación del intercambiador de calor de tubo y coraza en la planta de cal hidratada

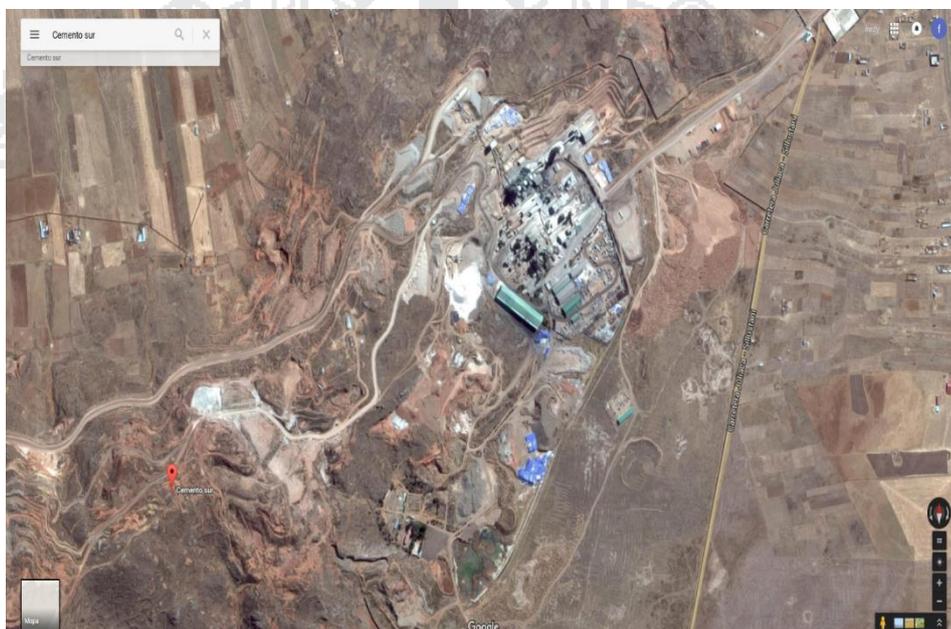


Fig. 13. Imagen panorámica CAL & CEMENTO SUR SA.

Fuente: Google Earth



Fig. 14. Planta molienda e hidratación de CAL & CEMENTO SUR SA.

Fuente: Google Earth

Esta implantación estará en el circuito normal de proceso, desde la alimentación pasada por la tolva de alimentación Fig.15 y balanza dosificadora Fig. 16.



Fig. 15. Tolvas de alimentación con motor vibratorio.

Fuente: Foto tomada el 2015 en la planta de cal – Cal & Cemento Sur SA



Fig. 16. Faja balanza

Fuente: Foto tomada el 2015 en la planta de cal- Cal & Cemento Sur SA

Dicha faja balanza alimentará al hidratador, y este a su vez para la reacción exotérmica usará agua de proceso, que por reacción propia del proceso generará vapor de agua que será succionado por un ventilador de vapor de agua Fig. 17, que es expulsado al medio ambiente, también razón de estudio en el presente trabajo de tesis.



Fig. 17. Ventilador extractor de vapor de agua.

Fuente: Foto tomada el 2015 en la planta de cal- Cal & Cemento Sur SA

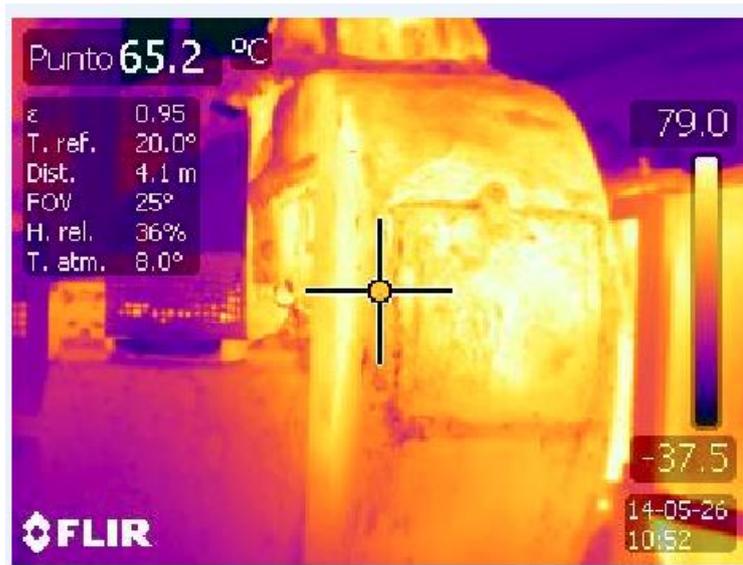


Fig. 18. Termografía a voluta de ventilador.

Fuente: Cámara termográfica FLIR – Cal & Cemento Sur SA



Fig. 19. Chimenea extractora de vapor de agua.

Fuente: Foto tomada el 2015 en la planta de cal – Cal & Cemento Sur SA



Fig. 20. Termografía a chimenea extractora de vapor.

Fuente: Cámara termográfica FLIR – Cal & Cemento Sur SA

La alimentación de agua hacia el hidratador viene suministrada por un tanque de agua de 5 mts<sup>3</sup> Fig. 21, bombeada por 02 bombas de 100 lpm (l/min) Fig. 22



Fig. 21. Tanque de agua 5 m<sup>3</sup>.



Fig. 22. Bombas de agua 100 lpm.

Fuente: Fotos tomadas el 2015 en la planta de cal – Cal & Cemento Sur SA

Teniendo como flujo de proceso el mostrado en la Fig. 23

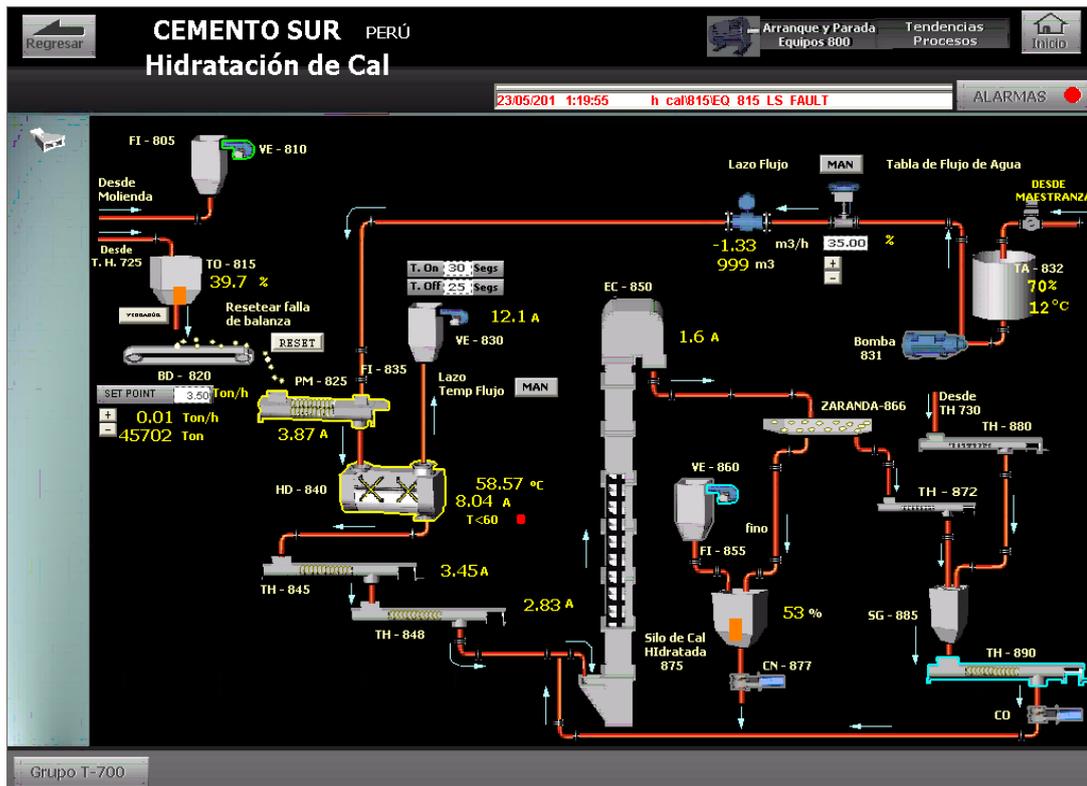


Fig. 23. Flujo de proceso hidratación de cal.

Fuente: foto tomada al panel de control de la planta de hidratación de cal – Cal & Cemento

Sur SA

En el planteamiento de la ampliación de capacidad de producción de cal hidratada según lo detallado en el CAPÍTULO I, la ubicación del tanque de agua y del intercambiador será a la altura del techo de la sala eléctrica Fig. 25 plano 01-HIDR-CAL-CESUR-REV.00, toda esta instalación será una nueva integración según lo mostrado en el plano 02-HIDR-CAL-CESUR-REV.00 mostrado en la Fig. 29, además del nuevo Flow Sheet según plano 02-HD-CESUR-REV.00, estos planos se visualizan también en los anexos (PLANOS DE FABRICACION Y FLOWSHEET).



Fig. 24. Sala Eléctrica.

Fuente: Foto tomada a la sala eléctrica, planta de molienda e hidratación de cal – Cal & Cemento Sur SA

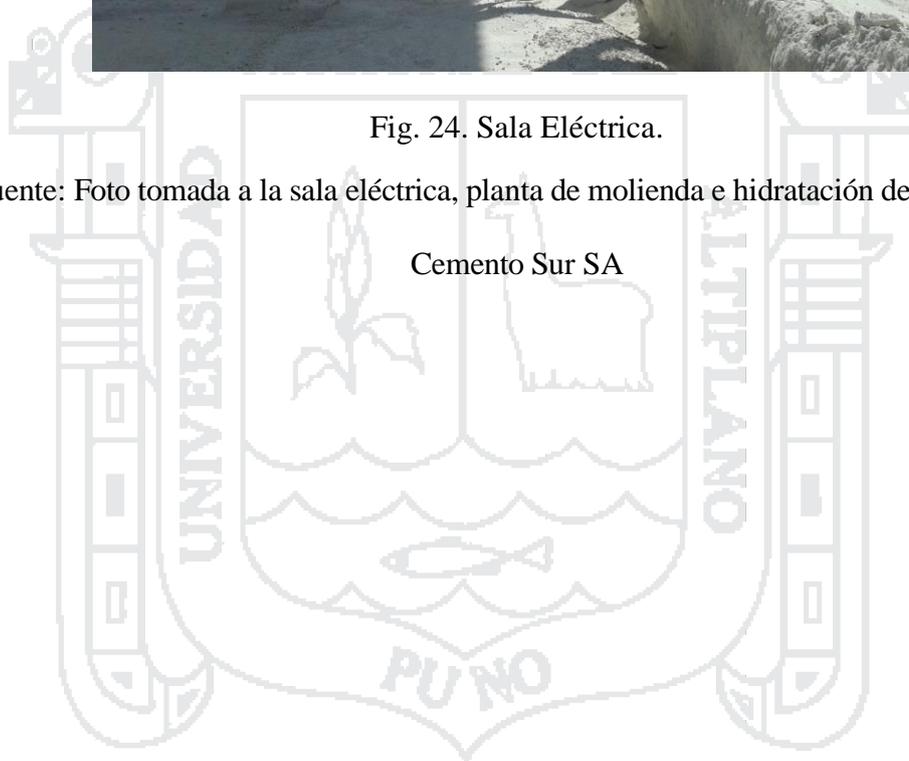
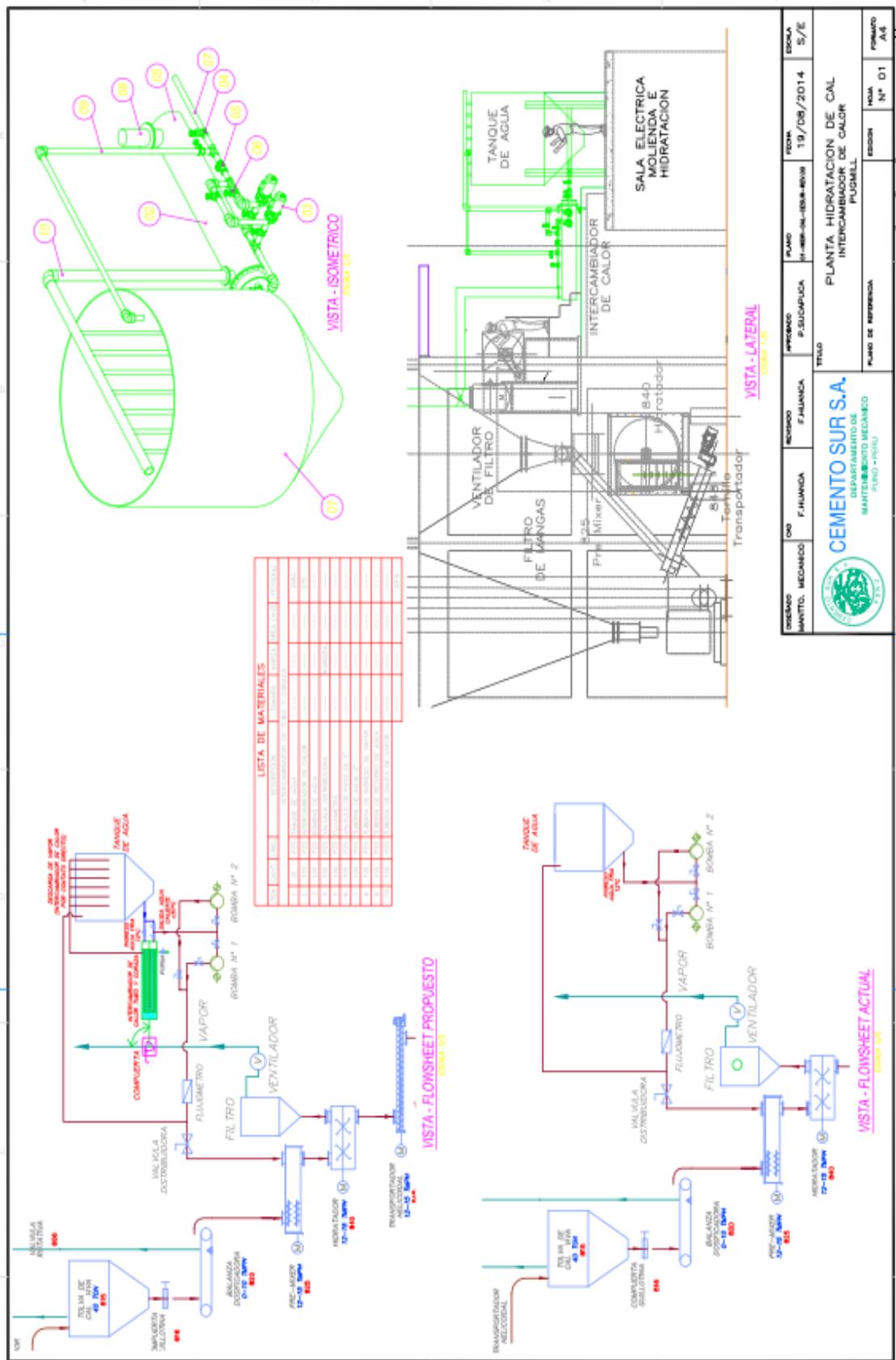


Fig. 25. Ubicación tanque de agua e intercambiador de calor.

Fuente: propia



### 3.4 MATERIALES EXPERIMENTALES

Para desarrollar el presente trabajo de tesis se utilizó y se revisó los siguientes materiales bibliográficos básicos para el cumplimiento de los objetivos:

- ↪ Bibliografía referente al tema de intercambiadores de calor y transferencia de masas.
- ↪ Documentos oficiales, catálogos, manuales de instituciones, empresas que comercializan equipos y materiales referidas al Sistema de transferencia de calor
- ↪ Otro de los materiales que se utilizó es el resultado de laboratorio.

### 3.5 RESTRICCIONES

No existen trabajos similares en nuestra planta, es por ello que no será posible realizar una evaluación del comportamiento de otros intercambiadores afines para así poder tener más conclusiones con respecto a este tema.

### 3.6 MÉTODO Y TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

#### 3.6.1 MÉTODO

La METODOLÓGICA de investigación que se plantea para el desarrollo del presente Proyecto de Tesis, es básicamente las pruebas de laboratorio y resultado de los mismos.

#### 3.6.2 TÉCNICAS

Para la ejecución de la presente investigación se vio por conveniente utilizar las siguientes técnicas:

### 3.6.3 OBSERVACIONES DIRECTAS

En vista del gran problema presentado en la producción de la planta, por el gran consumo de energía y baja recuperación de cal hidratada, se plantea calentar el agua, para ello se realizó la prueba casera de calentar agua por transferencia de calor al lado de la cámara de hidratación en una botella de 3 Lts, llegando este a una temperatura de 45°C en 15 minutos en fluido (agua) estático, en un área de transferencia de 23cm x 3cm (96cm<sup>2</sup>). De acuerdo a los resultados de la prueba casera (prueba de transferencia de calor) y pruebas de laboratorio (prueba de hidratación de cal, con inyecciones de agua desde 13°C a 30°C), motivaron a plantear la solución del problema presentado, además del sustento matemático presentado en el capítulo IV

Video 1. Proceso de transporte hidratación de cal (ver:

<https://www.youtube.com/watch?v=FDeGHAOx0uQ&feature=youtu.be>)

Fuente: Cal & Cemento Sur SA

Elaboración: Propia

## 3.4 CÁLCULOS JUSTIFICATIVOS PARA EL DISEÑO

En el Capítulo IV, desarrollamos detalladamente en lo que respecta a los cálculos que justifican la selección de los equipos y/o accesorios que componen el intercambiador de calor.

Desarrollándose los cálculos y dimensionamiento para los siguientes equipos y/o accesorios del sistema:

- Serpentes de transferencia de calor.
- Dimensionamiento del tubo de coraza conductor de vapor.
- Dimensionamiento del tubo conductor de agua.
- Cálculo de soporte principal del tanque de agua.

Todos los cálculos justificativos fueron determinados gracias a la aplicación de relaciones matemáticas, tablas, diagramas de selección, etc.; los cuales se adjuntan en la sección de Anexos del presente trabajo de tesis.

### **3.5 SELECCIÓN DE EQUIPOS Y ACCESORIOS**

Para proceder a realizar la selección de los equipos y/o accesorios del intercambiador de calor, se tiene bastante énfasis en efectuar primeramente los cálculos de diseño respectivos (Capítulo IV), y luego en base a estos resultados se procedió a seleccionar los equipos y accesorios, de catálogos, tablas y diagramas de diversos fabricantes y proveedores (Anexos), para posteriormente realizar la adquisición de estos equipos y accesorios seleccionados.

### **3.6 MONTAJE E INSTALACIÓN DE EQUIPOS Y ACCESORIOS**

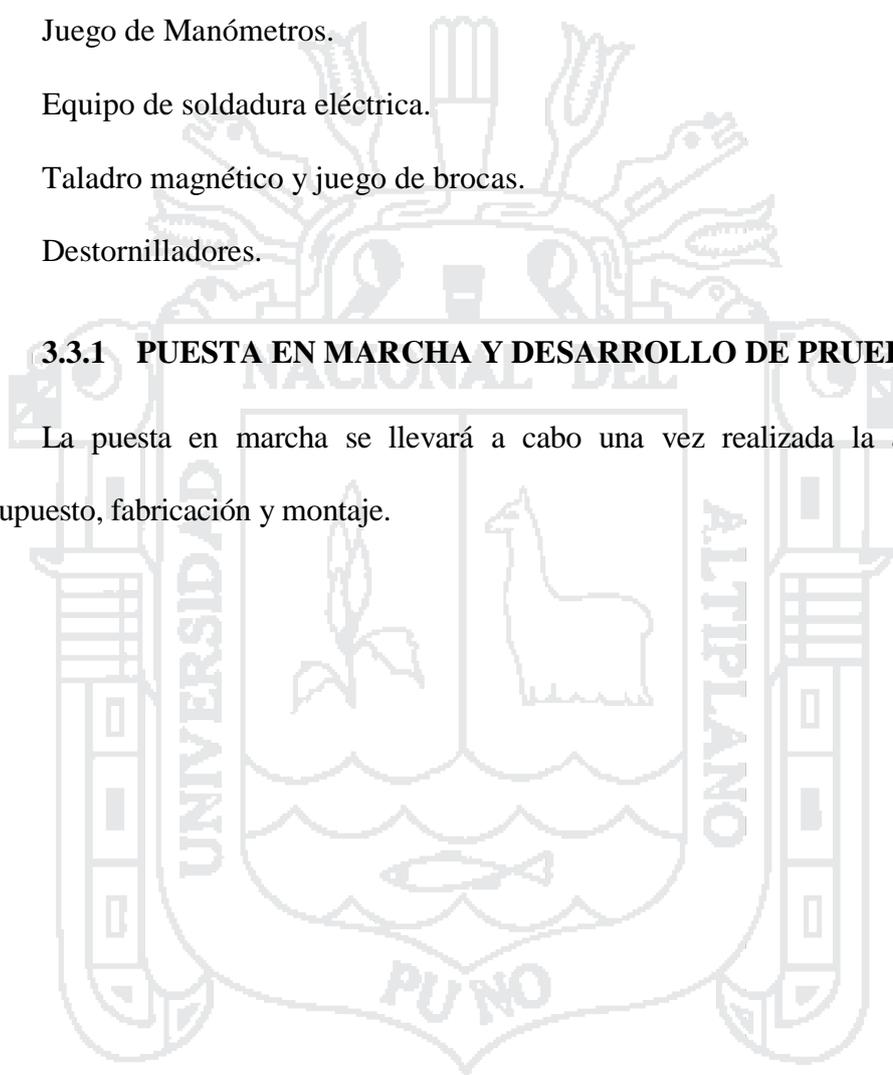
Para realizar el montaje del intercambiador de calor se debe utilizar lo siguiente:

- Planos de fabricación y montaje.
- Grúa P&H de 20 Ton.

- Tecles de 1Tn, 2Tn, 3Tn.
- Sogas, eslingas, estrobos.
- Juego de llaves mixtas.
- Rayador para tubos de cobre.
- Juego de Manómetros.
- Equipo de soldadura eléctrica.
- Taladro magnético y juego de brocas.
- Destornilladores.

### **3.3.1 PUESTA EN MARCHA Y DESARROLLO DE PRUEBAS**

La puesta en marcha se llevará a cabo una vez realizada la aprobación del presupuesto, fabricación y montaje.





**CAPÍTULO IV**  
**ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DE**  
**LA INVESTIGACIÓN**

#### 4.1 DESCRIPCIÓN

La elaboración del presente trabajo de tesis obedece a lo expuesto en el capítulo I, obteniendo pruebas de laboratorio según mostrado en el capítulo III donde se expone la necesidad de calentar el agua según muestra el cuadro.

Temperatura		tiempo de reacción	
12	°C	15	min
15	°C	13	min
20	°C	11	Min
25	°C	9	Min
30	°C	7	Min
35	°C	5	Min

Tabla 3. Resultado pruebas de laboratorio

Fuente: Cal & Cemento Sur SA

Elaboración: Propia

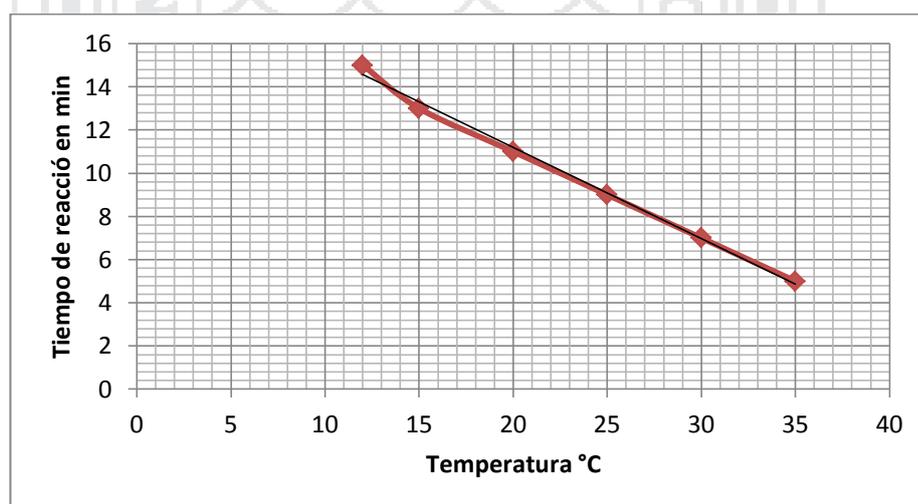


Fig. 26. Curva de Tiempo de reacción vs Temperatura de agua.

Fuente: Tabla 3

Elaboración: Propia

Cuyos datos obtenidos en laboratorio mostrados en la tabla 3 y Fig. 22, es completamente necesario calentar el agua, y el método empleado para el diseño de intercambiador de calor de tubo y coraza empleado, será con el objetivo de calentar el agua desde 13°C hasta 30°C, para ello aplicamos el método de cálculo empleado por Donald Kern

De acuerdo a la metodología de cálculo expuesto en el capítulo II, se requiere el cálculo de:

- (1) Cálculo de balance de calor

$$Q = WC(T_1 - T_2) = wc(t_2 - t_1) \quad (2.6)$$

- (2) Diferencia verdadera de temperatura  $At$ :

$$MLDT = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{2.3 \text{Log}\left(\frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}\right)} \quad (2.51)$$

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} \quad (2.17a)$$

$$S = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} \quad (2.17b)$$

Dónde:

$$At = MLDDT \times Ft \quad (2.52)$$

Para  $Ft$  se obtiene de la figura 18 del libro Donald Kern

- (3) Cálculo de las temperaturas calóricas  $T_c$  y  $t_c$ :

$$\text{De } \frac{\Delta t_{caliente}}{\Delta t_{fria}} \quad (2.53)$$

Para un valor de  $Kc$  obtener  $Fc$  de la figura 27 del libro Donald Kern

$$T_c = T_2 + F_c(T_1 - T_2) \quad (2.54)$$

$$t_c = t_1 + F_c(t_2 - t_1) \quad (2.55)$$

**FLUIDO CALIENTE: LADO CORAZA**

(4) cálculo del área de flujo

$$a_s = \frac{DIC'B}{144PT} \quad \text{pies}^2 \quad (2.1)$$

(5) Velocidad másica

$$G_s = \frac{W}{a_s} \quad \frac{lb}{h\pi e^2} \quad (2.2)$$

(6) Cálculo de  $D_e$

$$d_e = \frac{4\left(\frac{0.86}{2}PT^2 - \frac{1}{2}\pi DE\right)}{\frac{1}{2}\pi DE} \quad \text{pulg} \quad (2.4)$$

$$D_e = \frac{d_e}{12} \quad \text{pulg} \quad (2.3)$$

$$\Rightarrow Re_s = \frac{D_e G_s}{\mu}$$

(7) obtener  $j_H$  de la figura 28 de Donald Kern

(8) A  $T_c$  obtener  $c$  y  $k$  y computar por

$$\left(\frac{c\mu}{k}\right)^{\frac{1}{3}}$$

$$(9) \text{ de } j_H = \left(\frac{h_0 D_e}{k}\right) \left(\frac{c\mu}{k}\right)^{-\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14}$$

(2.56)

Calcular  $h_o$ :

$$h_o = j_H \left(\frac{k}{D_e}\right) \left(\frac{c\mu}{k}\right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14}$$

(2.57)

$\left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14} = 1.00$  Por tratarse de un fluido no viscoso

(10) temperatura de la pared del tubo

$$t_w = t_c + \frac{\frac{h_0}{\phi_0}}{\frac{h_{i0} + h_0}{\phi_t + \phi_0}} (Tc - tc)$$

(2.58)

(11) obtener  $u_w$  de  $\phi_s = \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14}$

(2.59)

(12) cálculo del coeficiente corregido:

$$h_o = h_0 \phi_s \quad (2.60)$$

(13) coeficiente total  $U_C$

$$U_C = \frac{h_{i0} h_o}{h_{i0} + h_i} \quad (2.66)$$

**FLUIDO FRIO: LADO DE LOS TUBOS**

(4) Área de flujo

$$a_t = \frac{Nt * \text{area de flujo/tubo}}{N^\circ \text{ pasos}} \quad \text{pies}^2$$

$$a_t = \frac{Nt * a'_t}{144n} \quad \text{pies}^2 \quad (2.61)$$

(5) Masa velocidad

$$G_t = \frac{w}{a_t} \quad \frac{lb}{h * \pi e^2} \quad (2.61b)$$

$$(6) Re_t = \frac{D G_t}{\mu} \quad (2.62)$$

(7) Obtener  $j_H$  de la figura 28 de Donald Kern

(8') A  $T_c$  obtener  $c$  y  $k$  y computar por  $\left(\frac{c\mu}{k}\right)^{\frac{1}{3}}$

$$(9') \text{ De } j_H = \left(\frac{h_i D_o}{k}\right) \left(\frac{c\mu}{k}\right)^{-\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14}$$

Calcular  $h_i$

$$h_i = j_H \left(\frac{k}{D_o}\right) \left(\frac{c\mu}{k}\right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14} \quad (2.63)$$

$\left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14} = 1.00$  Por tratarse de un fluido no viscoso

(10') temperatura de la pared del tubo

$$\frac{h_{i0}}{\phi_t} = \frac{h_i}{\phi_t} X \frac{DI}{DE} \quad (2.64)$$

(11'') obtener  $u_w$  de  $\phi_s = \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14}$

(12') coeficiente de corrección

$$h_{i0} = h_{i0} \phi_t \quad (2.65)$$

(14) coeficiente total de diseño  $U_D$

$$U_D = \frac{Q}{A\Delta t} \quad (2.67)$$

(15) factor de obstrucción

$$R_d = \frac{U_C - U_D}{U_C U_D} \quad (2.68)$$

⇒ SI  $R_d$  CALCULADO ES MAYOR O IGUAL AL  $R_d$  PERMITIDO, ENTONCES CONTINUAR CON EL CÁLCULO DE CAIDA DE PRESIONES

**CÁLCULO DE CAIDA DE PRESION**

FLUIDO CALIENTE: LADO FLUIDO CALIENTE: LADO DE LOS

CORAZA

TUBOS

(1) hallar “ $f$ ” y “ $s$ ”

(2) Cálculo del número de cruces

$$N + 1 = 12 \frac{L}{B} \quad (2.43)$$

(3) caída de presión lado coraza

$$\Delta P_s = \frac{f G_s^2 D_s (N+1)}{5.22 \times 10^{10} D_e s \phi_t} \quad \frac{lb}{pulg^2} \quad (2.44)$$

DONDE  $\Delta P_s > \Delta P_{PERMITIDO}$

(1) Hallar  $f$  de Ret lado tubos

(2) Cálculo de caída de presión lado tubos

$$\Delta P_t = \frac{f G_t^2 L n}{5.22 \times 10^{10} D_s \phi_t} \quad \frac{lb}{pulg^2} \quad (2.45)$$

(3') Cálculo de caída de presión lado tubos

$$\Delta P_r = \frac{4n}{s} \frac{V^2}{2g'} \frac{62.5}{144} \quad \frac{lb}{pulg^2}$$

(2.46)

Hallar  $\frac{V^2}{2g'} \frac{62.5}{144}$  a  $G_t \left( \frac{lb}{h * pulg^2} \right)$  según

Figura 27

⇒ Cálculo de caída de presión total

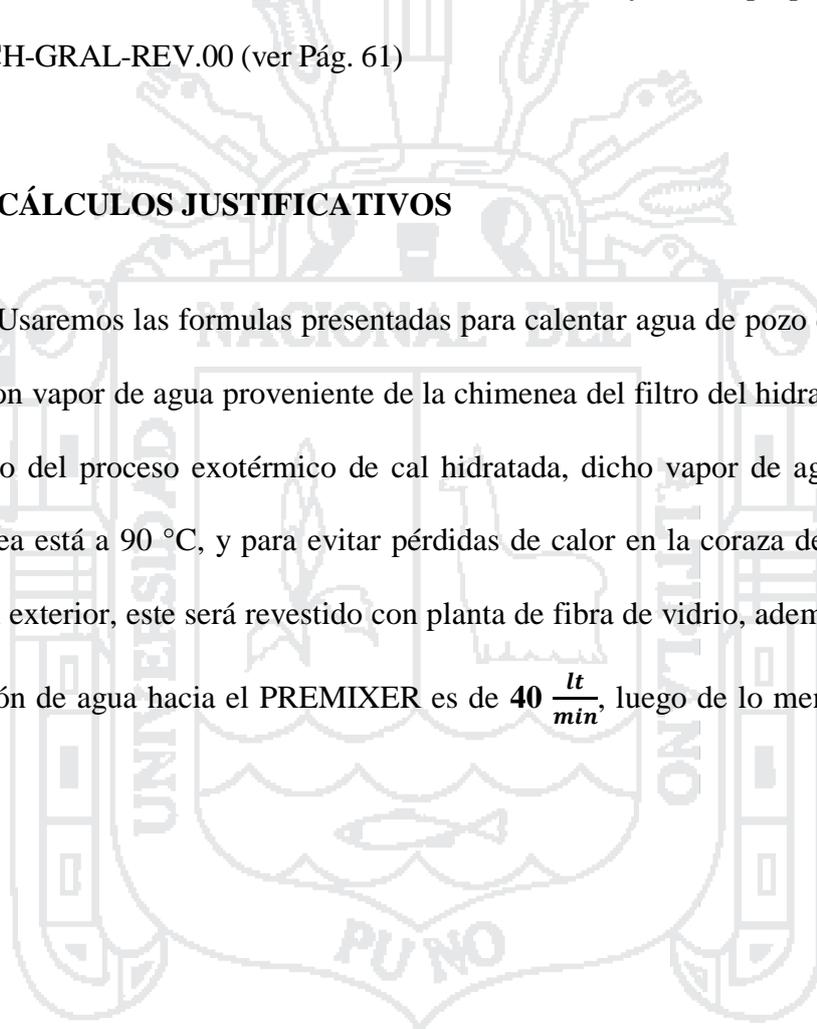
$$AP = \Delta P_t + \Delta P_r \quad \frac{lb}{pulg^2} \quad (2.47)$$

DONDE  $AP > \Delta P_{PERMITIDO}$

Según las formulas presentadas se realiza los cálculos pertinentes para la afirmación correcta del diseño del intercambiador de calor de tubo y coraza propuesto según plano 01CS-CH-GRAL-REV.00 (ver Pág. 61)

## 4.2 CÁLCULOS JUSTIFICATIVOS

Usaremos las formulas presentadas para calentar agua de pozo desde 12°C hasta 30°C con vapor de agua proveniente de la chimenea del filtro del hidratador PUGMILL producto del proceso exotérmico de cal hidratada, dicho vapor de agua tomada en la chimenea está a 90 °C, y para evitar pérdidas de calor en la coraza del intercambiador hacia el exterior, este será revestido con planta de fibra de vidrio, además se sabe que la inyección de agua hacia el PREMIXER es de  $40 \frac{lt}{min}$ , luego de lo mencionado se tiene que.



**FLUIDO CALEFACTOR: VAPOR**

**FLUIDO A CALENTAR: AGUA**

**DE AGUA**

$T_1 = 90^{\circ}\text{C} = 194^{\circ}\text{F}$

$T_2 = 87^{\circ}\text{C} = 189^{\circ}\text{F}$

W = a ser calculado

$C = 1.01 \frac{\text{BTU}}{\text{lb}^{\circ}\text{F}}$

$\mu = \text{hallarse en tablas } \frac{\text{lb}}{\text{h} \cdot \text{pie}}$

$k = \text{hallarse en tablas } \frac{\text{BTU}}{\text{h} \cdot \text{pie}^2 \cdot ^{\circ}\text{F} / \text{pie}}$

DI = 27.57 pulg

B = 15.75 pulg

N = 5

Paso = 1

C' = 0.5 pulg

$t_1 = 12^{\circ}\text{C} = 54^{\circ}\text{F}$

$t_2 = 30^{\circ}\text{C} = 86^{\circ}\text{F}$

Flujo volumétrico =  $100 \frac{\text{lt}}{\text{min}}$

$w = 13227 \frac{\text{lb}}{\text{h}}$

$c = 0.67 \frac{\text{BTU}}{\text{lb}^{\circ}\text{F}}$

$\mu = \text{hallarse en tablas } \frac{\text{lb}}{\text{h} \cdot \text{pie}}$

$k = \text{hallarse en tablas } \frac{\text{BTU}}{\text{h} \cdot \text{pie}^2 \cdot ^{\circ}\text{F} / \text{pie}}$

$\rho = 62.43 \frac{\text{lb}}{\text{pie}^3}$

DE = 0.75 pulg.

Arreglo en triangulo =  $1 \frac{1}{4}$  pulg

DWG = 13

n = 2

L = 649.61 pie

Nt = 45

1. Cálculo del balance de calor  $Q$ :

Reemplazando datos en la ecuación (2.6)

$$Q = WC(T_1 - T_2) = wc(t_2 - t_1)$$

$$Q = 13227 * 0.67 * (86 - 54)$$

$$Q = 287125.09 \frac{BTU}{h}$$

De lo calculado, calcularemos W para flujo calefactor

$$Q = WC(T_1 - T_2)$$

$$W = \frac{Q}{C(T_1 - T_2)}$$

$$W = \frac{287125.09}{1.01 * (212 - 203)}$$

$$W = 31586.92 \frac{lb}{h}$$

2. Cálculo de la diferencia verdadera de temperatura  $\Delta t$ :

Teniendo los siguientes datos:

Fluido caliente		Fluido frio					
T1	212 °F	86 °F	t2	126	$\Delta t_2$		
T2	203 °F	53.6 °F	t1	149.4	$\Delta t_1$		

Y usando las ecuaciones:

$$MLDT = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{2.3 \log\left(\frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}\right)} \quad (2.51)$$

$$MLDT = \frac{126 - 149.4}{2.3 \operatorname{Log}\left(\frac{126}{149.4}\right)}$$

$$MLDT = 137.5^{\circ}F$$

A continuación se calculara R y S usando las ecuaciones respectivas

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} \quad (2.17a)$$

$$R = \frac{212 - 203}{86 - 53.6}$$

$$R = 0.278$$

$$S = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - T_2} \quad (2.17b)$$

$$S = \frac{86 - 53.6}{212 - 203}$$

$$S = 0.277$$

Para R y S calculados hallamos  $F_T$  (factor de diferencia de temperatura) de la Fig. 18,

Dónde:

$$F_T = 1$$

Con estos datos hallamos la diferencia verdadera de temperatura usando la ecuación

(2.52)

$$At = MLDDTxFt \quad (2.52)$$

$$At = 137.5 * 1$$

$$At = 137.5 \text{ } ^\circ\text{F}$$

### 3. Cálculo de las temperaturas calóricas $T_c$ y $t_c$

$$De \frac{\Delta t_{caliente}}{\Delta t_{fria}} \quad (2.53)$$

$$\frac{126}{149} = 0.84$$

Para un valor de  $Kc = 3$  obtenemos  $F_c$  de la figura 27 del libro Donald Kern

$$F_c = 0.42$$

Entonces reemplazando en las ecuaciones (2.54) y (2.55) para  $T_c$  y  $t_c$  respectivamente

$$T_c = T_2 + F_c(T_1 - T_2) \quad (2.54)$$

$$T_c = 203 + 0.42 * (212 - 203)$$

$$T_c = 206.78 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$t_c = t_1 + F_c(t_2 - t_1) \quad (2.55)$$

$$t_c = 53.6 + 0.42 * (86 - 53.6)$$

$$t_c = 67.21 \text{ } ^\circ\text{F}$$

### CÁLCULOS LADO CORAZA

#### 4. Cálculo del área de flujo

Reemplazando datos en la ecuación

$$a_s = \frac{DIC' B}{144PT} \text{ pies}^2 \quad (2.1)$$

$$a_s = \frac{30.07 * 0.5 * 15.75}{144 * 1.25}$$

$$a_s = 1.315 \text{ pies}^2$$

#### 5. Cálculo de la velocidad másica

$$G_s = \frac{W}{a_s} \quad \frac{lb}{h * pie^2} \quad (2.2)$$

$$G_s = \frac{31586.92}{1.21}$$

$$G_s = 24007.99 \frac{lb}{h * pie^2}$$

#### 6. Cálculo del N° de Reynolds.

Reemplazando datos en la ecuación:

$$d_e = \frac{4\left(\frac{0.86}{2} * PT^2 - \frac{\frac{1}{2}\pi DE}{4}\right)}{\frac{1}{2} * \pi DE} \quad \text{pulg} \quad (2.4)$$

$$d_e = \frac{4\left(\frac{0.86}{2} * 1.25^2 - \frac{\frac{1}{2} * \pi * 0.75}{4}\right)}{\frac{1}{2} * \pi * 0.75}$$

$$d_e = 1.531$$

Reemplazando en

$$D_e = \frac{d_e}{12} \quad \text{pulg} \quad (2.3)$$

$$D_e = \frac{1.531}{12} \text{ pulg}$$

$$D_e = 0.1276 \text{ pulg}$$

$$\Rightarrow Re_s = \frac{D_e G_s}{\mu} \quad (2.62)$$

Para datos de la viscosidad de gases  $\mu$ , las coordenadas según tabla de la Fig. 15, son (8,16) entonces:

$$\mu = 0.01 * 2.42$$

$$\mu = 0.0242$$

Reemplazando datos hallados en la ecuación (2.62)

$$Re_s = \frac{0.1277 * 24007.99}{0.0242}$$

$$Re_s = 126589.3$$

Y siendo que  $Re_s > 2500$  entonces el flujo es turbulento

7. Obtención de  $j_H$

Según  $Re_s$  calculado, hallamos  $j_H$  en la Fig. 28

$$\Rightarrow j_H = 70$$

8. A  $T_c$  calculado hallamos “ $c$ ” y “ $k$ ”

A  $T_c = 206.78^\circ F$  hallamos “ $c$ ” según la Fig. 2

$$c = 0.9 \frac{BTU}{lb * ^\circ F}$$

Según la TABLA 5 existen datos para “ $k$ ” en temperaturas de  $115^\circ F$  y  $212^\circ F$  para vapor de agua, por lo tanto interpolamos para hallar “ $k$ ” a  $206.78^\circ F$

Tc °F	K
115	0.012
206.78	0.013609
212	0.0137

Dónde:

$$k = 0.013609 \frac{BTU}{lb * pie^2 * ^\circ F / pie}$$

9. Calculamos  $h_o$

Reemplazando datos en:

$$h_o = j_H \left( \frac{k}{D_e} \right) \left( \frac{c\mu}{k} \right)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (2.63)$$

Dónde:

$$\left( \frac{c\mu}{k} \right)^{\frac{1}{3}} = \left( \frac{0.09 * 0.0242}{0.013609} \right)^{\frac{1}{3}} = 1.169721 \quad \text{Y para } \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} = 1 \text{ por tratarse de un flujo no}$$

viscoso, reemplazar datos en la ecuación (5.35)

$$h_o = 70 * \left( \frac{0.013609}{0.127602} \right) * 1.169721 * 1$$

$$h_o = 8.732419 \frac{BTU}{h * \pi e^2 * ^\circ F}$$

**10.** Cálculo de la temperatura de la pared del tubo

Reemplazando en la ecuación:

$$t_w = t_c + \frac{\frac{h_o}{\phi_o}}{\frac{h_{i_o} + h_o}{\phi_t + \phi_o}} (T_c - t_c) \quad (2.58)$$

Se calculara en el ítem **10'**, debido a que se requieren datos del cálculo del lado de los tubos

**11.** Obtención de  $\mu_w$  donde  $\phi_t = \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} = 1$  por tratarse de un flujo no viscoso

**12.** Cálculo del coeficiente de corrección

Reemplazando en la ecuación:

$$h_o = h_o \phi_s \quad (2.60)$$

$$h_o = 8.732419 * 1$$

$$h_o = 8.732419 \frac{BTU}{h * \pi e^2 * ^\circ F}$$

**CÁLCULOS LADO TUBOS**

**4'. Cálculo del área de flujo**

Según la ecuación:

$$a_t = \frac{Nt*a'_t}{144n} \text{ pies}^2 \quad (2.61)$$

$$a'_t = 0.247 \text{ pulg}^2, \text{ según la TABLA 10}$$

⇒ Reemplazando datos en la ecuación (2.61)

$$a_t = \frac{Nt*a'_t}{144n} \text{ pies}^2$$

$$a_t = \frac{45*0.247}{144*2}$$

$$a_t = \mathbf{0.03859375 \text{ pie}^2}$$

**5'. Cálculo de la velocidad másica**

Reemplazando datos en la ecuación:

$$G_t = \frac{w}{a_t} \frac{lb}{h*pie^2} \quad (2.61b)$$

$$G_t = \frac{13227}{0.03859375}$$

$$G_t = \mathbf{342715.98 \frac{lb}{h*pie^2}}$$

**6'. Cálculo del N° de Reynolds**

A  $t_c = 67.21 \text{ }^\circ\text{F}$ , hallamos “ $\mu$ ” de la Fig. 14. Para datos de la viscosidad de líquidos  $\mu$ , las coordenadas según tabla de la Fig. 14, son (10.2, 13) entonces:

$$\mu = 1.1 * 2.42$$

$$\mu = 2.662$$

Reemplazamos en la ecuación:

$$Re_t = \frac{DG_t}{\mu} \quad (2.62)$$

$$Re_t = \frac{0.0625 * 342715.98}{2.662}$$

$$Re_t = 8046.48717$$

Siendo que  $Re_t > 2500$ , entonces es flujo turbulento

7'. Obtención de “ $j_H$ ”

Según  $Re_t$  calculado y  $\frac{L}{D} = \frac{649.61}{0.0625} = 10393$ , hallamos  $j_H$  en la Fig. 24

$$\Rightarrow j_H = 27$$

8'. A  $t_c$  obtener  $c$  y  $k$

A  $t_c = 67.21^\circ F$  hallamos “ $c$ ” de la Fig. 2

$$c = 1.0 \frac{BTU}{lb * ^\circ F}$$

Según la TABLA 5, existen datos para “ $k$ ” en temperaturas de  $32^\circ F$  y  $86^\circ F$  para agua, por lo tanto interpolamos para hallar “ $k$ ” a  $67.21^\circ F$

Tc °F	K
32	0.33
67.21	0.346952
86	0.356

Dónde:

$$k = 0.346952 \frac{BTU}{lb * pie^2 * ^\circ F / pie}$$

9'. Calculamos  $h_i$

Reemplazando datos en:

$$h_i = j_H \left( \frac{k}{D_o} \right) \left( \frac{c \mu}{k} \right)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (2.63)$$

Dónde:

$$\left(\frac{c\mu}{k}\right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{1 \cdot 2.226}{0.346952}\right)^{\frac{1}{3}} = 1.9723 \text{ Y para } \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14} = 1 \text{ por tratarse de un flujo no viscoso,}$$

reemplazar datos en la ecuación (5.42)

$$h_i = 27 * \left(\frac{0.346952}{0.0625}\right) * 1.9723 * 1$$

$$h_i = 295.62 \frac{BTU}{h \cdot pie^2 \cdot ^\circ F}$$

10'. Cálculo de  $h_{i0}$

Usando la ecuación:

$$\frac{h_{i0}}{\phi_t} = \frac{h_i}{\phi_t} \times \frac{DI}{DE} \quad (2.64)$$

Donde  $\phi_t = \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14} = 1$  pues se trata de un fluido no viscoso

$$h_{i0} = 295.62 * \frac{30.07}{0.75}$$

$$h_{i0} = 11854.9324 \frac{BTU}{h \cdot pie^2 \cdot ^\circ F}$$

Además con este dato calculamos lo mencionado en el Ítem 10, donde la temperatura de la pared de los tubos será:

$$t_w = t_c + \frac{\frac{h_0}{\phi_0}}{\frac{h_{i0}}{\phi_t} + \frac{h_0}{\phi_0}} (Tc - tc) \quad (2.58)$$

$$t_w = 67.21 + \frac{\frac{h_0}{\phi_0}}{118549324 + 8.732419} * (206.78 - 67.21)$$

$$t_w = 67.31 \text{ } ^\circ F$$

11'. Obtener  $u_w$  de  $\phi_s = \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14} = 1$ , por tratarse de un fluido no viscoso

12'. Cálculo del coeficiente de corrección:

Reemplazar en la fórmula:

$$h_{i0} = h_{i0} \phi_t \quad (2.65)$$

$$h_{i0} = 11854.9324 * 1$$

$$h_{i0} = 11854.9324 \frac{BTU}{h * pie^2 * ^\circ F}$$

Por lo tanto, de los datos obtenidos tanto en el lado de la coraza como en el del tubo, procedemos con:

**13.** Cálculo del coeficiente total  $U_c$ :

Reemplazando datos calculados en la ecuación:

$$U_C = \frac{h_{i0} h_o}{h_{i0} + h_i} \quad (2.66)$$

$$U_C = \frac{11854.9324 * 8.732419}{11854.9324 + 295.619239}$$

$$U_C = 8.51996$$

**14.** Cálculo del coeficiente total de diseño.

Reemplazando datos en la ecuación:

$$U_D = \frac{Q}{A \Delta t} \quad (2.67)$$

Donde  $A = a'' nL \text{ pies}^2$  y  $a'' = 0.1963 \frac{pie^2}{pie \text{ lineal}}$ , dato obtenido de la TABLA 10.

$$\Rightarrow A = 0.1963 * 2 * 649.61$$

$$A = 255.0354 \text{ pie}^2$$

Reemplazando datos en (5.46)

$$U_D = \frac{287125.09}{255.0354 * 137.5224}$$

$$U_D = 8.186481$$

**15.** Cálculo del factor de obstrucción

Reemplazando datos calculados en la ecuación.

$$R_d = \frac{U_C - U_D}{U_C U_D} \quad (2.68)$$

$$R_d = \frac{8.519962 - 8.186481}{8.519962 * 8.186481}$$

$$R_d = 0.004781$$

De los datos calculados  $U_C$ ,  $U_D$  y  $R_d$ , se tiene:

$U_C$	8.519962
$U_D$	8.186481
$R_d$ calculado	0.004781
$R_d$ permitido	0.001 de la TABLA 8

Como se puede observar  $R_d$  calculado  $>$   $R_d$  permitido por lo tanto proseguiremos a realizar el cálculo de caídas de presión como siguiente paso.

### CÁLCULO DE CAIDAS DE PRESION

#### LADO CORAZA

(1). Hallar “ $f$ ” y “ $s$ ” De:

$Re_s = 138097.4$  Hallamos “ $f$ ” y “ $s$ ” de la Fig. 29 y Fig. 6 respectivamente

$$\Rightarrow f = 0.0013$$

$$\Rightarrow s = 0.96$$

(2). Cálculo del número de cruces:

$$N + 1 = 12 \frac{L}{B} \quad (2.43)$$

$$N + 1 = 12 * \frac{649.61}{15.75}$$

$$N + 1 = 495$$

(3). Cálculo de la caída de presión

Reemplazando en la ecuación:

$$\Delta P_s = \frac{f G_s^2 D_s (N+1)}{5.22 \times 10^{10} D_e s \phi_t} \quad \frac{lb}{pulg^2} \quad (2.44)$$

$$\Delta P_s = \frac{0.0013 * 24007.99^2 * 2.506377 * 495}{5.22 \times 10^{10} * 0.127602 * 0.96 * 1}$$

$$\Delta P_s = 0.139566 \frac{lb}{pulg^2}$$

Siendo que:  $\Delta P_{s \text{ permitido}} = 10 \frac{lb}{pulg^2}$

$$\Rightarrow \Delta P_s < \Delta P_{s \text{ permitido}}$$

**LADO TUBOS**

(1') Hallar f de Ret lado tubos

$Re_s = 8046.48717$  Hallamos “f” y “s” de la Fig. 29 y Fig. 6 respectivamente

$$\Rightarrow f = 0.00016$$

$$\Rightarrow s = 1$$

(2') Cálculo de caída de presión lado tubos

Reemplazando datos en la ecuación

$$\Delta P_t = \frac{f G_t^2 L_n}{5.22 \times 10^{10} D_s \phi_t} \quad \frac{lb}{pulg^2} \quad (2.45)$$

$$\Delta P_t = \frac{0.00016 * 342715.98^2 * 649.61 * 2}{5.22 * 10^{10} * 0.0625 * 1 * 1}$$

$$\Delta P_t = 7.4837 \frac{lb}{pulg^2}$$

(3') Cálculo de pérdida de presión lado tunos

$$\Delta P_r = \frac{4n}{s} \frac{V^2}{2g'} \frac{62.5}{144} \frac{lb}{pulg^2} \quad (2.46)$$

Hallamos  $\frac{V^2}{2g'} \frac{62.5}{144} = 0.0155$  a  $Gt = 342715.98 \left(\frac{lb}{h * pulg^2}\right)$  según Fig. 27, y reemplazando

en la ecuación anterior:

$$\Delta P_r = \frac{4 * 2}{1} * 0.0155$$

$$\Delta P_r = 0.12 \frac{lb}{pulg^2}$$

⇒ Cálculo de caída de presión total

$$AP = \Delta P_t + \Delta P_r \frac{lb}{pulg^2} \quad (2.47)$$

$$AP = 7.48373498 + 0.12$$

$$AP = 7.6037 \frac{lb}{pulg^2}$$

$$\Rightarrow AP \left(7.6037 \frac{lb}{pulg^2}\right) < \Delta P_{permitida} \left(10 \frac{lb}{pulg^2}\right)$$

De los resultados obtenidos, podemos afirmar que el diseño propuesto para calentar agua con vapor de agua proveniente de la chimenea del hidratador PUGMILL es óptimo, pues se cumple con todas las condiciones de cálculo y restricciones.

### 4.3 CÁLCULO ESTRUCTURAL PARA SOPORTE DE TANQUE DE AGUA 6 M3

Para realizar el cálculo estructural, se usará el software CYPECAD, donde:

#### 4.3.1. ESTRUCTURA

##### Resultados

##### Barras

##### Comprobaciones E.L.U. (Completo)

Nota: Se muestra el listado completo de comprobaciones realizadas para las 10 barras con mayor coeficiente de aprovechamiento.

Barra N9/N2

Perfil: 100x70x5.2							
Material: Acero (S235)							
Nudos		Longitud (m)	Características mecánicas				
Inicial	Final		Área (cm <sup>2</sup> )	I <sub>y</sub> <sup>(1)</sup> (cm <sup>4</sup> )	I <sub>z</sub> <sup>(1)</sup> (cm <sup>4</sup> )	I <sub>t</sub> <sup>(2)</sup> (cm <sup>4</sup> )	
N9	N2	2.000	16.60	226.07	127.76	247.03	
Notas: (1) Inercia respecto al eje indicado (2) Momento de inercia a torsión uniforme							
	Pandeo		Pandeo lateral				
		Plano XY	Plano XZ	Ala sup.	Ala inf.		
	b	0.62	0.79	1.00	1.00		
	L <sub>K</sub>	1.234	1.583	2.000	2.000		
	C <sub>m</sub>	1.000	1.000	1.000	1.000		
C <sub>1</sub>	-		1.000				
Notación: b: Coeficiente de pandeo L <sub>K</sub> : Longitud de pandeo (m) C <sub>m</sub> : Coeficiente de momentos C <sub>1</sub> : Factor de modificación para el momento crítico							

#### Limitación de esbeltez (CTE DB SE-A, Artículos 6.3.1 y 6.3.2.1 - Tabla 6.3)

La esbeltez reducida  $\lambda$  de las barras comprimidas debe ser inferior al valor 2.0.

$\lambda$ : 0.47 ✓

Donde:

**Clase:** Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos comprimidos de una sección.

**Clase :** 1

**A:** Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3.

**A :** 16.60 cm<sup>2</sup>

**f<sub>y</sub>:** Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)

**f<sub>y</sub> :** 2395.51 kp/cm<sup>2</sup>

**N<sub>cr</sub>:** Axil crítico de pandeo elástico.

**N<sub>cr</sub> :** 177.235 t

El axil crítico de pandeo elástico **N<sub>cr</sub>** es el menor de los valores obtenidos en a), b) y c):

a) Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Y.

**N<sub>cr,y</sub> :** 190.526 t

b) Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Z.

**N<sub>cr,z</sub> :** 177.235 t

c) Axil crítico elástico de pandeo por torsión.

**N<sub>cr,T</sub> :** 9568.318 t

Donde:

**I<sub>y</sub>:** Momento de inercia de la sección bruta, respecto al eje Y.

**I<sub>y</sub> :** 226.07 cm<sup>4</sup>

**I<sub>z</sub>:** Momento de inercia de la sección bruta, respecto al eje Z.

**I<sub>z</sub> :** 127.76 cm<sup>4</sup>

**I<sub>t</sub>:** Momento de inercia a torsión uniforme.

**I<sub>t</sub> :** 247.03 cm<sup>4</sup>

**I<sub>w</sub>:** Constante de alabeo de la sección.

**I<sub>w</sub> :** 0.00 cm<sup>6</sup>

**E:** Módulo de elasticidad.

**E :** 2140673 kp/cm<sup>2</sup>

**G:** Módulo de elasticidad transversal.

**G :** 825688 kp/cm<sup>2</sup>

**L<sub>ky</sub>:** Longitud efectiva de pandeo por flexión, respecto al eje Y.

**L<sub>ky</sub> :** 1.583 m

**L<sub>kz</sub>:** Longitud efectiva de pandeo por flexión, respecto al eje Z.

**L<sub>kz</sub> :** 1.234 m

**L<sub>kt</sub>:** Longitud efectiva de pandeo por torsión.

**L<sub>kt</sub> :** 2.000 m

**i<sub>0</sub>:** Radio de giro polar de la sección bruta, respecto al centro de torsión.

**i<sub>0</sub> :** 4.62 cm

Siendo:

**i<sub>y</sub> , i<sub>z</sub>:** Radios de giro de la

**i<sub>y</sub> :** 3.69 cm

sección bruta, respecto a los ejes principales de inercia Y y Z.  $i_z : \underline{2.77} \text{ cm}$   
 $y_0, z_0$ : Coordenadas del centro de torsión en la dirección de los ejes principales Y y Z, respectivamente, relativas al centro de gravedad de la sección.  $y_0 : \underline{0.00} \text{ mm}$   
 $z_0 : \underline{0.00} \text{ mm}$

**Abolladura del alma inducida por el ala comprimida** (Criterio de CYPE Ingenieros, basado en: Eurocódigo 3 EN 1993-1-5: 2006, Artículo 8)

Se debe satisfacer:

**17.23 ≤ 428.94 ✓**

Donde:

$h_w$ : Altura del alma.  $h_w : 89.60 \text{ mm}$   
 $t_w$ : Espesor del alma.  $t_w : 5.20 \text{ mm}$   
 $A_w$ : Área del alma.  $A_w : 9.32 \text{ cm}^2$   
 $A_{fc,ef}$ : Área reducida del ala comprimida.  $A_{fc,ef} : 3.64 \text{ cm}^2$   
 $k$ : Coeficiente que depende de la clase de la sección.  $k : 0.30$   
 $E$ : Módulo de elasticidad.  $E : 2140673 \text{ kp/cm}^2$   
 $f_{yf}$ : Límite elástico del acero del ala comprimida.  $f_{yf} : 2395.51 \text{ kp/cm}^2$   
 Siendo:

**Resistencia a tracción** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.3)

La comprobación no procede, ya que no hay axil de tracción.

**Resistencia a compresión** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.5)

Se debe satisfacer:

$h : \underline{0.042} \text{ ✓}$

$h : \underline{0.049} \text{ ✓}$

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en el nudo N9, para la combinación de acciones 1.35·PP.

$N_{c,Ed}$ : Axil de compresión solicitante de cálculo pésimo.

$$N_{c,Ed} : \underline{1.592} \text{ t}$$

La resistencia de cálculo a compresión  $N_{c,Rd}$  viene dada por:

$$N_{c,Rd} : \underline{37.868} \text{ t}$$

Donde:

**Clase:** Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos comprimidos de una sección.

$$\text{Clase} : \underline{1}$$

**A:** Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3.

$$A : \underline{16.60} \text{ cm}^2$$

$f_{yd}$ : Resistencia de cálculo del acero.

$$f_{yd} : \underline{2281.44} \text{ kp/cm}^2$$

Siendo:

$f_y$ : Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)

$$f_y : \underline{2395.51} \text{ kp/cm}^2$$

$g_{M0}$ : Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$g_{M0} : \underline{1.05}$$

**Resistencia a pandeo:** (CTE DB SE-A, Artículo 6.3.2)

La resistencia de cálculo a pandeo  $N_{b,Rd}$  en una barra comprimida viene dada por:

$$N_{b,Rd} : \underline{32.476} \text{ t}$$

Donde:

**A:** Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3.

$$A : \underline{16.60} \text{ cm}^2$$

$f_{yd}$ : Resistencia de cálculo del acero.

$$f_{yd} : \underline{2281.44} \text{ kp/cm}^2$$

Siendo:

$f_y$ : Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)

$$f_y : \underline{2395.51 \text{ kp/cm}^2}$$

$g_{M1}$ : Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$g_{M1} : \underline{1.05}$$

$c$ : Coeficiente de reducción por pandeo.

$$c_y : \underline{0.87}$$

$$c_z : \underline{0.86}$$

$$c_T : \underline{1.00}$$

Siendo:

$$f_y : \underline{0.67}$$

$$f_z : \underline{0.68}$$

$$f_T : \underline{0.47}$$

$a$ : Coeficiente de imperfección elástica.

$$a_y : \underline{0.49}$$

$$a_z : \underline{0.49}$$

$$a_T : \underline{0.49}$$

$\lambda$ : Esbeltez reducida.

$$\lambda_y : \underline{0.46}$$

$$\lambda_z : \underline{0.47}$$

$$\lambda_T : \underline{0.06}$$

$N_{cr}$ : Axil crítico elástico de pandeo, obtenido como el menor de los siguientes valores:

$$N_{cr} : \underline{177.235 \text{ t}}$$

$N_{cr,y}$ : Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Y.

$$N_{cr,y} : \underline{190.526 \text{ t}}$$

$N_{cr,z}$ : Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Z.

$$N_{cr,z} : \underline{177.235 \text{ t}}$$

$N_{cr,T}$ : Axil crítico elástico de pandeo por torsión.

$$N_{cr,T} : \underline{9568.318 \text{ t}}$$

**Resistencia a flexión eje Y** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.6)

Se debe satisfacer:

$$h : \underline{0.004} \checkmark$$

Para flexión positiva:

$M_{Ed}^+$ : Momento flector solicitante de cálculo pésimo.  $M_{Ed}^+ : \underline{0.000} \text{ t}\cdot\text{m}$

Para flexión negativa:

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en el nudo N2, para la combinación de acciones 1.35·PP.

$M_{Ed}^-$ : Momento flector solicitante de cálculo pésimo.  $M_{Ed}^- : \underline{0.005} \text{ t}\cdot\text{m}$

El momento flector resistente de cálculo  $M_{c,Rd}$  viene dado por:

$M_{c,Rd} : \underline{1.263} \text{ t}\cdot\text{m}$

Donde:

**Clase:** Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos de una sección a flexión simple. **Clase :** 1

$W_{pl,y}$ : Módulo resistente plástico correspondiente a la fibra con mayor tensión, para las secciones de clase 1 y 2.  $W_{pl,y} : \underline{55.38} \text{ cm}^3$

$f_{yd}$ : Resistencia de cálculo del acero.  $f_{yd} : \underline{2281.44} \text{ kp/cm}^2$

Siendo:

$f_y$ : Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)  $f_y : \underline{2395.51} \text{ kp/cm}^2$

$g_{M0}$ : Coeficiente parcial de seguridad del material.  $g_{M0} : \underline{1.05}$

**Resistencia a pandeo lateral:** (CTE DB SE-A, Artículo 6.3.3.2)

Para esbelteces  $\lambda_{LT} \leq 0.4$  se puede omitir la comprobación frente a pandeo, y comprobar únicamente la resistencia de la sección transversal.

$\lambda_{LT} : \underline{0.19}$

$M_{cr}$ : Momento crítico elástico de pandeo lateral.  $M_{cr} : \underline{37.127} \text{ t}\cdot\text{m}$

El momento crítico elástico de pandeo lateral  $M_{cr}$  se determina según la teoría de la elasticidad:

Siendo:

$M_{LTv}$ : Componente que representa la resistencia por torsión uniforme de la barra.

$$M_{LTv} : \underline{37.100} \text{ t}\cdot\text{m}$$

$M_{LTw}$ : Componente que representa la resistencia por torsión no uniforme de la barra.

$$M_{LTw} : \underline{1.435} \text{ t}\cdot\text{m}$$

Siendo:

$W_{el,y}$ : Módulo resistente elástico de la sección bruta, obtenido para la fibra más comprimida.

$$W_{el,y} : \underline{45.21} \text{ cm}^3$$

$I_z$ : Momento de inercia de la sección bruta, respecto al eje Z.

$$I_z : \underline{127.76} \text{ cm}^4$$

$I_t$ : Momento de inercia a torsión uniforme.

$$I_t : \underline{247.03} \text{ cm}^4$$

E: Módulo de elasticidad.

$$E : \underline{2140673} \text{ kp/cm}^2$$

G: Módulo de elasticidad transversal.

$$G : \underline{825688} \text{ kp/cm}^2$$

$L_c^+$ : Longitud efectiva de pandeo lateral del ala superior.

$$L_c^+ : \underline{2.000} \text{ m}$$

$L_c^-$ : Longitud efectiva de pandeo lateral del ala inferior.

$$L_c^- : \underline{2.000} \text{ m}$$

$C_1$ : Factor que depende de las condiciones de apoyo y de la forma de la ley de momentos flectores sobre la barra.

$$C_1 : \underline{1.00}$$

$i_{f,z}^+$ : Radio de giro, respecto al eje de menor inercia de la sección, del soporte formado por el ala comprimida y la tercera parte de la zona comprimida del alma adyacente al ala comprimida.

$$i_{f,z}^+ : \underline{2.45} \text{ cm}$$

$$i_{f,z}^- : \underline{2.45} \text{ cm}$$

### **Resistencia a flexión eje Z** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.6)

Se debe satisfacer:

$$h : \underline{0.093} \checkmark$$

Para flexión positiva:

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en el nudo N2, para la combinación de acciones 1.35·PP.

$M_{Ed}^+$ : Momento flector solicitante de cálculo pésimo.

$$M_{Ed}^+ : \underline{0.091} \text{ t}\cdot\text{m}$$

Para flexión negativa:

$M_{Ed}$ : Momento flector solicitante de cálculo pésimo.  $M_{Ed} : 0.000 \text{ t}\cdot\text{m}$

El momento flector resistente de cálculo  $M_{c,Rd}$  viene dado por:

$M_{c,Rd} : 0.979 \text{ t}\cdot\text{m}$

Donde:

**Clase:** Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos de una sección a flexión simple. **Clase :** 1

$W_{pl,z}$ : Módulo resistente plástico correspondiente a la fibra con mayor tensión, para las secciones de clase 1 y 2.  $W_{pl,z} : 42.93 \text{ cm}^3$

$f_{yd}$ : Resistencia de cálculo del acero.  $f_{yd} : 2281.44 \text{ kp/cm}^2$

Siendo:

$f_y$ : Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)  $f_y : 2395.51 \text{ kp/cm}^2$

$g_{M0}$ : Coeficiente parcial de seguridad del material.  $g_{M0} : 1.05$

**Resistencia a corte Z** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.4)

Se debe satisfacer:

$h < 0.001$  ✓

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce para la combinación de acciones 1.35·PP.

$V_{Ed}$ : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.  $V_{Ed} : 0.002 \text{ t}$

El esfuerzo cortante resistente de cálculo  $V_{c,Rd}$  viene dado por:

$V_{c,Rd} : 12.274 \text{ t}$

Donde:

$A_v$ : Área transversal a cortante.  $A_v : 9.32 \text{ cm}^2$

Siendo:

**d:** Altura del alma. **d** : 89.60 mm  
**t<sub>w</sub>:** Espesor del alma. **t<sub>w</sub>** : 5.20 mm

**f<sub>yd</sub>:** Resistencia de cálculo del acero. **f<sub>yd</sub>** : 2281.44 kp/cm<sup>2</sup>

Siendo:

**f<sub>y</sub>:** Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1) **f<sub>y</sub>** : 2395.51 kp/cm<sup>2</sup>  
**g<sub>M0</sub>:** Coeficiente parcial de seguridad del material. **g<sub>M0</sub>** : 1.05

**Abolladura por cortante del alma:** (CTE DB SE-A, Artículo 6.3.3.4)

Aunque no se han dispuesto rigidizadores transversales, no es necesario comprobar la resistencia a la abolladura del alma, puesto que se cumple:

**17.23 < 70.00** ✓

Donde:

**l<sub>w</sub>:** Esbeltez del alma. **l<sub>w</sub>** : 17.23

**l<sub>máx</sub>:** Esbeltez máxima. **l<sub>máx</sub>** : 70.00

**e:** Factor de reducción. **e** : 1.00

Siendo:

**f<sub>ref</sub>:** Límite elástico de referencia. **f<sub>ref</sub>** : 2395.51 kp/cm<sup>2</sup>  
**f<sub>y</sub>:** Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1) **f<sub>y</sub>** : 2395.51 kp/cm<sup>2</sup>

**Resistencia a corte Y** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.4)

Se debe satisfacer:

**H : 0.007** ✓

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce para la combinación de acciones  $1.35 \cdot PP$ .

$V_{Ed}$ : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.  $V_{Ed} : \underline{0.065} \text{ t}$

El esfuerzo cortante resistente de cálculo  $V_{c,Rd}$  viene dado por:

$V_{c,Rd} : \underline{9.589} \text{ t}$

Donde:

$A_v$ : Área transversal a cortante.  $A_v : \underline{7.28} \text{ cm}^2$

Siendo:

$A$ : Área de la sección bruta.  $A : \underline{16.60} \text{ cm}^2$

$d$ : Altura del alma.  $d : \underline{89.60} \text{ mm}$

$t_w$ : Espesor del alma.  $t_w : \underline{5.20} \text{ mm}$

$f_{yd}$ : Resistencia de cálculo del acero.  $f_{yd} : \underline{2281.44} \text{ kp/cm}^2$

Siendo:

$f_y$ : Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)  $f_y : \underline{2395.51} \text{ kp/cm}^2$

$g_{M0}$ : Coeficiente parcial de seguridad del material.  $g_{M0} : \underline{1.05}$

**Abolladura por cortante del alma:** (CTE DB SE-A, Artículo 6.3.3.4)

Aunque no se han dispuesto rigidizadores transversales, no es necesario comprobar la resistencia a la abolladura del alma, puesto que se cumple:

$13.46 < 70.00$  ✓

Donde:

$I_w$ : Esbeltez del alma.  $I_w : \underline{13.46}$

$I_{m\acute{a}x}$ : Esbeltez máxima.  $I_{m\acute{a}x} : \underline{70.00}$

e: Factor de reducción.

e: 1.00

Siendo:

$f_{ref}$ : Límite elástico de referencia.

$f_{ref}$ : 2395.51 kp/cm<sup>2</sup>

$f_y$ : Límite elástico. (CTE DB SE-A,  
Tabla 4.1)

$f_y$ : 2395.51 kp/cm<sup>2</sup>

**Resistencia a momento flector Y y fuerza cortante Z combinados** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.8)

No es necesario reducir la resistencia de cálculo a flexión, ya que el esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo  $V_{Ed}$  no es superior al 50% de la resistencia de cálculo a cortante  $V_{c,Rd}$ .

0.002 t £ 6.137 t ✓

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen en un punto situado a una distancia de 0.200 m del nudo N9, para la combinación de acciones 1.35·PP.

$V_{Ed}$ : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.

$V_{Ed}$ : 0.002 t

$V_{c,Rd}$ : Esfuerzo cortante resistente de cálculo.

$V_{c,Rd}$ : 12.274 t

**Resistencia a momento flector Z y fuerza cortante Y combinados** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.8)

No es necesario reducir la resistencia de cálculo a flexión, ya que el esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo  $V_{Ed}$  no es superior al 50% de la resistencia de cálculo a cortante  $V_{c,Rd}$ .

0.065 t £ 4.795 t ✓

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen en el nudo N9, para la combinación de acciones 1.35·PP.

$V_{Ed}$ : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.

$V_{Ed}$ : 0.065 t

$V_{c,Rd}$ : Esfuerzo cortante resistente de cálculo.

$V_{c,Rd}$ : 9.589 t

**Resistencia a flexión y axil combinados** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.8)

Se debe satisfacer:

$$h : \underline{0.138} \quad \checkmark$$

$$h : \underline{0.108} \quad \checkmark$$

$$h : \underline{0.145} \quad \checkmark$$

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen en el nudo N2, para la combinación de acciones 1.35·PP.

Donde:

$N_{c,Ed}$ : Axil de compresión solicitante de cálculo pésimo.

$$N_{c,Ed} : \underline{1.557} \quad t$$

$M_{y,Ed}$ ,  $M_{z,Ed}$ : Momentos flectores solicitantes de cálculo pésimos, según los ejes Y y Z, respectivamente.

$$M_{y,Ed} : \underline{0.005} \quad t \cdot m$$

$$M_{z,Ed} : \underline{0.091} \quad t \cdot m$$

**Clase**: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de sus elementos planos, para axil y flexión simple.

$$Clase : \underline{1}$$

$N_{pl,Rd}$ : Resistencia a compresión de la sección bruta.

$$N_{pl,Rd} : \underline{37.868} \quad t$$

$M_{pl,Rd,y}$ ,  $M_{pl,Rd,z}$ : Resistencia a flexión de la sección bruta en condiciones plásticas, respecto a los ejes Y y Z, respectivamente.

$$M_{pl,Rd,y} : \underline{1.263} \quad t \cdot m$$

$$M_{pl,Rd,z} : \underline{0.979} \quad t \cdot m$$

**Resistencia a pandeo:** (CTE DB SE-A, Artículo 6.3.4.2)

A: Área de la sección bruta.

$$A : \underline{16.60} \quad cm^2$$

$W_{pl,y}$ ,  $W_{pl,z}$ : Módulos resistentes plásticos correspondientes a la fibra comprimida, alrededor de los ejes Y y Z, respectivamente.

$$W_{pl,y} : \underline{55.38} \quad cm^3$$

$$W_{pl,z} : \underline{42.93} \quad cm^3$$

$f_{yd}$ : Resistencia de cálculo del acero.

$$f_{yd} : \underline{2281.44} \quad kp/cm^2$$

Siendo:

$f_y$ : Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)

$$f_y : \underline{2395.51} \quad kp/cm^2$$

$g_{M1}$ : Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$g_{M1} : \underline{1.05}$$

$k_y$ ,  $k_z$ : Coeficientes de interacción.

$$k_y : \underline{1.01}$$

$$k_z : \underline{1.01}$$

$C_{m,y}$ ,  $C_{m,z}$ : Factores de momento flector uniforme equivalente.

$$C_{m,y} : \underline{1.00}$$

$$C_{m,z} : \underline{1.00}$$

$c_y$ ,  $c_z$ : Coeficientes de reducción por pandeo, alrededor de los ejes Y y Z, respectivamente.

$$c_y : \underline{0.87}$$

$$c_z : \underline{0.86}$$

$\lambda_y$ ,  $\lambda_z$ : Esbelteces reducidas con valores no mayores que 1.00, en relación a los ejes Y y Z, respectivamente.

$$\lambda_y : \underline{0.46}$$

$$\lambda_z : \underline{0.47}$$

$a_y$ ,  $a_z$ : Factores dependientes de la clase de la sección.

$$a_y : \underline{0.60}$$

$$a_z : \underline{0.60}$$

### **Resistencia a flexión, axil y cortante combinados (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.8)**

No es necesario reducir las resistencias de cálculo a flexión y a axil, ya que se puede ignorar el efecto de abolladura por esfuerzo cortante y, además, el esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo  $V_{Ed}$  es menor o igual que el 50% del esfuerzo cortante resistente de cálculo  $V_{c,Rd}$ .

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen para la combinación de acciones 1.35·PP.

$$0.065 \text{ t} \leq 4.787 \text{ t} \quad \checkmark$$

Donde:

$V_{Ed,y}$ : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.

$$V_{Ed,y} : \underline{0.065 \text{ t}}$$

$V_{c,Rd,y}$ : Esfuerzo cortante resistente de cálculo.

$$V_{c,Rd,y} : \underline{9.575 \text{ t}}$$

### **Resistencia a torsión (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.7)**

Se debe satisfacer:

$$h : \underline{0.001} \quad \checkmark$$

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce para la combinación de acciones 1.35·PP.

$M_{T,Ed}$ : Momento torsor solicitante de cálculo pésimo.  $M_{T,Ed} : \underline{0.001} \text{ t}\cdot\text{m}$

El momento torsor resistente de cálculo  $M_{T,Rd}$  viene dado por:

$M_{T,Rd} : \underline{0.841} \text{ t}\cdot\text{m}$

Donde:

$W_T$ : Módulo de resistencia a torsión.  $W_T : \underline{63.83} \text{ cm}^3$   
 $f_{yd}$ : Resistencia de cálculo del acero.  $f_{yd} : \underline{2281.44} \text{ kp/cm}^2$

Siendo:

$f_y$ : Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)  $f_y : \underline{2395.51} \text{ kp/cm}^2$   
 $g_{M0}$ : Coeficiente parcial de seguridad del material.  $g_{M0} : \underline{1.05}$

**Resistencia a cortante Z y momento torsor combinados** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.8)

Se debe satisfacer:

$h < \underline{0.001}$  ✓

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen para la combinación de acciones 1.35·PP.

$V_{Ed}$ : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.  $V_{Ed} : \underline{0.002} \text{ t}$

$M_{T,Ed}$ : Momento torsor solicitante de cálculo pésimo.  $M_{T,Ed} : \underline{0.001} \text{ t}\cdot\text{m}$

El esfuerzo cortante resistente de cálculo reducido  $V_{pl,T,Rd}$  viene dado por:

$V_{pl,T,Rd} : \underline{12.256} \text{ t}$

Donde:

$V_{pl,Rd}$ : Esfuerzo cortante resistente de cálculo.  $V_{pl,Rd} : \underline{12.274} \text{ t}$   
 $t_{T,Ed}$ : Tensiones tangenciales por torsión.  $t_{T,Ed} : \underline{1.96} \text{ kp/cm}^2$

Siendo:

$$W_T: \text{Módulo de resistencia a torsión.} \quad W_T : \frac{63.89}{\text{cm}^3}$$

$$f_{yd}: \text{Resistencia de cálculo del acero.} \quad f_{yd} : \frac{2281.44}{\text{kp/cm}^2}$$

Siendo:

$$f_y: \text{Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)} \quad f_y : \frac{2395.51}{\text{kp/cm}^2}$$

$$g_{M0}: \text{Coeficiente parcial de seguridad del material.} \quad g_{M0} : \frac{1.05}{}$$

**Resistencia a cortante Y y momento torsor combinados** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.8)

Se debe satisfacer:

$$h : \frac{0.007}{\checkmark}$$

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen para la combinación de acciones 1.35·PP.

$$V_{Ed}: \text{Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.} \quad V_{Ed} : \frac{0.065}{t}$$

$$M_{T,Ed}: \text{Momento torsor solicitante de cálculo pésimo.} \quad M_{T,Ed} : \frac{0.001}{t \cdot m}$$

El esfuerzo cortante resistente de cálculo reducido  $V_{pl,T,Rd}$  viene dado por:

$$V_{pl,T,Rd} : \frac{9.575}{t}$$

Donde:

$$V_{pl,Rd}: \text{Esfuerzo cortante resistente de cálculo.} \quad V_{pl,Rd} : \frac{9.589}{t}$$

$$t_{T,Ed}: \text{Tensiones tangenciales por torsión.} \quad t_{T,Ed} : \frac{1.96}{\text{kp/cm}^2}$$

Siendo:

$$W_T: \text{Módulo de resistencia a torsión.} \quad W_T : \frac{63.89}{\text{cm}^3}$$

$$f_{yd}: \text{Resistencia de cálculo del acero.} \quad f_{yd} : \frac{2281.44}{\text{kp/cm}^2}$$

Siendo:

$f_y$ : Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)

$f_y$ : 2395.51 kp/cm<sup>2</sup>

$g_{M0}$ : Coeficiente parcial de seguridad del material.

$g_{M0}$ : 1.05

Barra N12/N3

Perfil: 100x70x5.2 Material: Acero (S235)							
Nudos		Longitud (m)	Características mecánicas				
Inicial	Final		Área (cm <sup>2</sup> )	$I_y^{(1)}$ (cm <sup>4</sup> )	$I_z^{(1)}$ (cm <sup>4</sup> )	$I_t^{(2)}$ (cm <sup>4</sup> )	
N12	N3	2.000	16.60	226.07	127.76	247.03	
<i>Notas:</i> (1) Inercia respecto al eje indicado (2) Momento de inercia a torsión uniforme							
	Pandeo		Pandeo lateral				
		Plano XY	Plano XZ	Ala sup.	Ala inf.		
	b	0.62	0.79	1.00	1.00		
	$L_K$	1.234	1.583	2.000	2.000		
	$C_m$	1.000	1.000	1.000	1.000		
	$C_1$	-		1.000			
<i>Notación:</i> b: Coeficiente de pandeo $L_K$ : Longitud de pandeo (m) $C_m$ : Coeficiente de momentos $C_1$ : Factor de modificación para el momento crítico							

**Limitación de esbeltez** (CTE DB SE-A, Artículos 6.3.1 y 6.3.2.1 - Tabla 6.3)

La esbeltez reducida  $\lambda$  de las barras comprimidas debe ser inferior al valor 2.0.

$\lambda$  : 0.47 ✓

Donde:

**Clase:** Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica

**Clas :**  
e 1

de los elementos planos comprimidos de una sección.

<b>A:</b> Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3.	:	<b>A</b> <u>16.60</u> cm <sup>2</sup>
	:	<b>f<sub>y</sub></b> <u>2395.51</u> <sup>2</sup> kp/cm
<b>f<sub>y</sub>:</b> Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)	:	<b>N<sub>cr</sub></b> <u>177.235</u> t
<b>N<sub>cr</sub>:</b> Axil crítico de pandeo elástico.	:	

El axil crítico de pandeo elástico **N<sub>cr</sub>** es el menor de los valores obtenidos en a), b) y c):

a) Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Y.	:	<b>N<sub>cr,y</sub></b> <u>190.526</u> t
---	---	--

b) Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Z.	:	<b>N<sub>cr,z</sub></b> <u>177.235</u> t
---	---	--

c) Axil crítico elástico de pandeo por torsión.	:	<b>N<sub>cr,T</sub></b> <u>8</u> t
---	---	------------------------------------

Donde:

<b>I<sub>y</sub>:</b> Momento de inercia de la sección bruta, respecto al eje Y.	:	<b>I<sub>y</sub></b> <u>226.07</u> cm <sup>4</sup>
<b>I<sub>z</sub>:</b> Momento de inercia de la sección bruta, respecto al eje Z.	:	<b>I<sub>z</sub></b> <u>127.76</u> cm <sup>4</sup>
<b>I<sub>t</sub>:</b> Momento de inercia a torsión uniforme.	:	<b>I<sub>t</sub></b> <u>247.03</u> cm <sup>4</sup>
<b>I<sub>w</sub>:</b> Constante de alabeo de la sección.	:	<b>I<sub>w</sub></b> <u>0.00</u> cm <sup>6</sup>
<b>E:</b> Módulo de elasticidad.	:	<b>E</b> <u>2140673</u> <sup>2</sup> kp/cm
<b>G:</b> Módulo de elasticidad transversal.	:	<b>G</b> <u>825688</u> <sup>2</sup> kp/cm
<b>L<sub>ky</sub>:</b> Longitud efectiva de pandeo por flexión, respecto al eje Y.	:	<b>L<sub>ky</sub></b> <u>1.583</u> m
<b>L<sub>kz</sub>:</b> Longitud efectiva de pandeo por flexión, respecto al eje Z.	:	<b>L<sub>kz</sub></b> <u>1.234</u> m
<b>L<sub>kt</sub>:</b> Longitud efectiva de pandeo por torsión.	:	<b>L<sub>kt</sub></b> <u>2.000</u> m
<b>i<sub>0</sub>:</b> Radio de giro polar de la sección bruta, respecto al centro de torsión.	:	<b>i<sub>0</sub></b> <u>4.62</u> cm

Siendo:

$i_y, i_z$ : Radios de giro de la sección bruta, respecto a los ejes principales de inercia Y y Z. :  $i_y$  3.69 cm

$y_0, z_0$ : Coordenadas del centro de torsión en la dirección de los ejes principales de inercia Y y Z. :  $i_z$  2.77 cm

:  $y_0$  0.00 mm

Se debe satisfacer:

17



Donde:

$h_w$ : Altura del alma.

$t_w$ : Espesor del alma.

$A_w$ : Área del alma.

$A_{f,ef}$ : Área reducida del ala comprimida.

$k$ : Coeficiente que depende de la clase de la sección.

$E$ : Módulo de elasticidad.

$f_{yf}$ : Límite elástico del acero del ala comprimida.

Siendo:

ejes principales Y y Z, respectivamente, relativas al centro de gravedad de la sección.

:  $z_0$  0.00 mm

**Abolladura del alma inducida por el ala comprimida** (Criterio de CYPE Ingenieros, basado en: Eurocódigo 3 EN 1993-1-5: 2006, Artículo 8)

**Resistencia a tracción** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.3)

La comprobación no procede, ya que no hay axil de tracción.

**Resistencia a compresión** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.5)

Se debe satisfacer:

$h : \underline{0.042}$  ✓

$h : \underline{0.049}$  ✓

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en el nudo N12, para la combinación de acciones 1.35·PP.

$N_{c,Ed}$ : Axil de compresión solicitante de cálculo pésimo.

$N_{c,Ed} : \underline{1.592}$  t

La resistencia de cálculo a compresión  $N_{c,Rd}$  viene dada por:

$N_{c,Rd} : \underline{37.868}$  t

Donde:

**Clase:** Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos comprimidos de una sección.

**Clase :** 1

**A:** Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3.

**A :** 16.60 cm<sup>2</sup>

**$f_{yd}$ :** Resistencia de cálculo del acero.

**$f_{yd} :$**  2281.44 kp/cm<sup>2</sup>

Siendo:

**$f_y$ :** Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)

**$f_y :$**  2395.51 kp/cm<sup>2</sup>

**$g_{M0}$ :** Coeficiente parcial de seguridad del material.

**$g_{M0} :$**  1.05

**Resistencia a pandeo:** (CTE DB SE-A, Artículo 6.3.2)

La resistencia de cálculo a pandeo  $N_{b,Rd}$  en una barra comprimida viene dada por:

$N_{b,Rd} : \underline{32.476}$  t

Donde:

A: Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3.

$$A : \underline{16.60} \text{ cm}^2$$

$f_{yd}$ : Resistencia de cálculo del acero.

$$f_{yd} : \underline{2281.44} \text{ kp/cm}^2$$

Siendo:

$f_y$ : Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)

$$f_y : \underline{2395.51} \text{ kp/cm}^2$$

$g_{M1}$ : Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$g_{M1} : \underline{1.05}$$

c: Coeficiente de reducción por pandeo.

$$c_y : \underline{0.87}$$

$$c_z : \underline{0.86}$$

$$c_T : \underline{1.00}$$

Siendo:

$$f_y : \underline{0.67}$$

$$f_z : \underline{0.68}$$

$$f_T : \underline{0.47}$$

a: Coeficiente de imperfección elástica.

$$a_y : \underline{0.49}$$

$$a_z : \underline{0.49}$$

$$a_T : \underline{0.49}$$

$\lambda$ : Esbeltez reducida.

$$\lambda_y : \underline{0.46}$$

$$\lambda_z : \underline{0.47}$$

$$\lambda_T : \underline{0.06}$$

$N_{cr}$ : Axil crítico elástico de pandeo, obtenido como el menor de los siguientes valores:

$$N_{cr} : \underline{177.235} \text{ t}$$

$N_{cr,y}$ : Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Y.

$$N_{cr,y} : \underline{190.526} \text{ t}$$

$N_{cr,z}$ : Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Z.

$$N_{cr,z} : \underline{177.235} \text{ t}$$

$N_{cr,T}$ : Axil crítico elástico de pandeo por torsión.

$$N_{cr,T} : \underline{9568.318} \text{ t}$$

**Resistencia a flexión eje Y** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.6)

Se debe satisfacer:

$$h : \underline{0.004} \checkmark$$

Para flexión positiva:

$M_{Ed}^+$ : Momento flector solicitante de cálculo pésimo.  $M_{Ed}^+ : \underline{0.000} \text{ t}\cdot\text{m}$

Para flexión negativa:

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en el nudo N3, para la combinación de acciones 1.35·PP.

$M_{Ed}^-$ : Momento flector solicitante de cálculo pésimo.  $M_{Ed}^- : \underline{0.005} \text{ t}\cdot\text{m}$

El momento flector resistente de cálculo  $M_{c,Rd}$  viene dado por:

$M_{c,Rd} : \underline{1.263} \text{ t}\cdot\text{m}$

Donde:

**Clase:** Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos de una sección a flexión simple. **Clase :** 1

$W_{pl,y}$ : Módulo resistente plástico correspondiente a la fibra con mayor tensión, para las secciones de clase 1 y 2.  $W_{pl,y} : \underline{55.38} \text{ cm}^3$

$f_{yd}$ : Resistencia de cálculo del acero.  $f_{yd} : \underline{2281.44} \text{ kp/cm}^2$

Siendo:

$f_y$ : Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)  $f_y : \underline{2395.51} \text{ kp/cm}^2$

$g_{M0}$ : Coeficiente parcial de seguridad del material.  $g_{M0} : \underline{1.05}$

**Resistencia a pandeo lateral:** (CTE DB SE-A, Artículo 6.3.3.2)

Para esbelteces  $\lambda_{LT} \leq 0.4$  se puede omitir la comprobación frente a pandeo, y comprobar únicamente la resistencia de la sección transversal.

$\lambda_{LT} : \underline{0.19}$

$M_{cr}$ : Momento crítico elástico de pandeo lateral.

$M_{cr} : \underline{37.127} \text{ t}\cdot\text{m}$

El momento crítico elástico de pandeo lateral  $M_{cr}$  se determina según la teoría de la elasticidad:

Siendo:

$M_{LTv}$ : Componente que representa la resistencia por torsión uniforme de la barra.

$$M_{LTv} : \underline{37.100} \text{ t}\cdot\text{m}$$

$M_{LTw}$ : Componente que representa la resistencia por torsión no uniforme de la barra.

$$M_{LTw} : \underline{1.435} \text{ t}\cdot\text{m}$$

Siendo:

$W_{el,y}$ : Módulo resistente elástico de la sección bruta, obtenido para la fibra más comprimida.  $W_{el,y} : \underline{45.21} \text{ cm}^3$

$I_z$ : Momento de inercia de la sección bruta, respecto al eje Z.  $I_z : \underline{127.76} \text{ cm}^4$

$I_t$ : Momento de inercia a torsión uniforme.  $I_t : \underline{247.03} \text{ cm}^4$

E: Módulo de elasticidad.  $E : \underline{2140673} \text{ kp/cm}^2$

G: Módulo de elasticidad transversal.  $G : \underline{825688} \text{ kp/cm}^2$

$L_c^+$ : Longitud efectiva de pandeo lateral del ala superior.  $L_c^+ : \underline{2.000} \text{ m}$

$L_c^-$ : Longitud efectiva de pandeo lateral del ala inferior.  $L_c^- : \underline{2.000} \text{ m}$

$C_1$ : Factor que depende de las condiciones de apoyo y de la forma de la ley de momentos flectores sobre la barra.  $C_1 : \underline{1.00}$

$i_{f,z}^+$ : Radio de giro, respecto al eje de menor inercia de la sección, del soporte formado por el ala comprimida y la tercera parte de la zona comprimida del alma adyacente al ala comprimida.  $i_{f,z}^+ : \underline{2.45} \text{ cm}$

$i_{f,z}^- : \underline{2.45} \text{ cm}$

**Resistencia a flexión eje Z (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.6)**

Se debe satisfacer:

$$h : \underline{0.093} \checkmark$$

Para flexión positiva:

$M_{Ed}^+$ : Momento flector solicitante de cálculo pésimo.

$$M_{Ed}^+ : \underline{0.000} \text{ t}\cdot\text{m}$$

Para flexión negativa:

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en el nudo N3, para la combinación de acciones 1.35·PP.

$M_{Ed}$ : Momento flector solicitante de cálculo pésimo.

$$M_{Ed} = 0.091 \text{ t}\cdot\text{m}$$

El momento flector resistente de cálculo  $M_{c,Rd}$  viene dado por:

$$M_{c,Rd} = 0.979 \text{ t}\cdot\text{m}$$

Donde:

**Clase:** Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos de una sección a flexión simple.

$$\text{Clas} = 1$$

$W_{pl,z}$ : Módulo resistente plástico correspondiente a la fibra con mayor tensión, para las secciones de clase 1 y 2.

$$W_{pl,z} = 42.93 \text{ cm}^3$$

$f_{yd}$ : Resistencia de cálculo del acero.

$$f_{yd} = 4 \text{ m}^2$$

Siendo:

$f_y$ : Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)

$$f_y = 2395.5 \text{ kp/c}$$

$g_{M0}$ : Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$g_{M0} = 1.05$$

### **Resistencia a corte Z** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.4)

Se debe satisfacer:

$$h < 0.001 \quad \checkmark$$

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce para la combinación de acciones 1.35·PP.

$V_{Ed}$ : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.

$$V_{Ed} = 0.002 \text{ t}$$

El esfuerzo cortante resistente de cálculo  $V_{c,Rd}$  viene dado por:

$$V_{c,Rd} = 12.274 \text{ t}$$

Donde:

$A_v$ : Área transversal a cortante.  $A_v$  : 9.32 cm<sup>2</sup>

Siendo:

$d$ : Altura del alma.  $d$  : 89.60 mm

$t_w$ : Espesor del alma.  $t_w$  : 5.20 mm

$f_{yd}$ : Resistencia de cálculo del acero.  $f_{yd}$  : 2281.44 kp/cm<sup>2</sup>

Siendo:

$f_y$ : Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)  $f_y$  : 2395.51 kp/cm<sup>2</sup>

$g_{M0}$ : Coeficiente parcial de seguridad del material.  $g_{M0}$  : 1.05

**Abolladura por cortante del alma:** (CTE DB SE-A, Artículo 6.3.3.4)

Aunque no se han dispuesto rigidizadores transversales, no es necesario comprobar la resistencia a la abolladura del alma, puesto que se cumple:

**17.23 < 70.00** ✓

Donde:

$l_w$ : Esbeltez del alma.  $l_w$  : 17.23

$l_{m\acute{a}x}$ : Esbeltez máxima.  $l_{m\acute{a}x}$  : 70.00

$e$ : Factor de reducción.  $e$  : 1.00

Siendo:

$f_{ref}$ : Límite elástico de referencia.  $f_{ref}$  : 2395.51 kp/cm<sup>2</sup>

$f_y$ : Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)  $f_y$  : 2395.51 kp/cm<sup>2</sup>

**Resistencia a corte Y** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.4)

Se debe satisfacer:

$h : \underline{0.007}$  ✓

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce para la combinación de acciones  $1.35 \cdot PP$ .

$V_{Ed}$ : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.  $V_{Ed} : \underline{0.065}$  t

El esfuerzo cortante resistente de cálculo  $V_{c,Rd}$  viene dado por:

$V_{c,Rd} : \underline{9.589}$  t

Donde:

$A_v$ : Área transversal a cortante.  $A_v : \underline{7.28}$  cm<sup>2</sup>

Siendo:

$A$ : Área de la sección bruta.  $A : \underline{16.60}$  cm<sup>2</sup>

$d$ : Altura del alma.  $d : \underline{89.60}$  mm

$t_w$ : Espesor del alma.  $t_w : \underline{5.20}$  mm

$f_{yd}$ : Resistencia de cálculo del acero.  $f_{yd} : \underline{2281.44}$  kp/cm<sup>2</sup>

Siendo:

$f_y$ : Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)  $f_y : \underline{2395.51}$  kp/cm<sup>2</sup>

$g_{M0}$ : Coeficiente parcial de seguridad del material.  $g_{M0} : \underline{1.05}$

**Abolladura por cortante del alma:** (CTE DB SE-A, Artículo 6.3.3.4)

Aunque no se han dispuesto rigidizadores transversales, no es necesario comprobar la resistencia a la abolladura del alma, puesto que se cumple:

$13.46 < 70.00$  ✓

Donde:

$I_w$ : Esbeltez del alma.  $I_w$  : 13.46

$I_{m\acute{a}x}$ : Esbeltez máxima.  $I_{m\acute{a}x}$  : 70.00

e: Factor de reducción. e : 1.00

Siendo:

$f_{ref}$ : Límite elástico de referencia.  $f_{ref}$  : 2395.51 kp/cm<sup>2</sup>

$f_y$ : Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)  $f_y$  : 2395.51 kp/cm<sup>2</sup>

**Resistencia a momento flector Y y fuerza cortante Z combinados** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.8)

No es necesario reducir la resistencia de cculo a flexión, ya que el esfuerzo cortante solicitante de cculo pésimo  $V_{Ed}$  no es superior al 50% de la resistencia de cculo a cortante  $V_{c,Rd}$ .

0.002 t  $\leq$  6.137 t ✓

Los esfuerzos solicitantes de cculo pésimos se producen en un punto situado a una distancia de 0.200 m del nudo N12, para la combinación de acciones 1.35·PP.

$V_{Ed}$ : Esfuerzo cortante solicitante de cculo pésimo.  $V_{Ed}$  : 0.002 t

$V_{c,Rd}$ : Esfuerzo cortante resistente de cculo.  $V_{c,Rd}$  : 12.274 t

**Resistencia a momento flector Z y fuerza cortante Y combinados** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.8)

No es necesario reducir la resistencia de cculo a flexión, ya que el esfuerzo cortante solicitante de cculo pésimo  $V_{Ed}$  no es superior al 50% de la resistencia de cculo a cortante  $V_{c,Rd}$ .

0.065 t  $\leq$  4.795 t ✓

Los esfuerzos solicitantes de cculo pésimos se producen en el nudo N12, para la combinación de acciones 1.35·PP.

$V_{Ed}$ : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.

$$V_{Ed} : \underline{0.065} \text{ t}$$

$V_{c,Rd}$ : Esfuerzo cortante resistente de cálculo.

$$V_{c,Rd} : \underline{9.589} \text{ t}$$

**Resistencia a flexión y axil combinados** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.8)

Se debe satisfacer:

$$h : \underline{0.138} \checkmark$$

$$h : \underline{0.108} \checkmark$$

$$h : \underline{0.145} \checkmark$$

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen en el nudo N3, para la combinación de acciones 1.35·PP.

Donde:

$N_{c,Ed}$ : Axil de compresión solicitante de cálculo pésimo.

$$N_{c,Ed} : \underline{1.557} \text{ t}$$

$M_{y,Ed}$ ,  $M_{z,Ed}$ : Momentos flectores solicitantes de cálculo pésimos, según los ejes Y y Z, respectivamente.

$$M_{y,Ed} : \underline{0.005} \text{ t}\cdot\text{m}$$

$$M_{z,Ed} : \underline{0.091} \text{ t}\cdot\text{m}$$

**Clase**: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de sus elementos planos, para axil y flexión simple.

$$\text{Clase} : \underline{1}$$

$N_{pl,Rd}$ : Resistencia a compresión de la sección bruta.

$$N_{pl,Rd} : \underline{37.868} \text{ t}$$

$M_{pl,Rd,y}$ ,  $M_{pl,Rd,z}$ : Resistencia a flexión de la sección bruta en condiciones plásticas, respecto a los ejes Y y Z, respectivamente.

$$M_{pl,Rd,y} : \underline{1.263} \text{ t}\cdot\text{m}$$

$$M_{pl,Rd,z} : \underline{0.979} \text{ t}\cdot\text{m}$$

**Resistencia a pandeo:** (CTE DB SE-A, Artículo 6.3.4.2)

**A**: Área de la sección bruta.

$$A : \underline{16.60} \text{ cm}^2$$

$W_{pl,y}$ ,  $W_{pl,z}$ : Módulos resistentes plásticos correspondientes a la fibra comprimida, alrededor de los ejes Y y Z, respectivamente.

$$W_{pl,y} : \underline{55.38} \text{ cm}^3$$

$$W_{pl,z} : \underline{42.93} \text{ cm}^3$$

$f_{yd}$ : Resistencia de cálculo del acero.

$$f_{yd} : \underline{2281.44} \text{ kp/cm}^2$$

Siendo:

$f_y$ : Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)

$$f_y : \underline{2395.51 \text{ kp/cm}^2}$$

$g_{M1}$ : Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$g_{M1} : \underline{1.05}$$

$k_y, k_z$ : Coeficientes de interacción.

$$k_y : \underline{1.01}$$

$$k_z : \underline{1.01}$$

$C_{m,y}, C_{m,z}$ : Factores de momento flector uniforme equivalente.

$$C_{m,y} : \underline{1.00}$$

$$C_{m,z} : \underline{1.00}$$

$c_y, c_z$ : Coeficientes de reducción por pandeo, alrededor de los ejes Y y Z, respectivamente.

$$c_y : \underline{0.87}$$

$$c_z : \underline{0.86}$$

$\lambda_y, \lambda_z$ : Esbelteces reducidas con valores no mayores que 1.00, en relación a los ejes Y y Z, respectivamente.

$$\lambda_y : \underline{0.46}$$

$$\lambda_z : \underline{0.47}$$

$a_y, a_z$ : Factores dependientes de la clase de la sección.

$$a_y : \underline{0.60}$$

$$a_z : \underline{0.60}$$

**Resistencia a flexión, axil y cortante combinados** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.8)

No es necesario reducir las resistencias de cálculo a flexión y a axil, ya que se puede ignorar el efecto de abolladura por esfuerzo cortante y, además, el esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo  $V_{Ed}$  es menor o igual que el 50% del esfuerzo cortante resistente de cálculo  $V_{c,Rd}$ .

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen para la combinación de acciones 1.35·PP.

$$0.065 \text{ t} \leq 4.787 \text{ t} \quad \checkmark$$

Donde:

$V_{Ed,y}$ : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.

$$V_{Ed,y} : \underline{0.065 \text{ t}}$$

$V_{c,Rd,y}$ : Esfuerzo cortante resistente de cálculo.

$$V_{c,Rd,y} : \underline{9.575 \text{ t}}$$

**Resistencia a torsión** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.7)

Se debe satisfacer:

$$h : \underline{0.001} \quad \checkmark$$

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce para la combinación de acciones 1.35·PP.

$M_{T,Ed}$ : Momento torsor solicitante de cálculo pésimo.  $M_{T,Ed} : \underline{0.001} \text{ t}\cdot\text{m}$

El momento torsor resistente de cálculo  $M_{T,Rd}$  viene dado por:

$$M_{T,Rd} : \underline{0.841} \text{ t}\cdot\text{m}$$

Donde:

$W_T$ : Módulo de resistencia a torsión.

$$W_T : \underline{63.83} \text{ cm}^3$$

$f_{yd}$ : Resistencia de cálculo del acero.

$$f_{yd} : \underline{2281.44} \text{ kp/cm}^2$$

Siendo:

$f_y$ : Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)

$$f_y : \underline{2395.51} \text{ kp/cm}^2$$

$g_{M0}$ : Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$g_{M0} : \underline{1.05}$$

**Resistencia a cortante Z y momento torsor combinados** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.8)

Se debe satisfacer:

$$h < \underline{0.001} \quad \checkmark$$

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen para la combinación de acciones 1.35·PP.

$V_{Ed}$ : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.  $V_{Ed} : \underline{0.002} \text{ t}$

$M_{T,Ed}$ : Momento torsor solicitante de cálculo pésimo.

$$M_{T,Ed} : \underline{0.001} \text{ t}\cdot\text{m}$$

El esfuerzo cortante resistente de cálculo reducido  $V_{pl,T,Rd}$  viene dado por:

$$V_{pl,T,Rd} : \underline{12.256} \text{ t}$$

Donde:

$V_{pl,Rd}$ : Esfuerzo cortante resistente de cálculo.

$$V_{pl,Rd} : \underline{12.274} \text{ t}$$

$t_{T,Ed}$ : Tensiones tangenciales por torsión.

$$t_{T,Ed} : \underline{1.96} \text{ kp/cm}^2$$

Siendo:

$W_T$ : Módulo de resistencia a torsión.

$$W_T : \underline{63.89} \text{ cm}^3$$

$f_{yd}$ : Resistencia de cálculo del acero.

$$f_{yd} : \underline{2281.44} \text{ kp/cm}^2$$

Siendo:

$f_y$ : Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)

$$f_y : \underline{2395.51} \text{ kp/cm}^2$$

$g_{M0}$ : Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$g_{M0} : \underline{1.05}$$

**Resistencia a cortante Y y momento torsor combinados** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.8)

Se debe satisfacer:

$$h : \underline{0.007} \quad \checkmark$$

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen para la combinación de acciones 1.35·PP.

$V_{Ed}$ : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.

$$V_{Ed} : \underline{0.065} \text{ t}$$

$M_{T,Ed}$ : Momento torsor solicitante de cálculo pésimo.

$$M_{T,Ed} : \underline{0.001} \text{ t}\cdot\text{m}$$

El esfuerzo cortante resistente de cálculo reducido  $V_{pl,T,Rd}$  viene dado por:

$$V_{pl,T,Rd} : \underline{9.575} \text{ t}$$

Donde:

$V_{pl,Rd}$ : Esfuerzo cortante resistente de cálculo.  $V_{pl,Rd} : \frac{9.589}{t}$   
 $t_{T,Ed}$ : Tensiones tangenciales por torsión.  $t_{T,Ed} : \frac{1.96}{kp/cm^2}$

Siendo:

$W_T$ : Módulo de resistencia a torsión.  $W_T : \frac{63.89}{cm^3}$   
 $f_{yd}$ : Resistencia de cálculo del acero.  $f_{yd} : \frac{2281.44}{kp/cm^2}$

Siendo:

$f_y$ : Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)  $f_y : \frac{2395.51}{kp/cm^2}$   
 $g_{M0}$ : Coeficiente parcial de seguridad del material.  $g_{M0} : 1.05$

Barra N1/N9

Perfil: 100x70x5.2							
Material: Acero (S235)							
	Nudos		Longitud (m)	Características mecánicas			
	Inicial	Final		Área (cm <sup>2</sup> )	I <sub>y</sub> <sup>(1)</sup> (cm <sup>4</sup> )	I <sub>z</sub> <sup>(1)</sup> (cm <sup>4</sup> )	I <sub>t</sub> <sup>(2)</sup> (cm <sup>4</sup> )
	N1	N9	1.000	16.60	226.07	127.76	247.03
Notas: (1) Inercia respecto al eje indicado (2) Momento de inercia a torsión uniforme							
		Pandeo		Pandeo lateral			
		Plano XY	Plano XZ	Ala sup.	Ala inf.		
b	0.60	0.66	1.00	1.00			
L <sub>K</sub>	0.596	0.661	1.000	1.000			
C <sub>m</sub>	1.000	1.000	1.000	1.000			
C <sub>1</sub>	-	-	-	1.000			
Notación: b: Coeficiente de pandeo L <sub>K</sub> : Longitud de pandeo (m) C <sub>m</sub> : Coeficiente de momentos C <sub>1</sub> : Factor de modificación para el momento crítico							

**Limitación de esbeltez** (CTE DB SE-A, Artículos 6.3.1 y 6.3.2.1 - Tabla 6.3)

La esbeltez reducida λ de las barras comprimidas debe ser inferior al valor 2.0.

λ = 0.23 ✓

Donde:

**Clase:** Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos comprimidos de una sección.

**Clas :**  
 $e \quad \underline{\quad 1 \quad}$

**A:** Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3.

**A**  $\underline{\quad 16.60 \quad}$  cm<sup>2</sup>

**f<sub>y</sub>:** Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)

**f<sub>y</sub>**  $\underline{\quad 2395.51 \quad}$  m<sup>2</sup> / kp/c

**N<sub>cr</sub>:** Axil crítico de pandeo elástico.

**N<sub>cr</sub>**  $\underline{\quad 760.587 \quad}$  t

El axil crítico de pandeo elástico **N<sub>cr</sub>** es el menor de los valores obtenidos en a), b) y c):

a) Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Y.

**N<sub>cr,y</sub>**  $\underline{\quad 1094.20 \quad}$  t

b) Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Z.

**N<sub>cr,z</sub>**  $\underline{\quad 760.587 \quad}$  t

c) Axil crítico elástico de pandeo por torsión.

**N<sub>cr,T</sub>**  $\underline{\quad 9568.31 \quad}$  t

Donde:

**I<sub>y</sub>:** Momento de inercia de la sección bruta, respecto al eje Y.

**I<sub>y</sub>**  $\underline{\quad 226.07 \quad}$  cm<sup>4</sup>

**I<sub>z</sub>:** Momento de inercia de la sección bruta, respecto al eje Z.

**I<sub>z</sub>**  $\underline{\quad 127.76 \quad}$  cm<sup>4</sup>

**I<sub>t</sub>:** Momento de inercia a torsión uniforme.

**I<sub>t</sub>**  $\underline{\quad 247.03 \quad}$  cm<sup>4</sup>

**I<sub>w</sub>:** Constante de alabeo de la sección.

**I<sub>w</sub>**  $\underline{\quad 0.00 \quad}$  cm<sup>6</sup>

**E:** Módulo de elasticidad.

**E**  $\underline{\quad 2140673 \quad}$  m<sup>2</sup> / kp/c

**G:** Módulo de elasticidad transversal.

**G**  $\underline{\quad 825688 \quad}$  m<sup>2</sup> / kp/c

**L<sub>ky</sub>:** Longitud efectiva de pandeo por flexión, respecto al eje Y.

**L<sub>ky</sub>**  $\underline{\quad 0.661 \quad}$  m

**L<sub>kz</sub>:** Longitud efectiva de pandeo por flexión, respecto al eje Z.

**L<sub>kz</sub>**  $\underline{\quad 0.596 \quad}$  m

**L<sub>kt</sub>:** Longitud efectiva de pandeo por torsión.

**L<sub>kt</sub>**  $\underline{\quad 1.000 \quad}$  m

$i_0$ : Radio de giro polar de la sección bruta, respecto al centro de torsión.  $i_0 = 4.62$  cm

Siendo:

$i_y, i_z$ : Radios de giro de la sección bruta, respecto a los ejes principales de inercia Y y Z.  $i_y = 3.69$  cm

$i_z = 2.77$  cm

$y_0, z_0$ : Coordenadas del centro de torsión en la dirección de los ejes principales Y y Z, respectivamente, relativas al centro de gravedad de la sección.  $y_0 = 0.00$  mm

$z_0 = 0.00$  mm

**Abolladura del alma inducida por el ala comprimida** (Criterio de CYPE Ingenieros, basado en: Eurocódigo 3 EN 1993-1-5: 2006, Artículo 8)

Se debe satisfacer:

$17.23 \leq 428.94$  ✓

Donde:

$h_w$ : Altura del alma.	$h_w = 89.60$ mm
$t_w$ : Espesor del alma.	$t_w = 5.20$ mm
$A_w$ : Área del alma.	$A_w = 9.32$ cm <sup>2</sup>
$A_{fc,ef}$ : Área reducida del ala comprimida.	$A_{fc,ef} = 3.64$ cm <sup>2</sup>
$k$ : Coeficiente que depende de la clase de la sección.	$k = 0.30$
$E$ : Módulo de elasticidad.	$E = 2140673$ kp/cm <sup>2</sup>
$f_{yf}$ : Límite elástico del acero del ala comprimida.	$f_{yf} = 2395.51$ kp/cm <sup>2</sup>

Siendo:

**Resistencia a tracción** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.3)

La comprobación no procede, ya que no hay axil de tracción.

**Resistencia a compresión** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.5)

Se debe satisfacer:

$h = 0.104$  ✓

$$h : \underline{0.106} \quad \checkmark$$

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en el nudo N1, para la combinación de acciones 1.35·PP.

$N_{c,Ed}$ : Axil de compresión solicitante de cálculo pésimo.

$$N_{c,Ed} : \underline{3.945} \quad t$$

La resistencia de cálculo a compresión  $N_{c,Rd}$  viene dada por:

$$N_{c,Rd} : \underline{37.868} \quad t$$

Donde:

**Clase:** Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos comprimidos de una sección.

$$\text{Clase} : \underline{1}$$

**A:** Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3.

$$A : \underline{16.60} \quad \text{cm}^2$$

**$f_{yd}$ :** Resistencia de cálculo del acero.

$$f_{yd} : \underline{2281.44} \quad \text{kp/cm}^2$$

Siendo:

**$f_y$ :** Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)

$$f_y : \underline{2395.51} \quad \text{kp/cm}^2$$

**$g_{M0}$ :** Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$g_{M0} : \underline{1.05}$$

**Resistencia a pandeo:** (CTE DB SE-A, Artículo 6.3.2)

La resistencia de cálculo a pandeo  $N_{b,Rd}$  en una barra comprimida viene dada por:

$$N_{b,Rd} : \underline{37.316} \quad t$$

Donde:

**A:** Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3.

$$A : \underline{16.60} \quad \text{cm}^2$$

**$f_{yd}$ :** Resistencia de cálculo del acero.

$$f_{yd} : \underline{2281.44} \quad \text{kp/cm}^2$$

Siendo:

$f_y$ : Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)

$$f_y : \underline{2395.51} \text{ kp/cm}^2$$

$g_{M1}$ : Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$g_{M1} : \underline{1.05}$$

c: Coeficiente de reducción por pandeo.

$$c_y : \underline{1.00}$$

$$c_z : \underline{0.99}$$

$$c_T : \underline{1.00}$$

Siendo:

$$f_y : \underline{0.52}$$

$$f_z : \underline{0.53}$$

$$f_T : \underline{0.47}$$

a: Coeficiente de imperfección elástica.

$$a_y : \underline{0.49}$$

$$a_z : \underline{0.49}$$

$$a_T : \underline{0.49}$$

$\lambda$ : Esbeltez reducida.

$$\lambda_y : \underline{0.19}$$

$$\lambda_z : \underline{0.23}$$

$$\lambda_T : \underline{0.06}$$

$N_{cr}$ : Axil crítico elástico de pandeo, obtenido como el menor de los siguientes valores:

$$N_{cr} : \underline{760.587} \text{ t}$$

$N_{cr,y}$ : Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Y.

$$N_{cr,y} : \underline{1094.205} \text{ t}$$

$N_{cr,z}$ : Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Z.

$$N_{cr,z} : \underline{760.587} \text{ t}$$

$N_{cr,T}$ : Axil crítico elástico de pandeo por torsión.

$$N_{cr,T} : \underline{9568.318} \text{ t}$$

**Resistencia a flexión eje Y** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.6)

Se debe satisfacer:

$$h : \underline{0.005} \quad \checkmark$$

Para flexión positiva:

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en el nudo N9, para la combinación de acciones 1.35·PP.

$$M_{Ed}^+ : \text{Momento flector solicitante de cálculo pésimo.} \quad M_{Ed}^+ : \underline{0.006} \text{ t}\cdot\text{m}$$

Para flexión negativa:

$M_{Ed}^-$ : Momento flector solicitante de cálculo pésimo.  $M_{Ed}^- : 0.000 \text{ t}\cdot\text{m}$

El momento flector resistente de cálculo  $M_{c,Rd}$  viene dado por:

$M_{c,Rd} : 1.263 \text{ t}\cdot\text{m}$

Donde:

**Clase:** Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos de una sección a flexión simple. **Clase :** 1

$W_{pl,y}$ : Módulo resistente plástico correspondiente a la fibra con mayor tensión, para las secciones de clase 1 y 2.  $W_{pl,y} : 55.38 \text{ cm}^3$

$f_{yd}$ : Resistencia de cálculo del acero.  $f_{yd} : 2281.44 \text{ kp/cm}^2$

Siendo:

$f_y$ : Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)  $f_y : 2395.51 \text{ kp/cm}^2$

$g_{M0}$ : Coeficiente parcial de seguridad del material.  $g_{M0} : 1.05$

**Resistencia a pandeo lateral:** (CTE DB SE-A, Artículo 6.3.3.2)

Para esbelteces  $\lambda_{LT} \leq 0.4$  se puede omitir la comprobación frente a pandeo, y comprobar únicamente la resistencia de la sección transversal.

$\lambda_{LT} : 0.13$

$M_{cr}$ : Momento crítico elástico de pandeo lateral.  $M_{cr} : 74.421 \text{ t}\cdot\text{m}$

El momento crítico elástico de pandeo lateral  $M_{cr}$  se determina según la teoría de la elasticidad:

Siendo:

$M_{LTv}$ : Componente que representa la resistencia por torsión uniforme de la barra.

$M_{LTv} : 74.199 \text{ t}\cdot\text{m}$

$M_{LTw}$ : Componente que representa la resistencia por torsión no uniforme de la barra.

$$M_{LTW} : \underline{5.740} \text{ t}\cdot\text{m}$$

Siendo:

$W_{el,y}$ : Módulo resistente elástico de la sección bruta, obtenido para la fibra más comprimida.  $W_{el,y} : \underline{45.21} \text{ cm}^3$

$I_z$ : Momento de inercia de la sección bruta, respecto al eje Z.  $I_z : \underline{127.76} \text{ cm}^4$

$I_t$ : Momento de inercia a torsión uniforme.  $I_t : \underline{247.03} \text{ cm}^4$

$E$ : Módulo de elasticidad.  $E : \underline{2140673} \text{ kp/cm}^2$

$G$ : Módulo de elasticidad transversal.  $G : \underline{825688} \text{ kp/cm}^2$

$L_c^+$ : Longitud efectiva de pandeo lateral del ala superior.  $L_c^+ : \underline{1.000} \text{ m}$

$L_c^-$ : Longitud efectiva de pandeo lateral del ala inferior.  $L_c^- : \underline{1.000} \text{ m}$

$C_1$ : Factor que depende de las condiciones de apoyo y de la forma de la ley de momentos flectores sobre la barra.  $C_1 : \underline{1.00}$

$i_{f,z}^+$ : Radio de giro, respecto al eje de menor inercia de la sección, del soporte formado por el ala comprimida y la tercera parte de la zona comprimida del alma adyacente al ala comprimida.  $i_{f,z}^+ : \underline{2.45} \text{ cm}$

$i_{f,z}^- : \underline{2.45} \text{ cm}$

**Resistencia a flexión eje Z** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.6)

Se debe satisfacer:

$$: \underline{h} \quad \underline{0.006} \quad \checkmark$$

Para flexión positiva:

$M_{Ed}^+$ : Momento flector solicitante de cálculo pésimo.  $M_{Ed}^+ : \underline{0.000} \text{ t}\cdot\text{m}$

Para flexión negativa:

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en el nudo N9, para la combinación de acciones 1.35·PP.

$M_{Ed}^-$ : Momento flector solicitante de cálculo pésimo.  $M_{Ed}^- : \underline{0.006} \text{ t}\cdot\text{m}$

El momento flector resistente de cálculo  $M_{c,Rd}$  viene dado por:

$$M_{c,R} : \quad d \quad \underline{0.979} \text{ t}\cdot\text{m}$$

Donde:

**Clase:** Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos de una sección a flexión simple.

$$\text{Clas} : \quad e \quad \underline{1}$$

**W<sub>pl,z</sub>:** Módulo resistente plástico correspondiente a la fibra con mayor tensión, para las secciones de clase 1 y 2.

$$: \quad \text{W}_{pl,z} \quad \underline{42.93} \text{ cm}^3$$

**f<sub>yd</sub>:** Resistencia de cálculo del acero.

$$: \quad \underline{2281.4} \text{ kp/cm} \\ f_{yd} \quad \underline{4}^2$$

Siendo:

**f<sub>y</sub>:** Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)

$$: \quad \underline{2395.5} \text{ kp/cm} \\ f_y \quad \underline{1}^2$$

**g<sub>M0</sub>:** Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$: \quad \underline{1.05} \\ g_{M0}$$

**Resistencia a corte Z** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.4)

Se debe satisfacer:

$$h : \quad \underline{0.001} \quad \checkmark$$

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce para la combinación de acciones 1.35·PP.

**V<sub>Ed</sub>:** Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.

$$V_{Ed} : \quad \underline{0.009} \text{ t}$$

El esfuerzo cortante resistente de cálculo **V<sub>c,Rd</sub>** viene dado por:

$$V_{c,Rd} : \quad \underline{12.274} \text{ t}$$

Donde:

**A<sub>v</sub>:** Área transversal a cortante.

$$A_v : \quad \underline{9.32} \text{ cm}^2$$

Siendo:

**d**: Altura del alma.  $d : 89.60$  mm  
**t<sub>w</sub>**: Espesor del alma.  $t_w : 5.20$  mm

**f<sub>yd</sub>**: Resistencia de cálculo del acero.  $f_{yd} : 2281.44$  kp/cm<sup>2</sup>

Siendo:

**f<sub>y</sub>**: Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)  $f_y : 2395.51$  kp/cm<sup>2</sup>

**g<sub>M0</sub>**: Coeficiente parcial de seguridad del material.  $g_{M0} : 1.05$

**Abolladura por cortante del alma:** (CTE DB SE-A, Artículo 6.3.3.4)

Aunque no se han dispuesto rigidizadores transversales, no es necesario comprobar la resistencia a la abolladura del alma, puesto que se cumple:

$$17.23 < 70.00 \quad \checkmark$$

Donde:

**l<sub>w</sub>**: Esbeltez del alma.  $l_w : 17.23$

**l<sub>máx</sub>**: Esbeltez máxima.  $l_{máx} : 70.00$

**e**: Factor de reducción.  $e : 1.00$

Siendo:

**f<sub>ref</sub>**: Límite elástico de referencia.  $f_{ref} : 2395.51$  kp/cm<sup>2</sup>

**f<sub>y</sub>**: Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)  $f_y : 2395.51$  kp/cm<sup>2</sup>

**Resistencia a corte Y** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.4)

Se debe satisfacer:

$$h < 0.001 \quad \checkmark$$

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce para la combinación de acciones 1.35·PP.

$V_{Ed}$ : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.  $V_{Ed} : \underline{0.005} \text{ t}$

El esfuerzo cortante resistente de cálculo  $V_{c,Rd}$  viene dado por:

$V_{c,Rd} : \underline{9.589} \text{ t}$

Donde:

$A_v$ : Área transversal a cortante.  $A_v : \underline{7.28} \text{ cm}^2$

Siendo:

$A$ : Área de la sección bruta.  $A : \underline{16.60} \text{ cm}^2$

$d$ : Altura del alma.  $d : \underline{89.60} \text{ mm}$

$t_w$ : Espesor del alma.  $t_w : \underline{5.20} \text{ mm}$

$f_{yd}$ : Resistencia de cálculo del acero.  $f_{yd} : \underline{2281.44} \text{ kp/cm}^2$

Siendo:

$f_y$ : Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)  $f_y : \underline{2395.51} \text{ kp/cm}^2$

$\gamma_{M0}$ : Coeficiente parcial de seguridad del material.  $\gamma_{M0} : \underline{1.05}$

**Abolladura por cortante del alma:** (CTE DB SE-A, Artículo 6.3.3.4)

Aunque no se han dispuesto rigidizadores transversales, no es necesario comprobar la resistencia a la abolladura del alma, puesto que se cumple:

$13.46 < 70.00$  ✓

Donde:

$l_w$ : Esbeltez del alma.  $l_w : \underline{13.46}$

$l_{m\acute{a}x}$ : Esbeltez máxima.  $l_{m\acute{a}x} : \underline{70.00}$

$e$ : Factor de reducción.  $e : \underline{1.00}$

Siendo:

$f_{ref}$ : Límite elástico de referencia.  $f_{ref} : 2395.51 \text{ kp/cm}^2$

$f_y$ : Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)  $f_y : 2395.51 \text{ kp/cm}^2$

**Resistencia a momento flector Y y fuerza cortante Z combinados** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.8)

No es necesario reducir la resistencia de cálculo a flexión, ya que el esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo  $V_{Ed}$  no es superior al 50% de la resistencia de cálculo a cortante  $V_{c,Rd}$ .

0.009 t £ 6.137 t ✓

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen para la combinación de acciones 1.35·PP.

$V_{Ed}$ : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.  $V_{Ed} : 0.009 \text{ t}$

$V_{c,Rd}$ : Esfuerzo cortante resistente de cálculo.  $V_{c,Rd} : 12.274 \text{ t}$

**Resistencia a momento flector Z y fuerza cortante Y combinados** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.8)

No es necesario reducir la resistencia de cálculo a flexión, ya que el esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo  $V_{Ed}$  no es superior al 50% de la resistencia de cálculo a cortante  $V_{c,Rd}$ .

0.005 t £ 4.795 t ✓

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen para la combinación de acciones 1.35·PP.

$V_{Ed}$ : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.  $V_{Ed} : 0.005 \text{ t}$

$V_{c,Rd}$ : Esfuerzo cortante resistente de cálculo.  $V_{c,Rd} : 9.589 \text{ t}$

**Resistencia a flexión y axil combinados** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.8)

Se debe satisfacer:

$$h : \underline{0.114} \quad \checkmark$$

$$h : \underline{0.112} \quad \checkmark$$

$$h : \underline{0.114} \quad \checkmark$$

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen en el nudo N9, para la combinación de acciones 1.35·PP.

Donde:

$N_{c,Ed}$ : Axil de compresión solicitante de cálculo pésimo.

$$N_{c,Ed} : \underline{3.927} \quad t$$

$M_{y,Ed}$ ,  $M_{z,Ed}$ : Momentos flectores solicitantes de cálculo pésimos, según los ejes Y y Z, respectivamente.

$$M_{y,Ed}^+ : \underline{0.006} \quad t \cdot m$$

$$M_{z,Ed}^- : \underline{0.006} \quad t \cdot m$$

**Clase:** Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de sus elementos planos, para axil y flexión simple.

$$\text{Clase} : \underline{1}$$

$N_{pl,Rd}$ : Resistencia a compresión de la sección bruta.

$$N_{pl,Rd} : \underline{37.868} \quad t$$

$M_{pl,Rd,y}$ ,  $M_{pl,Rd,z}$ : Resistencia a flexión de la sección bruta en condiciones plásticas, respecto a los ejes Y y Z, respectivamente.

$$M_{pl,Rd,y} : \underline{1.263} \quad t \cdot m$$

$$M_{pl,Rd,z} : \underline{0.979} \quad t \cdot m$$

**Resistencia a pandeo:** (CTE DB SE-A, Artículo 6.3.4.2)

A: Área de la sección bruta.

$$A : \underline{16.60} \quad cm^2$$

$W_{pl,y}$ ,  $W_{pl,z}$ : Módulos resistentes plásticos correspondientes a la fibra comprimida, alrededor de los ejes Y y Z, respectivamente.

$$W_{pl,y} : \underline{55.38} \quad cm^3$$

$$W_{pl,z} : \underline{42.93} \quad cm^3$$

$f_{yd}$ : Resistencia de cálculo del acero.

$$f_{yd} : \underline{2281.44} \quad kp/cm^2$$

Siendo:

$f_y$ : Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)

$$f_y : \underline{2395.51} \quad kp/cm^2$$

$g_{M1}$ : Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$g_{M1} : \underline{1.05}$$

$k_y$ ,  $k_z$ : Coeficientes de interacción.

$$k_y : \underline{1.00}$$

$$k_z : \underline{1.00}$$

$C_{m,y}$ ,  $C_{m,z}$ : Factores de momento flector uniforme equivalente.

$$C_{m,y} : \underline{1.00}$$

$$C_{m,z} : \underline{1.00}$$

$c_y$ ,  $c_z$ : Coeficientes de reducción por pandeo, alrededor de los ejes Y y Z, respectivamente.

$$c_y : \underline{1.00}$$

$$c_z : \underline{0.99}$$

$\lambda_y$ ,  $\lambda_z$ : Esbelteces reducidas con valores no mayores que 1.00, en relación a los ejes Y y Z, respectivamente.

$$\lambda_y : \underline{0.19}$$

$$\lambda_z : \underline{0.23}$$

$a_y$ ,  $a_z$ : Factores dependientes de la clase de la sección.

$$a_y : \underline{0.60}$$

$$a_z : \underline{0.60}$$

### **Resistencia a flexión, axil y cortante combinados** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.8)

No es necesario reducir las resistencias de cálculo a flexión y a axil, ya que se puede ignorar el efecto de abolladura por esfuerzo cortante y, además, el esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo  $V_{Ed}$  es menor o igual que el 50% del esfuerzo cortante resistente de cálculo  $V_{c,Rd}$ .

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen para la combinación de acciones 1.35·PP.

$$0.005 \text{ t} \leq 4.791 \text{ t} \quad \checkmark$$

Donde:

$V_{Ed,y}$ : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.

$$V_{Ed,y} : \underline{0.005 \text{ t}}$$

$V_{c,Rd,y}$ : Esfuerzo cortante resistente de cálculo.

$$V_{c,Rd,y} : \underline{9.581 \text{ t}}$$

### **Resistencia a torsión** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.7)

Se debe satisfacer:

$$h : \underline{0.001} \quad \checkmark$$

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce para la combinación de acciones 1.35·PP.

$M_{T,Ed}$ : Momento torsor solicitante de cálculo pésimo.  $M_{T,Ed} : 0.001 \text{ t}\cdot\text{m}$

El momento torsor resistente de cálculo  $M_{T,Rd}$  viene dado por:

$$M_{T,Rd} : 0.841 \text{ t}\cdot\text{m}$$

Donde:

$W_T$ : Módulo de resistencia a torsión.  $W_T : 63.83 \text{ cm}^3$   
 $f_{yd}$ : Resistencia de cálculo del acero.  $f_{yd} : 2281.44 \text{ kp/cm}^2$

Siendo:

$f_y$ : Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)  $f_y : 2395.51 \text{ kp/cm}^2$

$g_{M0}$ : Coeficiente parcial de seguridad del material.  $g_{M0} : 1.05$

**Resistencia a cortante Z y momento torsor combinados** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.8)

Se debe satisfacer:

$$h : 0.001 \checkmark$$

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen para la combinación de acciones 1.35·PP.

$V_{Ed}$ : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.  $V_{Ed} : 0.009 \text{ t}$

$M_{T,Ed}$ : Momento torsor solicitante de cálculo pésimo.  $M_{T,Ed} : 0.001 \text{ t}\cdot\text{m}$   
 El esfuerzo cortante resistente de cálculo reducido  $V_{pl,T,Rd}$  viene dado por:

$$V_{pl,T,Rd} : 12.264 \text{ t}$$

Donde:

$V_{pl,Rd}$ : Esfuerzo cortante resistente de cálculo.  $V_{pl,Rd} : 12.274 \text{ t}$   
 $t_{T,Ed}$ : Tensiones tangenciales por torsión.  $t_{T,Ed} : 1.09 \text{ kp/cm}^2$

Siendo:

$$W_T: \text{Módulo de resistencia a torsión.} \quad W_T : \underline{63.89} \text{ cm}^3$$

$$f_{yd}: \text{Resistencia de cálculo del acero.} \quad f_{yd} : \underline{2281.44} \text{ kp/cm}^2$$

Siendo:

$$f_y: \text{Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)} \quad f_y : \underline{2395.51} \text{ kp/cm}^2$$

$$g_{M0}: \text{Coeficiente parcial de seguridad del material.} \quad g_{M0} : \underline{1.05}$$

**Resistencia a cortante Y y momento torsor combinados** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.8)

Se debe satisfacer:

$$h < \underline{0.001} \quad \checkmark$$

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen para la combinación de acciones 1.35·PP.

$$V_{Ed}: \text{Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.} \quad V_{Ed} : \underline{0.005} \text{ t}$$

$$M_{T,Ed}: \text{Momento torsor solicitante de cálculo pésimo.} \quad M_{T,Ed} : \underline{0.001} \text{ t}\cdot\text{m}$$

El esfuerzo cortante resistente de cálculo reducido  $V_{pl,T,Rd}$  viene dado por:

$$V_{pl,T,Rd} : \underline{9.581} \text{ t}$$

Donde:

$$V_{pl,Rd}: \text{Esfuerzo cortante resistente de cálculo.} \quad V_{pl,Rd} : \underline{9.589} \text{ t}$$

$$t_{T,Ed}: \text{Tensiones tangenciales por torsión.} \quad t_{T,Ed} : \underline{1.09} \text{ kp/cm}^2$$

Siendo:

$$W_T: \text{Módulo de resistencia a torsión.} \quad W_T : \underline{63.89} \text{ cm}^3$$

$$f_{yd}: \text{Resistencia de cálculo del acero.} \quad f_{yd} : \underline{2281.44} \text{ kp/cm}^2$$

Siendo:

$f_y$ : Límite elástico. (CTE DB SE-A,  
Tabla 4.1)

$$f_y : \underline{2395.51 \text{ kp/cm}^2}$$

$g_{M0}$ : Coeficiente parcial de seguridad  
del material.

$$g_{M0} : \underline{1.05}$$



Tabla 4. Comprobaciones de esfuerzo estructural de soporte de tanque de agua E.L.U. (Resumido)

Fuente: CYPECAD

Elaboración: Propia

Barras	COMPROBACIONES (CTE DB SE-A)													Estado			
	$\lambda$	$I_w$	$N_t$	$N_c$	$M_Y$	$M_Z$	$V_Z$	$V_Y$	$M_Y V_Z$	$M_Z V_Y$	$NM_Y M_Z$	$NM_Y M_Z$	$V_Y V_Z$		$M_t$	$M_t V_Z$	$M_t V_Y$
N1/ N9	$\lambda < 2.0$ Cumple	$I_w \leq I_{w,max}$ Cumple	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. <sup>(1)</sup>	$x: 0$ $h = 10.6$	$x: 1$ $h = 0.5$	$x: 1$ $h = 0.6$	$h = 0.1$	$h < 0.1$	$h < 0.1$	$h < 0.1$	$x: 1$ $h = 11.4$	$NM_Y M_Z$ $V_Y V_Z$	$h < 0.1$	$h = 0.1$	$h = 0.1$	$h < 0.1$	<b>CUMPLE</b> <b>h = 11.4</b>
N9/ N2	$\lambda < 2.0$ Cumple	$I_w \leq I_{w,max}$ Cumple	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. <sup>(1)</sup>	$x: 0$ $h = 4.9$	$x: 2$ $h = 0.4$	$x: 2$ $h = 9.3$	$h < 0.1$	$h = 0.7$	$x: 0.2$ $h < 0.1$	$x: 0$ $h < 0.1$	$x: 2$ $h = 14.5$	$NM_Y M_Z$ $V_Y V_Z$	$h < 0.1$	$h = 0.1$	$h < 0.1$	$h = 0.7$	<b>CUMPLE</b> <b>h = 14.5</b>
N2/ N13	$\lambda < 2.0$ Cumple	$I_w \leq I_{w,max}$ Cumple	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. <sup>(1)</sup>	$h = 0.2$	$x: 1.175$ $h = 37.7$	$x: 0$ $h = 0.3$	$x: 1.175$ $h = 17.8$	$h < 0.1$	$h < 0.1$	$h < 0.1$	$x: 1.175$ $h = 38.1$	$NM_Y M_Z$ $V_Y V_Z$	$h < 0.1$	$M_{Ed} = 0.00$ N.P. <sup>(2)</sup>	$N.P.$ <sup>(3)</sup>	$N.P.$ <sup>(3)</sup>	<b>CUMPLE</b> <b>h = 38.1</b>
N13/ N3	$\lambda < 2.0$ Cumple	$I_w \leq I_{w,max}$ Cumple	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. <sup>(1)</sup>	$h = 0.2$	$x: 0$ $h = 37.7$	$x: 1.175$ $h = 0.3$	$x: 0$ $h = 17.8$	$h < 0.1$	$h < 0.1$	$h < 0.1$	$x: 0$ $h = 38.1$	$NM_Y M_Z$ $V_Y V_Z$	$h < 0.1$	$M_{Ed} = 0.00$ N.P. <sup>(2)</sup>	$N.P.$ <sup>(3)</sup>	$N.P.$ <sup>(3)</sup>	<b>CUMPLE</b> <b>h = 38.1</b>
N4/ N12	$\lambda < 2.0$	$I_w \leq I_{w,max}$	$N_{Ed} = 0.00$	$x: 0$ $h =$	$x: 1$ $h =$	$x: 1$ $h =$	$h = 0.1$	$h < 0.1$	$h < 0.1$	$h < 0.1$	$x: 1$ $h = 11.4$	$NM_Y M_Z$ $V_Y V_Z$	$h < 0.1$	$h = 0.1$	$h = 0.1$	$h < 0.1$	<b>CUMPLE</b> <b>h = 11.4</b>

Barras	COMPROBACIONES (CTE DB SE-A)													Estado				
	$\gamma$	$I_w$	$N_t$	$N_c$	$M_y$	$M_z$	$V_z$	$V_y$	$M_y V_z$	$M_z V_y$	$NM_y M_z$	$NM_y M_z$	$V_y V_z$		$M_t$	$M_t V_z$	$M_t V_y$	
N12/ N3	Cumple	Cumple	N.P. <sup>(1)</sup>	10.6	0.5	0.6												<b>CUMPLE</b> <b>h = 14.5</b>
	$\gamma < 2.0$	x: 0.2 m	$N_{Ed} = 0.00$	x: 0 m h = 4.9	x: 2 m h = 0.4	x: 2 m h = 9.3	h < 0.1	h = 0.7	x: 0.2 m h < 0.1	x: 0 m h < 0.1	x: 2 m h = 14.5		h < 0.1	h = 0.1	h < 0.1	h = 0.7		
N2/ N16	Cumple	Cumple	h < 0.1	N <sub>Ed</sub> = 0.00 N.P. <sup>(4)</sup>	x: 1.175 m h = 1.1	x: 1.175 m h = 0.8	x: 1.175 m h = 0.2	h = 0.1	h < 0.1	x: 0 m h < 0.1	x: 1.175 m h = 1.9		h < 0.1	h = 2.3	x: 1.175 m h = 0.2	h = 0.1		<b>CUMPLE</b> <b>h = 2.3</b>
	$\gamma < 3.0$	$I_w$ $I_{w,max}$	h < 0.1	N <sub>Ed</sub> = 0.00 N.P. <sup>(4)</sup>	x: 0 m h = 1.1	x: 0 m h = 0.8	x: 0 m h = 0.2	h = 0.1	h < 0.1	x: 0 m h < 0.1	x: 0 m h = 1.9		h < 0.1	h = 2.3	x: 0 m h = 0.2	h = 0.1		<b>CUMPLE</b> <b>h = 2.3</b>
N5/ N15	Cumple	Cumple	N <sub>Ed</sub> = 0.00 N.P. <sup>(1)</sup>	h = 0.2	x: 1.175 m h = 37.7	x: 0 m h = 0.3	x: 1.175 m h = 17.8	h < 0.1	h < 0.1	h < 0.1	x: 1.175 m h = 38.1		h < 0.1	M <sub>Ed</sub> = 0.00 N.P. <sup>(2)</sup>	N.P. <sup>(3)</sup>	N.P. <sup>(3)</sup>		<b>CUMPLE</b> <b>h = 38.1</b>
	$\gamma < 2.0$	$I_w$ $I_{w,max}$	N <sub>Ed</sub> = 0.00 N.P. <sup>(1)</sup>	h = 0.2	x: 0 m h = 37.7	x: 0 m h = 0.3	x: 1.175 m h = 17.8	h < 0.1	h < 0.1	h < 0.1	x: 1.175 m h = 38.1		h < 0.1	M <sub>Ed</sub> = 0.00 N.P. <sup>(2)</sup>	N.P. <sup>(3)</sup>	N.P. <sup>(3)</sup>		<b>CUMPLE</b> <b>h = 38.1</b>

Barras	COMPROBACIONES (CTE DB SE-A)													Estado		
	$\lambda$	$I_w$	$N_t$	$N_c$	$M_y$	$M_z$	$V_z$	$V_y$	$M_y V_z$	$M_z V_y$	$NM_y M_z$	$NM_y M_z$	$M_t$		$M_t V_z$	$M_t V_y$
N3/ N14	$\lambda < 3.0$ Cumple	$I_w \leq I_{w,max}$ Cumple	$N_t < 0.1$	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. <sup>(4)</sup>	$M_y$ x: 1.175 m h = 1.1	$M_z$ x: 1.175 m h = 0.8	$V_z$ x: 1.175 m h = 0.2	$V_y$ h = 0.1	$M_y V_z$ h < 0.1	$M_z V_y$ x: 0 m h < 0.1	$NM_y M_z$ x: 1.175 m h = 1.9	$NM_y M_z$ h < 0.1	$M_t$ h = 2.3	$M_t V_z$ x: 1.175 m h = 0.2	$M_t V_y$ h = 0.1	<b>CUMPLE</b> h = 2.3
N14/ N6	$\lambda < 3.0$ Cumple	$I_w \leq I_{w,max}$ Cumple	$N_t < 0.1$	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. <sup>(4)</sup>	$M_y$ x: 0 m h = 1.1	$M_z$ x: 0 m h = 0.8	$V_z$ x: 0 m h = 0.2	$V_y$ h = 0.1	$M_y V_z$ h < 0.1	$M_z V_y$ x: 0 m h < 0.1	$NM_y M_z$ x: 0 m h = 1.9	$NM_y M_z$ h < 0.1	$M_t$ h = 2.3	$M_t V_z$ x: 0 m h = 0.2	$M_t V_y$ h = 0.1	<b>CUMPLE</b> h = 2.3
N7/ N11	$\lambda < 2.0$ Cumple	$I_w \leq I_{w,max}$ Cumple	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. <sup>(1)</sup>	$N_{Ed} = 0.00$ h = 10.6	$M_y$ x: 1 m h = 0.5	$M_z$ x: 1 m h = 0.6	$V_z$ h = 0.1	$V_y$ h < 0.1	$M_y V_z$ h < 0.1	$M_z V_y$ h < 0.1	$NM_y M_z$ x: 1 m h = 11.4	$NM_y M_z$ h < 0.1	$M_t$ h = 0.1	$M_t V_z$ h = 0.1	$M_t V_y$ h < 0.1	<b>CUMPLE</b> h = 11.4
N11/ N6	$\lambda < 2.0$ Cumple	$I_w \leq I_{w,max}$ Cumple	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. <sup>(1)</sup>	$N_{Ed} = 0.00$ h = 4.9	$M_y$ x: 2 m h = 0.4	$M_z$ x: 2 m h = 9.3	$V_z$ h < 0.1	$V_y$ h = 0.7	$M_y V_z$ x: 0.2 m h < 0.1	$M_z V_y$ x: 0 m h < 0.1	$NM_y M_z$ x: 2 m h = 14.5	$NM_y M_z$ h < 0.1	$M_t$ h = 0.1	$M_t V_z$ h < 0.1	$M_t V_y$ h = 0.7	<b>CUMPLE</b> h = 14.5
N8/ N10	$\lambda < 2.0$ Cumple	$I_w \leq I_{w,max}$ Cumple	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. <sup>(1)</sup>	$N_{Ed} = 0.00$ h = 10.6	$M_y$ x: 1 m h = 0.5	$M_z$ x: 1 m h = 0.6	$V_z$ h = 0.1	$V_y$ h < 0.1	$M_y V_z$ h < 0.1	$M_z V_y$ h < 0.1	$NM_y M_z$ x: 1 m h = 11.4	$NM_y M_z$ h < 0.1	$M_t$ h = 0.1	$M_t V_z$ h = 0.1	$M_t V_y$ h < 0.1	<b>CUMPLE</b> h = 11.4
N10/ N5	$\lambda < 2.0$ Cumple	$I_w \leq I_{w,max}$ Cumple	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. <sup>(1)</sup>	$N_{Ed} = 0.00$ h = 4.9	$M_y$ x: 2 m h = 0.4	$M_z$ x: 2 m h = 9.3	$V_z$ h < 0.1	$V_y$ h = 0.7	$M_y V_z$ x: 0.2 m h < 0.1	$M_z V_y$ x: 0 m h < 0.1	$NM_y M_z$ x: 2 m h = 14.5	$NM_y M_z$ h < 0.1	$M_t$ h = 0.1	$M_t V_z$ h < 0.1	$M_t V_y$ h = 0.7	<b>CUMPLE</b> h = 14.5

Barras	COMPROBACIONES (CTE DB SE-A)													Estado		
	$\lambda$	$I_w$	$N_t$	$N_c$	$M_Y$	$M_Z$	$V_Z$	$V_Y$	$M_Y V_Z$	$M_Z V_Y$	$NM_Y M_Z$	$NM_Y M_Z$	$M_t$		$M_t V_Z$	$M_t V_Y$
N9/ N10	$\lambda < 3.0$ Cumple	$x: 0 m$ $I_w \leq I_w^{max}$ Cumple	$h < 0.1$	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. <sup>(4)</sup>	$x: 0 m$ $h = 0.5$	$h = 0.1$	$x: 0 m$ $h = 0.2$	$V_{Ed} = 0.00$ N.P. <sup>(5)</sup>	$x: 0 m$ $h < 0.1$	N.P. <sup>(6)</sup>	$x: 0 m$ $h = 0.7$	$x: 0 m$ $h < 0.1$	$M_{Ed} = 0.00$ N.P. <sup>(2)</sup>	N.P. <sup>(3)</sup>	N.P. <sup>(3)</sup>	<b>CUMPLE</b> <b>h = 0.7</b>
N10/ N11	$\lambda < 3.0$ Cumple	$x: 0 m$ $I_w \leq I_w^{max}$ Cumple	$h = 3.6$	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. <sup>(4)</sup>	$x: 0 m$ $h = 1.0$	$h = 0.1$	$x: 0 m$ $h = 0.2$	$V_{Ed} = 0.00$ N.P. <sup>(5)</sup>	$x: 0 m$ $h < 0.1$	N.P. <sup>(6)</sup>	$x: 0 m$ $h = 4.7$	$x: 0 m$ $h < 0.1$	$M_{Ed} = 0.00$ N.P. <sup>(2)</sup>	N.P. <sup>(3)</sup>	N.P. <sup>(3)</sup>	<b>CUMPLE</b> <b>h = 4.7</b>
N12/ N11	$\lambda < 3.0$ Cumple	$x: 0 m$ $I_w \leq I_w^{max}$ Cumple	$h < 0.1$	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. <sup>(4)</sup>	$x: 0 m$ $h = 0.5$	$h = 0.1$	$x: 0 m$ $h = 0.2$	$V_{Ed} = 0.00$ N.P. <sup>(5)</sup>	$x: 0 m$ $h < 0.1$	N.P. <sup>(6)</sup>	$x: 0 m$ $h = 0.7$	$x: 0 m$ $h < 0.1$	$M_{Ed} = 0.00$ N.P. <sup>(2)</sup>	N.P. <sup>(3)</sup>	N.P. <sup>(3)</sup>	<b>CUMPLE</b> <b>h = 0.7</b>
N9/ N12	$\lambda < 3.0$ Cumple	$x: 0 m$ $I_w \leq I_w^{max}$ Cumple	$h = 3.6$	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. <sup>(4)</sup>	$x: 0 m$ $h = 1.0$	$h = 0.1$	$x: 0 m$ $h = 0.2$	$V_{Ed} = 0.00$ N.P. <sup>(5)</sup>	$x: 0 m$ $h < 0.1$	N.P. <sup>(6)</sup>	$x: 0 m$ $h = 4.7$	$x: 0 m$ $h < 0.1$	$M_{Ed} = 0.00$ N.P. <sup>(2)</sup>	N.P. <sup>(3)</sup>	N.P. <sup>(3)</sup>	<b>CUMPLE</b> <b>h = 4.7</b>
N9/ N13	$\lambda < 2.0$ Cumple	$x: 0 m$ $I_w \leq I_w^{max}$ Cumple	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. <sup>(1)</sup>	$x: 0 m$ $h = 9.1$	$x: 0 m$ $h = 1.7$	$x: 0 m$ $h = 0.2$	$x: 0 m$ $h = 0.2$	$h < 0.1$	$h < 0.1$	$x: 0 m$ $h < 0.1$	$x: 0 m$ $h = 10.4$	$h < 0.1$	$h < 0.1$	$x: 0 m$ $h < 0.1$	$h < 0.1$	<b>CUMPLE</b> <b>h = 10.4</b>
N12/ N13	$\lambda < 2.0$ Cumple	$x: 0 m$ $I_w \leq I_w^{max}$ Cumple	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. <sup>(1)</sup>	$x: 0 m$ $h = 9.1$	$x: 0 m$ $h = 1.7$	$x: 0 m$ $h = 0.2$	$x: 0 m$ $h = 0.2$	$h < 0.1$	$h < 0.1$	$x: 0 m$ $h < 0.1$	$x: 0 m$ $h = 10.4$	$h < 0.1$	$h < 0.1$	$x: 0 m$ $h < 0.1$	$h < 0.1$	<b>CUMPLE</b> <b>h = 10.4</b>

Barras	COMPROBACIONES (CTE DB SE-A)													Estado		
	$\lambda$	$I_w$	$N_t$	$N_c$	$M_y$	$M_z$	$V_z$	$V_y$	$M_y V_z$	$M_z V_y$	$NM_y M_z$	$NM_y M_z$	$M_t$		$M_t V_z$	$M_t V_y$
N12/ N14	$\lambda < 2.0$ Cumple	$x: 0 \text{ m}$ $I_w \leq I_{w, \text{máx}}$ Cumple	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. <sup>(1)</sup>	$x: 0 \text{ m}$ $h = 0.3$	$x: 2.32 \text{ m}$ $h = 0.4$	$x: 2.32 \text{ m}$ $h = 2.1$	$x: 2.32 \text{ m}$ $h = 0.1$	$h = 0.1$	$x: 0 \text{ m}$ $h < 0.1$	$h < 0.1$	$x: 2.32 \text{ m}$ $h = 2.6$	$h < 0.1$	$h = 0.4$	$x: 2.32 \text{ m}$ $h = 0.1$	$h = 0.1$	<b>CUMPLE</b> <b>h = 2.6</b>
N11/ N14	$\lambda < 2.0$ Cumple	$x: 0 \text{ m}$ $I_w \leq I_{w, \text{máx}}$ Cumple	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. <sup>(1)</sup>	$x: 0 \text{ m}$ $h = 0.3$	$x: 2.32 \text{ m}$ $h = 0.4$	$x: 2.32 \text{ m}$ $h = 2.1$	$x: 2.32 \text{ m}$ $h = 0.1$	$h = 0.1$	$x: 0 \text{ m}$ $h < 0.1$	$h < 0.1$	$x: 2.32 \text{ m}$ $h = 2.6$	$h < 0.1$	$h = 0.4$	$x: 2.32 \text{ m}$ $h = 0.1$	$h = 0.1$	<b>CUMPLE</b> <b>h = 2.6</b>
N11/ N15	$\lambda < 2.0$ Cumple	$x: 0 \text{ m}$ $I_w \leq I_{w, \text{máx}}$ Cumple	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. <sup>(1)</sup>	$x: 0 \text{ m}$ $h = 9.1$	$x: 0 \text{ m}$ $h = 1.7$	$x: 0 \text{ m}$ $h = 0.2$	$x: 0 \text{ m}$ $h = 0.2$	$h < 0.1$	$h < 0.1$	$x: 0 \text{ m}$ $h < 0.1$	$x: 0 \text{ m}$ $h = 10.4$	$h < 0.1$	$h < 0.1$	$x: 0 \text{ m}$ $h = 0.2$	$h < 0.1$	<b>CUMPLE</b> <b>h = 10.4</b>
N10/ N15	$\lambda < 2.0$ Cumple	$x: 0 \text{ m}$ $I_w \leq I_{w, \text{máx}}$ Cumple	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. <sup>(1)</sup>	$x: 0 \text{ m}$ $h = 9.1$	$x: 0 \text{ m}$ $h = 1.7$	$x: 0 \text{ m}$ $h = 0.2$	$x: 0 \text{ m}$ $h = 0.2$	$h < 0.1$	$h < 0.1$	$x: 0 \text{ m}$ $h < 0.1$	$x: 0 \text{ m}$ $h = 10.4$	$h < 0.1$	$h < 0.1$	$x: 0 \text{ m}$ $h = 0.2$	$h < 0.1$	<b>CUMPLE</b> <b>h = 10.4</b>
N10/ N16	$\lambda < 2.0$ Cumple	$x: 0 \text{ m}$ $I_w \leq I_{w, \text{máx}}$ Cumple	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. <sup>(1)</sup>	$x: 0 \text{ m}$ $h = 0.3$	$x: 2.32 \text{ m}$ $h = 0.4$	$x: 2.32 \text{ m}$ $h = 2.1$	$x: 2.32 \text{ m}$ $h = 0.1$	$h = 0.1$	$x: 0 \text{ m}$ $h < 0.1$	$h < 0.1$	$x: 2.32 \text{ m}$ $h = 2.6$	$h < 0.1$	$h = 0.4$	$x: 2.32 \text{ m}$ $h = 0.1$	$h = 0.1$	<b>CUMPLE</b> <b>h = 2.6</b>
N9/ N16	$\lambda < 2.0$ Cumple	$x: 0 \text{ m}$ $I_w \leq I_{w, \text{máx}}$ Cumple	$N_{Ed} = 0.00$ N.P. <sup>(1)</sup>	$x: 0 \text{ m}$ $h = 0.3$	$x: 2.32 \text{ m}$ $h = 0.4$	$x: 2.32 \text{ m}$ $h = 2.1$	$x: 2.32 \text{ m}$ $h = 0.1$	$h = 0.1$	$x: 0 \text{ m}$ $h < 0.1$	$h < 0.1$	$x: 2.32 \text{ m}$ $h = 2.6$	$h < 0.1$	$h = 0.4$	$x: 2.32 \text{ m}$ $h = 0.1$	$h = 0.1$	<b>CUMPLE</b> <b>h = 2.6</b>

COMPROBACIONES (CTE DB SE-A)															
$\lambda$	$I_w$	$N_t$	$N_c$	$M_Y$	$M_Z$	$V_Z$	$V_Y$	$M_Y V_Z$	$M_Z V_Y$	$N M_Y M_Z$	$N M_Y M_Z / V_Y V_Z$	$M_t$	$M_t V_Z$	$M_t V_Y$	

Limitación:

*Limitación de esbeltez*

*Abolladura del alma inducida por el ala comprimida*

*Resistencia a tracción*

*Resistencia a compresión*

*Resistencia a flexión eje Y*

*Resistencia a flexión eje Z*

*Resistencia a corte Z*

*Resistencia a corte Y*

*$V_Z$ : Resistencia a momento flector Y y fuerza cortante Z combinados*

*$V_Y$ : Resistencia a momento flector Z y fuerza cortante Y combinados*

*$M_Y M_Z$ : Resistencia a flexión y axil combinados*

*$M_Y M_Z V_Y V_Z$ : Resistencia a flexión, axil y cortante combinados*

*Resistencia a torsión*

*$V_Z$ : Resistencia a cortante Z y momento torsor combinados*

*$V_Y$ : Resistencia a cortante Y y momento torsor combinados*

*Distancia al origen de la barra*

*Coefficiente de aprovechamiento (%)*

*N.P.: No procede*

*Comprobaciones que no proceden (N.P.):*

*La comprobación no procede, ya que no hay axil de tracción.*

*La comprobación no procede, ya que no hay momento torsor.*

*No hay interacción entre momento torsor y esfuerzo cortante para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede.*

*La comprobación no procede, ya que no hay axil de compresión.*

*La comprobación no procede, ya que no hay esfuerzo cortante.*

*No hay interacción entre momento flector y esfuerzo cortante para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede.*

## CONCLUSION

**Primero:** De los resultados obtenidos, podemos afirmar que el diseño propuesto para calentar agua con vapor de agua proveniente de la chimenea del hidratador PUGMILL es óptimo, pues se cumple con todas las condiciones de cálculo y restricciones. Queda de esta manera según el modelo matemático demostrado que es posible el calentar agua con vapor de agua y además la mitigación de vapor proveniente de la chimenea, también queda demostrada la resistencia estructural mediante cálculo matemático del soporte del tanque de agua.

**Segundo:** Al realizar el incremento de capacidad de cal hidratada, este se verá reflejado en los sistemas de transporte, pues la capacidad de transporte deberá incrementarse, para tal fin la empresa CAL & CEMENTO SUR SA previendo este incremento en la producción de cal hidratada, ya realizó las modificaciones para incrementos de capacidades respectivos en transportadores helicoidales, elevador de cangilones, zaranda vibratoria y aumento de otro silo de almacenamiento según lo mostrado en las figuras mostradas en el anexo. Este incremento de capacidad de producción ayudara a sostener los despachos solicitados por las principales unidades mineras del sur del país.

## RECOMENDACIONES

**Primero:** Se resuelve la inmediata implementación del intercambiador de calor por tratarse de una inversión con recuperación a corto plazo.

**Segundo:** Antes de la instalación de lo propuesto, es recomendable la limpieza integral y TAGGEO respectivo (etiquetado de instrumentos y equipos) de dicha zona para mayor control de equipos.

**Tercero:** La selección adecuada de las tuberías, esto con la finalidad de tener una alta conductividad térmica.

**Cuarto:** Luego de la puesta en marcha, el intercambiador de calor debe ser revestido con fibra de vidrio u otro material aislante de calor, con la finalidad de incrementar la eficiencia y por razones de seguridad.

**Quinto:** Los planes de mantenimiento deber ser cumplidos según el manual presentado en el presente trabajo de tesis, esto con la finalidad de evitar daños leves y mayores.

**Sexto:** Para una operación adecuada y duradera, se recomienda instalar antes de la entrada del tanque de agua un ablandador de agua esto con la finalidad de bajar la dureza del agua en ppm a valores aceptables para evitar el encalichamiento de nuestro intercambiador.

**BIBLIOGRAFIA**

- ✓ Kern, Donald Q. (1999) *Procesos de Transferencia de calor*
- ✓ *Standards of Tubular Exchangers Manufacturers Association*, 1988, 7th ed., New York, pp. 3-7, 13-18, 58-94, 133-136, 191-196.
- ✓ *American Society of Mechanical Engineers Boiler and Pressure Vessel Code*, Section VIII, Div. 1, 2001, New York.
- ✓ Taborek, J., (1992), *Handbook of Heat Exchangers Design*, New York, Begell House, Inc., pp. 3.3.4-1-3.3.4-6, 3.3.5-1-3.3.5-17.
- ✓ Saunders, E. A. D., (1988), *Heat Exchangers Selection, Design y Construction*, New York, John Wiley & Sons, Inc., pp. 3-83, 475-524.
- ✓ Megyesy, E. F., (2001), *Manual de Recipientes a Presión*, 7ta. Ed., Editorial Limusa, México, pp. 13-25, 85-96, 98-104, 118-128, 140-160, 192-199, 237, 324-333.
- ✓ Harris, D., Morris, M., (1983), *Heat Exchanger Design Handbook: Mechanical Design of Heat Exchangers*, 1ra. ed., U.S.A., Hemisphere Publishing Corporation, Vol. 4, p. 4.3.2-2-4.3.2-11, 4.3.6-1-4.3.6-23.
- ✓ Spencer, T. C., (1986), *Mechanical Design and Fabrication of Shell and Tube Heat Exchanger*, ASME Pressure Vessels and Piping Division, Houston, Texas, p. 131-134.
- ✓ Taborek, J., (1992), *Shell and Tube Heat Exchanger*. Chapter 3. Heat Exchanger Design Hemisphere, G. F. Hewitt. Begell House, Inc. New York.
- ✓ Flores, González. R., (2007), *Diseño, Fabricación y Validación Experimental de un Intercambiador de Calor de Tubo y Coraza*, Tesis de Maestría, IPN, México.
- ✓ Flores, González. R., Aguilar, Osorio. R., (2005), *Selección de Materiales para la Fabricación de un Intercambiador de Calor de Tubo y Coraza*, 4º Congreso Internacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas, IPN, México, p. 5-11
- ✓ *Technical Manual Pressure Pipelines*, (1999), AKATHERM-KMF, Holland.

- ✓ Flores, González R., Aguilar, Osorio R., (2006), *Diseño y Fabricación de Mamparas para un Intercambiador de Calor de Tubo y Coraza*, 9º Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas, IPN, México.
- ✓ Mukherjee, R., (1998), *Effectively Design Shell and Tube Heat Exchangers*, Chemical Engineering Progress, India, p. 21-37.
- ✓ Kakac, S., Liu, H., (1998), *Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design*, 1ra. ed., U.S.A., Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, p. 249-300.
- ✓ Gupta, J. P., (1986), *Fundamentals of Heat Exchanger and Pressure Vessel Technology*, 1ra. ed., U.S.A, Hemisphere Publishing Corporation, p. 1-54, 361-365, 375-377.
- ✓ Manual de la producción GEORGE E. HAGEMANN, B.S. in M.E.
- ✓ Manual de ingeniero Mecánico VOL I – VOL II. MARKS
- ✓ Manual de Ingeniero Químico VOL II JOHN H. PERRY
- ✓ Construcción de elementos de máquinas DEXTER S. KIMBALL, A.B., Dr. ENG., LL.D.
- ✓ Diseño de estructuras metálicas JOHN E. LOTHERS
- ✓ Manual de mantenimiento industrial Tomo I Organización, ingeniería mecánica, eléctrica, química, civil, procesos y sistemas.
- ✓ Internet

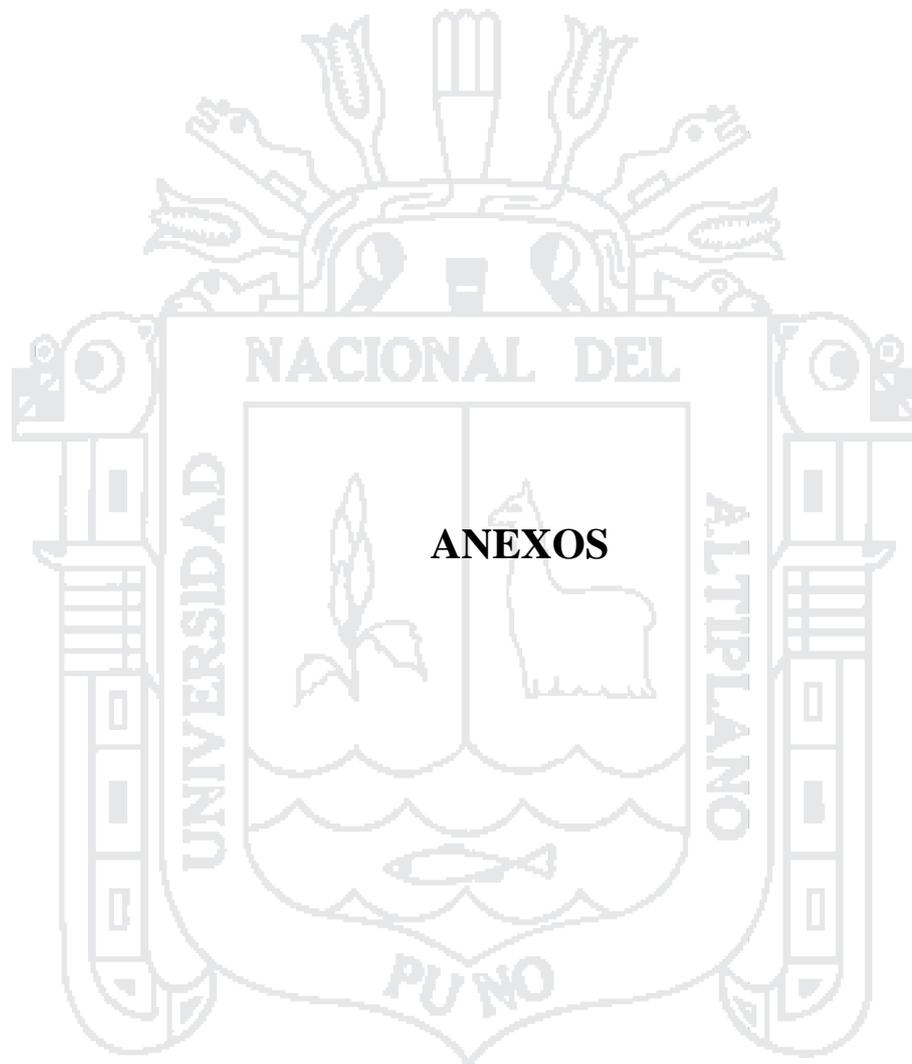




Fig. 27. Montaje de silo alternativo de cal hidratada.

Fuente: Foto Instalación de silo alternativo 60 Ton planta de cal – Cal & Cemento Sur SA



Fig. 28. Reemplazo de cangilones elevador 850.

Fuente: Foto Mecánico de mantenimiento realizando el cambio de cangilones en la

Cabeza de elevador - Cal & Cemento Sur SA

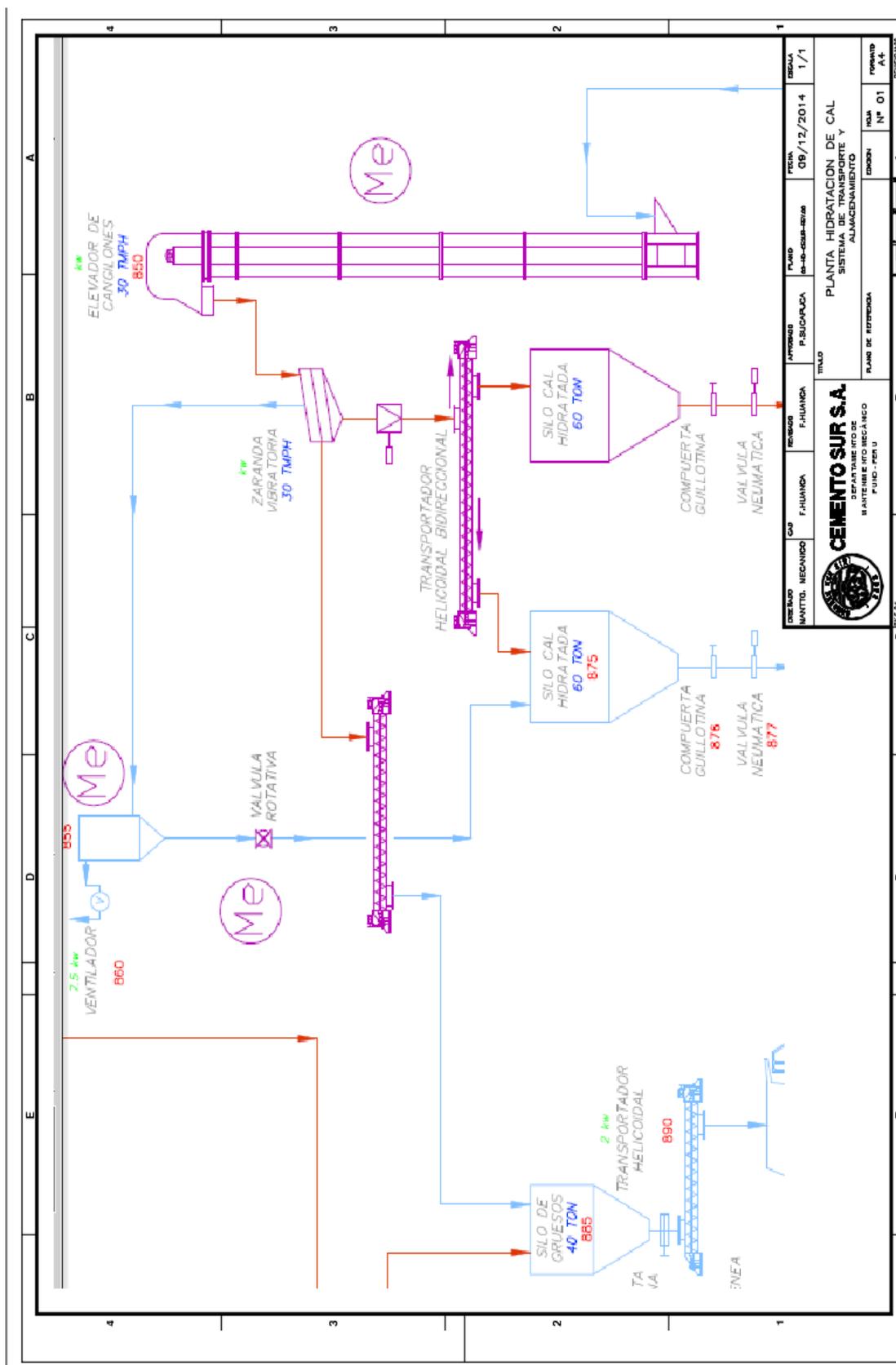


Fig. 29. Nuevo flow sheet sistema de transporte hidratación de cal.

Fuente: Propia

## MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBO Y CORAZA

### Seguridad

#### **LEA DETALLADAMENTE ESTE MANUAL. ANTES DE INSTALAR, OPERAR O DAR SERVICIO A ESTE EQUIPO**

Cal & Cemento sur SA recomienda a los usuarios de equipos de planta existentes y los equipos nuevos, que sigan los estándares industriales de seguridad más recientes. Como mínimo, estos deben incluir los requisitos de seguridad industrial establecidos por:

1. La Administración de Salud y Seguridad Ocupacional (OSHA), Título 29 del CFR Sección 1910.212- Requisitos generales para todas las máquinas
2. Asociación Nacional de Protección contra Incendios, ANSI/NFPA 79ANSI/NFPA 79- Estándares eléctricos para maquinaria industrial
3. Código Nacional de Electricidad, ANSI/NFPA 70ANSI/NFPA 70- Código Nacional de Electricidad ANSI/NFPA 70E- Requisito de seguridad eléctrica para lugares de trabajo con empleados
4. Instituto Nacional de Estándares Americanos (American National Standards Institute), Sección B11

**Atención:** Puede ser peligroso dar servicio a equipo industrial energizado. Pueden producirse lesiones severas o la muerte por el choque eléctrico, quemaduras o activación no intencional de equipo controlado. La práctica recomendada es desconectar y bloquear el equipo industrial de las fuentes de alimentación y liberar la energía almacenada, si la hay. Remítase al Estándar de la Asociación Nacional de Protección

contra Incendios Núm. NFPA70E, Parte II y (según sea aplicable) reglas OSHA para el Control de fuentes de energía peligrosas (Bloqueo-Rotulado) y prácticas de trabajo relacionadas con la seguridad eléctrica de OSHA, incluyendo requisitos de procedimientos para:

- ✓ Bloqueo y rotulación
- ✓ Calificaciones de personal y requisitos de capacitación
- ✓ Cuando no sea factible desenergizar y bloquear-rotular circuitos eléctricos y equipo antes de trabajar en piezas con circuitos expuestos o cerca de ellas

**Dispositivos de bloqueo y enclavamiento:** Deben revisarse estos dispositivos en cuanto a su estado de funcionamiento adecuado y capacidad de desempeñar sus funciones destinadas. Reemplace solamente por las piezas o juegos del fabricante original. Ajuste o repare conforme a las instrucciones del fabricante.

**Inspección periódica:** El equipo industrial debe inspeccionarse periódicamente. Los intervalos de inspección deben basarse en condiciones ambientales y operativas y ajustarse según lo indique la experiencia. Como mínimo, se recomienda una inspección inicial dentro de 3 a 4 meses después de la instalación. La inspección de los sistemas de control eléctrico deben cumplir con las recomendaciones especificadas en el Estándar de la Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos (National ELÉCTRICAL Manufacturers Association, NEMA) Núm. ICS 1.3, Mantenimiento Preventivo de Equipo de Sistemas y Control Industrial, para las pautas generales destinadas a establecer un programa de mantenimiento periódico.

**Equipo de reemplazo:** Use solamente piezas y dispositivos de reemplazo recomendados por el fabricante para mantener la integridad del equipo. Confirme que

las piezas estén debidamente adecuadas a la serie, el modelo, el número de serie y el nivel de revisión del equipo.

Se dan advertencias y precauciones en este manual para poder evitar lesiones serias y/o posibles daños al equipo:

**PELIGRO:** *marcadas con un signo de stop. Los peligros inmediatos que VAN a ocasionar lesiones personales severas o la muerte.*

**ADVERTENCIA:** *marcados con un triángulo de advertencia. Los peligros o prácticas peligrosas que PODRÍAN ocasionar lesiones personales severas o la muerte.*

**PRECAUCIÓN:** *marcados con un triángulo de advertencia. Los peligros o prácticas peligrosas que PODRÍAN ocasionar lesiones personales menores o daños al producto o la propiedad.*

## OPERACIÓN

### PROCEDIMIENTO DE ARRANQUE DE INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBO Y CORAZA

#### Antes de iniciar la operación

El principio básico del intercambiador de calor, es la transferencia de calor originada por el vapor que emana del proceso de hidratación, llegando a temperaturas de 90 °C. Este pequeño procedimiento está basado según el plano **02-HDR-CAL-CESUR-REV.00** (ver Página 172).

Antes de realizar el arranque de la planta de hidratación con el nuevo intercambiador de calor instalado, tener en cuenta que:

- ✓ Verificar el nivel del tanque de agua 1, este debe encontrarse por encima del nivel mínimo establecido (80% de nivel), para tener la certeza de que los ductos del intercambiador estén con agua

- ✓ Apertura de la válvula 14 (válvula de purga), para verificar que la coraza no se encuentre con agua.
- ✓ Inspección y cierre de válvulas 2 y 3 para que el agua no fluya por el intercambiador de calor antes de iniciar la operación.
- ✓ La compuerta 10 deberá estar direccionada 100% al medio ambiente.

**Durante la operación.**

- ✓ Una vez iniciada la operación de la planta de hidratación de cal, verificar la temperatura de salida del vapor de la chimenea sea mayor a 87°C, esto se verá en la termocupla 15 (sensor de temperatura) instalada en la tobera de la chimenea, esto con la finalidad de evitar que el punto de rocío se vea afectado en la coraza y tener condensados no deseados.
- ✓ Una vez que nuestra temperatura se encuentre por encima de los 87°C, abrir la compuerta direccionadora 10 de vapor ligeramente hasta tener un 85% de apertura.
- ✓ Teniendo el vapor fluyendo por la coraza 9, procedemos a abrir las válvulas 2 y 3 para que el agua fluya a través de los tubos y poder iniciar con el proceso de transferencia de calor, paralelo a ello, cerrar la válvula 4.
- ✓ Tener en cuenta con qué bomba se ha de trabajar 5 o 6 para poder aperturar o cerrar las válvulas 5 – 6 – 7 ú 8 respectivamente.
- ✓ En operación continua, verificación constante de la válvula de purga de la coraza, válvula 14, para evitar niveles de condensados indeseados.
- ✓ Luego de realizar la parada de la planta de hidratación, verificar e inspeccionar el premixer (PUGMILL) y asegurarse que no se encuentre apelmazamientos en las bocas de los inyectores de agua.
- ✓ El flujómetro 11 y la válvula distribuidora 12, trabajarán de acuerdo a requerimientos de producción.

- ✓ El vapor de agua que sale del intercambiador de calor, será direccionada al tanque de agua 1, con la finalidad de mitigar el vapor extraído.

✓

## MANTENIMIENTO

### Mantenimiento preventivo

- ✓ Corrija los problemas tan pronto los descubra.
- ✓ Inspeccione el equipo frecuentemente después de hacer cambios y en la formulación de nuevos productos (tipos de cal hidratada).
- ✓ Siempre anote y reporte cualquier condición anormal o fuera de lo común.
- ✓ Siga un programa de mantenimiento preventivo regular. Hay muchos factores que determinan el intervalo requerido para el servicio programado. La gravedad de la aplicación o no del programa de mantenimiento se verá reflejado en la conservación del equipo (intercambiador de calor).

Cuando se ponen las nuevas unidades en servicio por primera vez, deben desarmarse después de cada vuelta de producción e inspeccionarse en busca de patrones obvios de desgaste. Estas inspecciones iniciales establecerán un historial de procesos, así como darán una base para definir un programa de mantenimiento preventivo. Las inspecciones deben enfocarse principalmente en los componentes del tubo, el eje, aspas y sellos. Durante las vueltas normales de producción, debe anotarse y corregirse cualquier condición anormal como ruido inusual, fuga o vibración.

### Sellos mecánicos

El intercambiador de calor están equipado con sello mecánicos simples o dobles en cada extremo del eje del mutador (deflector).

NOTA: Los sellos mecánicos dobles deben estar al ras para evitar que se sobrecalienten sus caras.

Deben cambiarse las caras de los sellos mecánicos con picaduras, ampollas, surcos o cualquier anomalía en la cara del sello. Deben cambiarse los elastómeros que estén quebradizos, deformados, cortados o que tengan alguna anomalía. Es una excelente práctica cambiar todos los elastómeros y juntas siempre que se realice el mantenimiento.

### **Tubos**

Una causa frecuente de daños a la pared de los tubos es la manipulación descuidada al retirar o instalar el eje del mutador (deflector). Siempre debe usarse el patín del canal del eje al retirar o instalar el eje del mutador en el Votator II Horizontal (o la unidad Vertical si está en una posición horizontal) para prevenir que los pasadores de montaje de las aspas marquen y dañen la pared del tubo.

Una manera común de dañar los extremos de los tubos es golpear o dejar caer las chumaceras del eje al retirar o insertar el eje.

Los tubos deben examinarse en cuanto a desgaste en cualquier momento que se quite el eje o al menos una vez cada 3 meses. Deben inspeccionarse los tubos cromados para ver si se ha descascarado el cromo. Normalmente, los tubos desarrollarán patrones fonográficos por el contacto y la rotación del aspa; este patrón fonográfico es generalmente visible a simple vista pero no es significativo a menos que sea detectable al tacto. Las marcas son significativas cuando se ha dañado el metal de la base; la aspereza de la pared del tubo es obvia de manera tanto visual como táctil. Un tubo muy marcado dificultará más la limpieza, reduce la transferencia de calor, produce mal rendimiento y aumenta el desgaste del aspa.

El reacondicionamiento del tubo es la única manera de restaurar el rendimiento. Si se sospecha que las marcas han penetrado la pared del tubo, la unidad puede probarse en cuanto a presión activando los medios de la camisa y observando el interior del tubo en busca de fugas.

Los tubos deben retirarse cada 12 a 18 meses para limpiar los residuos del lado de los medios. Deben cambiarse las juntas tóricas del lado de la camisa cuando se vuelvan a instalar los tubos.

### **Cuidado del tubo del intercambiador de calor**

**NOTA:** El trabajo de reparación debe realizarlo un taller con soldadores certificados por ASME. Los tubos del intercambiador de calor son piezas codificadas ASME. Si no se hacen las reparaciones en un taller de maquinaria codificado ASME con soldadores certificados se anulará la garantía y posiblemente quedará nulo el seguro. El Equipo de Procesos SPX tiene todas las certificaciones requeridas necesarias para reparar piezas codificadas ASME.

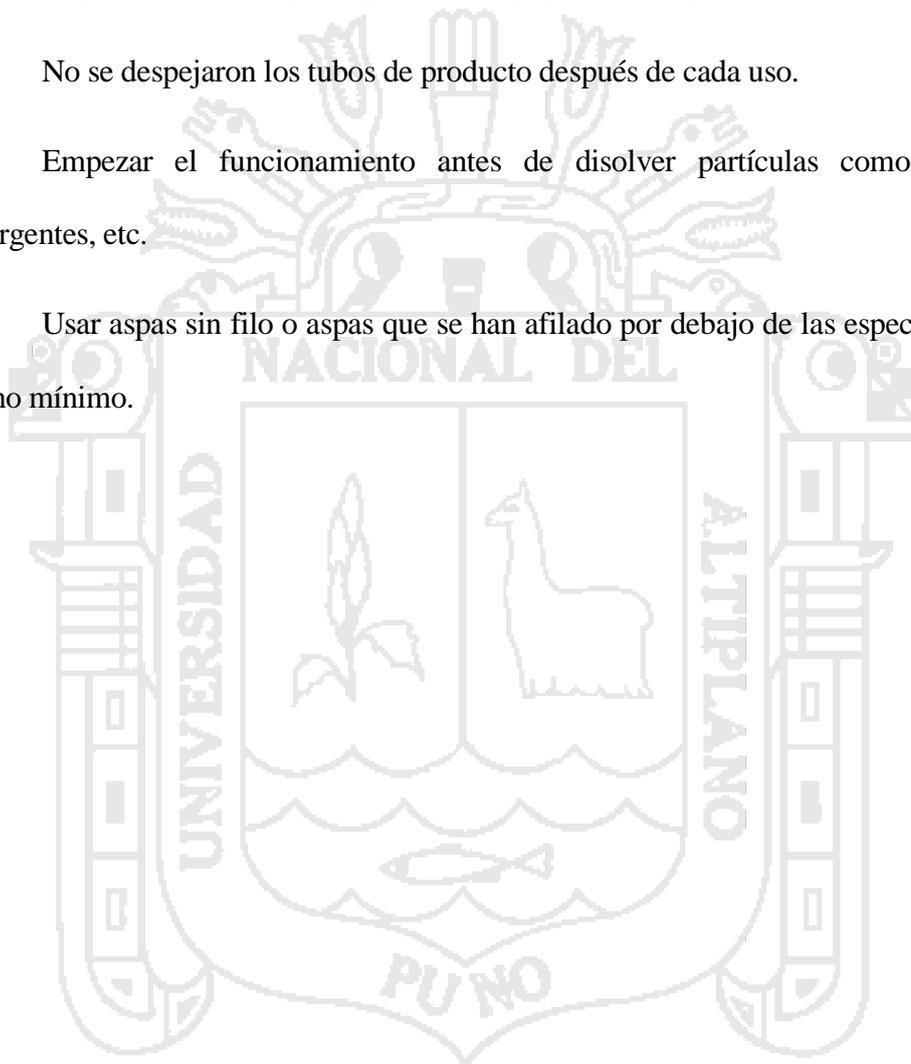
### **Lado del producto**

El tubo del intercambiador de calor está diseñado para durar largo tiempo con mínimo mantenimiento.

Si los tubos se desgastan prematuramente, uno o varios de los siguientes factores pueden ser la causa:

- ✓ Si no se usa el canal del eje al retirar el eje del mutador provocará rayas o muescas en la pared del tubo.
- ✓ Ensamblaje e instalación descuidados de las aspas.
- ✓ Girar el eje sin producto o sin flujo de producto.

- ✓ Uso del detergente equivocado o el uso incorrecto de un detergente.
- ✓ Iniciar los ejes contra producto endurecido o solidificado en los tubos.
- ✓ Iniciar el flujo de medios de la camisa (amoníaco, freón, vapor, agua, etc.) antes de establecer plenamente el flujo de producto bajo presiones operativas.
- ✓ No se despejaron los tubos de producto después de cada uso.
- ✓ Empezar el funcionamiento antes de disolver partículas como sal, azúcar, detergentes, etc.
- ✓ Usar aspas sin filo o aspas que se han afilado por debajo de las especificaciones de ancho mínimo.



**COSTOS Y PRESUPUESTO DE OBRA**

A	OBRAS CIVILES					
Ítem	Descripción	Unid.	Cant.	Unitario	S/.	US\$
<b>1.10</b>	<b><u>OBRAS PRELIMINARES</u></b>					
1.11	Limpieza de zona de trabajo	m2	48.00	5.00	240.00	85.71
1.12	Trazo y replanteo, control de niveles	Global	1.00	450.00	450.00	160.71
	<b>SUB-TOTÁL 1:</b>				<b>690.00</b>	<b>246.43</b>
	<b><u>OBRAS DE CONCRETO</u></b>					
<b>1.20</b>	<b><u>SIMPLE</u></b>					
	<b><u>OBRAS DE CONCRETO</u></b>					
	<b><u>ARMADO</u></b>					
	<b><u>BASES PARA SOPORTE DE</u></b>					
	<b><u>TANQUE DE AGUA</u></b>					
<b>1.210</b>	<b><u>ZAPATA</u></b>					
1.211	Concreto en zapata	m3	2.30	128.00	294.40	105.14
1.212	Acero en Zapata	kg	78.50	2.00	157.00	56.07
<b>1.220</b>	<b><u>VIGA DE CONEXIÓN</u></b>					
1.221	Concreto en viga	m3	1.42	125.00	177.50	63.39
1.222	Encofrado en viga	m2	9.44	38.00	358.72	128.11
1.223	Acero en viga	kg	74.00	2.00	148.00	52.86
<b>1.230</b>	<b><u>PEDESTAL</u></b>					
1.231	Concreto en pedestal	m3	1.60	125.00	200.00	71.43
1.232	Encofrado en pedestal	m2	11.52	46.00	529.92	189.26
1.233	Acero en pedestal	kg	46.50	2.00	93.00	33.21
1.234	anclaje metálico	und	14.00	85.00	1,190.00	425.00
	<b>SUB-TOTAL 2:</b>				<b>3148.54</b>	<b>1124.48</b>

TOTAL OBRAS CIVILES				3,838.54	1,370.91	
OBRAS METALMECÁNICAS						
B						
Ítem	Descripción	Unid.	Cant.	Unitario	S/.	US\$
1.00	<b>FABRICACIONES</b>					
1.10	<b><u>INTERCAMBIADOR DE CALOR</u></b>					
1.20	Logística y Seguridad	Gral.	1.00	350.00	350.00	125.00
1.30	Fabricación de intercambiador de calor según plano (incluye deflectores)	Und.	1.00	4,462.00	4,462.00	1,593.57
1.40	Forrado de intercambiador con material	mts2	5.28	542.10	2,861.15	1,021.84
1.50	Fabricación de ductos de dirección de vapor a intercambiador y tanque de agua	mts	5.00	928.00	4,640.00	1,657.14
1.60	Fabricación de válvulas de redirección de vapor (2 vías)	Gral.	1.00	1,252.00	1,252.00	447.14
1.70	Fabricación de plataforma para intercambiador (incluye barandas y cobertura)	Gral.	1.00	2,020.29	2,020.29	721.53
	<b>SUB-TOTAL 1:</b>				<b>15585.45</b>	<b>5566.23</b>
1.20	<b><u>TANQUE DE AGUA 6MTS3</u></b>					
1.21	Logística y Seguridad	Gral.	1.00	750.00	750.00	267.86
1.22	Fabricación de tanque de agua de 6 m3, según plano adjunto	Und.	1.00	14,800.00	14,800.00	5,285.71
1.23	Fabricación de ductos de dirección	mts	5.00	928.00	4,640.00	1,657.14

	de vapor a intercambiador					
1.24	Fabricación de soporte para tanque de agua 1200kg	Und.	1.00	2,534.00	2,534.00	905.00
	<b>SUB-TOTÁL 2:</b>				<b>22724.00</b>	<b>8115.71</b>
<b>1.30</b>	<b><u>OTRAS FABRICACIONES</u></b>					
1.31	Logística y Seguridad	Gral.	1.00	750.00	750.00	267.86
1.32	Fabricación de tanque de agua de 6 m3, según plano adjunto	Und.	1.00	3,649.60	3,649.60	1,303.43
1.33	Fabricación de ductos de dirección de vapor a intercambiador	mts	5.00	928.00	4,640.00	1,657.14
1.34	Fabricación de válvulas de redirección de vapor (2 vías)	Gral.	1.00	1,252.00	1,252.00	447.14
	<b>SUB-TOTÁL 3:</b>				<b>10291.60</b>	<b>3675.57</b>
<b>2.00</b>	<b>DESMONTAJES MECÁNICOS</b>					
<b>2.10</b>	<b><u>DESMONTAJES EN GENERAL</u></b>					
2.11	Desmontaje de tubería de vapor	Gral.	1.00	976.00	976.00	348.57
2.12	Desmontaje de voluta de ventilador de filtro de mangas	Gral.	1.00	976.00	976.00	348.57
2.13	Desmontaje de barandas de seguridad	Gral.	1.00	797.44	797.44	284.80
2.14	traslado a zona chatarra de unidades desmontadas	Gral.	1.00	1,085.68	1,085.68	387.74
2.15	montaje de tuberías de vapor (después de ventilador de filtro de mangas a intercambiador y a tanque de agua)	Gral.	1.00	798.40	798.40	285.14
	<b>SUB-TOTÁL 4:</b>				<b>4633.52</b>	<b>1654.83</b>

<b>3.00 DESMONTAJES MECÁNICOS</b>						
<b><u>MONTAJE</u></b>						
<b>3.10</b>	<b><u>INTERCAMBIADOR DE CALOR</u></b>					
	Montaje de plataforma para					
3.11	intercambiador (incluye barandas y cobertura)	Gral.	1.00	1,496.00	1,496.00	534.29
	Montaje de soporte principal para					
3.12	tanque de agua	Gral.	1.00	1,176.00	1,176.00	420.00
3.13	Montaje de tanque de agua montaje de intercambiador de calor	Und.	1.00	897.44	897.44	320.51
3.14	(incluye instalación de tuberías de intercambiador y a tanque de agua)	Und.	1.00	1,085.68	1,085.68	387.74
	montaje de tuberías de vapor					
3.15	(después de ventilador de filtro de mangas a intercambiador y a tanque de agua)	Und.	1.00	998.40	998.40	356.57
3.16	Pruebas de operación y limpieza de zona de trabajo	Und.	1.00	594.00	594.00	2,019.11
<b>SUB-TOTAL 5:</b>					<b>6247.52</b>	<b>2231.26</b>
<b>TOTAL OBRAS METALMECÁNICAS</b>					<b>59,482.09</b>	<b>21,243.60</b>
<b>C</b>	<b>OBRAS ELÉCTRICAS</b>					
Ítem	Descripción	Unid.	Cant.	Unitario	S/.	US\$
<b>1.10</b>	<b><u>OBRAS PRELIMINARES</u></b>					
1.11	instalaciones en general	Global	1.00	594.82	594.82	212.44
1.12	Otros (protección, cableado,	Global	1.00	4,758.57	4,758.57	1,699.49

	tableros, etc.)					
	<b>SUB-TOTÁL 1:</b>				<b>5353.39</b>	<b>1911.92</b>
	<b>TOTÁL OBRAS ELÉCTRICAS</b>				<b>5,353.39</b>	<b>1,911.92</b>
	<b>SUMINISTRO DE MATERIALES</b>					
<b>D</b>						
Ítem	Descripción	Unid.	Cant.	Unitario	S/.	US\$
<b>1.00</b>	<b><u>SUMINISTRO DE MATERIALES</u></b>					
1.01	CEMENTO PORT. PUZ. IP X 42.5 KG. RUMI	Und	8.00	20.00	160.00	57.14
1.02	Fierro corrugado 3/8"	Und	5.00	11.74	58.71	20.97
1.03	Fierro corrugado 3/4"	Und	4.00	49.04	196.17	70.06
1.04	PLANCHA DE FIERRO NEGRO DE 5/8 PU. X 4'X 8'	Und	4.00	652.37	2609.47	931.95
1.05	PLANCHA DE FIERRO NEGRO DE 1/4" X 4'X8'	Und	7.00	232.25	1625.73	580.62
1.06	VIGA W 6"X15 LB, LONG.: 20' ASTM A-36	Und	4.00	314.84	1259.37	449.78
1.07	ANGULO DE FIERRO NEGRO DE 1/4 X 2 X 2	Und	6.00	64.37	386.23	137.94
1.08	PLANCHA ACERO ANTITERMICO 6MM X 1.5 m X 3.0 m	Und	1.00	3639.90	3639.90	1299.96
1.09	VALVULA COMPUERTA DE BRONCE DE 2 PU.	Und	8.00	170.87	1366.96	488.20
1.10	FLUJOMETRO DE AGUA 2"DIAM	Und	1.00	569.88	569.88	203.53

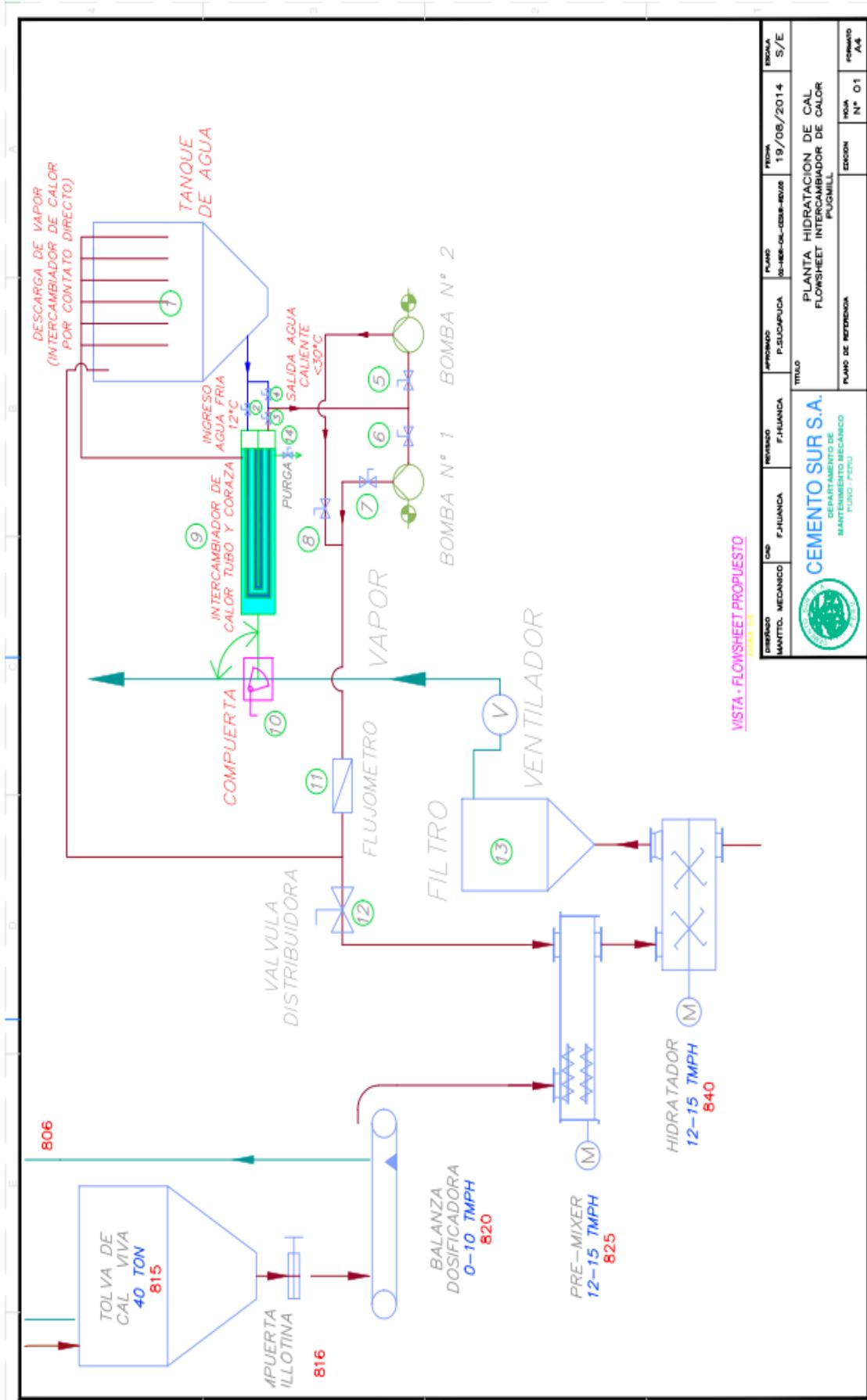
1.11	TUBO ACERO SCH-40 ASTM- A53 4 PU X 6.1MT	mts	12.20	39.00	475.80	169.93
1.12	TUBO DE ACERO DE 2 PU. X 6 MTS. SCH 40	Und	3.00	80.21	240.64	85.94
1.13	VALVULA DE DISTRIBUCION DE FIERRO NEGRO DE 2 PU	Und	1.00	150.00	150.00	53.57
<b>TOTÁL SUMINISTRO DE MATERIALES</b>					<b>12,738.85</b>	<b>4,549.59</b>

DESCRIPCIÓN	TOTÁL (S/.)	TOTÁL (US\$)
<b>OBRAS CIVILES</b>	<b>3,838.54</b>	<b>1,370.91</b>
<b>OBRAS METALMECÁNICAS</b>	<b>59,482.09</b>	<b>21,243.60</b>
<b>OBRAS ELÉCTRICAS</b>	<b>5,353.39</b>	<b>1,911.92</b>
<b>SUMINISTRO DE MATERIALES</b>	<b>12,738.85</b>	<b>4,549.59</b>
<b>COSTO TOTÁL NO INCLUYE IGV</b>	<b>81,412.86</b>	<b>29,076.02</b>



**PLANO DE INSTALACIÓN, FLOWSHEET, DATOS Y  
GRÁFICOS PARA CÁLCULOS**





PROYECTO	MANITTO. MECANICO	ESP. 304	CDP	F. HUANCA	REFERENCIO	F. HUANCA	PROYECTO	P. SUCUPUCA	FECHA	19/08/2014	ESCALA	S/E	
PLANTA HIDRATACION DE CAL FLOWSHEET INTERCAMBIADOR DE CALOR PUCHILLI													
PLANO DE REFERENCIA													
										HOJA	N° 01	FORMATO	A4



$$k = \text{Btu}/(\text{h})(\text{pie}^2)(^{\circ}\text{F}/\text{pie})$$

Los valores extremos de la temperatura constituyen el rango experimental. Para extrapolación a otras temperaturas, se sugiere que los datos consignados se grafiquen como log de  $k$  vs. log de  $T$  o que se haga uso de la suposición de que la razón  $c_p/k$  es prácticamente independiente de la temperatura (o de la presión, dentro de límites moderados).

Sustancia	$^{\circ}\text{F}$	$k$	Sustancia	$^{\circ}\text{F}$	$k$
Acetato de etilo	115	0.0072	Diclorodifluorometano	32	0.0048
	212	0.0098		122	0.0064
	363	0.0141		212	0.0080
Alcohol	68	0.0089		302	0.0097
cloruro	212	0.0124	tanq	-94	0.0066
	32	0.0055		-29	0.0066
	212	0.0099		32	0.0106
	363	0.0138		212	0.0175
Eter	413	0.0182	Etileno	-96	0.0064
	32	0.0077		32	0.0101
	115	0.0099		122	0.0131
	212	0.0131		212	0.0161
	363	0.0189	Heptano (n-)	362	0.0112
Acetona	413	0.0202		212	0.0103
	32	0.0057	Hexano (n-)	32	0.0072
	115	0.0074		68	0.0080
	212	0.0092	Hexano	32	0.0061
	363	0.0147		212	0.0109
Acetileno	-103	0.0068	Hidrógeno	148	0.065
	32	0.0106		-58	0.083
	122	0.0140		32	0.100
	212	0.0172		122	0.115
Aire	-148	0.0095		212	0.129
	32	0.0140		572	0.178
	212	0.0183	Hidrógeno y bióxido de carbono	32	
	302	0.0228	0% H <sub>2</sub>		0.0083
Alcohol metílico	572	0.0265	20%		0.0165
	32	0.0083	40%		0.0270
	212	0.0128	60%		0.0410
Acetato	32	0.0059	80%		0.0620
Amoníaco	68	0.0068	100%		0.10
	-76	0.0028	Hidrógeno y nitrógeno	32	
	32	0.0128	0 H <sub>2</sub>		0.0133
	192	0.0257	50%		0.0212
Benceno	212	0.0185	40%		0.0312
	32	0.0052	60%		0.0438
	112	0.0073	80%		0.0635
	212	0.0103	Hidrógeno y óxido nítrico	32	
Bióxido de azufre	363	0.0152	0% H <sub>2</sub>		0.0002
	413	0.0176	20%		0.0170
	72	0.0060	40%		0.0270
Bióxido de carbono	212	0.0069	60%		0.0410
	-58	0.0068	80%		0.0650
	32	0.0068	Mercurio	-392	0.0197
	212	0.0135	Metano	-268	0.0100
	392	0.0181		-58	0.0145
	572	0.0228		32	0.0175
Bisulfuro	32	0.0040		212	0.0215
Monóxido	45	0.0048	Nitrógeno	-142	0.0095
	-312	0.0041		32	0.0140
	-294	0.0048		122	0.0100
	32	0.0135	Oxido nítrico	212	0.0180
Tetracloruro	115	0.0041		-94	0.0103
	212	0.0052	Oxido nítrico	32	0.0136
	363	0.0062		-96	0.0067
Butano (n-)	32	0.0078	Oxido nítrico	32	0.0087
Butano (iso-)	212	0.0135		212	0.0228
	32	0.0060	Oxígeno	-48	0.0095
	212	0.0138		-58	0.0112
Ciclohexano	216	0.0039		32	0.0142
Cloro	32	0.0043		122	0.0164
Cloroformo	32	0.0038	Pentano (n-)	212	0.0185
	115	0.0046		32	0.0074
	312	0.0058	(iso-)	68	0.0083
	363	0.0077		32	0.0072
Cloruro de metileno	32	0.0038	Propano	212	0.0127
	115	0.0049		32	0.0087
	212	0.0063	Sulfuro de hidrógeno	212	0.0151
	413	0.0095	Vapor de agua	32	0.0076
Cloruro de metilo	32	0.0053		115	0.0120
	115	0.0072		212	0.0137
	212	0.0094		302	0.0187
	363	0.0130		572	0.0248
	413	0.0148		752	0.0315
				932	0.0441

De Perry, J. H. "Chemical Engineers' Handbook", 3d ed. McGraw-Hill Book Company Inc., New York, 1950.

Tabla 6. Conductividades termicas de gases y vapores.

Fuente: Procesos de transferencia de calor DONALD KERN

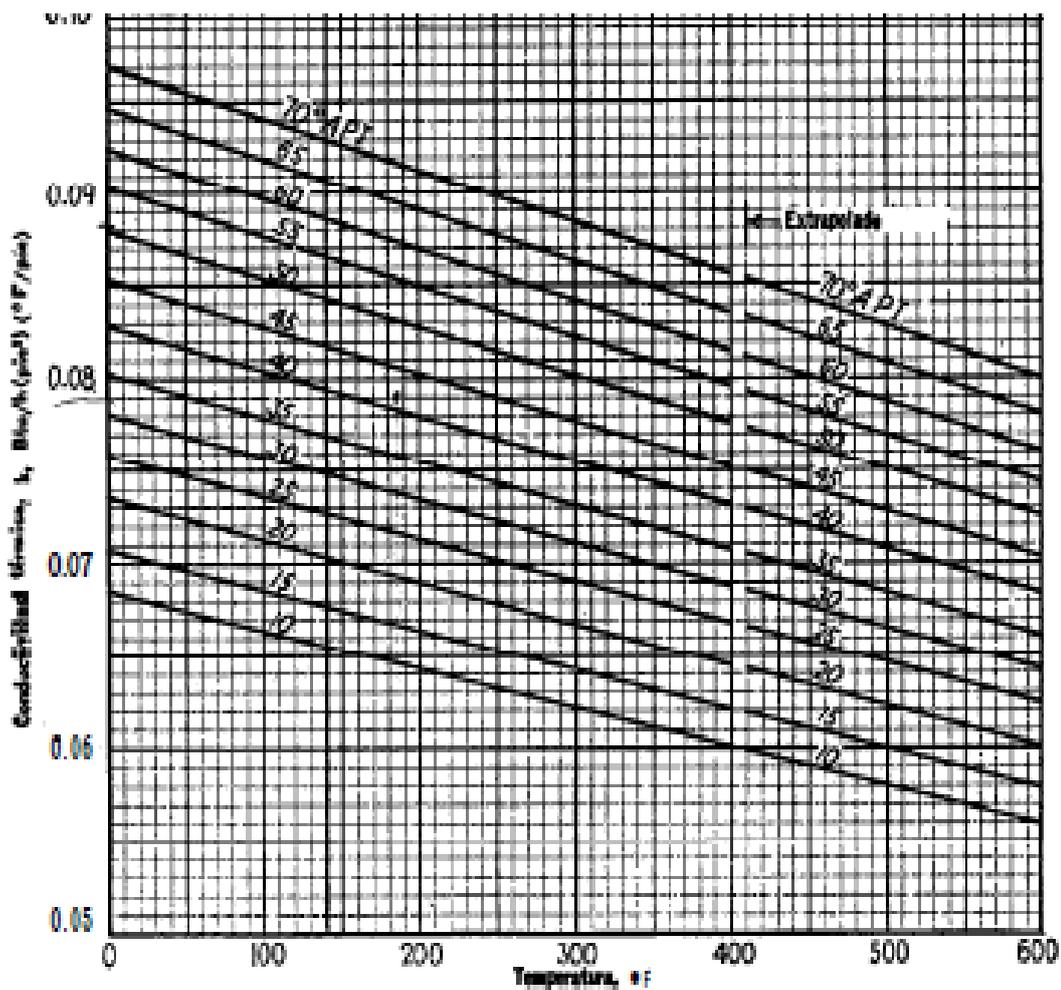
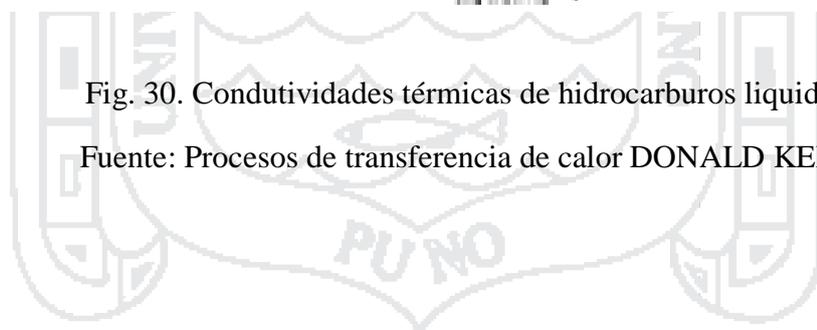


Fig. 30. Conduktividades térmicas de hidrocarburos líquidos.

Fuente: Procesos de transferencia de calor DONALD KERN



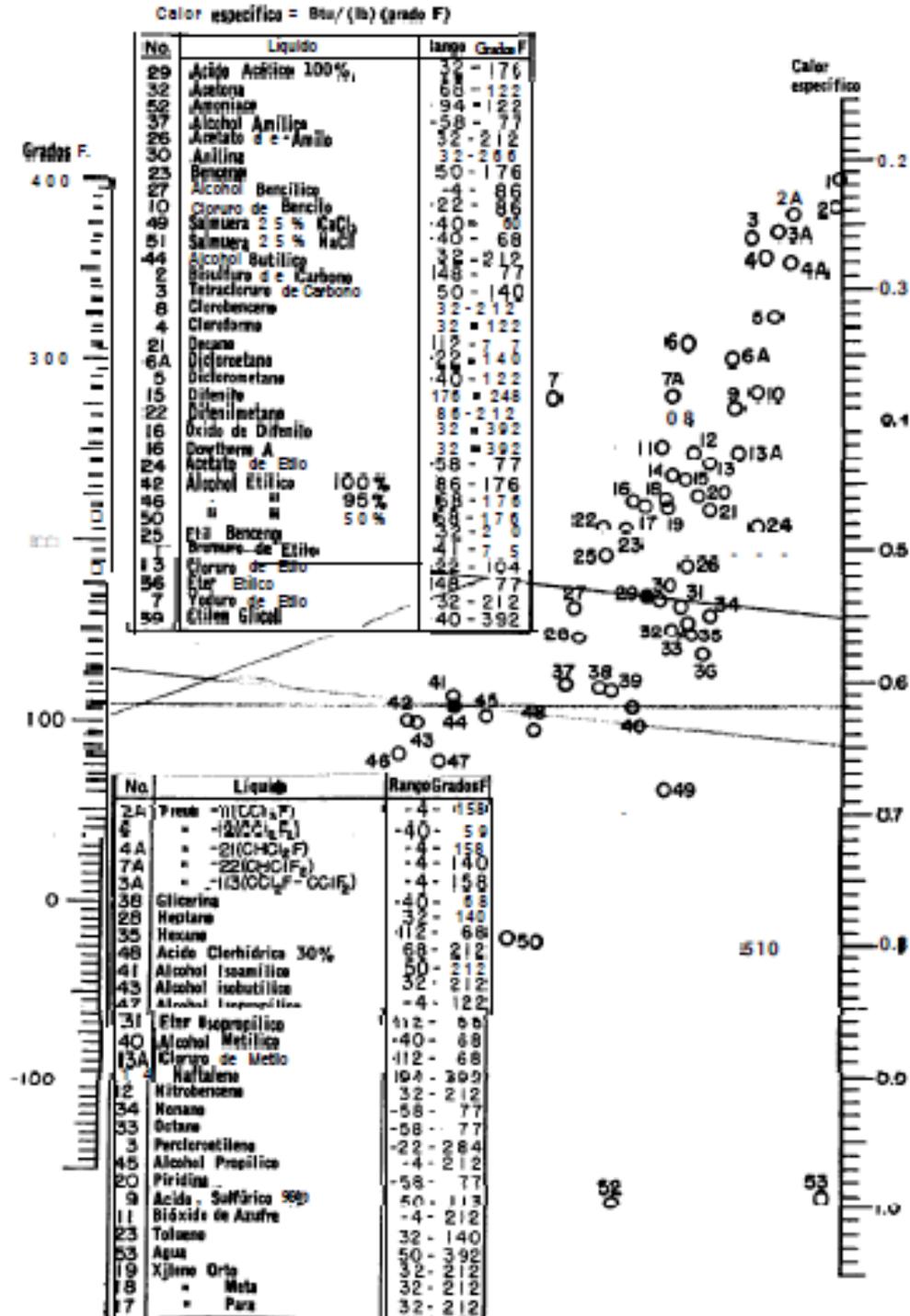


Fig. 31. Calores específicos de líquidos.

Fuente: Procesos de transferencia de calor DONALD KERN

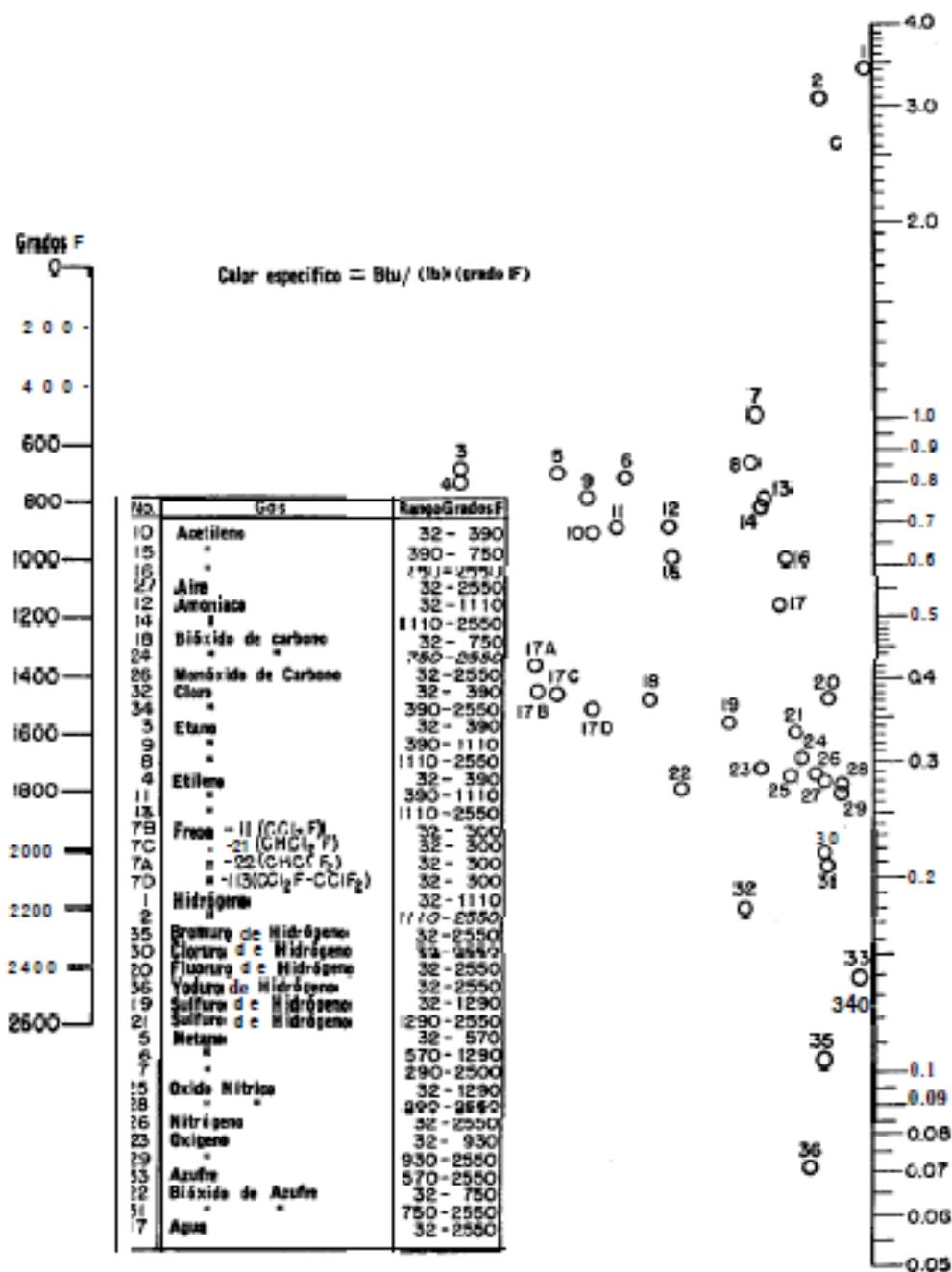


Fig. 32. Calores específicos de gases a 1 atm.

Fuente: Procesos de transferencia de calor DONALD KERN

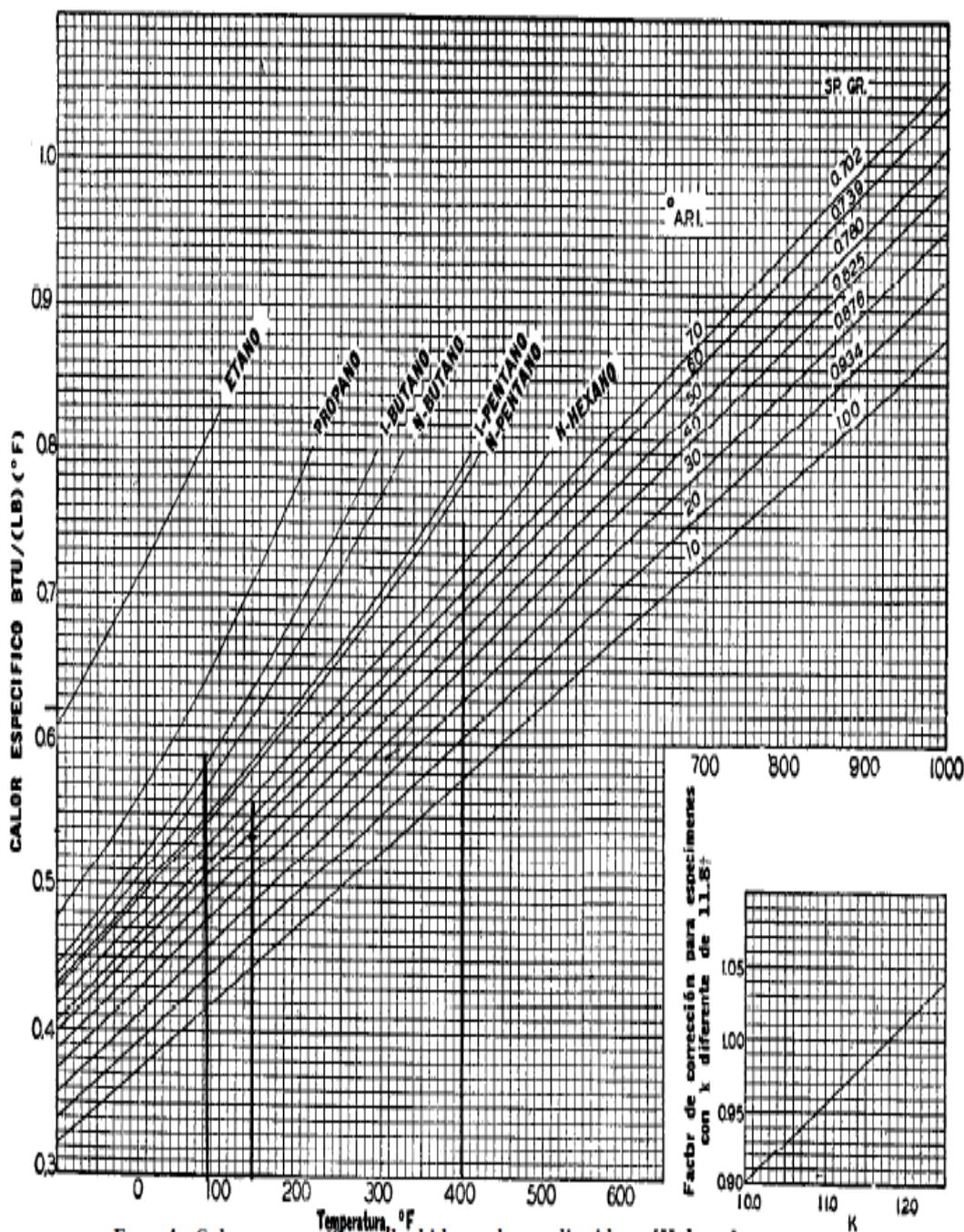


Fig. 33. Calores específicos de líquidos hidrocarburos líquidos.

Fuente: Procesos de transferencia de calor DONALD KERN

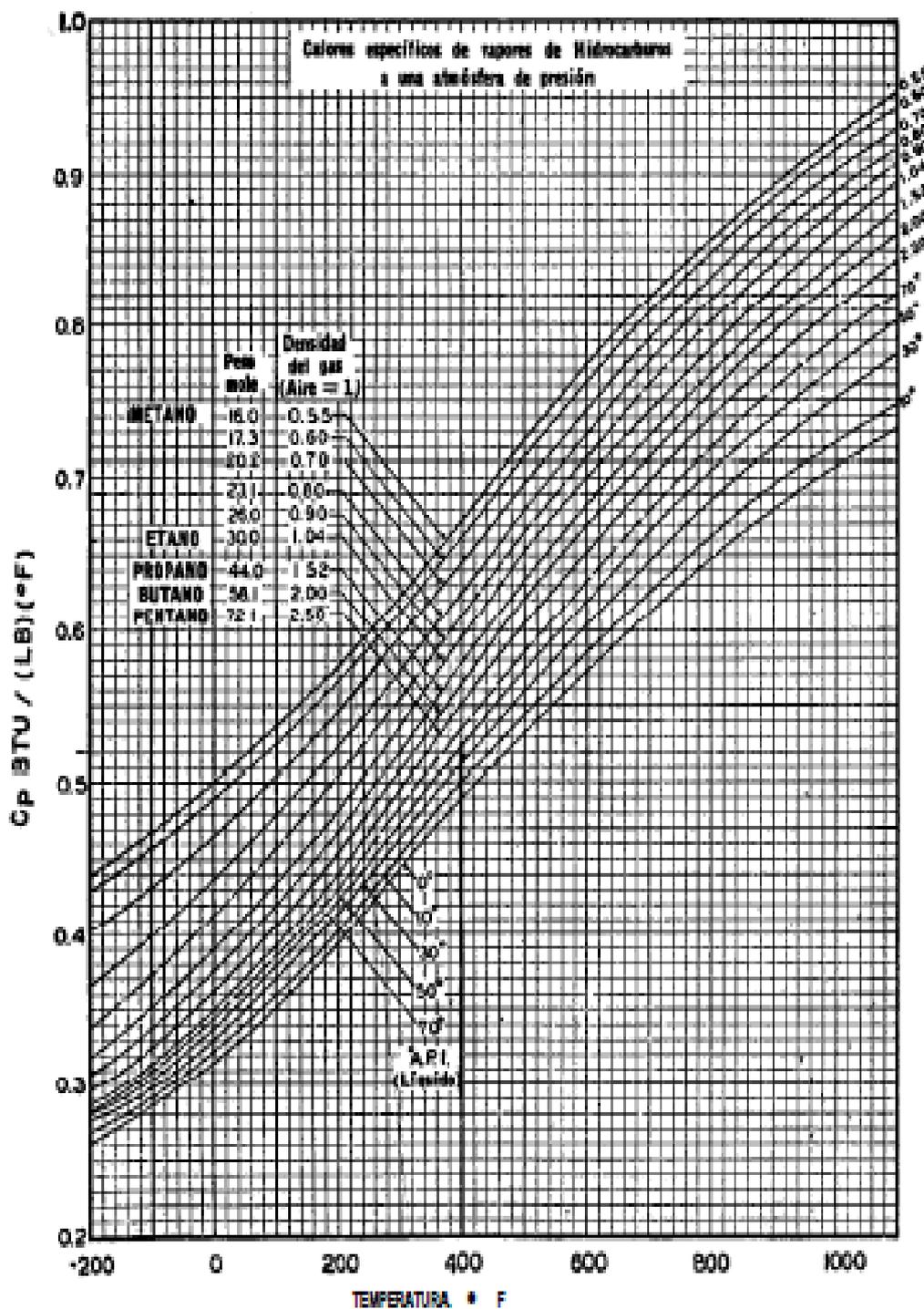


Fig. 34. Calores específicos de vapores de hidrocarburos a 1 atm.

Fuente: Procesos de transferencia de calor DONALD KERN

Compuesto	Mol.	g *	compuesto	Mol.	g *
Acetaldehído	44.1	0.78	Cloruro de etilo	64.5	0.92
Acetato de amilo	130.2	0.88	Cloruro de metilo	50.5	0.92
Acetato de etilo	88.1	0.90	Cloruro de n-propilo	78.5	0.89
Acetato de metilo	74.9	0.91	Cloruro de sulfúrico	135.0	1.87
Acetona	58.1	0.79	Diclorometano	89.0	1.17
Acetato de butilo	116.2	0.88	Diclorometano	88.9	1.34
Acetato de vinilo	88.1	0.93	Difenilo	154.2	0.99
Agua	18.0	1.0	Eter etílico	74.1	0.71
Acido acético 100%	60.1	1.05	Etilbenceno	106.1	0.87
Acido acético 70%		1.07	Etilglicol	88.1	1.04
Acido n-butírico	88.1	0.96	Fenol	94.1	1.07
Acido n-butílico	88.1	0.86	Formiato de etilo	74.1	0.92
Acido clorosulfónico	116.2	1.77	Glicerina 100%	92.1	1.26
Acido fórmico	46.0	1.22	Glicerina 50%		1.15
Acido nítrico 95%		1.50	n-heptano	100.2	0.68
Acido nítrico 60%		1.38	n-hexano	86.1	0.69
Acido propiónico	74.1	0.99	Hidróxido de sodio 50%		1.53
Acido sulfúrico 100%	98.1	1.83	Yoduro de etilo	188.9	1.93
Acido sulfúrico 98%		1.84	Yoduro de n-propilo	170.0	1.76
Acido sulfúrico 60%		1.05	Mercurio	200.6	13.55
Alcohol alílico	88.1	0.86	Metacresol	108.1	1.03
Alcohol amílico	88.2	0.81	Metanol 100%		0.79
Alcohol n-butílico	74.1	0.81	Metanol 90%		0.82
Alcohol butilico	74.1	0.82	Metanol 40%		0.94
Alcohol etílico 100%	46.1	0.70	Metiletilcetona	72.1	0.81
Alcohol etílico 95%		0.81	Naftaleno	128.1	1.14
Alcohol etílico 40%		0.94	Nitrobenzeno	123.1	1.20
Alcohol isopropílico	60.1	0.79	Nitrotolueno, orto	137.1	1.16
Alcohol octílico	30.23	0.82	Nitrotolueno, meta	137.1	1.16
Alcohol n-propílico	60.1	0.80	Nitrotolueno, para	137.1	1.29
Amoniaco 100%	17.0	0.61	n-octano	114.2	0.70
Amoniaco 26 %		0.91	Oxalato de dietilo	146.1	1.08
Anhidrido acético	82.1	1.08	Oxalato de dimetilo	118.1	1.40
Anilina	93.1	1.02	Oxalato de dipropilo	174.1	1.02
Anisol	98.1	0.99	Pentacloroetano	202.3	1.67
Benceno	78.1	0.88	n-pentano	72.1	0.63
Bóxido de azufre	64.1	1.38	Propano	44.1	0.59
Bóxido de carbono	44.0	1.29	Salmuera, Ca Cl. 25%		1.23
Bisulfuro de carbono	76.1	1.28	Salmuera, Na Cl. 25%		1.19
Bromotolueno, orto	171.0	1.42	Sodio	23.0	0.97
Bromotolueno, meta	171.0	1.41	Tetracloroetano	167.9	1.60
Bromotolueno, para	171.0	1.39	Tetracloroetileno	166.9	1.63
Bromuro de etilo	108.9	1.43	Tetracloruro de carbono	183.8	1.60
Bromuro de n-propilo	123.0	1.36	Tetracloruro de titanio	189.7	1.73
n-butano	58.1	0.60	Tricloruro de fósforo	270.8	2.85
i-butano	58.1	0.60	Tricloruro de arsénico	181.3	2.16
Ciclohexanol	98.1	0.96	Tricloruro de fósforo	137.4	1.57
Clorobenceno	112.6	1.11	Tricloroetileno	131.4	1.46
Cloroformo	119.4	1.49	Tolueno	92.1	0.87
Clorotolueno, orto	126.6	1.08	xileno, orto	106.1	0.87
Clorotolueno, meta	126.6	1.07	Xileno, meta		0.86
Clorotolueno, para	126.6	1.07	Xileno, para		0.86
Cloruro estánico	180.5	1.93			

\* Aproximadamente a 68°F. Estos valores están satisfactorios, sin extrapolación, para la mayoría de los problemas de ingeniería.

Tabla 7. Gravedades específicas y peso molecular de líquidos

Fuente: Procesos de transferencia de calor DONALD KERN

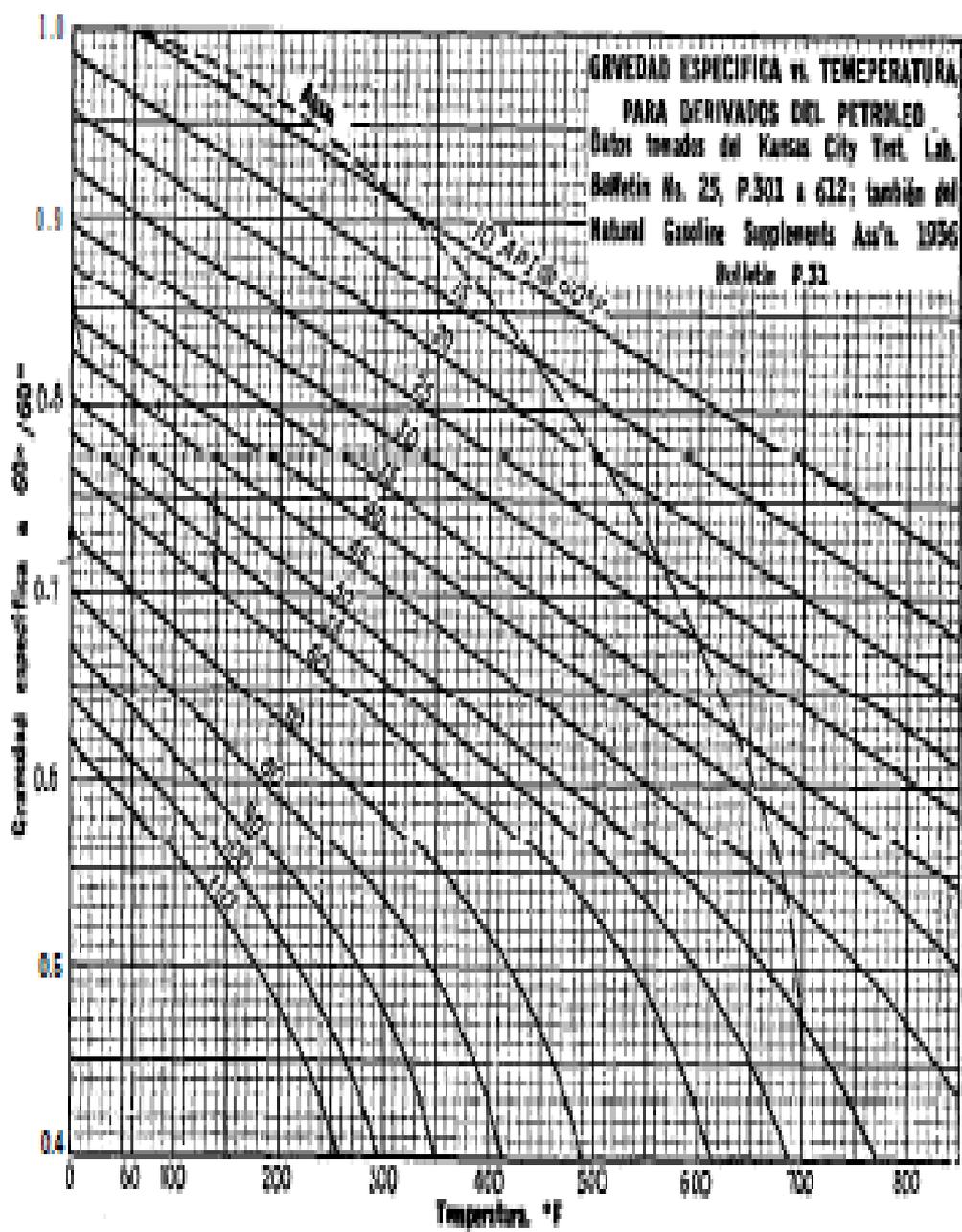


Fig. 35. Gravedades específicas de hidrocarburos.

Fuente: Procesos de transferencia de calor DONALD KERN

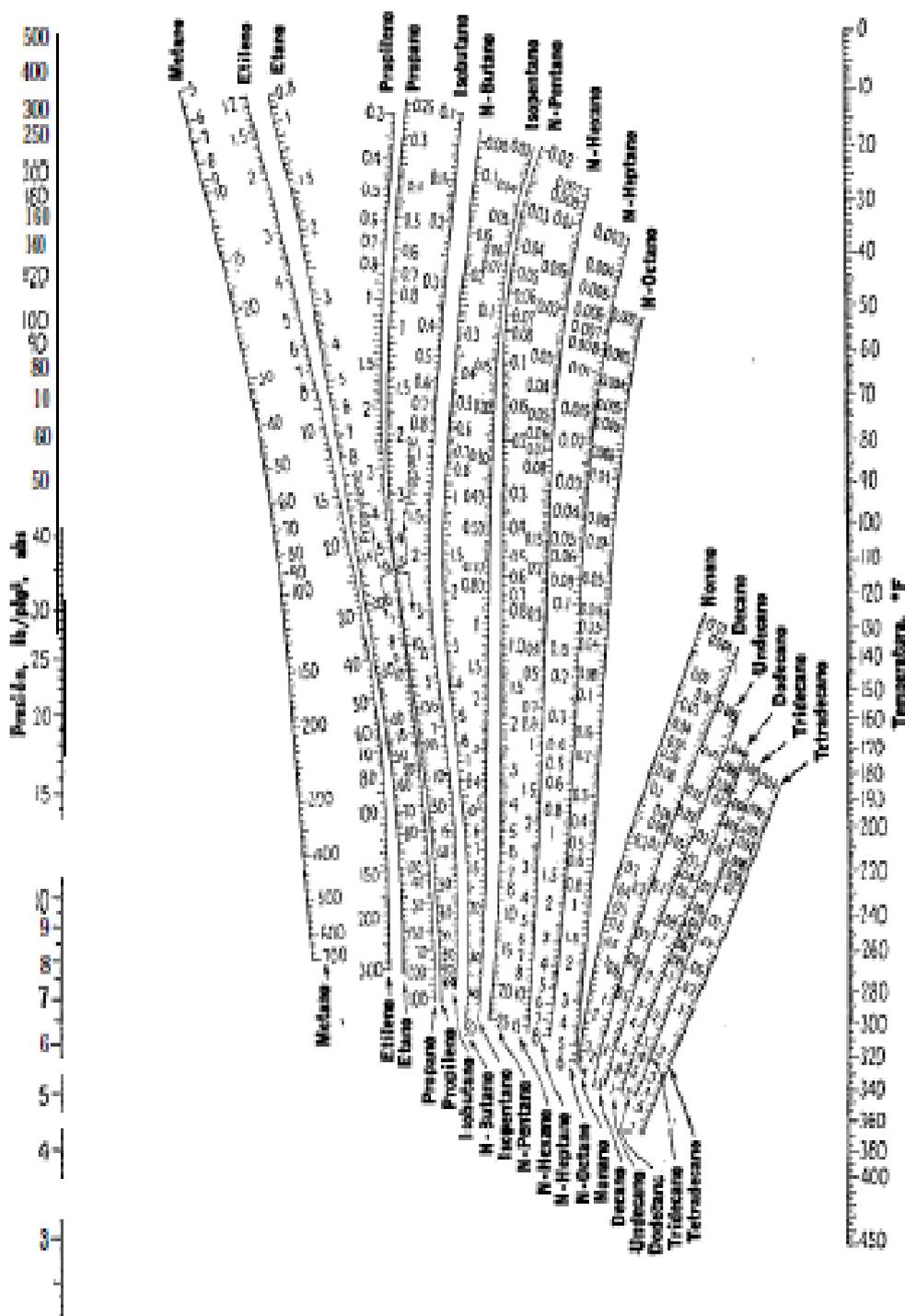


Fig. 36. Constantes de equilibrio para hidrocarburos.

Fuente: Procesos de transferencia de calor DONALD KERN

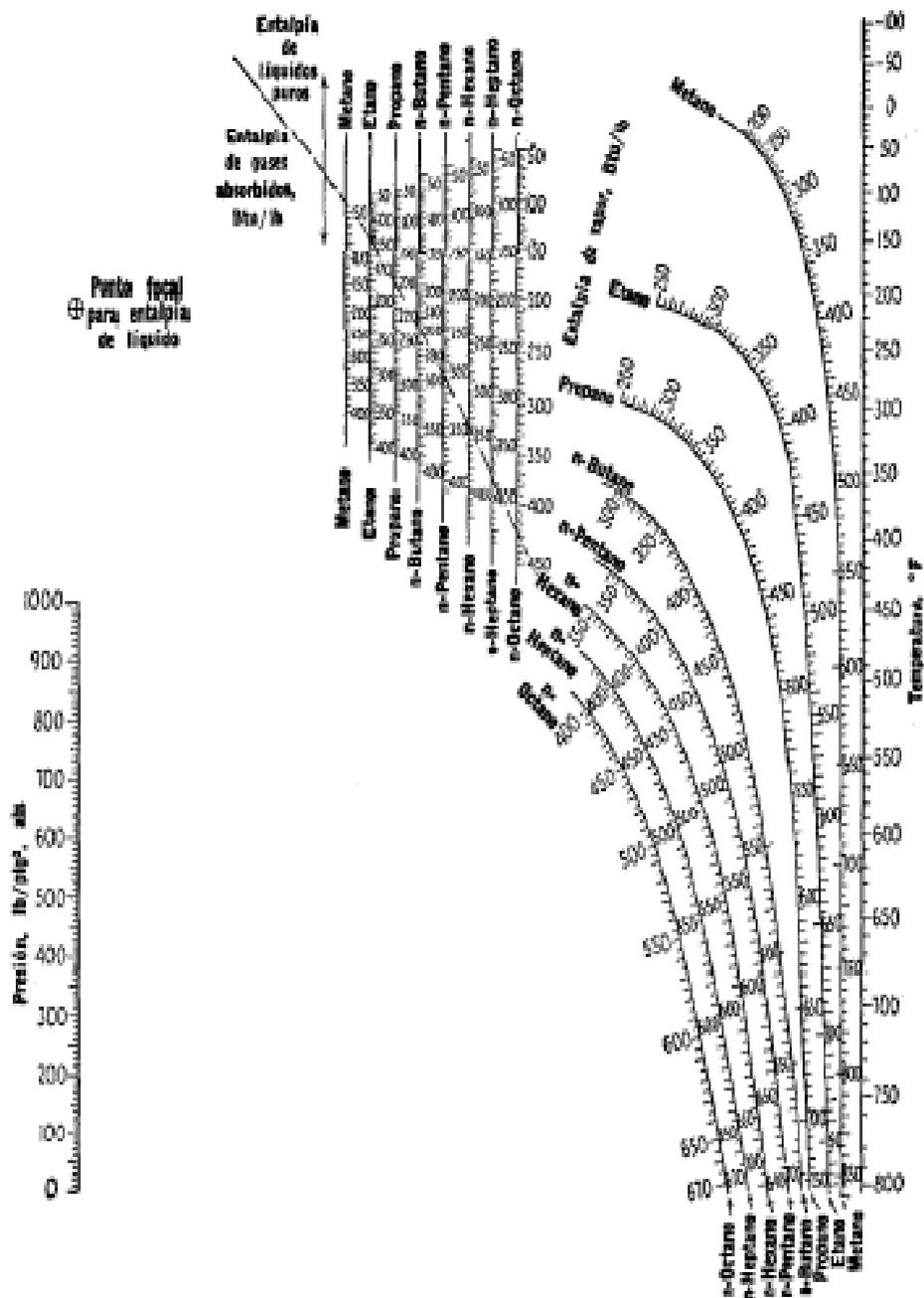


Fig. 37. Entalpias de hidrocarburos puros.

Fuente: Procesos de transferencia de calor DONALD KERN

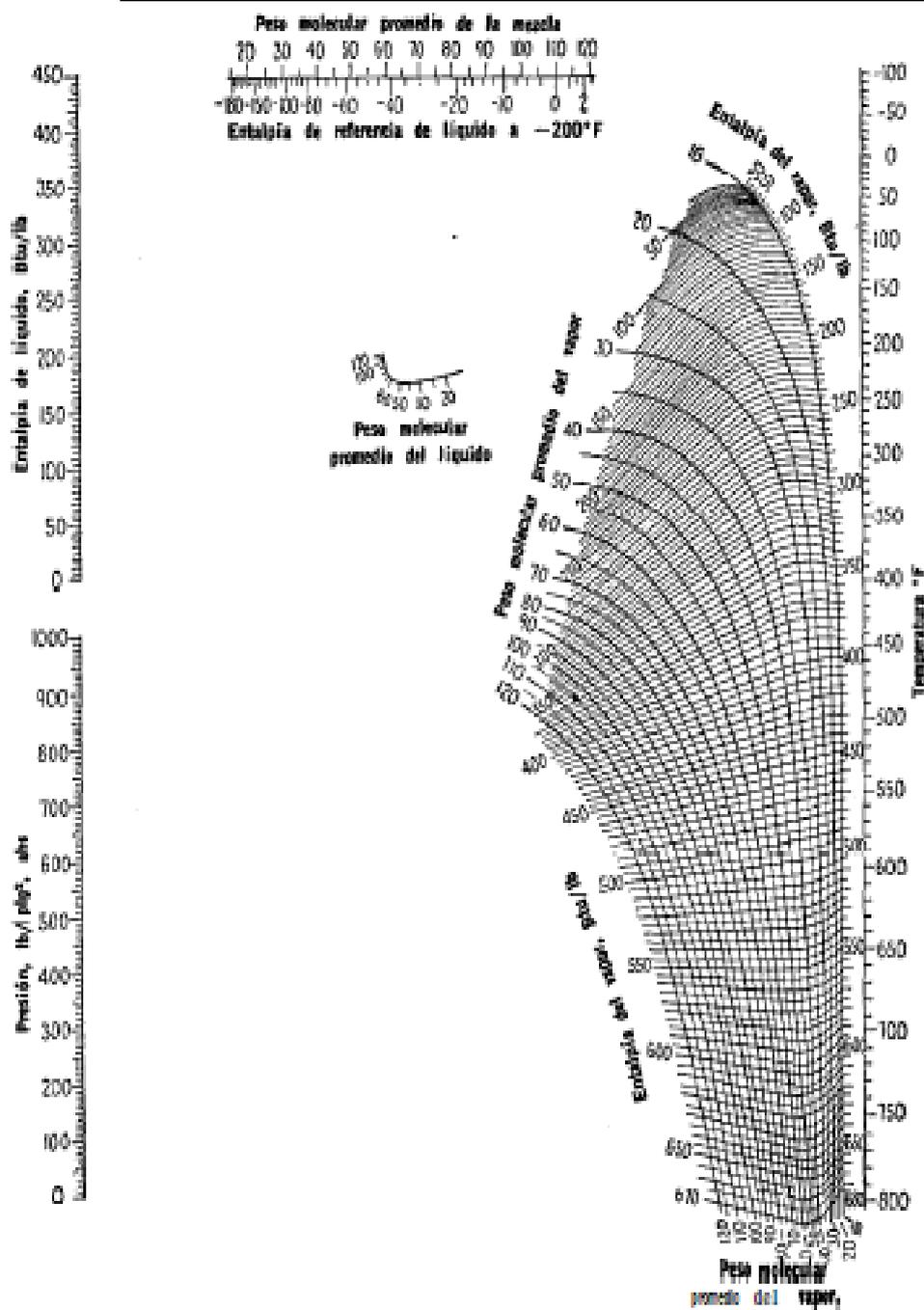


Fig. 38. Entalpias de hidrocarburos ligeros.

Fuente: Procesos de transferencia de calor DONALD KERN

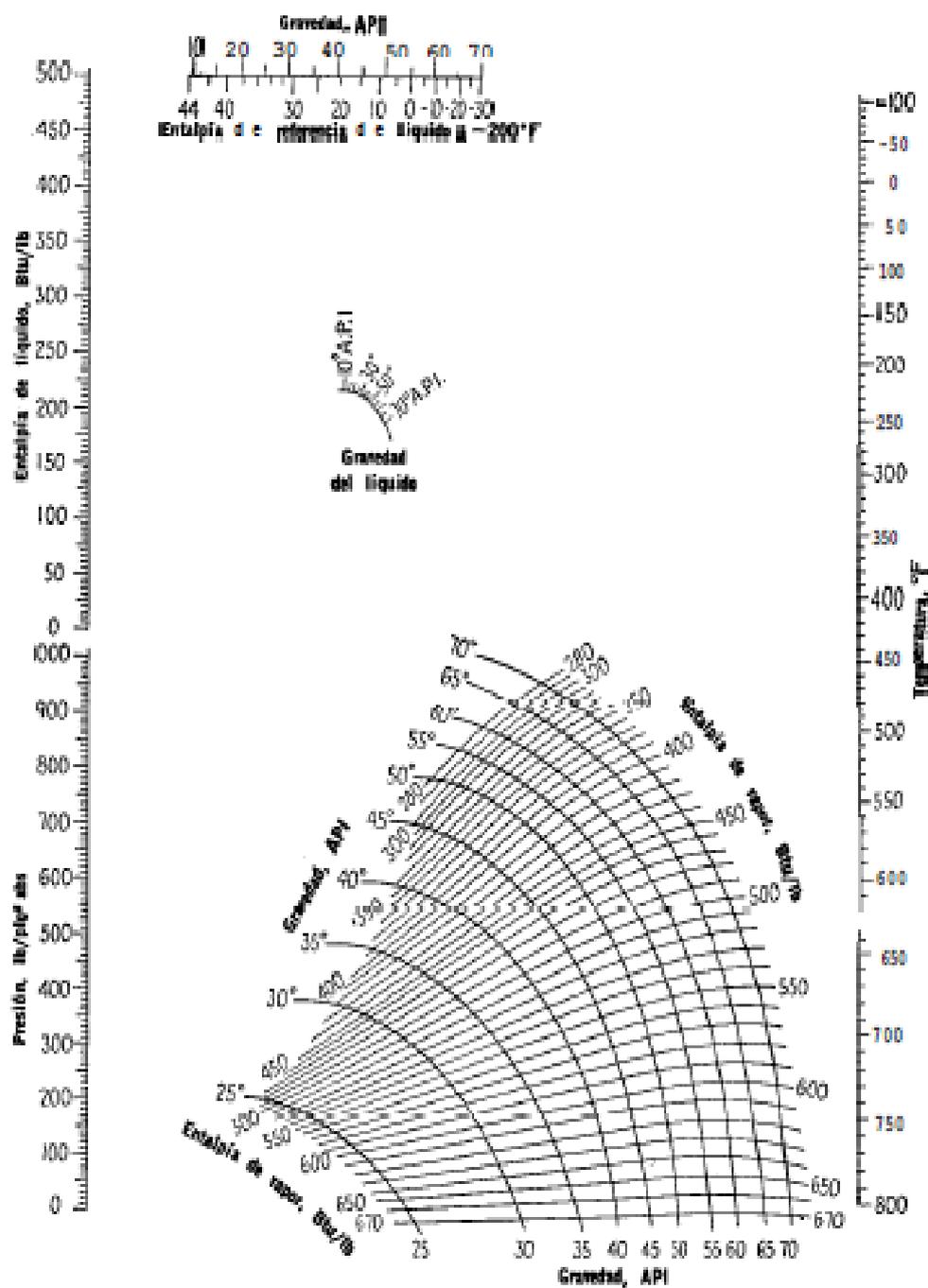


Fig. 39. Entalpías de fracciones de petróleo.

Fuente: Procesos de transferencia de calor DONALD KERN

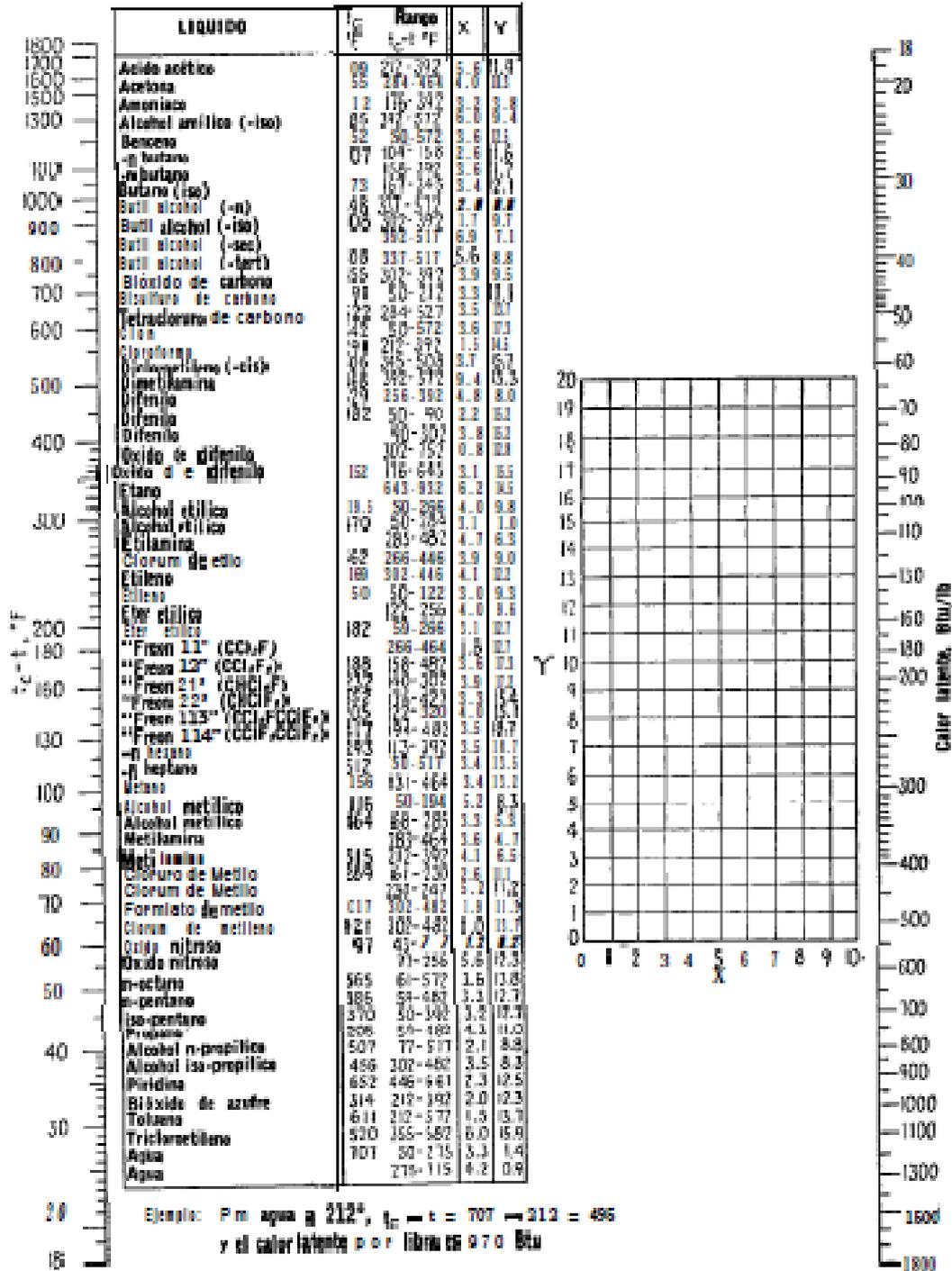


Fig. 40. Calores latentes de vaporización.

Fuente: Procesos de transferencia de calor DONALD KERN

Presión absoluta, lb/plg <sup>2</sup>	Temperatura, °F	Vol. específico		Entalpía			Entropía			Energía interna		Presión absoluta, lb/plg <sup>2</sup>
		Líquido saturado, v <sub>f</sub>	Vapor saturado, v <sub>g</sub>	Líquido saturado, h <sub>f</sub>	Evaporación, h <sub>fg</sub>	Vapor saturado, h <sub>g</sub>	Líquido saturado, s <sub>f</sub>	Evaporación, s <sub>fg</sub>	Vapor saturado, s <sub>g</sub>	Líquido saturado, u <sub>f</sub>	Vapor saturado, u <sub>g</sub>	
1.0	101.74	0.01814	633.6	69.70	1038.3	1108.0	0.1320	1.8456	1.9782	69.70	1044.3	1.0
2.0	120.05	0.01623	371.73	93.99	1022.2	1116.2	0.1749	1.7451	1.9200	93.98	1051.9	2.0
3.0	141.48	0.01483	118.71	109.37	1013.2	1122.6	0.2008	1.6855	1.8863	109.36	1056.7	3.0
4.0	152.97	0.01434	99.63	120.80	1006.4	1127.3	0.2198	1.6427	1.8625	120.85	1060.2	4.0
5.0	162.24	0.01400	73.32	130.13	1001.0	1131.1	0.2347	1.6094	1.8441	130.12	1063.1	5.0
6.0	170.06	0.01375	61.98	137.95	996.2	1134.2	0.2472	1.5820	1.8292	137.94	1065.4	6.0
7.0	176.83	0.01358	53.64	144.76	992.1	1136.2	0.2581	1.5581	1.8167	144.74	1067.4	7.0
8.0	182.80	0.01345	47.34	150.79	988.5	1137.3	0.2674	1.5381	1.8057	150.77	1069.2	8.0
9.0	188.28	0.01336	42.40	156.22	985.2	1137.4	0.2759	1.5231	1.7962	156.19	1070.8	9.0
10	193.21	0.01330	38.42	161.17	982.1	1137.3	0.2835	1.5043	1.7870	161.14	1072.2	10
14.696	212.00	0.01292	26.80	180.07	970.3	1136.40	0.3120	1.4446	1.7561	180.02	1077.5	14.696
15	213.03	0.01292	26.29	181.11	969.7	1136.30	0.3135	1.4415	1.7549	181.06	1077.8	15
20	227.96	0.01263	20.089	196.16	952.11	1135.68	0.3392	1.3605	1.7339	196.13	1082.8	20
24	240.07	0.01242	16.303	208.42	945.3	1134.10	0.3680	1.3313	1.6993	208.37	1087.8	24
30	250.33	0.01220	13.746	218.82	939.2	1132.10	0.3807	1.3063	1.6702	217.80	1090.1	30
35	259.28	0.01208	11.898	227.91	933.7	1130.39	0.3919	1.2844	1.6532	227.90	1092.0	35
40	267.25	0.01197	10.498	236.03	928.6	1128.80	0.4019	1.2650	1.6383	236.02	1093.7	40
45	274.44	0.01187	9.401	243.36	924.0	1127.30	0.4110	1.2474	1.6252	243.35	1095.3	45
50	281.01	0.01178	8.515	250.09	919.8	1125.90	0.4193	1.2313	1.6143	250.08	1096.7	50
55	287.07	0.01170	7.787	256.30	915.5	1124.60	0.4270	1.2163	1.6043	256.29	1097.9	55
60	292.71	0.01163	7.175	262.09	911.6	1123.40	0.4342	1.2032	1.5952	262.08	1099.1	60
65	297.97	0.01157	6.655	267.50	907.9	1122.30	0.4409	1.1906	1.5872	267.50	1100.2	65
70	302.92	0.01152	6.206	272.61	904.5	1121.30	0.4472	1.1787	1.5802	272.61	1101.2	70
75	307.60	0.01148	5.816	277.43	901.3	1120.40	0.4531	1.1676	1.5742	277.43	1102.1	75
80	312.03	0.01145	5.472	282.08	897.8	1119.60	0.4587	1.1571	1.5688	282.08	1102.9	80
85	316.25	0.01142	5.168	286.39	894.7	1118.90	0.4641	1.1471	1.5639	286.39	1103.7	85
90	320.27	0.01140	4.896	290.38	891.7	1118.30	0.4692	1.1376	1.5593	290.38	1104.5	90
95	324.12	0.01138	4.652	294.10	888.8	1117.80	0.4740	1.1286	1.5550	294.10	1105.2	95
100	327.81	0.01137	4.432	297.40	886.2	1117.40	0.4783	1.1200	1.5510	297.40	1105.8	100
110	334.77	0.01132	4.049	305.63	883.2	1117.00	0.4832	1.1117	1.5473	305.63	1106.5	110
120	341.25	0.01128	3.728	312.44	877.9	1116.40	0.4916	1.0962	1.5438	312.44	1107.2	120
130	347.32	0.01125	3.455	318.81	879.9	1115.90	0.4995	1.0817	1.5405	318.81	1107.8	130
140	353.02	0.01123	3.220	324.82	868.2	1115.00	0.5069	1.0682	1.5375	324.82	1109.6	140
150	358.42	0.01121	3.015	330.51	863.6	1114.10	0.5138	1.0556	1.5348	330.51	1110.5	150
160	363.53	0.01119	2.834	335.93	859.2	1113.10	0.5204	1.0436	1.5323	335.93	1111.2	160
170	368.41	0.01118	2.675	341.04	854.9	1112.00	0.5266	1.0324	1.5300	341.04	1111.9	170
180	373.06	0.01117	2.532	346.03	850.8	1111.00	0.5325	1.0217	1.5278	346.03	1112.5	180
190	377.51	0.01116	2.404	350.79	846.8	1110.00	0.5381	1.0116	1.5257	350.79	1113.1	190
200	381.79	0.01115	2.288	355.33	843.0	1109.40	0.5435	1.0018	1.5238	355.33	1113.7	200
250	400.95	0.01105	1.8438	376.00	825.1	1201.10	0.5675	0.9888	1.5263	376.00	1115.8	250
300	417.33	0.01095	1.5433	393.84	809.0	1202.80	0.5879	0.9225	1.5104	393.84	1117.1	300
350	431.72	0.01091	1.3200	409.69	794.2	1203.90	0.6056	0.8910	1.4964	409.69	1118.0	350
400	444.69	0.01090	1.1613	424.04	780.5	1204.50	0.6214	0.8630	1.4844	424.04	1118.5	400
450	456.28	0.01090	1.0320	437.2	767.4	1204.60	0.6356	0.8378	1.4734	437.2	1118.7	450
500	467.01	0.01090	0.9278	449.4	755.0	1204.40	0.6487	0.8147	1.4634	449.4	1118.6	500
550	476.94	0.01090	0.8404	460.8	743.1	1203.90	0.6608	0.7934	1.4542	460.8	1118.2	550
600	486.21	0.02091	0.7656	471.6	731.0	1203.20	0.6720	0.7734	1.4456	471.6	1117.7	600
650	494.90	0.0203	0.7083	481.8	720.5	1202.30	0.6826	0.7548	1.4374	481.8	1117.1	650
700	503.10	0.0206	0.6654	491.5	709.7	1201.20	0.6925	0.7371	1.4296	491.5	1116.3	700
750	510.85	0.0207	0.6292	500.8	699.2	1200.00	0.7011	0.7204	1.4223	500.8	1115.4	750
800	518.23	0.0209	0.5987	509.7	688.9	1198.60	0.7108	0.7045	1.4153	509.7	1114.4	800
850	525.26	0.0210	0.5732	518.3	678.8	1197.10	0.7194	0.6891	1.4085	518.3	1113.3	850
900	531.98	0.0212	0.5506	526.6	668.8	1195.40	0.7275	0.6744	1.4020	526.6	1112.1	900
950	538.43	0.0214	0.4717	534.6	659.1	1193.70	0.7355	0.6602	1.3957	534.6	1110.8	950
1000	544.61	0.0216	0.4456	542.4	649.4	1191.80	0.7430	0.6467	1.3897	542.4	1109.4	1000
1100	556.31	0.0220	0.4001	557.4	630.4	1187.80	0.7575	0.6205	1.3780	557.4	1106.4	1100
1200	567.22	0.0223	0.3620	571.7	611.7	1183.40	0.7711	0.5956	1.3607	571.7	1103.0	1200
1300	577.46	0.0227	0.3293	585.7	593.2	1178.60	0.7840	0.5719	1.3559	585.7	1099.4	1300
1400	587.20	0.0231	0.3012	598.7	574.7	1173.40	0.7963	0.5491	1.3454	598.7	1095.4	1400
1500	596.58	0.0235	0.2765	611.6	556.3	1167.80	0.8081	0.5280	1.3323	611.6	1091.2	1500
2000	635.82	0.0257	0.1878	671.7	483.4	1135.10	0.8619	0.4230	1.2849	671.7	1065.6	2000
2500	658.13	0.0287	0.1307	730.6	360.5	1090.91	0.9126	0.3198	1.2322	730.6	1030.6	2500
3000	695.36	0.0346	0.0858	802.5	217.8	1020.80	0.9731	0.1861	1.1615	802.5	972.7	3000
3206.2	705.40	0.0503	0.0503	902.7	0	902.7	1.0580	0	1.0580	902.7	3206.2	3206.2

\* Condensada de "Thermodynamic Properties of Steam", por Joseph H. Keenan y Frederick G. Keyes. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1937

Tabla 8. Propiedades termodinamicas del vapor de agua, vapor saturado seco: tabla de presion.

Fuente: Proceso de transferencia de calor DONALD KERN

Temperatura, t	Presión absoluta, psi	Volumen específico			Entalpía			Entropía			Temperatura, T
		Líquido saturado, v <sub>f</sub>	Evaporación, v <sub>fg</sub>	Vapor saturado, v <sub>g</sub>	Líquido saturado, h <sub>f</sub>	Vapor, h <sub>fg</sub>	Evaporación, h <sub>g</sub>	Líquido saturado, s <sub>f</sub>	Evaporación, s <sub>fg</sub>	Vapor, s <sub>g</sub>	
32	0.08854	0.01603	306	8306	0.00	075.8	1075.8	0.0000	2.1877	2.1877	32
35	0.09995	0.01603	294.7	294.7	3.02	074.1	1077.1	0.0061	2.1709	2.1770	35
40	0.12170	0.01603	244	244	8.05	071.3	1079.3	0.0162	2.1435	2.1597	40
45	0.14752	0.01603	200.4	200.4	13.06	068.4	1081.3	0.0262	2.1167	2.1429	45
50	0.178110	0.01603	1703.2	1703.2	18.07	065.6	1083.7	0.0361	2.0903	2.1264	50
60	0.2563	0.01604	206.6	206.6	28.06	054.3	1092.3	0.0555	0.3333	0.3333	60
70	0.3631	0.01606	867.8	867.8	38.04	054.3	1092.3	0.0745	1.9902	2.0647	70
80	0.5069	0.01608	633.1	633.1	48.02	048.6	1096.6	0.0932	1.9422	2.0360	80
90	0.6952	0.01610	468.0	468.0	57.99	049.6	1100.6	0.1118	1.8972	2.0087	90
100	0.9492	0.01613	350.3	350.3	67.97	047.2	1105.2	0.1295	1.8531	1.9826	100
110	1.2748	0.01617	265.3	265.3	77.94	031.6	1109.5	0.1471	1.8105	1.9577	110
120	1.6924	0.01620	203.25	203.25	87.92	025.8	1113.7	0.1645	1.7694	1.9335	120
130	2.2225	0.01625	157.32	157.32	97.84	020.0	1117.9	0.1816	1.7298	1.9112	130
140	2.8896	0.01629	122.99	122.99	107.89	014.1	1122.0	0.1984	1.6910	1.8894	140
150	3.718	0.01634	98.06	98.06	117.89	008.2	1126.1	0.2149	1.6537	1.8685	150
160	4.794	0.01639	77.27	77.27	127.89	002.3	1130.2	0.2311	1.6174	1.8485	160
170	6.142	0.01645	62.04	62.04	137.80	006.3	1134.2	0.2472	1.5822	1.8293	170
180	7.810	0.01651	50.21	50.21	147.82	010.2	1138.1	0.2630	1.5480	1.8109	180
190	9.859	0.01657	40.94	40.94	157.85	014.1	1142.0	0.2785	1.5147	1.7932	190
200	12.326	0.01663	33.62	33.62	167.99	017.9	1145.9	0.2938	1.4824	1.7762	200
210	15.223	0.01670	27.80	27.80	178.05	021.6	1149.7	0.3090	1.4508	1.7598	210
220	18.606	0.01677	23.78	23.78	188.07	025.3	1153.4	0.3239	1.4201	1.7440	220
230	22.525	0.01684	20.355	20.355	198.23	029.0	1157.0	0.3387	1.3901	1.7288	230
240	27.029	0.01692	16.308	16.308	208.34	032.6	1160.5	0.3531	1.3609	1.7140	240
250	32.165	0.01700	13.804	13.804	218.42	036.2	1164.0	0.3675	1.3323	1.6998	250
260	38.000	0.01706	11.748	11.748	228.44	039.8	1167.5	0.3817	1.3043	1.6860	260
270	44.618	0.01713	10.044	10.044	238.44	043.4	1170.9	0.3958	1.2769	1.6727	270
280	52.000	0.01720	8.628	8.628	248.06	047.0	1174.3	0.4098	1.2501	1.6597	280
290	60.256	0.01728	7.444	7.444	257.31	050.6	1177.6	0.4234	1.2238	1.6472	290
300	69.513	0.01735	6.449	6.449	266.59	054.2	1180.9	0.4369	1.1980	1.6350	300
310	79.768	0.01743	5.600	5.600	275.84	057.8	1184.2	0.4504	1.1727	1.6231	310
320	91.000	0.01750	4.893	4.893	285.08	061.4	1187.5	0.4637	1.1478	1.6115	320
330	103.206	0.01758	4.280	4.280	294.23	065.0	1190.8	0.4769	1.1233	1.6002	330
340	116.401	0.01767	3.770	3.770	303.31	068.6	1194.1	0.4900	1.0992	1.5891	340
350	130.63	0.01776	3.320	3.320	312.31	072.2	1197.4	0.5029	1.0755	1.5783	350
360	145.94	0.01785	2.920	2.920	321.23	075.8	1200.7	0.5157	1.0521	1.5677	360
370	173.37	0.01794	2.562	2.562	330.08	079.4	1204.0	0.5284	1.0289	1.5573	370
380	192.77	0.01803	2.237	2.237	338.84	083.0	1207.3	0.5410	1.0059	1.5471	380
390	220.37	0.01812	1.945	1.945	347.51	086.6	1210.6	0.5535	0.9832	1.5371	390
400	247.31	0.01821	1.684	1.684	356.11	090.2	1213.9	0.5659	0.9608	1.5272	400
410	276.75	0.01830	1.451	1.451	364.64	093.8	1217.2	0.5782	0.9386	1.5174	410
420	308.83	0.01839	1.241	1.241	373.11	097.4	1220.5	0.5904	0.9166	1.5078	420
430	343.72	0.01848	1.050	1.050	381.51	101.0	1223.8	0.6025	0.8947	1.4982	430
440	381.59	0.01857	0.875	0.875	389.84	104.6	1227.1	0.6145	0.8730	1.4887	440
450	422.6	0.01866	0.715	0.715	398.11	108.2	1230.4	0.6264	0.8513	1.4793	450
460	466.9	0.01875	0.570	0.570	406.31	111.8	1233.7	0.6382	0.8298	1.4700	460
470	514.4	0.01884	0.440	0.440	414.44	115.4	1237.0	0.6500	0.8083	1.4608	470
480	564.1	0.01893	0.325	0.325	422.51	119.0	1240.3	0.6617	0.7868	1.4518	480
490	622.4	0.01902	0.222	0.222	430.54	122.6	1243.6	0.6733	0.7653	1.4429	490
500	689.4	0.01911	0.130	0.130	438.51	126.2	1246.9	0.6849	0.7438	1.4335	500
520	882.4	0.01920	0.080	0.080	446.44	129.8	1250.2	0.6964	0.7223	1.4241	520
540	962.5	0.01929	0.043	0.043	454.23	133.4	1253.5	0.7078	0.7008	1.4148	540
560	133.1	0.0221	0.354	0.354	462.08	137.0	1256.8	0.7191	0.6793	1.4055	560
580	325.8	0.0228	0.298	0.298	469.84	140.6	1260.1	0.7304	0.6578	1.3962	580
600	542.9	0.0236	0.243	0.243	477.51	144.2	1263.4	0.7416	0.6363	1.3870	600
620	784.4	0.0247	0.195	0.195	485.11	147.8	1266.7	0.7528	0.6148	1.3778	620
640	1055.4	0.0260	0.153	0.153	492.64	151.4	1270.0	0.7639	0.5933	1.3686	640
660	1408.1	0.0278	0.116	0.116	500.11	155.0	1273.3	0.7750	0.5718	1.3594	660
680	1793.7	0.0305	0.081	0.081	507.54	158.6	1276.6	0.7861	0.5503	1.3502	680
700	2306.2	0.0342	0.050	0.050	514.84	162.2	1279.9	0.7972	0.5288	1.3410	700

\* Condensada de "Thermodynamic Properties of Steam", por Joseph H. Keenan y Frederick G. Keyes, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1937.

Tabla 9. Propiedades termodinamicas del vapor de agua, vapor saturado seco: tabla de temperaturas (continuación tabla 7)

Fuente: Procesos de transferencia de calor DONALD KERN

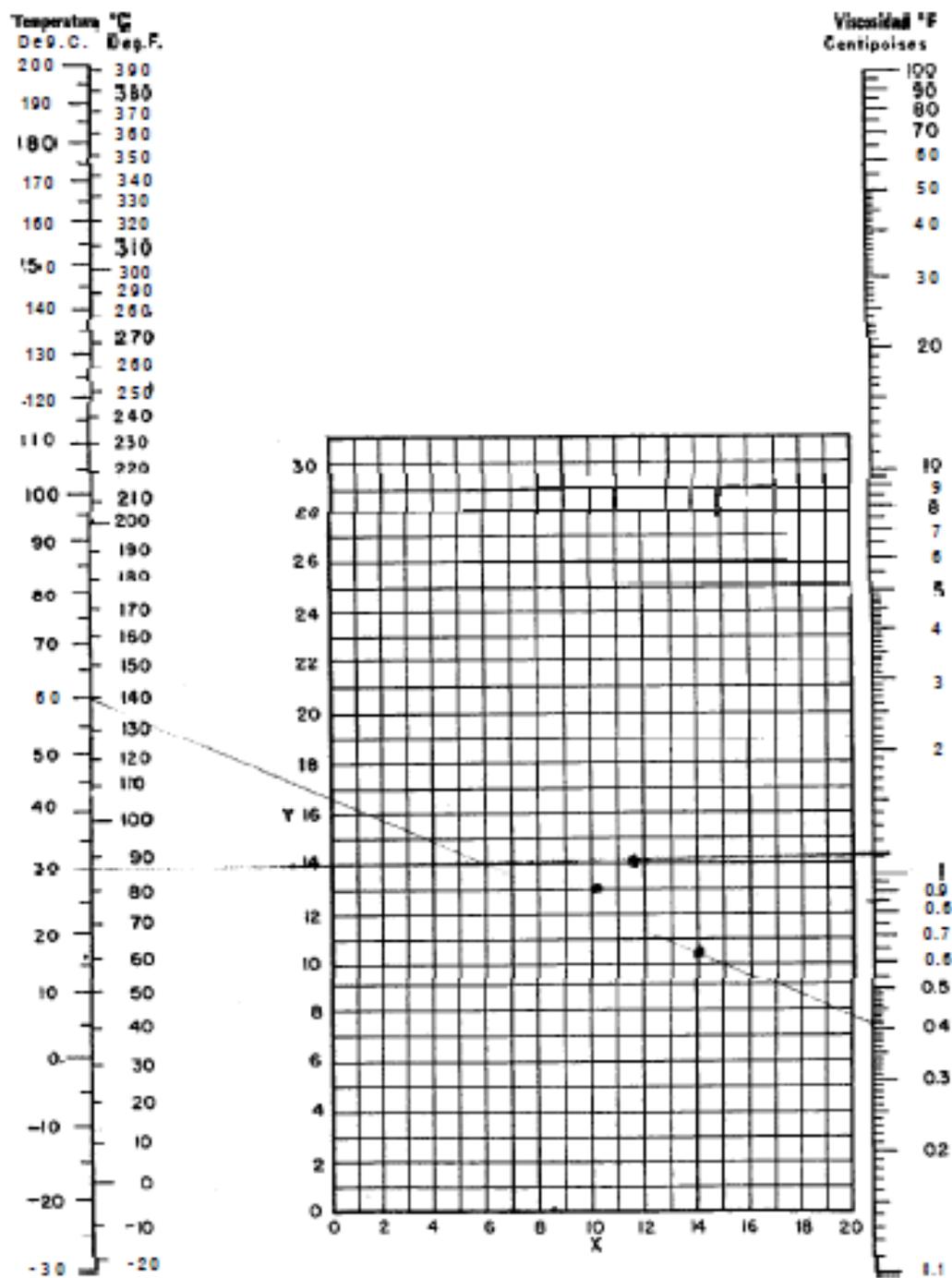


FIG. 14. Viscosidades de líquidos. (Perry, "Chemical Engineers' Handbook", 3a. ed., McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1950)

Fig. 41. Viscosidades de líquidos.

Fuente: Procesos de transferencia de calor DONALD KERN

Gas	X	Y
Acetato de Etilo	8.5	13.2
Acetona	8.9	13.0
Acetileno	9.8	14.9
Acido Acético	7.7	14.3
Agua	8.0	16.0
Aire	11.0	20.0
Alcohol Etilico	9.2	14.2
Alcohol Metilico	8.5	15.6
Alcohol Propilico	8.4	13.4
Amoniac	8.4	16.0
Argón	10.5	22.4
Benceno	8.5	13.2
Bromo	8.9	19.2
Buteno	9.2	13.7
Butileno	8.9	13.0
Óxido de Azufre	9.6	17.0
Óxido de Carbono	9.5	18.7
Bisulfuro de Carbono	8.9	16.0
Bromuro de Hidrógeno	8.8	20.9
Cianógeno	9.2	15.2
Ciclobexano	9.2	12.0
Cianuro de Hidrogeno	9.3	14.9
Cloro	9.0	18.4
Cloroformo	8.9	15.7
Cloruro de Etilo	8.3	15.6
Cloruro de Hidrógeno	8.8	18.7
Cloruro de Nitrosilo	8.0	17.6
Etano	9.1	14.5
Eter Etilico	8.9	13.0
Etileno	9.5	15.1
Flúor	7.3	23.8
Freon 11	10.8	15.1
Freon 12	11.1	16.0
Freon 21	10.8	15.3
Freon 22	10.1	17.0
Freon 113	11.3	14.0
Helio	10.9	20.5
Hexano	8.6	11.8
Hidrógeno	11.2	112.4
3H <sub>2</sub> + 1N <sub>2</sub>	11.2	117.2
Yodo	9.0	18.4
Yoduro de Hidrógeno	9.0	21.3
Mercurio	5.3	22.9
Metano	9.9	15.5
Monóxido de Carbono	11.0	20.0
Nitrógeno	10.6	20.0
Oxido Nítrico	10.9	210.6
Oxido Nitroso	8.8	19.0
Oxígeno	11.0	211.3
Pentano	7.0	12.8
Propano	9.7	12.9
Propileno	9.0	13.8
Sulfuro de Hidrógeno	8.6	18.0
Tolueno	8.6	12.4
2, 3, 3-Trimetilbutano	9.5	10.6
Xenón	9.3	23.0

\* De Perry, J. H. "Chemical Engineers' Handbook" 3d ed. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York 1950.

VISCOSIDADES DE GASES (para usarse como coordenadas en la fig. 40)

Fuente: Procesos de transferencia de calor DONALD KERN

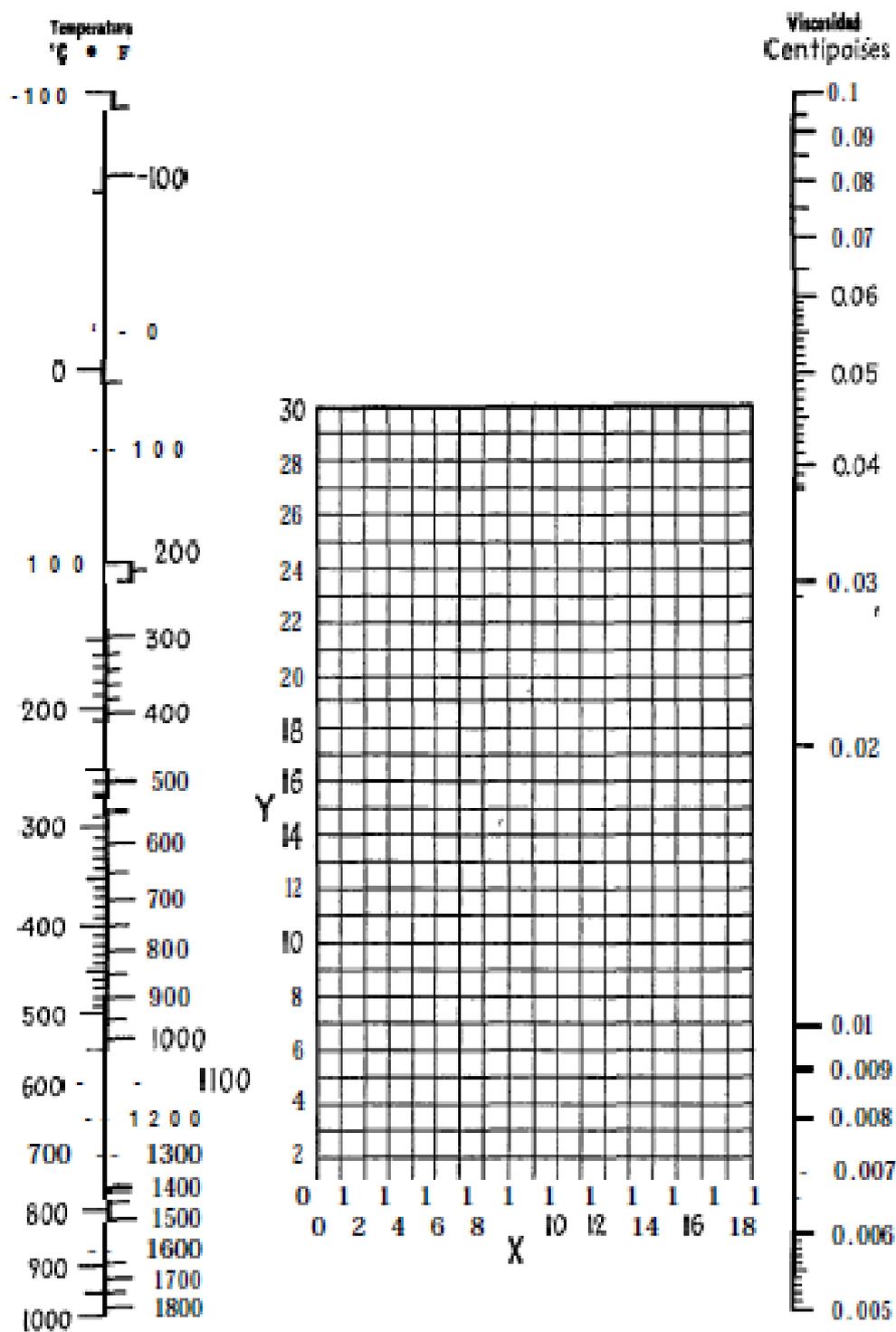


Fig. 42. Viscosidades de gases.

Fuente: Procesos de transferencia de calor DONALD KERN

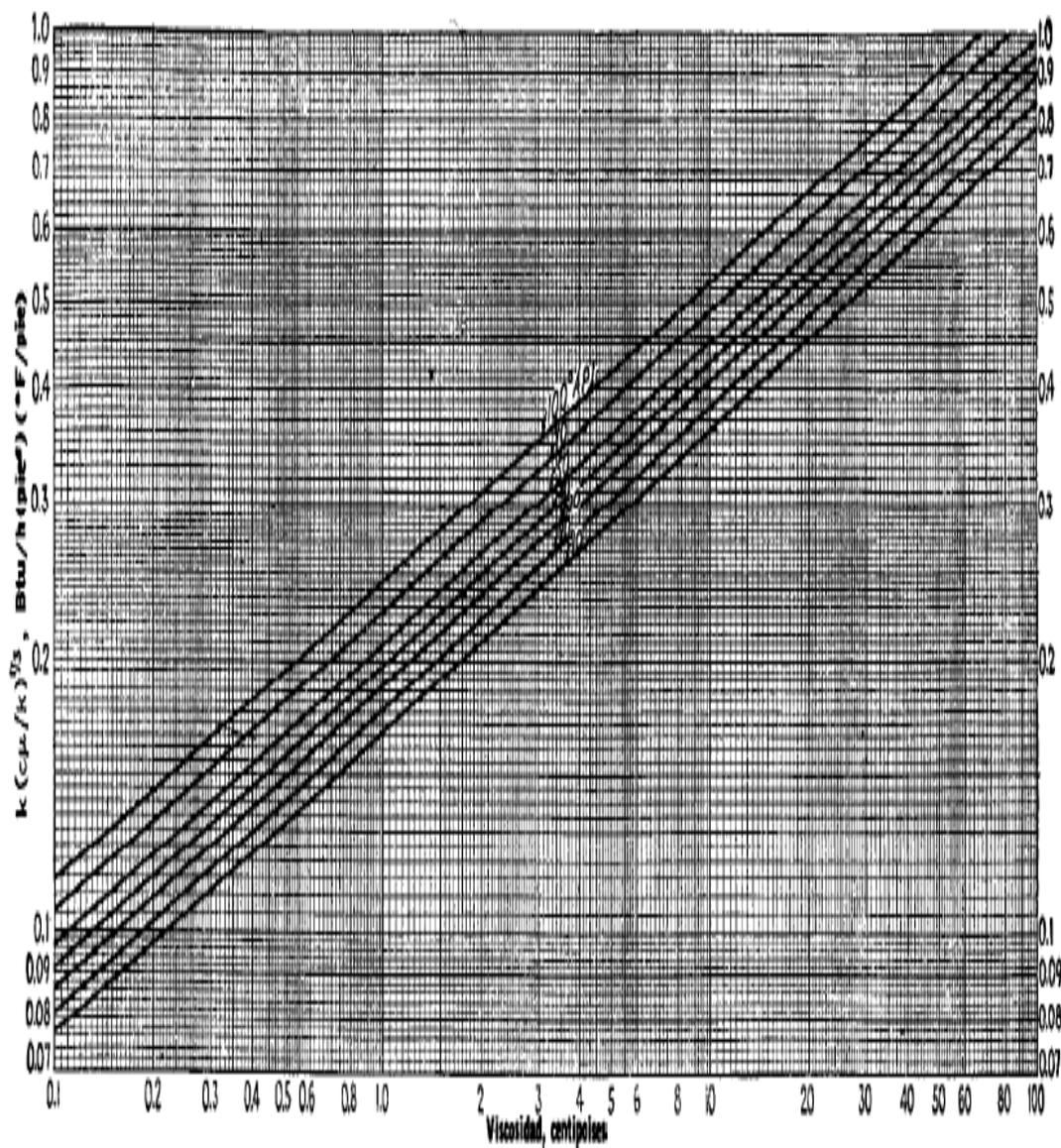


Fig. 43. Valores de  $[(k(c/\mu))]^{1/3}$  para hidrocarburos.

Fuente: Procesos de transferencia de calor DONALD KERN

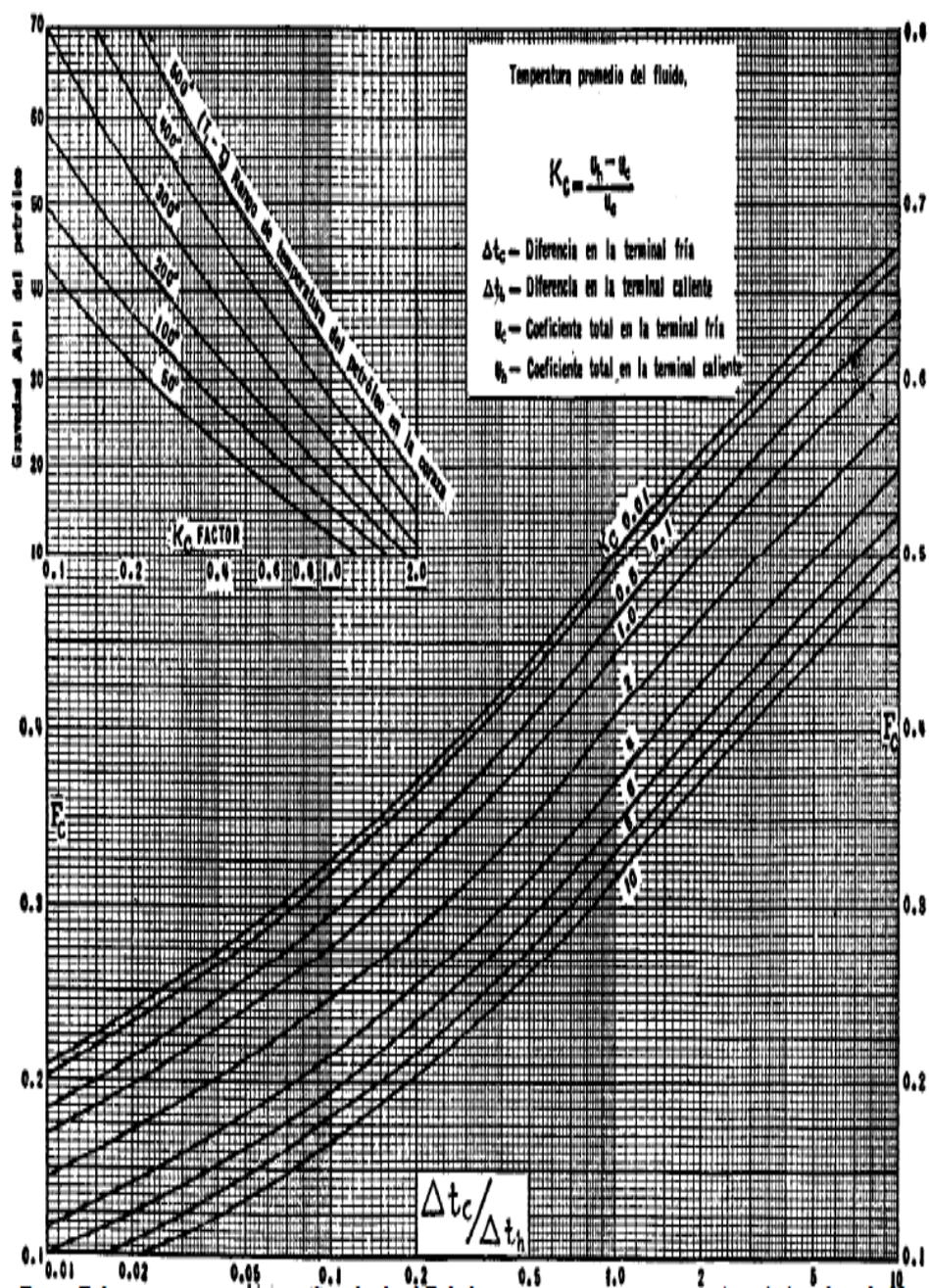


Fig. 44. Factor F de temperatura calórica.

Fuente: Procesos de transferencia de calor DONALD KERN

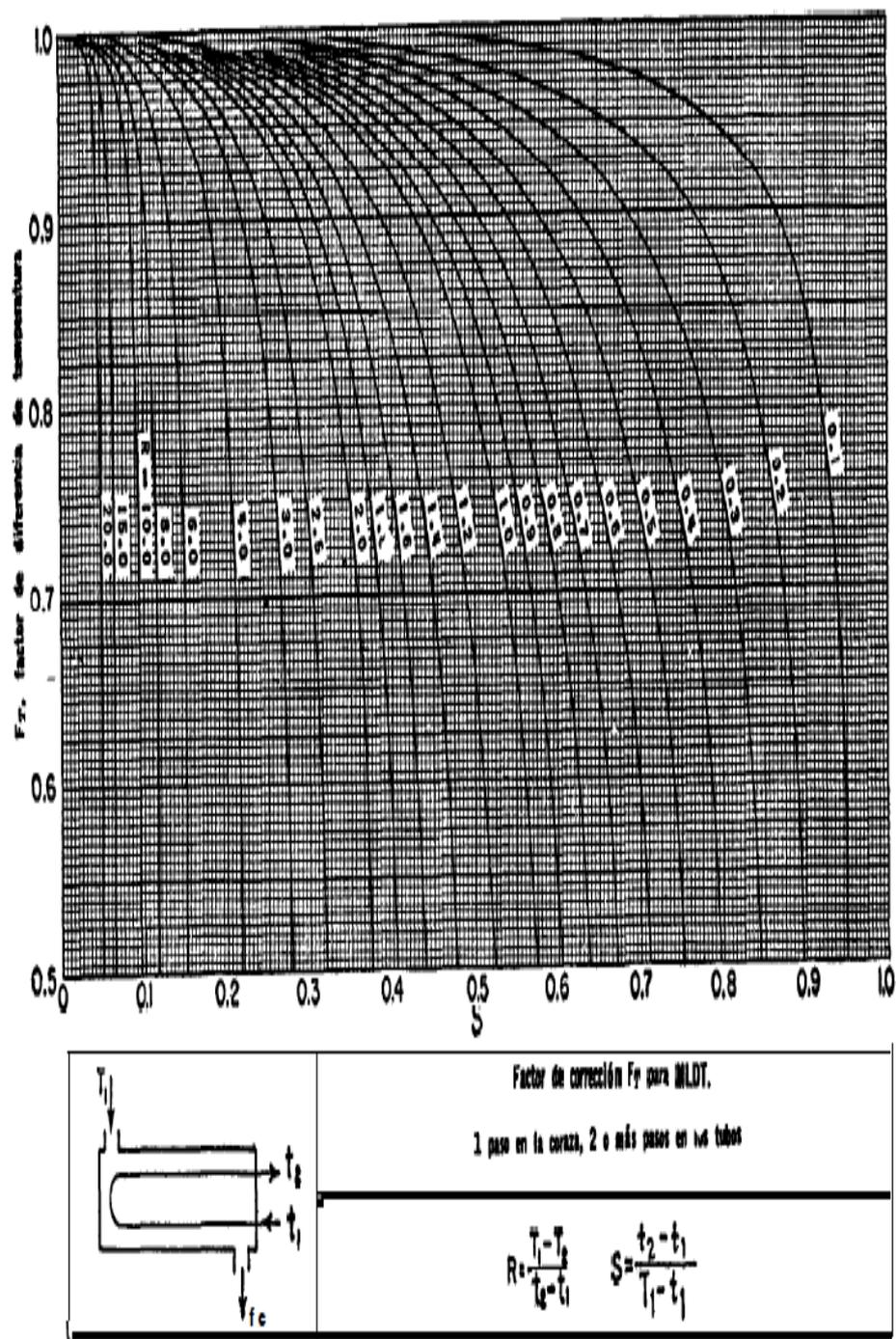


Fig. 45. Factores de corrección MLDT.

Fuente: Procesos de transferencia de calor DONALD KERN

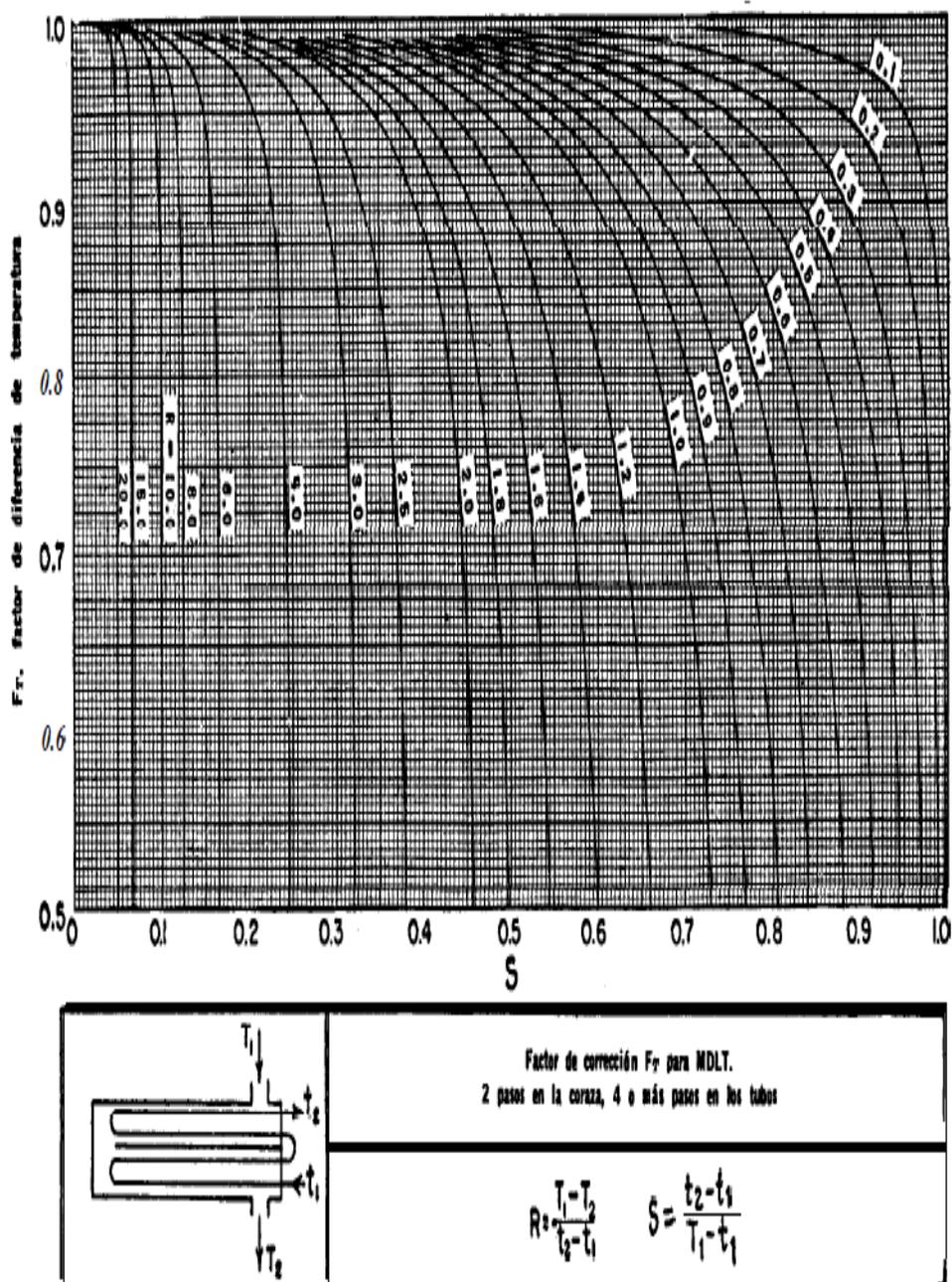


Fig. 46. Factores de corrección MLDT para intercambiadores 2-4.

Fuente: Procesos de transferencia de calor DONALD KERN

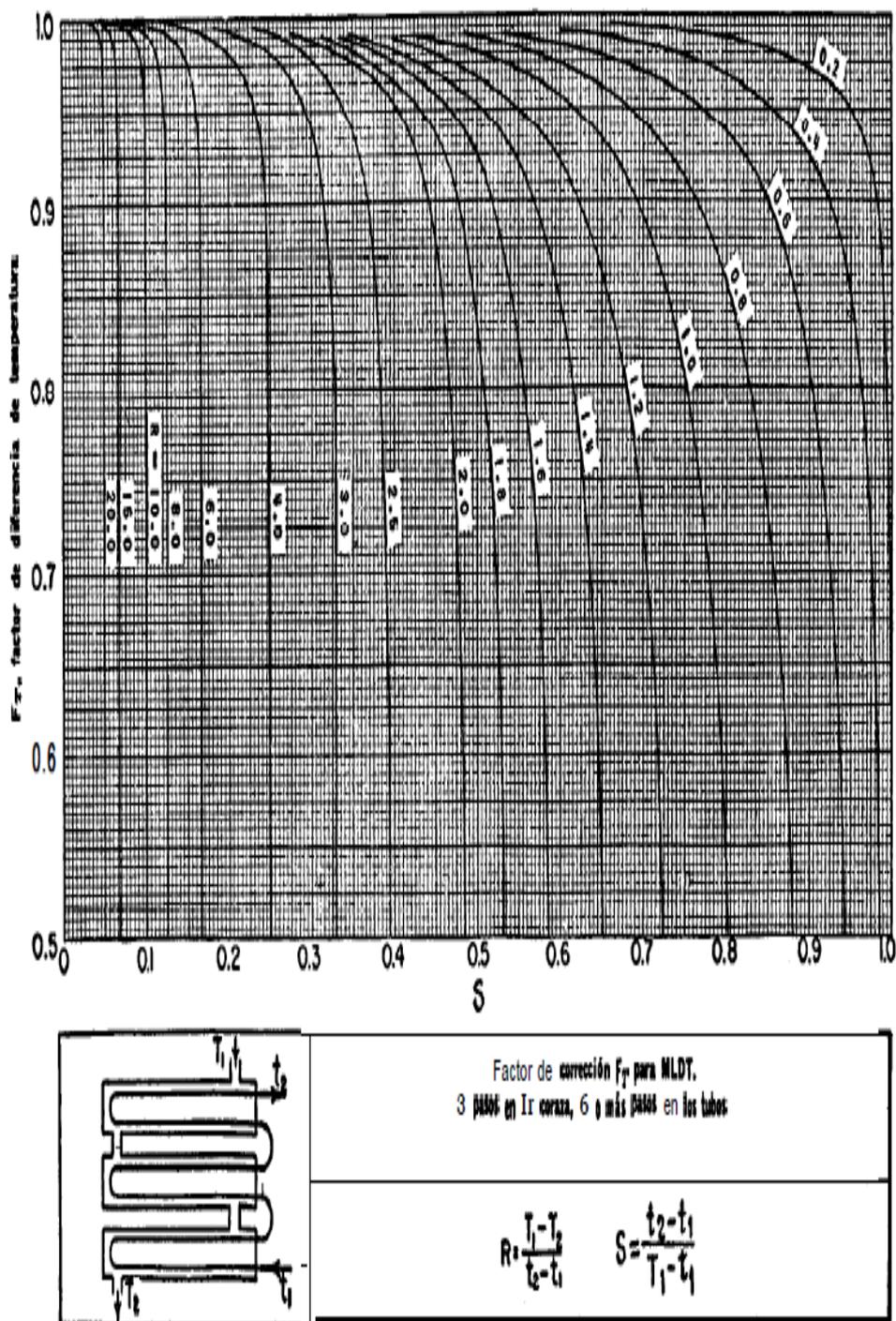


Fig. 47. Factores de corrección MLDT para intercambiadores 3-6.

Fuente: Procesos de transferencia de calor DONALD KERN

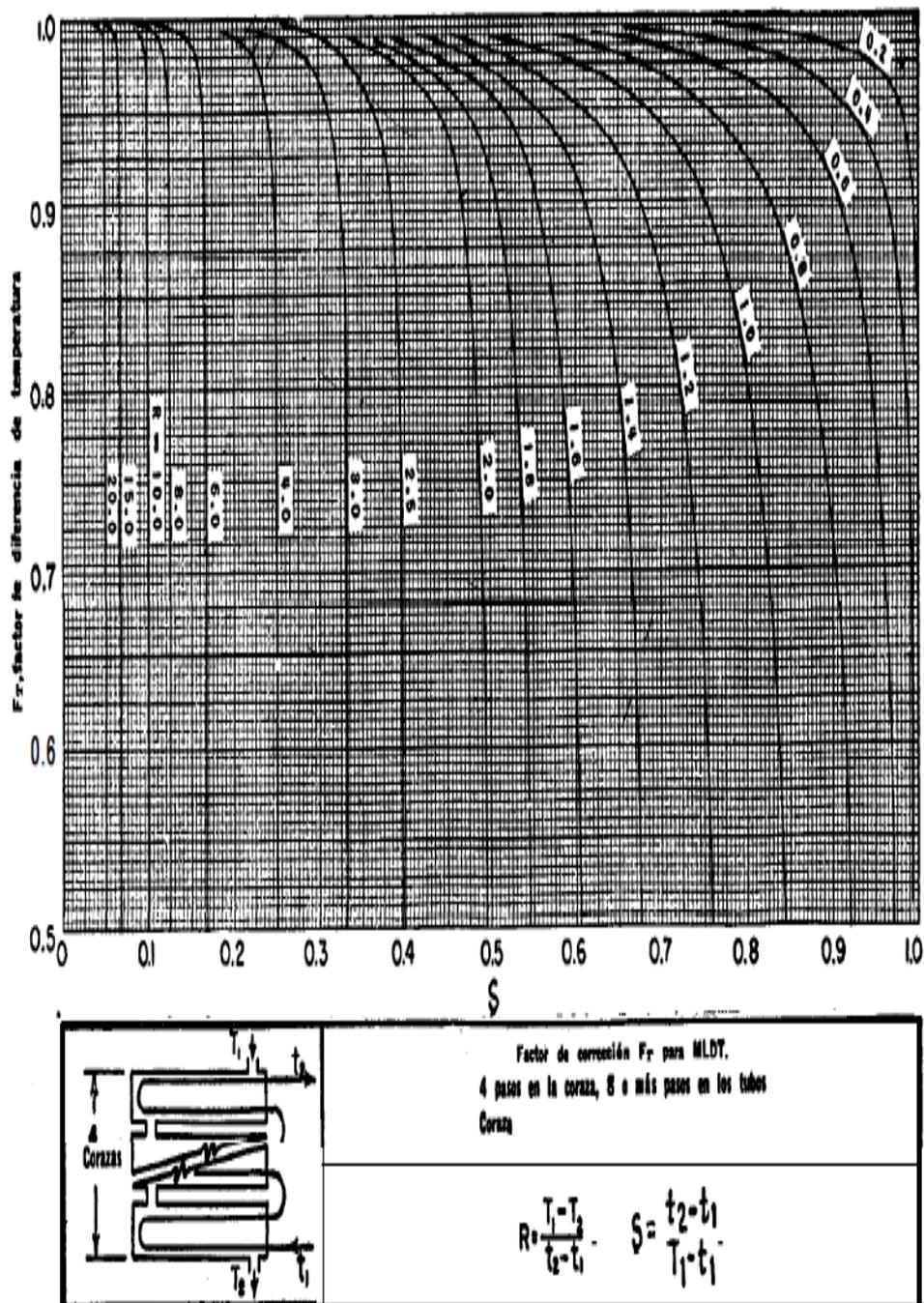


Fig. 48. Factores de corrección MLDT para intercambiadores 4-8.

Fuente: Procesos de transferencia de calor DONALD KERN

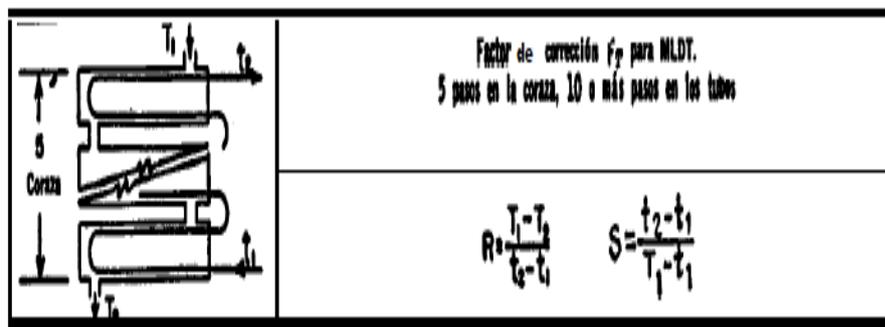
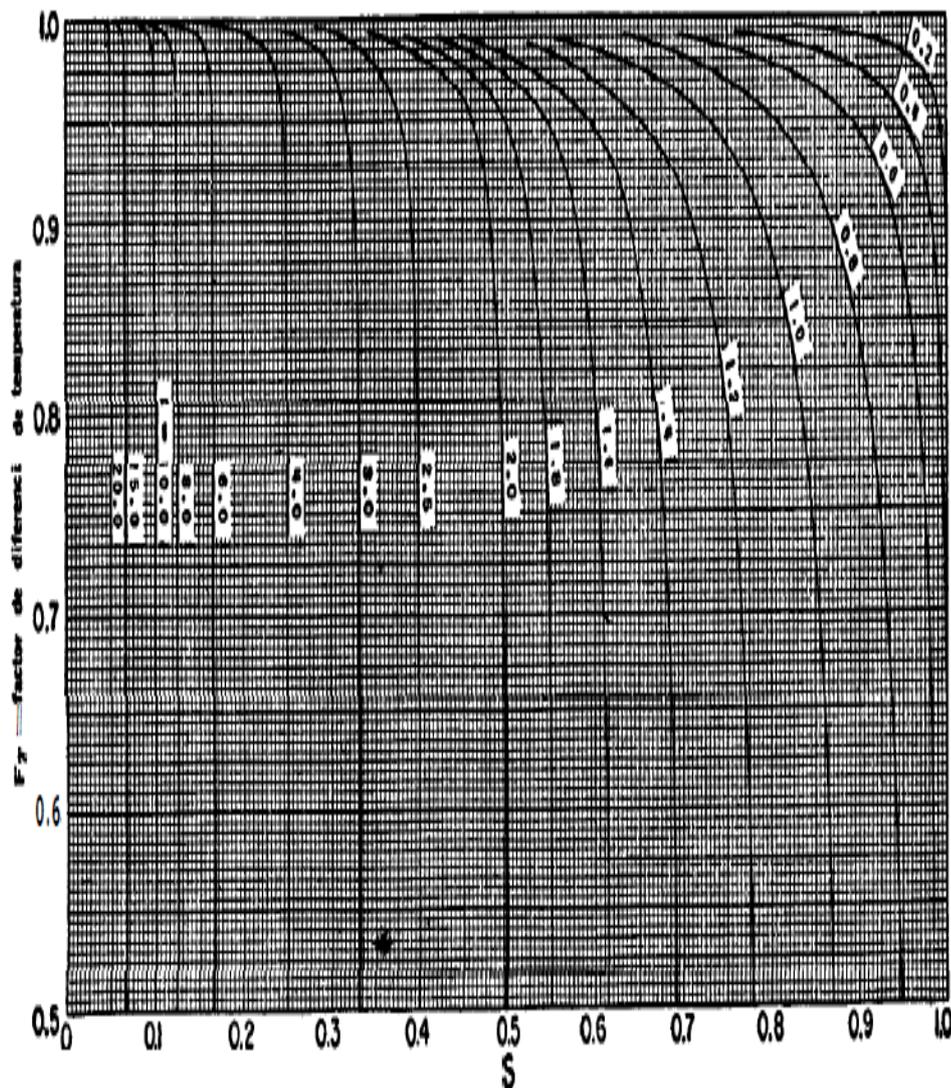


Fig. 49. Factores de corrección MLDT para intercambiadores 5-10.

Fuente: Procesos de transferencia de calor DONALD KERN

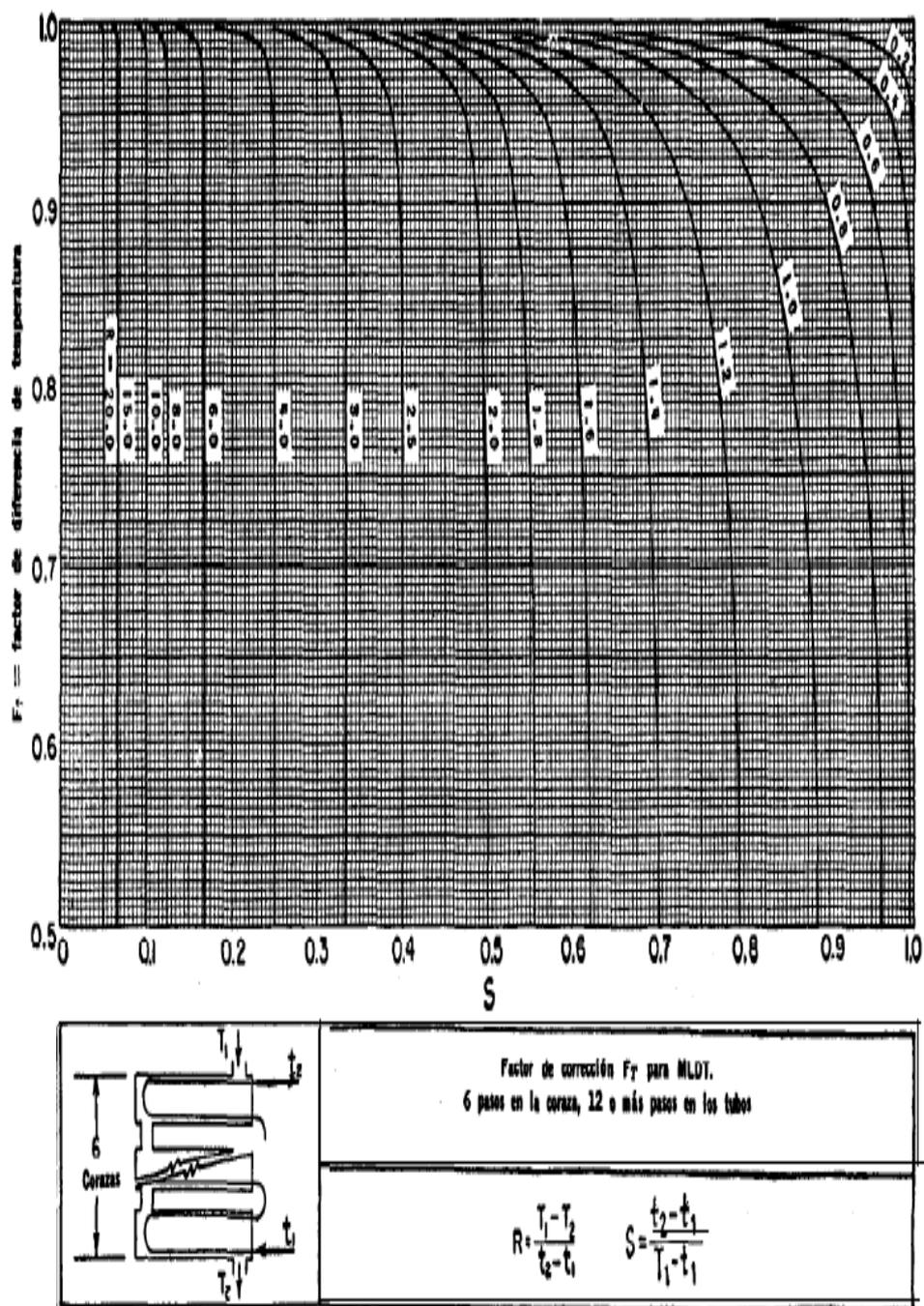


Fig. 50. Factores de corrección MLDT para intercambiadores 6-12.

Fuente: Procesos de transferencia de calor DONALD KERN

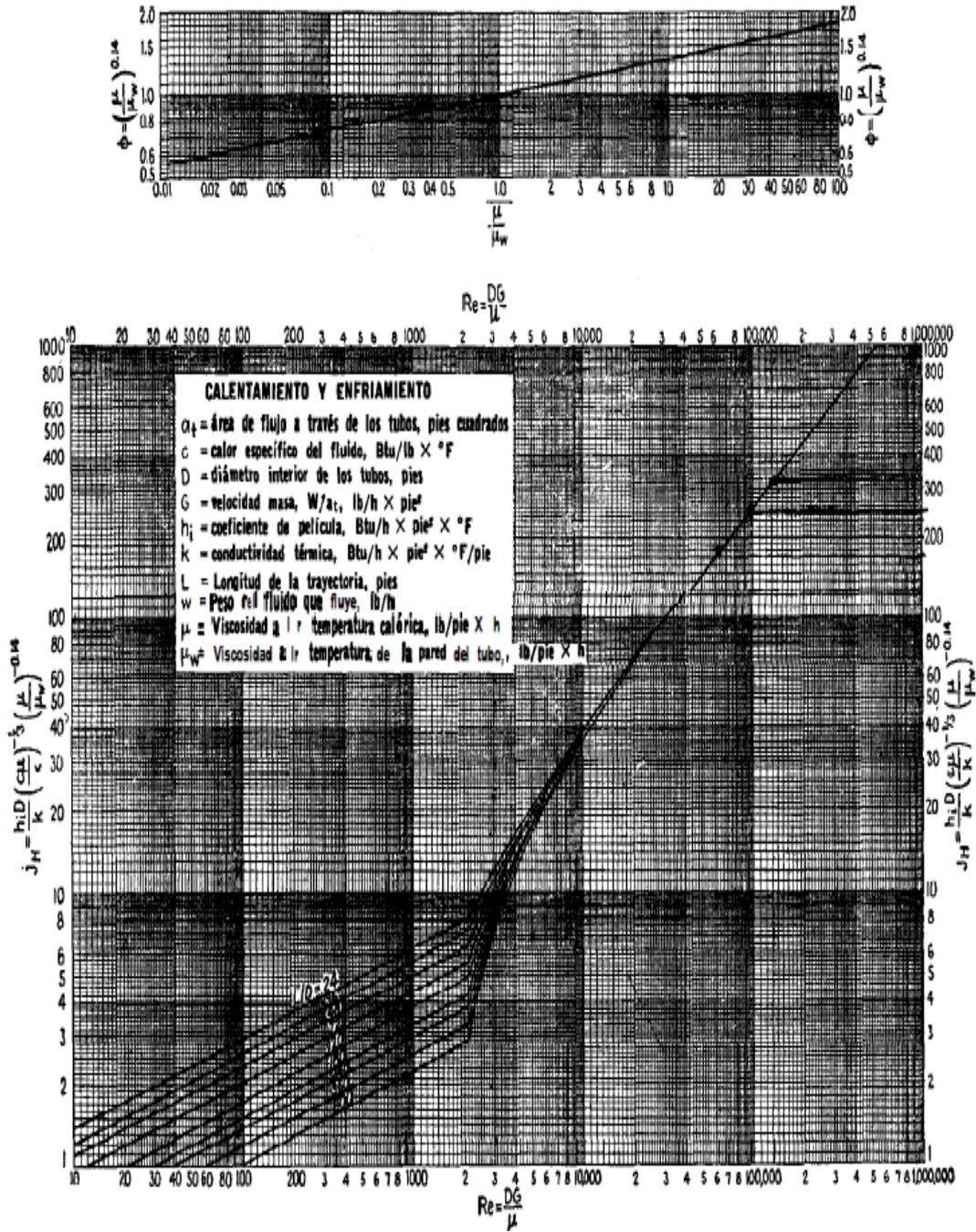


Fig. 51. Curva de transferencia de calor lado de tubos.

Fuente: Procesos de transferencia de calor DONALD KERN

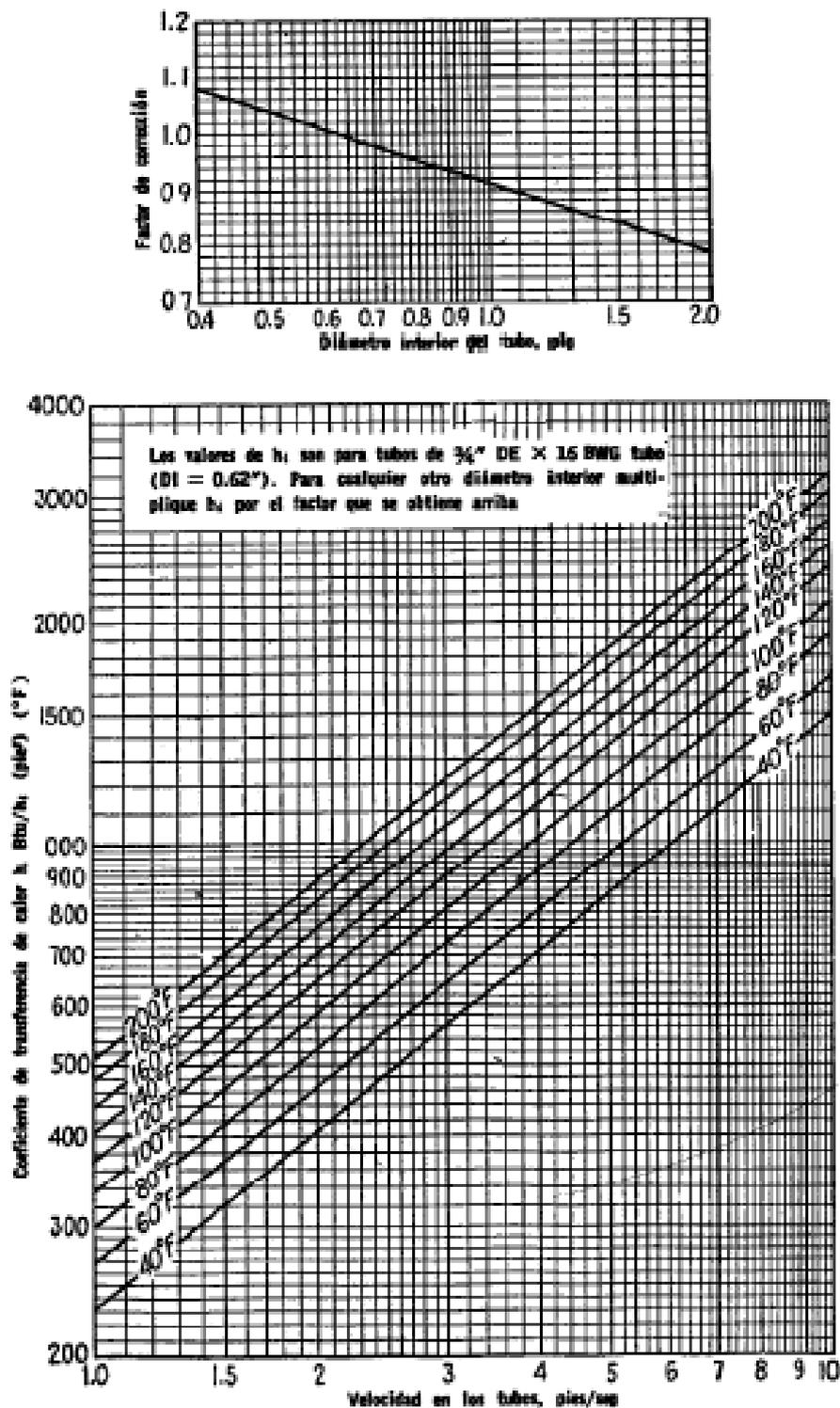


Fig. 52. Curva de transferencia de calor, agua en los tubos.

Fuente: Procesos de transferencia de calor DONALD KERN

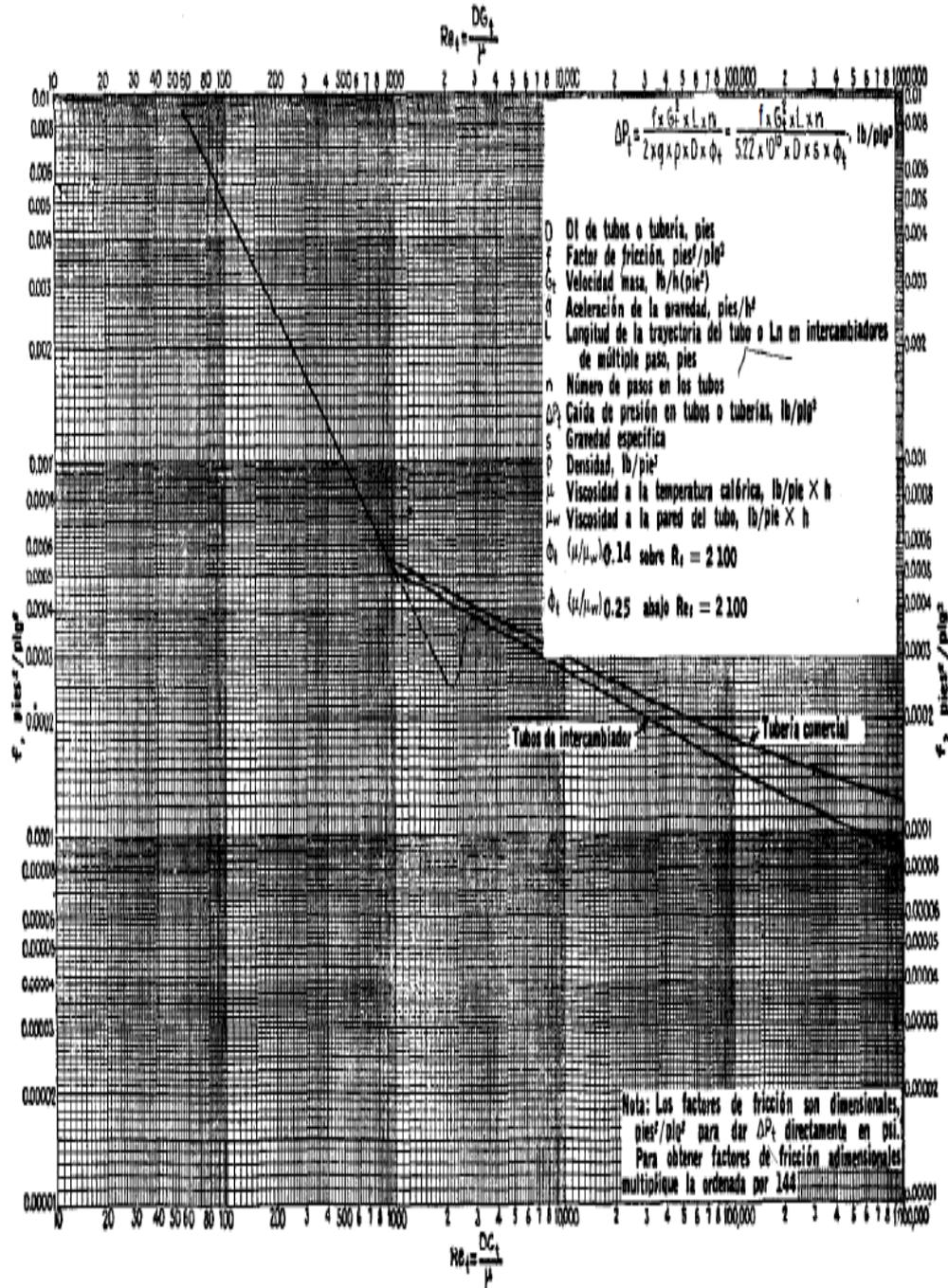


Fig. 53. Factores de fricción para lado de tubos.

Fuente: Procesos de transferencia de calor DONALD KERN

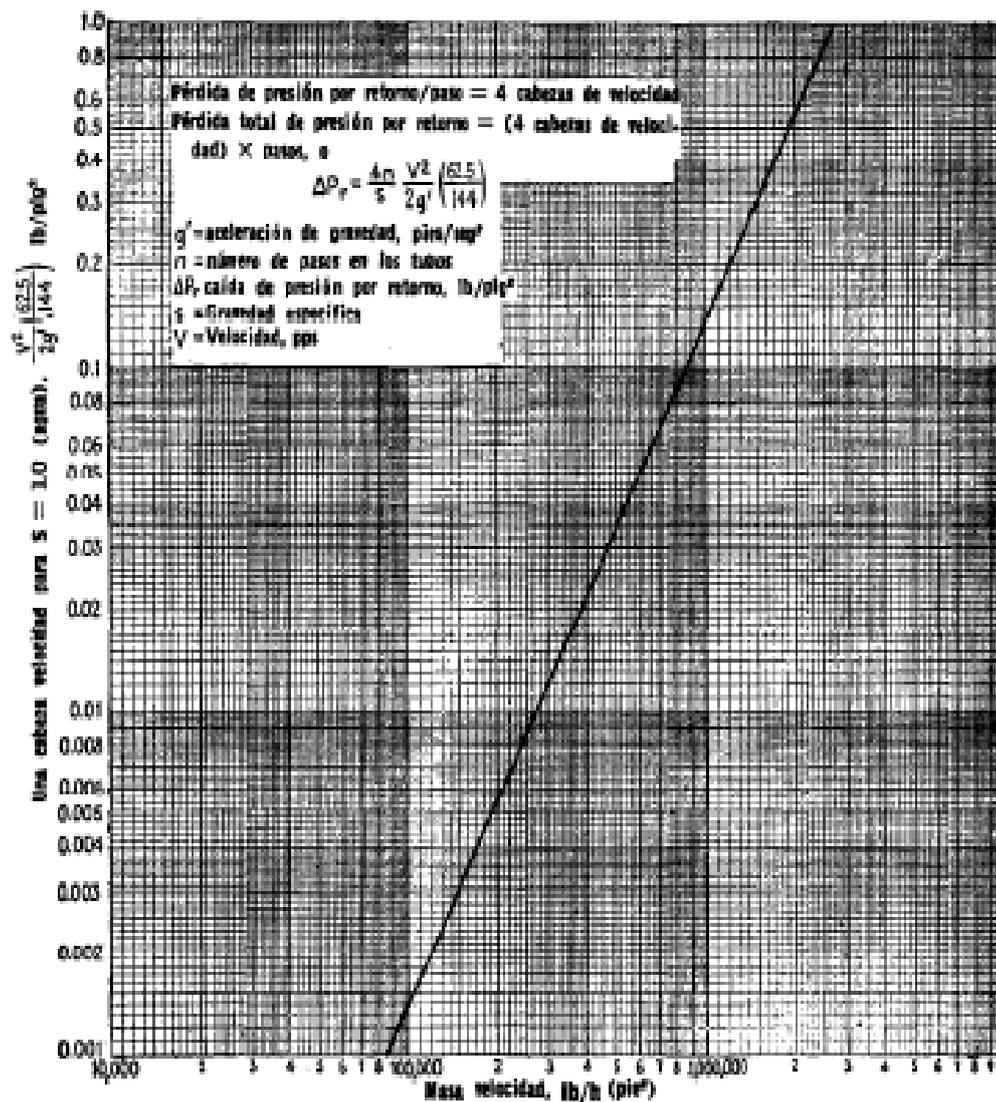


Fig. 54. Pérdida de presión por retorno, lado de tubos.

Fuente: Procesos de transferencia de calor DONALD KERN



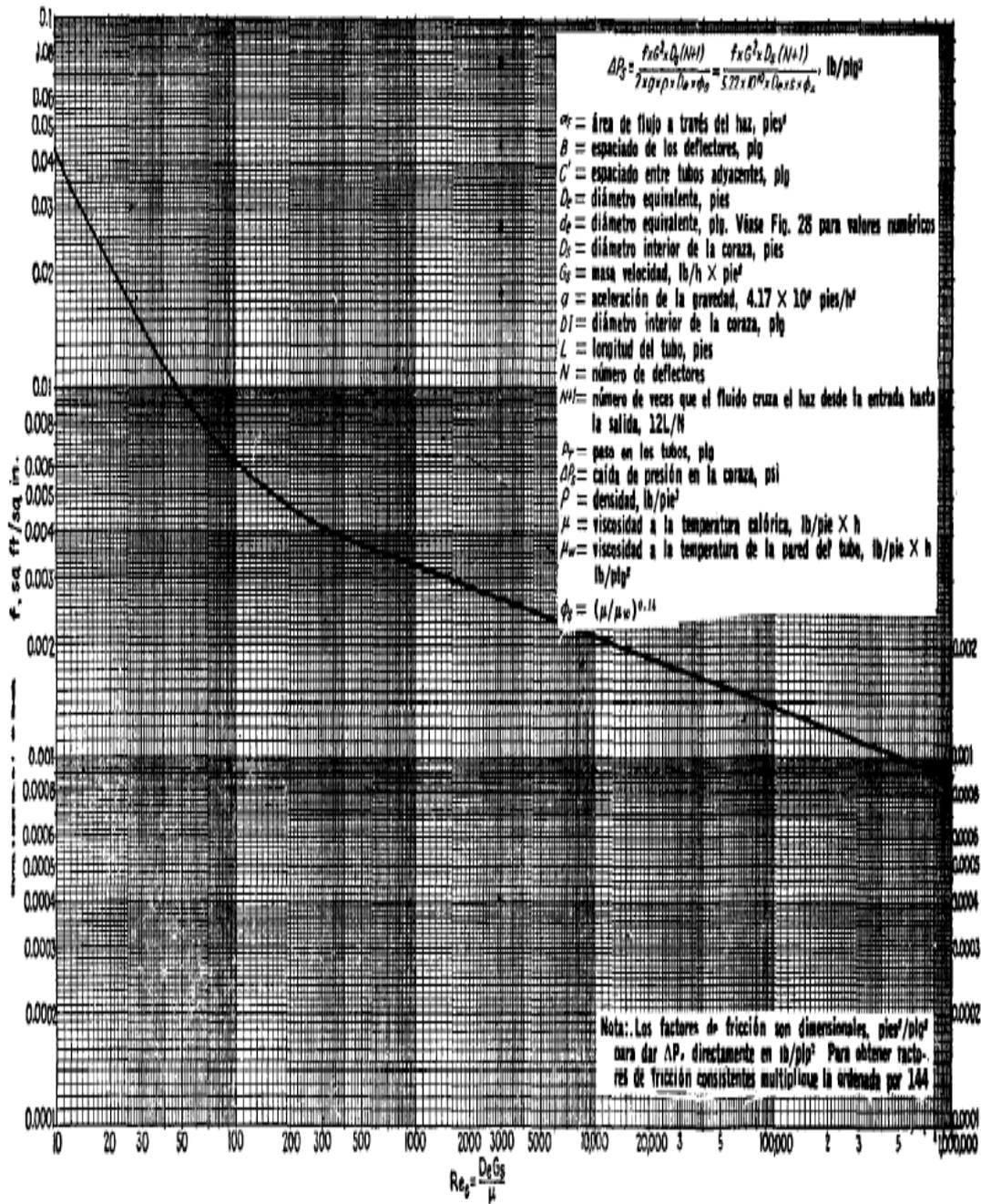


Fig. 56. Factores de fricción de la coraza, para haces de tubos con deflectores segmentados 25%.

Fuente: Procesos de transferencia de calor DONALD KERN

NOMENCLATURA DEL CAPÍTULO IV

$A$	Superficie de transferencia de calor,	$pie^2$
$a$	Área de flujo,	$pie^2$
$a''$	Superficie externa por pie lineal,	$pie^2$
$B$	espacio de los deflectores	$pulg$
$C$	Calor específico del fluido caliente, en derivaciones	$\frac{BTU}{lb^{\circ}F}$
$C$	Sección libre entre tubos,	$pulg$
$c$	Calor específico del fluido,	$\frac{BTU}{lb^{\circ}F}$
$D$	Diámetro interior de los tubos,	$pie$
$d_o$	Diámetro exterior de los tubos,	$pulg$
$D_e, D'_e$	Diámetro equivalente para transferencia de calor y caída de presión, $pie$	
$d_e, d'_e$	Diámetro equivalente para transferencia de calor y caída de presión, $pie$	
$D_s$	Diámetro interior de la coraza,	$pie$
$F_T$	Factor de diferencia de temperatura adimensional	
$f$	Factor de fricción adimensional para AP en	$\frac{lb}{pulg^2}, \frac{pie^2}{pulg^2}$
$G$	Masa velocidad,	$\frac{lb}{h \cdot pie^2}$
$g$	Aceleración de gravedad,	$\frac{pie}{h^2}$
$g'$	Aceleración de gravedad,	$\frac{pie}{seg^2}$
$h, h_i, h_o$	Coefficiente de transferencia de calor, en forma general fluido interior y fluido exterior, respectivamente,	$\frac{BTU}{h \cdot pie^2 \cdot ^{\circ}F}$
$h_{io}$	Valor de $h_i$ cuando se refiere al diámetro exterior del tubo,	$\frac{BTU}{h \cdot pie^2 \cdot ^{\circ}F}$
$DI$	Diámetro interior,	$pulg$

$Q$	Flujo de calor,	$\frac{BTU}{h}$
$j_H$	Factor de transferencia de calor, adimensional	
$k_c$	Constante calórica, adimensional	
$k$	Conductividad térmica,	$\frac{BTU}{h \cdot pie^2 \cdot ^\circ F / pie}$
$L$	Longitud, <i>pie</i>	
$MLDT$	Media logarítmica de la diferencia de temperaturas,	$^\circ F$
$N$	Número de deflectores en la coraza	
$N_t$	Número de tubos	
$n$	Número de pasos de tubos	
$DI$	Diámetro interior,	<i>pulg</i>
$P_T$	Espacio de los tubos,	<i>pulg</i>
$\Delta P_T, \Delta P_t, \Delta P_r$	Caídas totales de presión, lado de los tubos y retorno respectivamente,	$\frac{lb}{pulg^2}$
$R_d, R_i, R_o$	Factores de obstrucción, combinados, interior y exterior respectivamente	$\frac{h \cdot pie^2 \cdot ^\circ F}{BTU}$
$Re, Re'$	Número de Reynolds para transferencia de calor y caída de presión adimensional	
$S$	Grupo de temperaturas, $(t_2 - t_1) / (T_1 - t_1)$ , adimensional	
$T, T_1, T_2$	Temperatura en general, entrada y salida del fluido caliente,	$^\circ F$
$T_c$	Temperatura calórica del fluido caliente,	$^\circ F$
$t_c$	Temperatura calórica del fluido frio,	$^\circ F$
$t, t_1, t_2$	Temperatura en general, entrada y salida del fluido frio,	$^\circ F$
$T_w$	Temperatura de la pared del tubo,	$^\circ F$

$\Delta T_c, \Delta T_h$	Diferencia verdadera de temperatura, $Q = U_D A \Delta t$ °F	
$U, U_c, U_D$	Diferencia de temperatura en las terminales frías y calientes, °F	
	Coefficiente total de transferencia de calor, coeficiente limpio, coeficiente de diseño,	$\frac{BTU}{h \cdot \pi e^2 \cdot ^\circ F}$
$V$	Velocidad pps,	$\frac{\pi e}{seg}$
$v$	Volumen específico,	$\frac{\pi e^3}{lb}$
$W$	Peso del flujo en general, peso del flujo del fluido caliente,	$\frac{lb}{h}$
$w$	Peso del flujo del fluido frio, $\frac{lb}{h}$	
$\phi$	Razón de viscosidad, $(\frac{\mu}{\mu_w})^{0.14}$	
$\mu$	Viscosidad, centipoises x 2.42 = $\frac{lb}{\pi e \cdot h}$	
$\mu_w$	Viscosidad a la temperatura de la pared del tubo, centipoises x 2.42 = $\frac{lb}{\pi e \cdot h}$	
$\rho$	Densidad,	$\frac{lb}{\pi e^3}$
$w$	Peso del flujo del fluido frio,	$\frac{lb}{h}$
Suscritos < excepto los anotados arriba >		
$s$	Coraza	
$t$	Tubos	



**PLANOS DE FABRICACIÓN Y FLOWSHEET**

## INDICE DE PLANOS

<b>01-HIDR-CAL-CESUR-REV.00</b>	<b>1</b>
PLANTA HIDRATAACION DE CAL, INTERCAMBIADOR DE CALOR – PUGMILL	
<b>02-HIDR-CAL-CESUR-REV.00</b>	<b>2</b>
PLANTA HIDRATAACION DE CAL, FLOWSHEET– INTERCAMBIADOR DE CALOR – PUGMILL	
<b>02-HD-CESUR-REV.00</b>	<b>3</b>
PLANTA HIDRATAACION DE CAL – SISTEMA DE TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO	
<b>01CS-CH-GRAL-REV.00</b>	<b>4</b>
PLANO GENERAL – SISTEMA DE HIDRATAACION DE CAL – INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBO Y CORAZA	
<b>02CS-CH-GRAL-REV.00</b>	<b>5</b>
PLANO GENERAL – SISTEMA DE HIDRATAACION DE CAL – INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBO Y CORAZA	
<b>03CS-CH-GRAL-REV.00</b>	<b>6</b>
PLANO GENERAL – SISTEMA DE HIDRATAACION DE CAL – INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBO Y CORAZA	
<b>04CS-CH-GRAL-REV.00</b>	<b>7</b>
PLANO GENERAL – SISTEMA DE HIDRATAACION DE CAL – INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBO Y CORAZA	
<b>05CS-CH-GRAL-REV.00</b>	<b>8</b>
PLANO GENERAL – SISTEMA DE HIDRATAACION DE CAL – INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBO Y CORAZA	
<b>06CS-CH-GRAL-REV.00</b>	<b>9</b>

PLANO GENERAL – SISTEMA DE HIDRATACION DE CAL – INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBO Y CORAZA <b>07CS-CH-GRAL-REV.00</b>	<b>10</b>
PLANO GENERAL – SISTEMA DE HIDRATACION DE CAL – INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBO Y CORAZA <b>08CS-CH-GRAL-REV.00</b>	<b>11</b>
PLANO GENERAL – SISTEMA DE HIDRATACION DE CAL – INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBO Y CORAZA <b>09CS-CH-GRAL-REV.00</b>	<b>12</b>
PLANO GENERAL – SISTEMA DE HIDRATACION DE CAL – INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBO Y CORAZA <b>10CS-CH-GRAL-REV.00</b>	<b>13</b>
PLANO GENERAL – SISTEMA DE HIDRATACION DE CAL – INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBO Y CORAZA <b>11CS-CH-GRAL-REV.00</b>	<b>14</b>
PLANO GENERAL – SISTEMA DE HIDRATACION DE CAL – INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBO Y CORAZA <b>12CS-CH-GRAL-REV.00</b>	<b>15</b>
PLANO GENERAL – SISTEMA DE HIDRATACION DE CAL – INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBO Y CORAZA	