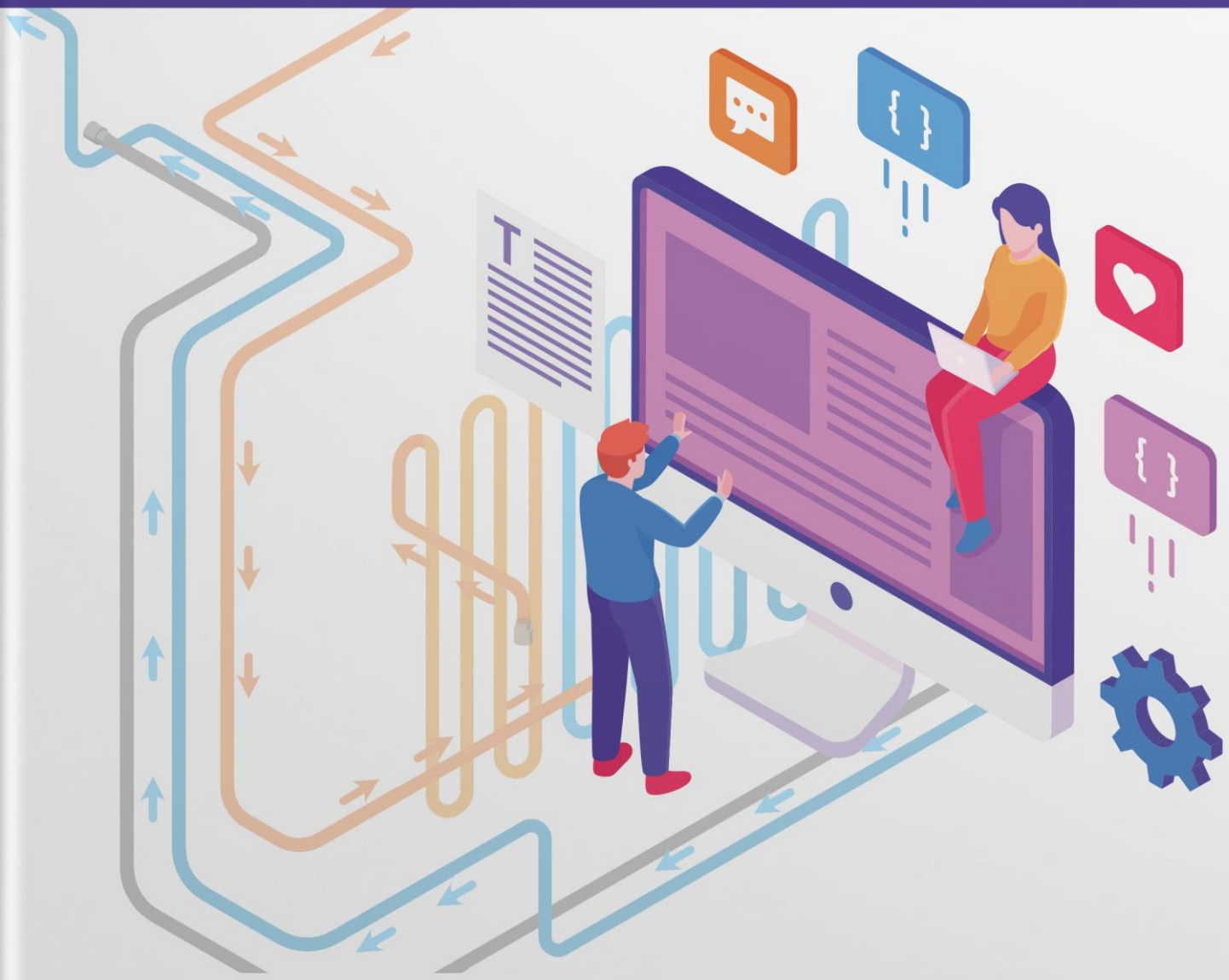
Ciencia Latina
Internacional

DESARROLLO DEL SOFTWARE "CÁLCULO EN CALODUCTOS" (CALCA) PARA EL DISEÑO DE TUBOS DE CALOR (HEAT PIPES)

Dr. Gerardo Galindo Ramos & Dra. Beatriz Gabriel Salmerón



CID editorial
ALIANZA RED
Red de Redes
INDEXA
Crossref

Abril 2024 – CID - Centro de Investigación y Desarrollo
Copyright © CID - Centro de Investigación y Desarrollo
Copyright del texto © 2024 de Autores
biblioteca.ciencialatina.org
editorial@ciencialatina.org
Atención por WhatsApp al +52 22 2690 3834

Datos Técnicos de Publicación Internacional
Título: Desarrollo del software “Cálculo en Caloductos” (CALCA) para el diseño de tubos de calor (Heat Pipes)
Autores: Gerardo Galindo Ramos y Beatriz Gabriel Salmerón
Editor: CID - Centro de Investigación y Desarrollo
Diseño de tapa: CID - Centro de Investigación y Desarrollo
Corrección de Estilo: CID - Centro de Investigación y Desarrollo
Formato: PDF
Páginas: 355 pág.
Tamaño: A4 21x29.7cm
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader
Modo de acceso: World Wide Web
ISBN: 978-99989-67-25-0
DOI: https://doi.org/10.37811/cli_w1058

1ª. Edición. Año 2024. Editorial CID - Centro de Investigación y Desarrollo.

El contenido del libro y sus datos en su forma, corrección y fiabilidad son responsabilidad exclusiva de los autores. Permite la descarga de la obra y compartir siempre que los créditos se atribuyan a los autores, pero sin la posibilidad de cambiarlo de cualquier forma o utilizarlo con fines comerciales

Prohibida su reproducción por cualquier medio.

Distribución gratuita

ÍNDICE

Índice de Figuras..... 9

Índice de Tablas..... 16

NOMENCLATURA..... 17

DEDICATORIA 19

AGRADECIMIENTOS..... 21

RESUMEN 22

ABSTRACT 23

INTRODUCCIÓN 24

1. Antecedentes. 27

1.1. Desarrollo de los Caloductos. 27

1.2. Principio de Funcionamiento de los Caloductos. 35

1.3. Límites de Funcionamiento. 42

1.4. Aplicación de los Caloductos. 44

2. Diseño del Caloducto..... 53

2.1. Especificaciones Técnicas. 53

2.2. Diseño Térmico del Caloducto. 57

2.2.1. Consideraciones Preliminares de Diseño. 57

2.2.1.1. Selección del Fluido de Trabajo..... 62

2.2.1.2. Estructura Capilar. 68

2.2.1.3. Material del Contenedor. 71

2.2.2. Preparación del Tubo Caloducto. 71

2.2.2.1. Preparación Interna del Tubo. 72

2.2.2.2. Limpieza..... 72

2.2.3. Procedimiento de Carga. 74

2.2.3.1. Cálculo Analítico de la Cantidad de Fluido de Trabajo..... 78

2.2.3.2. Estación de Llenado de Caloductos. 79

2.2.4. Pruebas de Seguridad y Vida de Funcionamiento. 81

2.2.5. Fabricación del Caloducto. 81

2.2.6. Ejemplo de la Determinación de Dimensiones para el Diseño de un Caloducto..... 82

2.3. Instalación Experimental para la Fabricación de Caloductos. 85

2.4. Instalación Experimental para la Prueba de los Caloductos. 88

2.5. Instalación para Caracterizar el Caloducto. 92

3. Límites de Funcionamiento Estable de los Caloductos. 92

3.1. Límite Viscoso. 93

3.2. Límite Sónico. 95

3.3. Límite de Arrastre. 101

3.4. Límite de Ebullición o de Calentamiento Crítico. 108

3.5. Límite Capilar. 112

3.5.1. Presión Capilar en la Interfaz Líquido-Vapor. 117

3.5.2. Caída de Presión en el Vapor. 119

3.5.2.1. Caída de Presión del Vapor en el Evaporador. 120

3.5.2.2. Caída de Presión del Vapor en la Zona Adiabática. 122

3.5.2.3. Caída de Presión de Vapor en el Condensador. 125

3.5.3. Gradiente de Presión Inercial. 126

3.5.4. Caída de Presión del Líquido, ΔP_l. 128

3.5.5. Caída de Presión Hidrostática Normal. 132

3.5.6. Caída de Presión Hidrostática Axial. 133

4. Desarrollo del Programa de Cómputo Calca. 135

4.1. Algoritmo de Cálculo y Diagramas de Flujo. 137

4.1.1. Cálculo de los Límites de Funcionamiento en Caloductos. 142

4.1.2. Cálculo del Perfil de Presiones y Temperaturas Analíticos del Vapor. 148

4.1.3. Cálculo del Perfil de Presiones y Temperaturas Analíticos del Líquido. 151

4.1.4. Cálculo del Perfil de Temperaturas y Presiones Experimentales del Vapor. 153

4.1.5. Cálculo del Espesor de Película. 160

4.2. Datos de Entrada. 163

4.2.1. Datos de Entrada en la Rutina CLFC. 163

4.2.2. Datos de Entrada en la Rutina PPTAV. 165

4.2.3. Datos de Entrada en la Rutina PPTAL. 165

4.2.4. Datos de Entrada en la Rutina PTPVE. 165

4.2.5. Datos de Entrada en las Subrutina CEP-d y CEP-X. 166

4.3. Resultados del Programa. 167

4.3.1. Resultados del Programa en la Rutina CLFC. 168

4.3.2. Resultados del Programa en la Rutina PPTAV. 171

4.3.3. Resultados del Programa en la Rutina PPTAL. 175

4.3.4. Resultados del Programa en la Rutina PTPVE. 179

4.3.5. Resultados del Programa en las Subrutinas CEP-d y CEP-X. 183

5. Análisis Paramétrico de Caloductos Utilizando Calca. 185

5.1. Diseño del Experimento. 185

5.1.1. Valores de Entrada en Corridas del Programa de Cómputo CALCA. 185

5.2. Análisis de Resultados y Comparación de Modelos. 189

5.2.1. Máxima Capacidad de Transporte con la Temperatura. 190

5.2.2. Modelos Matemáticos del Límite Viscoso. 192

5.2.3. Modelos Matemáticos del Límite de Ebullición. 193

5.2.4. Modelos Matemáticos del Límite de Arrastre. 195

5.2.5. Modelos Matemáticos del Límite Sónico. 197

5.2.6. Modelos Matemáticos del Límite Capilar. 200

5.2.7. Máxima Capacidad de Transporte y Espacio Libre para el Flujo de Vapor. 202

5.2.8. Relación entre Límites de Funcionamiento y Espacio Libre para el Flujo de Vapor. ... 204

5.2.9. Perfiles de Temperatura. 208

5.2.10. Perfiles de presión. 213

5.3. Comparación con Datos Experimentales. 217

5.3.1. Aplicación del Programa de Cómputo CALCA. 217

CONCLUSIONES 229

REFERENCIAS 230

APÉNDICES 233

Apéndice A Propiedades de Fluidos de Trabajo 233

Apéndice B Tablas de Conductividades Térmicas para Materiales y Estructuras Capilares .. 243

Apéndice C Propiedades de Materiales Sólidos. 245

Apéndice D Tablas de Radios y Permeabilidad para Estructuras Capilares. 247

Apéndice E Relación de Calores Específicos de Vapores 249

Apéndice F Factor de Corrección, a0. 249

Apéndice G Coficiente de Fricción, (flRel). 250

Apéndice H Permeabilidad de Algunas Estructuras Capilares. 251

Apéndice I Factor de Corrección, k3. 252

Apéndice J Radio Hidráulico de Estructuras Capilares. 253

Apéndice K Propiedades Físicas del Agua. 254

Apéndice L Modelos Matemáticos para el Cálculo de los Límites de Funcionamiento en la Rutina CLFC. 255

Apéndice M Listado de Rutinas y Subrutinas del Programa de Cómputo Calca. 259

Apéndice N Instalación del Programa Calca 261

Apéndice O Códigos Fuente del Programa de Cómputo Calca 262

Código Fuente para el Acceso al Programa Calca (Ap) 262

Código Fuente para el Cálculo de los Límites de Funcionamiento en Caloductos (CLFC) 263

Código Fuente para el Cálculo de los Perfiles de Presión y Temperatura Analíticos del Vapor (PPTAV) 281

Código Fuente para el Cálculo de los Perfiles de Presión y Temperatura Analíticos del Líquido (PPTAL) 287

Código Fuente para el Cálculo de los Perfiles de Temperatura y Presión de Vapor Experimentales (PTPVE) 292

Segundo Código Fuente para el Cálculo de los Perfiles de Temperatura y Presión de Vapor Experimentales (PTPVE) 298

Código Fuente para la Obtención de las Gráficas Analíticas de los Perfiles de Presión y Temperatura del Vapor (GAPPTV) 303

Código Fuente para la Obtención de las Gráficas Analíticas de los Perfiles de Presión y Temperatura del Líquido (GAPPTL) 306

Código Fuente para la Obtención de las Gráficas de los Perfiles de Temperatura y Presión de Vapor Experimentales (GPTPVE) 309

Segundo Código Fuente para la Obtención de las Gráficas de los Perfiles de Temperatura y Presión de Vapor Experimentales (GPTPVE) 312

Código Fuente para Guardar el Cálculo de los Perfiles de Temperatura y Presión de Vapor Experimentales (GDE) 316

Segundo Código Fuente para Guardar el Cálculo de los Perfiles de Temperatura y Presión de Vapor Experimentales (GDE) 318

Código Fuente de la Utilería para el Cálculo de los Límites de Funcionamiento en Caloductos (UCLFC) 320

Código Fuente de las Condicionantes para el Cálculo de los Límites de Funcionamiento en Caloductos (CCLFC) 353

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Primer dispositivo tipo caloducto, el "Tubo de Perkins" (King, 1931; Perkins y Buck, 1892) [3]. 27

Figura 2. Intercambiador de calor en base a termosifones aletados (Gay, 1929) [3]. 28

Figura 3. Principio de funcionamiento de un caloducto que funciona como diodo térmico: a) Con la fuente de calor en la parte superior, b) Con la fuente de calor en la parte inferior [12]. 30

Figura 4. Caloducto rotatorio a) tipo flujo axial, b) tipo flujo radial [2].....31

Figura 5. Caloducto rotatorio [2]. 32

Figura 6. Disposición del caloducto rotatorio utilizado para el enfriamiento de rotores de motores [2].....32

Figura 7. Configuración de un caloducto de conductancia variable [4]. 33

Figura 8. Caloducto [7] 35

Figura 9. Operación de un termosifón típico [3].....38

Figura 10. Operación del (a) termosifón y del (b) caloducto [2] 38

Figura 11. Esquemas típicos de los límites de funcionamiento de un caloducto, según a) Peterson [3] y b) Mills [5]. 43

Figura 12. Satélite con arreglo de caloductos [2]. 45

Figura 13.- El uso de caloductos reduce los gradientes de temperatura de la pared del troquel [2]. 47

Figura 14. Enfriamiento de componentes electrónicos por contacto directo [2]. 48

Figura 15. Enfriamiento de componentes microelectrónicos utilizando micro-caloductos [2]. 49

Figura 16. Enfriamiento de componentes de alto voltaje utilizando caloductos aislados eléctricamente [2]. 49

Figura 17. Localización del reactor SPAR y sus caloductos [2]. 51

Figura 18. El SPAR y la disposición de capas mostrando el núcleo del reactor y sus caloductos sodio/molibdeno [2].....51

Figura 19. Caloductos insertados [2]. 52

Figura 20. Caloducto quemador de litio [2]. 53

Figura 21. Carta de flujo para el diseño de un caloducto [3].....59

Figura 22. Efectos de la calidad inicial sobre la operación del caloducto [3]. 63

Figura 23. Efectos de gas no condensable sobre la distribución de temperaturas [3]. 64

Figura 24. Típicos rangos de operación para fluidos de trabajo de caloductos [3].....65

Figura 25. Figura de Merit para varios fluidos de trabajo (Dunn y Reay, 1982) [3]. 66

Figura 26. Diferentes tipos de estructuras capilares [3].....70

Figura 27. Carga y doble destilación [3].....76

Figura 28. Esquema de la doble destilación y carga [3].....77

Figura 29. Geometría de ranura axial [14].....79

Figura 30. Diagrama esquemático de la estación de llenado [14].....80

Figura 31. Diagrama de bloques para la fabricación de caloductos [8].....82

Figura 32. Diagrama de las dimensiones del caloducto.....85

Figura 33. Diagrama de la instalación experimental [21]. 91

Figura 34. Limites de funcionamiento de los caloductos [2]. 93

Figura 35. Flujo de masa y distribución axial de presión [3].....97

Figura 36. Temperatura en función de la posición axial [3]. 98

Figura 37. Recuperación completa de presión (Cotter, 1967) [3]. 98

Figura 38. (a) Variación de curvatura de menisco en función de la posición axial. (b) Típicas distribuciones de presión de vapor y de líquido en caloductos [3]. 112

Figura 39. Representación gráfica de las caídas de presión durante la operación de un caloducto [3]..... 114

Figura 40. Perfil de presiones en un caloducto de estructura capilar homogénea, asistido por gravedad [11]. 117

Figura 41. Meniscos de líquido en el relleno poroso de un caloducto el radio de curvatura es menor en el evaporador [5]. 118

Figura 42. Longitud efectiva para la adición y eliminación constante de calor [3] 131

Figura 43. Diagrama de flujo del algoritmo de cálculo. 138

Figura 44. Diagrama de flujo de presentación de la rutina CLFC en el programa de cómputo CALCA. 143

Figura 45. Diagrama de flujo de la rutina CLFC para el cálculo de los límites de funcionamiento. 146

Figura 46. Diagrama de flujo de la rutina PPTAV. 150

Figura 47. Diagrama de flujo de la rutina GAPPTV. 151

Figura 48. Diagrama de flujo de la rutina PPTAL. 152

Figura 49. Diagrama de flujo de la rutina GAPPTL. 153

Figura 50. Diagrama de flujo de presentación de la rutina PTPVE y cálculo de los valores de Pv. 155

Figura 51. Diagrama de flujo de la rutina PTPVE y cálculo del valor de los calores. 156

Figura 52. Diagrama de flujo de la rutina GPTPVE. 157

Figura 53. Diagrama de flujo de presentación de la segunda rutina PTPVE y cálculo de los valores de Pv. 158

Figura 54. Diagrama de flujo de la segunda rutina PTPVE y cálculo de los valores de calores. 159

Figura 55. Diagrama de flujo de la segunda rutina GPTPVE. 160

Figura 56. Diagrama de flujo de la subrutina CEP-X para el cálculo del espesor de película. . 161

Figura 57. Diagrama de flujo de la subrutina CEP-d para el cálculo del espesor de película. . 162

Figura 58. Pantalla principal de la rutina CLFC en el programa de cómputo CALCA. 170

Figura 59. Pantalla principal de la rutina PPTAV en el programa de cómputo CALCA. 172

Figura 60. Tipo de Gráfica para el perfil de presiones obtenida mediante la rutina GAPPTV. 174

Figura 61. Tipo de Gráfica para el perfil de temperaturas obtenida mediante la rutina GAPPTV. 174

Figura 62. Pantalla principal de la rutina PPTAL en el programa de cómputo CALCA. 176

Figura 63. Tipo de Gráfica para el perfil de presiones obtenida mediante la rutina GAPPTL. 178

Figura 64. Tipo de Gráfica para el perfil de temperaturas obtenida mediante la rutina GAPPTL. 178

Figura 65. Pantalla principal de la rutina PTPVE en el programa de cómputo CALCA. 179

Figura 66. Segunda pantalla de la rutina PTPVE en el programa de cómputo CALCA. 180

Figura 67. Formato de Gráfica para el perfil de presiones obtenida mediante la rutina GPTPVE. 182

Figura 68. Formato de Gráfica para el perfil de temperaturas obtenida mediante la rutina GPTPVE. 182

Figura 69. Pantalla principal de la subrutina CEP-d para el cálculo del espesor promedio de película. 184

Figura 70. Pantalla principal de la subrutina CEP-X para el cálculo del espesor promedio de película. 184

Figura 71. Cálculo de los Límites de Funcionamiento del Caloducto a r_v= 6 mm y 100 °C..... 189

Figura 72. Variación de la capacidad de transporte de calor del caloducto en función de la temperatura de operación. 190

Figura 73. Variación de la capacidad de transporte de calor del caloducto para una relación (r_v/r_i) = 0.92. 191

Figura 74. Variación de la capacidad de transporte de calor del caloducto para una relación (r_v/r_i) = 0.1. 192

Figura 75. Comportamiento del límite viscoso en función de la temperatura de operación y un radio de vapor de 0.65 mm. 193

Figura 76. Comportamiento del tercer modelo matemático del límite de ebullición en función de la temperatura de operación y un radio de vapor de 6 mm..... 194

Figura 77. Comportamiento del primer y tercer modelos matemáticos del límite de ebullición en función de la temperatura de operación y un radio de vapor de 0.65 mm. 195

Figura 78. Comportamiento de los modelos matemáticos 1, 2, 3 y 7 del límite de arrastre en función de la temperatura de operación y un radio de vapor de 6 mm. 196

Figura 79. Comportamiento de los modelos matemáticos 1, 2, 3 y 7 del límite de arrastre en función de la temperatura de operación y un radio de vapor igual a 0.65 mm. 196

Figura 80. Comportamiento del límite sónico, en algunos modelos matemáticos utilizados, en función de la temperatura de operación y un radio de vapor de 6 mm. 197

Figura 81. Comportamiento de los modelos matemáticos 3 y 5 para el cálculo del límite sónico en función de la temperatura de operación y un radio de vapor igual a 6 mm. 198

Figura 82. Comportamiento del límite sónico, en algunos modelos matemáticos utilizados, en función de la temperatura de operación y un radio de vapor de 0.65 mm. 199

Figura 83. Comportamiento de los modelos matemáticos 3 y 5 para el cálculo del límite sónico en función de la temperatura de operación y un radio de vapor de 0.65 mm. 199

Figura 84. Comportamiento de los modelos matemáticos que calculan el límite capilar en función de la temperatura de operación y un radio de vapor de 6 mm. 201

Figura 85. Comportamiento de los modelos matemáticos que calculan el límite capilar en función de la temperatura de operación y un radio de vapor de 0.65 mm. 201

Figura 86. Variación de la capacidad de transporte de calor del caloducto en función del espacio libre de flujo para el vapor (r_v). 203

Figura 87. Comportamiento del límite de ebullición con la variación del radio libre para el flujo de vapor a 80 °C y 100 °C. 204

Figura 88. Comportamiento del límite de arrastre con la variación del radio libre para el flujo de vapor a 60, 80 y 100 °C. 205

Figura 89. Comportamiento del límite sónico con la variación del radio libre para el flujo de vapor a 60 °C. 206

Figura 90. Comportamiento del límite capilar con la variación del radio libre para el flujo de vapor a 60, 80 y 100 °C. 207

Figura 91. Perfil de temperaturas del caloducto sometido a diversos suministros de calor constante. 210

Figura 92. Perfil de temperaturas del caloducto sometido a diversos suministros de calor constante. 212

Figura 93. Perfil de presiones del caloducto sometido a temperaturas de operación constante con r_v = 6 mm. 213

Figura 94. Perfil de presiones del caloducto sometido a diversos suministros de calor constante, con r_v = 0.65 mm. 214

Figura 95. PPTAV mostrado por el programa CALCA para un r_v= 6 mm y 100 °C..... 215

Figura 96. Tabulación de resultados del PPTAV guardados por el programa CALCA para un r_v= 6 mm y 100 °C. 215

Figura 97. Gráfica del perfil de temperaturas en función de la posición axial para el vapor para un r_v= 6 mm y 100 °C. 216

Figura 98. Gráfica del perfil de presiones en función de la posición axial para el vapor para un r_v= 6 mm y 100 °C. 216

Figura 99. Numeración de los principales modelos matemáticos utilizados en el cálculo de los límites de funcionamiento. 217

Figura 100. Ventana de valores de entrada para el Cálculo de los Límites de Funcionamiento del Caloducto y resultados adicionales sin desprecio de gradientes de presiones. 222

Figura 101. Ventana de valores de entrada para el Cálculo de los Límites de Funcionamiento del Caloducto y resultados adicionales despreciando los gradientes de presiones. 222

Figura 102. Ventana de valores de entrada para el Cálculo de los Límites de Funcionamiento del Caloducto y resultados adicionales. 227

Figura 103. Ventana de valores de entrada para el Cálculo de los Límites de Funcionamiento del Caloducto y resultados adicionales mostrando el desprecio de gradientes de presiones. 227

Figura 104. Modelos matemáticos que rigen el comportamiento de los límites de funcionamiento de los ejemplos de aplicación..... 228

Figura 105. Cuadro para la selección de caídas de presión consideradas despreciables..... 228

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Componentes del caloducto y su influencia sobre los requerimientos del diseño [3].60

Tabla 2.- Datos de compatibilidad entre el fluido de trabajo y contenedor [3].....61

Tabla 3. Figuras de Merit para fluidos de trabajo [18]. 67

Tabla 4. Características de operación en Caloductos [6].....68

Tabla 5. Limitación sónica para tubos de calor de metal líquido [5]. 96

Tabla 6. Combinaciones de algunas constantes aplicadas al vapor [5]. 124

Tabla 7. Tabulado de resultados de los perfiles de presión y temperatura de la rutina PPTAV. 173

Tabla 8. Tabulado de resultados de los perfiles de presión y temperatura de la rutina PPTAL. 177

Tabla 9. Tabulado de resultados experimental para los perfiles de presión y temperatura de la rutina PTPVE. 181

Tabla 10. Valores de las propiedades físicas resultado del programa de cómputo CALCA. ... 219

Tabla 11. Límites de funcionamiento experimentales y resultado del programa de cómputo CALCA. 220

Tabla 12. Cálculos adicionales realizados por el programa de cómputo CALCA. 221

Tabla 13. Valores de las propiedades físicas resultado del programa de cómputo CALCA. ... 224

Tabla 14. Límites de funcionamiento experimentales y resultado del programa de cómputo CALCA. 225

Tabla 15. Cálculos adicionales realizados por el programa de cómputo CALCA. 226

NOMENCLATURA

SÍMBOLO	SIGNIFICADO	UNIDADES
A	Área de sección transversal.	m^2
	Factor de corrección del perfil de velocidades.	
A*	Constante Adimensional $\cong (1/8)\pi^2$ para $(P_{e,sal}/P_{e,ext}) \cong 1$; $\cong 2.2$ para flujo turbulento.	
C	Velocidad del sonido.	m/s
	Constante.	
	Factor de corrección del perfil de velocidades.	
D	Diámetro.	M
	Diámetro del tubo.	M
E_t	Parámetro de arrastre adimensional.	
G	Razón de volumen de líquido al volumen total de las ranuras.	
I	Intensidad de corriente.	Amperes
K	Permeabilidad.	m^2
L	Longitud.	m
M	Número de Mach.	
N	Número de ranuras.	
	Número de estrías helicoidales.	
	Número de malla.	m^{-1}
P	Presión.	N/m^2, Pa
	Potencia térmica aplicada.	W
P_e	Perímetro mojado.	m^2
ΔP	Caída y/o diferencia de presión.	N/m^2, Pa
PM	Peso molecular.	kg/kg mol
Q	Transferencia de calor.	W
R	Radio.	m
	Resistencia eléctrica.	Ohm
$\overline{R}$	Constante universal de los gases.	J/kg mol K
Re	Número de Reynolds.	
R_v	Constante del vapor.	J/kg K
T	Temperatura.	K
ΔT	Diferencia de temperaturas.	K
V	Voltaje.	Volts
	Velocidad.	m/s
	Volumen.	m^3
	Volumen del espacio de flujo del vapor.	m^3
We	Número de Weber	
Z	Longitud de la columna de líquido.	m
a	Factor de corrección del perfil de velocidad	
d	Diámetro.	m
cp	Capacidad calorífica a presión constante.	J/kg K
cv	Capacidad calorífica a volumen constante.	J/kg K
f	Factor de fricción	
g	Aceleración gravitacional = 9.81.	m/s^2
g_c	Constante = 1.0 = 32.2	$kg.m/N.s^2$ $lb_m.ft/lb_f.s^2$

h	Altura de la ranura.	m
h_{fg}	Calor latente de vaporización.	J/kg
k	Conductividad térmica.	W/mk
k_3	Factor de corrección	
$\dot{m}$	Flujo másico.	kg/s
m	Masa.	kg
$\dot{m}_r$	Flujo másico del fluido refrigerante.	kg/s
q	Flujo axial de energía.	W
r_v/r_i	Espesor adimensional de película	
r	Radio.	m
s	Espesor de tubo.	m
$\bar{v}$	Velocidad media del vapor.	m/s
v	Volumen específico.	m^3/kg
	Velocidad.	m/s
w_f	Amplitud entre ranuras.	m
w	Ancho de ranura.	m
x	Posición axial, Coordenada de longitud.	m
z	Dimensión axial medida desde la entrada del condensador.	m
	Diámetro hidráulico de los poros de la estructura capilar.	m
	Distancia entre centros de alambres o dos crestas de una ranura.	m
$f\,\mathrm{Re}$	Coeficiente de fricción.	
α	Factor de corrección del perfil de velocidad	
	Relación de forma	
δ	Dimensión característica de superficie.	m
	Profundidad de ranura.	m
δ^*	Profundidad de la superficie de referencia, para ranurados;	m
	$\cong (d_{alambre}/2)$, para mallas;	m
	Tamaño del poro.	m
ε	Porosidad de la estructura capilar.	
ϕ	Angulo de inclinación del caloducto con la horizontal.	grados
γ	Relación de calores específicos.	Cp/Cv
ι	Longitud característica de la estructura capilar = 16 $r_{h,w}$.	m
λ	Longitud de onda.	m
μ	Viscosidad absoluta.	kg/ms
ν	Viscosidad cinemática.	m^2/s
θ	Angulo de contacto.	grados
θ_1, θ_2	Angulo de desviación de la pared de la ranura con respecto a la vertical.	rad
ρ	Densidad.	kg/m^3
σ	Tensión superficial.	N/m
τ	Esfuerzo de corte en interfaz líquido-sólido.	
ψ	Angulo de inclinación del caloducto con la horizontal.	grados

SÍMBOLO SUBÍNDICE	SIGNIFICADO
A	Adiabática, axial
C	Condensador, Capilar, Curvatura
cr	Crítico
e	Evaporador, exterior
eff	Efectiva
ext	Extremo
f	Friccional, fluido
gr	Ranuras
h	Hidráulico
i	Interior, Interface, Inercial
in	Entrada
l	Líquido
$l-v$	Interface líquido-vapor
M	Máximo
N	Nucleación, nominal
Nuc	Nucleación
Out	Salida
Ph	Transición y/o cambio de fase
Por	Poro
R	Radial, refrigerante
Rec.	Rechazado
S	Saturación, esfera
Sal	Salida
Sum	Suministrado
T	Total
Tot	Total
v	Vapor
vs	Espacio de flujo del vapor
W	Estructura capilar, Húmedo, Alambre.
X	Coordenada de longitud
Z	Dimensión característica de la superficie líquido-vapor. Separación de la estructura capilar o malla, en un caloducto.
0	Condiciones de estancamiento
$\Downarrow$	Hidrostática axial
+	Hidrostática normal

DEDICATORIA

El presente libro está dedicado a mi familia, a mi esposa por estar a mi lado, por su comprensión y apoyo, a mis hijos Luis Alberto, Irving Eduardo y Samantha Yexalén para orgullo mío y a mi madre, Esther, ella forjó lo que soy.

AGRADECIMIENTOS

Al Señor mi Dios por permitirme concluir este proyecto, a mi esposa por sus contribuciones técnicas y de revisión y a mi amigo el Ing. Juan Carlos Bacilio Sánchez por su ayuda incondicional y valiosa colaboración.

RESUMEN

El presente trabajo tiene como propósito fundamental el desarrollo de un programa de cómputo que permita analizar, caracterizar y diseñar un caloducto bajo tres diferentes geometrías básicas y que utilice algunos de los fluidos más comunes tanto orgánicos como inorgánicos. Se ha incluido, además, la posibilidad de trabajar con termosifones bajo la misma tónica que para los caloductos. La metodología para el desarrollo del algoritmo y la elaboración del programa utiliza las principales ecuaciones y modelos matemáticos teóricos que gobiernan el comportamiento de los límites de funcionamiento y la capacidad de transferencia de calor del dispositivo. Se han incluido en el algoritmo del programa de cómputo ecuaciones y modelos matemáticos reportados tanto en la literatura como las utilizadas y generadas en artículos de investigación. Mediante el empleo de estas expresiones y modelos matemáticos el programa de cómputo permite establecer los perfiles de presión y temperatura a lo largo del caloducto tanto para el flujo de vapor como para el líquido de retorno dentro de la estructura capilar, simula las secciones de evaporación, adiabática y de condensación, permite subdividir cada sección simulando la posición de termopares, representar gráficamente los valores de presión y temperatura para el flujo bifásico y obtener tablas de la información generada. Se incluye el cálculo del calor suministrado y transportado, el cálculo de la presión del vapor y la representación gráfica y tabular de los perfiles de presión y temperatura a partir de la información experimental que de algún caloducto específico se obtenga. Mediante el empleo del lenguaje de programación Visual Basic se generó un programa de cómputo al que se ha denominado CALCA, “cálculos de caloducto”, cuya operación y funcionamiento resulta ser muy amigable con una fiabilidad bastante aceptable de acuerdo a los resultados obtenidos y comparados con los existentes en la literatura. Con el presente se pretende contribuir al desarrollo del área, concretamente en lo que a la transferencia de calor en los llamados” heat pipes” o caloductos se refiere, así como constituirse en un aporte tecnológico de aplicación al incorporarse un programa que permita ser utilizado y mejorado por los estudiosos del campo.

Palabras clave: caloducto; limites; calor; software; heat pipes.

ABSTRACT

The main goal of this work is the development of a computing program that allows to analyze, characterize and design a heat pipe under three different basic geometries, using some of the most common organic and inorganic fluids. In addition, the possibility to work with thermosiphons has been considered under the same condition that heat pipes. The methodology for the development of the algorithm and the elaboration of the program uses the main theoretical mathematical equations and models that rule the behavior of the operation limits and the capacity of heat transference of the device. The algorithm of the calculation program equations and mathematical models reported in literature have been included. By using these expressions and mathematical models, the camputing program allows us establish the profiles of pressure and temperature throughout the heat pipe as for the steam flow as for the liquid of return within the wicking structure, it simulates the sections of evaporation, adiabatic and condensation, it allows subdivide each section simulating the position of thermocouples, it represents graphically the values of pressure and temperature for two-phase flow and obtain tables of the generated information. The calculation of the provided and transported heat, is included as well as the calculation of the pressure of the steam and the graph and tabular representation of the profiles of pressure and temperature obtained experimentaly from a specific heat pipe. Throught the use of the Visual Basic programming language, computing program was generated a CALCA, “calculations of heat pipe”, whose operation and working is very friendly with an enough acceptable reliability according to the results obtained and compared with the existing in literature. This thesis tries to contribute to the development of this area, espeficically in the heat transference of “heat pipes”, as well as constitute in a technological contribution of application by adding a program to be used and improved by the students of the field.

Keywords: heat pipe; boundaries; heat; software; heat pipes.

INTRODUCCIÓN

El contar con tecnología en sistemas de intercambio de calor de alta eficiencia, simples, compactos, capaces de incrementar energía adicional a los procesos que lo requieran y que, además, permitan aprovechar y utilizar la energía de desecho, es una necesidad que lleva a trabajar con nuevos dispositivos recuperadores de calor llamados “caloductos”.

El caloducto es un dispositivo con una eficiencia de transporte de calor muy alta, de aparente fácil construcción, que en la actualidad no es muy utilizado en nuestro país y que requiere de un mayor y profundo estudio en lo que a su diseño, fabricación y comportamiento se refiere con la finalidad de que sean reconocidos su potencialidad y diversidad de aplicaciones.

El desarrollo de este tipo de dispositivos para la transferencia de calor, así como de programas de cómputo que simulen su función y faciliten su diseño permitirá el desarrollo de sistemas de recuperación de calor de alta eficiencia cuyas expectativas de aplicación se consideran bastante amplias y que en nuestro país no es en lo más mínimo explotado.

En este libro se puede observar que se propone el uso de expresiones teóricas, principalmente, para el cálculo de los límites de funcionamiento y de la capacidad de transporte de calor en caloductos con el objetivo de desarrollar un programa de cómputo que permita conocer los parámetros que intervienen en su diseño. El programa de cómputo permitirá analizar y caracterizar el comportamiento de los caloductos mediante el análisis comparativo de cualquier información experimental que se tenga con la que se obtenga de las corridas del programa.

Del análisis comparativo se pretende determinar los modelos matemáticos que mejor describen el comportamiento térmico del caloducto.

La identificación de estos modelos permitirá tener un mejor control de los parámetros de interés.

El libro consta de cinco apartados; en el primer apartado se presentan los antecedentes históricos que sobre caloductos se tiene en la literatura. Inicia con el acuñamiento del concepto “heat pipe” o “caloducto” y el posterior desarrollo que ha tenido tomando como base a los tubos termosifones hasta llegar al diseño de dispositivos de mayor seguridad,

ligeros y con una mayor eficiencia en la transferencia de calor. Se analiza su estructura y principio básico de funcionamiento, comparándolo con el de los termosifones, así como los factores que disminuyen su capacidad de transporte de calor llegando incluso a "bloquearlos" e impidiendo su adecuado funcionamiento. Estos son los llamados límites de funcionamiento. Se concluye este apartado detallando la amplia variedad de aplicaciones a las que se han destinado los caloductos que, si en un principio su principal aplicación se consideró en la industria aeroespacial, hoy día se consideran de un gran avance para las aplicaciones terrestres cubriendo un amplio espectro de temperaturas.

El segundo apartado considera las especificaciones técnicas que un caloducto fabricado puede manejar con el fin de entender su comportamiento y posibles aplicaciones. Se dan las consideraciones preeliminares para el diseño de un caloducto, analizando el tipo de fluido a utilizar, los materiales de fabricación, el tipo y material de la estructura capilar, así como algunas técnicas para la fabricación del mismo. Se presentan los elementos necesarios para el diseño y construcción de las instalaciones experimentales para la fabricación, pruebas de calidad y caracterización experimental de un caloducto.

En el apartado tres se definen y analizan los principales mecanismos que pueden limitar la cantidad máxima de calor que el caloducto puede transferir, los llamados límites de funcionamiento; entre ellos el viscoso, el sónico, el de arrastre, el de ebullición y el capilar. Para cada uno de ellos se estudian las principales expresiones y modelos matemáticos que nos permiten realizar su cálculo. Expresiones que por igual se constituyen en el corazón del programa de cómputo CALCA.

En el apartado cuatro se presentan y describen los diagramas de flujo de todas las rutinas y subrutinas consideradas en la elaboración del programa de cómputo CALCA. Se proporciona una breve descripción de las propiedades de los diferentes fluidos de trabajo, así como de los materiales de fabricación a fin de entender la compatibilidad entre estos para una correcta introducción de los datos de entrada, datos con que se alimentan el programa. Se describe el sistema de unidades utilizado y las unidades que se manejan para la entrada de datos. Finalmente, se describe ampliamente el tipo de resultados arrojados por el programa, unidades, tipos de gráficos y tabulados, así como los modelos matemáticos utilizados y ya analizados en el apartado tres.

El apartado cinco muestra la aplicación de programa de cómputo CALCA. Se inicia con la asignación de las condiciones de entrada para la operación del programa y posterior análisis de toda la información que se pueda graficar en lo que se ha denominado comparación de modelos y análisis de resultados. Se concluye con la comparación entre los resultados obtenidos con el programa CALCA y dos casos experimentales documentados.

Finalmente se presentan las conclusiones.

1. Antecedentes.

1.1. Desarrollo de los Caloductos.

La formulación inicial del concepto “caloducto” es atribuida a las patentes de A. M. Perkins y J. Perkins en la mitad del siglo XIX (King, 1931; Perkins y Buck, 1892). Estas patentes están enfocadas a un dispositivo al que se le refiere como tubo de Perkins. Este dispositivo, figura 1, puede ser utilizado en procesos de una o de dos fases para transferir calor desde un horno hasta una caldera, para el calentamiento de agua, por ejemplo. Gay (1929) obtuvo una patente de un dispositivo similar al tubo de Perkins, figura 2, en el cual un determinado número de tubos verticales fueron acondicionados con el evaporador localizado abajo del condensador.

Figura 1. Primer dispositivo tipo caloducto, el “Tubo de Perkins” (King, 1931; Perkins y Buck, 1892) [3].

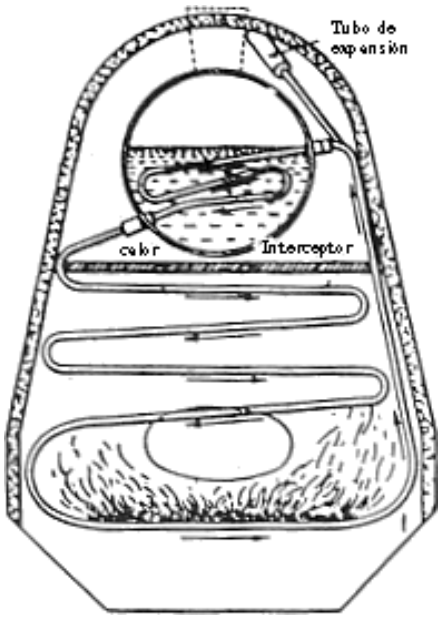
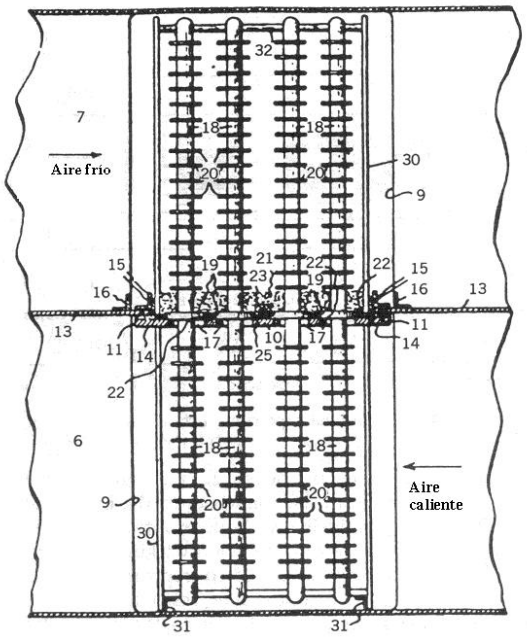


Figura 2. Intercambiador de calor en base a termosifones aletados (Gay, 1929) [3].



Estos dispositivos, actualmente conocidos como termosifones, colocaron los trabajos preparatorios para, más tarde, permitir el desarrollo de lo que hoy se conocen como caloductos [3].

El concepto de caloducto recibió no recibió gran atención sino hasta que Grover (1964) publicó los resultados de una investigación independiente en la que utilizó la primera aplicación del término “caloducto” (heat pipe) que lo describe como “una estructura de ingeniería que posee una elevada conductividad térmica que excede a cualquiera de los metales conocidos”.

Es a partir de entonces que se establece la diferencia primaria entre el termosifón propuesto por Perkins (Perkins and Buck, 1892) y Gay (1929) y el caloducto propuesto por Gaugler (1944) y Grover (1964); en el que los caloductos utilizan alguna especie de material poroso o estructura capilar que asiste o promueve el flujo del líquido desde el condensador al evaporador, en vez de confiar solamente en la aceleración gravitacional local, para el retorno del líquido desde el condensador al evaporador [3].

Gaugler (1944) introduce el concepto de estructura capilar como parte de un dispositivo de transferencia de calor de dos fases, pasivo, capaz de transferir grandes cantidades de calor

con una mínima caída de temperatura [3]. En 1964 Grover, Cotter y Erickson publicaron los resultados de sus experimentos sobre la transferencia de calor realizada en tres dispositivos con estructura capilar interna única a las cuales se refirieron como caloductos. Cada caloducto consistía de un tubo sellado sobre cuya superficie interna se colocó una delgada capa de material poroso. Esta estructura capilar se saturó de líquido mientras que el volumen interno remanente del tubo fue ocupado por el vapor del líquido. A uno de los caloductos se le adicionó agua mientras que a los otros dos Sodio.

Al suministrar calor a través de una sección de cada uno de los tubos y ser removido a través de la longitud remanente del mismo, por convección natural, encontraron que la temperatura de los caloductos permanecía prácticamente constante en la mayor parte de su longitud aún para flujos de calor relativamente elevados. Luego de ser dados a conocer estos primeros experimentos sobre caloductos, los años sucesivos se caracterizaron por una cantidad creciente de literatura sobre la investigación y aplicación de los caloductos [1].

En base a los trabajos de Gaugler (1944) es que Udell y Jennings (1984) propusieron y formularon un modelo de caloducto con una estructura capilar de porosidad media, de dos diferentes permeabilidades, orientada paralelamente a la dirección del flujo de calor, cuando hasta ese momento se tenían caloductos de una sola permeabilidad [3].

El diseño y aplicación de los caloductos se desarrolló rápidamente en los últimos 30 años desde el primer manuscrito de la investigación realizada por Grover and Erickson (1964). El primer artículo que contenía una formulación teórica unidimensional completa fue publicado por Cotter (1965). Ismail and Zanardi (1988) publicaron un estudio numérico sobre un caloducto de sección transversal rectangular con estructura capilar aglomerada [9].

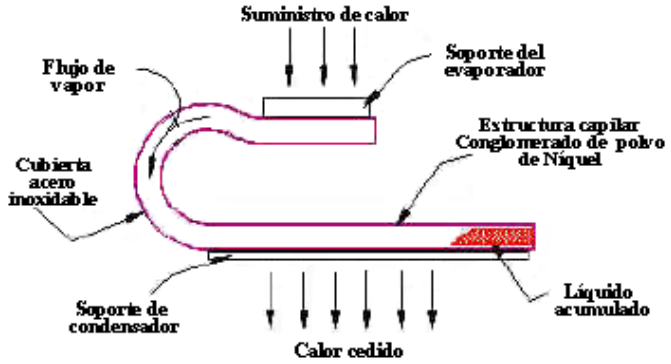
Los esfuerzos iniciales de la aplicación de los caloductos se dirigieron hacia el transporte de calor en la industria aeroespacial debido a su elevada capacidad de transporte de flujos de energía, su capacidad de operación bajo condiciones de ausencia de gravedad en el espacio, y su capacidad de operación isotérmica. Esto hizo que las características únicas del caloducto fueran igualmente utilizadas aquí en la tierra, y las aplicaciones terrestres vinieran a ser de considerable interés [1].

Por otro lado, Zanardi (1989) estudió un caloducto en un colector solar parabólico y obtuvo eficiencias de cerca del 50%. De igual manera Ismail y Abogderah (1991, 1992) publicaron algunos resultados parciales relacionados con caloductos en colectores solares [9].

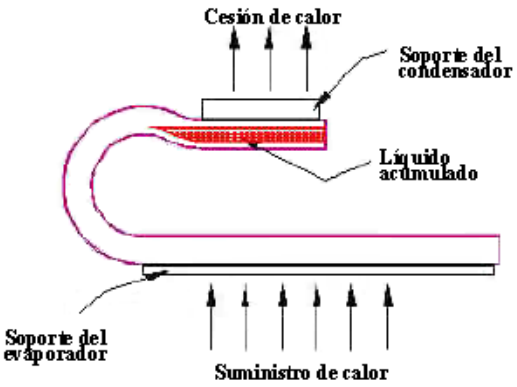
Las propiedades que poseen los caloductos constituyen una atractiva opción para que estos funcionen como diodos térmicos en colectores solares [9]. Las figuras 3, a y b, muestran el principio de funcionamiento de un caloducto utilizado como diodo térmico en sistemas espaciales y terrestres donde se utilizan fluidos de trabajo como el amoniaco, metanol o agua y con la variante en la recepción y eliminación de calor de acuerdo a su disposición en el cuerpo o sistema a enfriar o calentar [12].

Figura 3. Principio de funcionamiento de un caloducto que funciona como diodo térmico: a) Con la fuente de calor en la parte superior, b) Con la fuente de calor en la parte inferior [12].

a)



b)

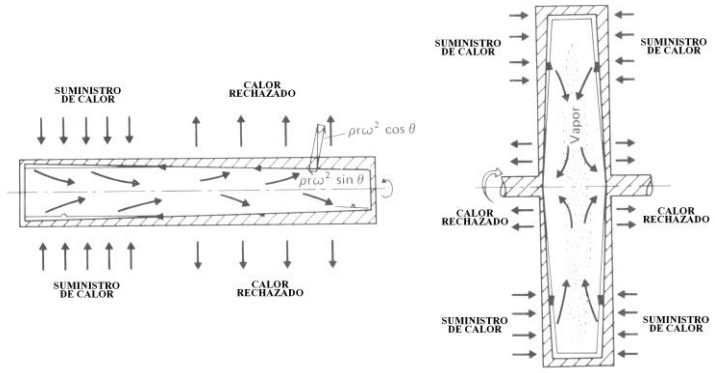


Un nuevo tipo de caloductos, en los cuales se omite la estructura capilar, fue desarrollado por la NASA. Este caloducto, tipo rotatorio, utiliza las fuerzas centrífugas de aceleración para transferir el líquido desde el condensador hasta el evaporador y puede ser utilizado en el enfriamiento de motores y alabes de turbinas [1].

La figura 4 muestra dos tipos de caloductos rotatorios, el caloducto rotatorio convencional (a), donde los flujos de vapor y líquido se presentan de forma axial, y el caloducto rotatorio en forma de plato (b), donde los flujos de vapor y líquido son predominanteme

Figura 4. Caloducto rotatorio a) tipo flujo axial, b) tipo flujo radial [2].

(a) (b)



La figura 5 muestra una modificación sobre la región del condensador del caloducto convencional. La rotación alrededor del eje origina una aceleración centrífuga ω^2r y la componente de la fuerza, ω^2r senα , a lo largo de la pared. Esta fuerza es la que impulsa al fluido de trabajo condensado a la región del evaporador [2].

Los caloductos rotatorios no sufren las limitaciones de bombeo capilar como ocurre en los caloductos convencionales, y su capacidad de transporte puede ser muy superior a la de los caloductos con estructura capilar [1]. De igual manera Ismail y Miranda (1988) estudiaron los caloductos rotatorios cuya principal aplicación se ubica en el enfriamiento de rotores de turbinas y motores eléctricos de alta potencia, como se aprecia en la figura 6 [9].

Figura 5. Caloducto rotatorio [2].

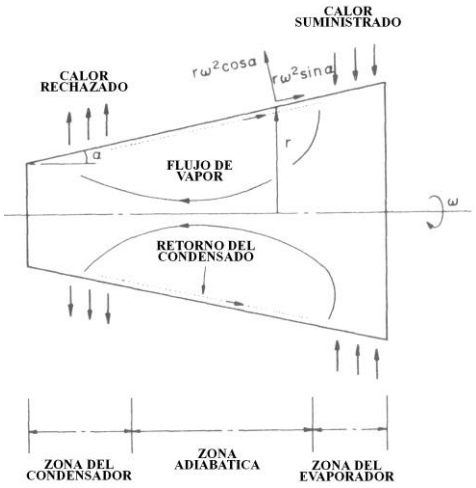
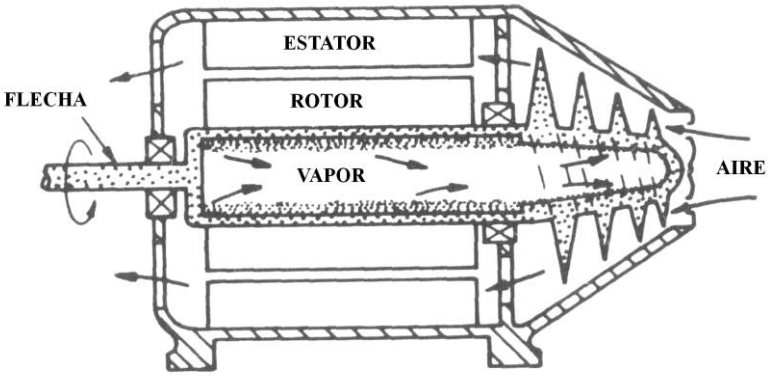


Figura 6. Disposición del caloducto rotatorio utilizado para el enfriamiento de rotores de motores [2].

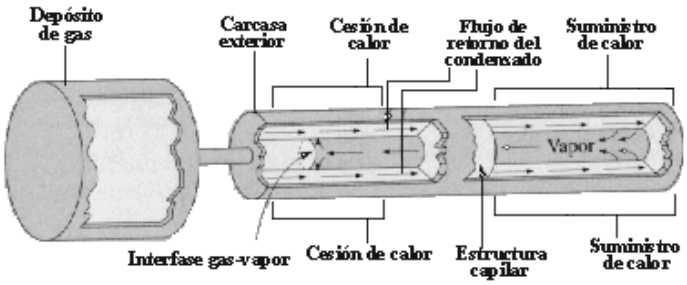


A inicios de los años 80´s y 90´s, los esfuerzos de desarrollo se orientaron a los llamados VCHP´s (Variable conductance heat pipes), caloductos de conductancia variable que, a diferencia de los caloductos con un solo vapor proveniente del fluido de trabajo, los llamados caloductos de conductancia fija, son caloductos con vapor y una carga gaseosa que poseen además estructuras capilares muy peculiares.

Estos dispositivos inicialmente pensados para satisfacer los requerimientos de los programas espaciales se han vuelto uno de los más importantes tipos de caloductos ya que son capaces de manejar con precisión pequeños gradientes de temperatura aun cuando las condiciones de entrada y salida de calor varíen ampliamente.

Este tipo de caloductos constan, figura 7, de un depósito, el cual contiene un gas no condensable, que se conecta al extremo del caloducto donde se extrae el calor con lo que se obtiene un dispositivo de conductancia variable. Este gas puede, de esta manera, formar una interfase con el vapor, y "cortar" parte de la condensación en la estructura capilar.

Figura 7. Configuración de un caloducto de conductancia variable [4].



Al aumentar el suministro de calor se genera una mayor cantidad de vapor incrementándose con ello su presión de vapor con lo que se obliga al gas no condensable a regresar al depósito abriendo, de este modo, un área adicional del condensador para extraer un flujo de calor adicional.

Con una reducción del flujo de calor añadido, se observa justamente lo contrario. Si la temperatura de la fuente de calor baja hasta un cierto valor mínimo, que depende de las combinaciones del fluido y del gas en el caloducto, el dispositivo deja de funcionar [4, 5].

Uno más de los diseños de caloductos, de reciente desarrollo, lo constituye el LHP (Loop heat pipe), un caloducto curvo con un sistema de control térmico pasivo de dos fases que utiliza el calor latente de vaporización de un fluido interno de trabajo para transferir calor desde el evaporador (la fuente de calor) hasta el condensador (el sumidero).

El LHP utiliza las fuerzas de capilaridad para iniciar y mantener la circulación del fluido de trabajo en dos fases. El LHP teóricamente requiere sólo de material capilar en la zona activa del evaporador mientras el resto del LHP es tubería sin estructura capilar (el condensador puede utilizar diseños variados, pero no necesariamente necesita tener alguna estructura capilar). Los LHP´s están considerados como componentes de control térmico integral para la futura generación de satélites de comunicación [12].

Los caloductos ranurados, de igual manera, han tenido un enorme desarrollo que han derivado en algunas modificaciones de los convencionales. Entre estos se tienen los denominados AGHP´s (Axially Grooved heat pipe), caloductos axialmente ranurados, convencionales o con aletas que funcionan como disipadores de calor, los cuales han demostrado tener un enorme potencial para aplicaciones terrestres con elevado flujo de calor.

En sistemas de enfriamiento electrónico han tenido una gran demanda dados los enormes avances que se han tenido según resultados de estudios hechos en estos por Khrustalev y Faghri (1995) [13]. Los resultados obtenidos recientemente en estudios analíticos y experimentales realizados por Castle y Yerkes (2000) mostraron la capacidad de los HGHP (Helically-grooved heat pipe), caloductos helicoidalmente ranurados, al utilizar uno de este tipo con el que se demostró que la limitación capilar se incrementa significativamente cuando el campo de fuerzas radiales se incrementa [14].

Dentro de todos los grandes avances que se han tenido en el campo de los caloductos existen aún muchos más proyectos que conllevan al diseño, mejoramiento y puesta en marcha de grandes instalaciones en base a estos dispositivos.

Tal es el caso de programas como el que se desarrolla en el Laboratorio Nacional de los Alamos para desarrollar pequeños y compactos sistemas de potencia, como el reactor nuclear para aplicaciones espaciales. Sistemas más compactos, que permitirán la producción y uso potencial del suministro eléctrico necesario para la supervivencia espacial, las comunicaciones y la propulsión [16]. Por ejemplo, los caloductos de titanio utilizados en radiadores espaciales se constituyen tecnológicamente como los posibles candidatos para utilizarse en sistemas de potencia nuclear espacial.

El desarrollo de caloductos de peso ligero, para elevadas temperaturas, seguridad, y una eficiente transferencia de calor es el interés principal del concepto de radiador. Futuros trabajos pretenden involucrar diversas geometrías y configuraciones [16].

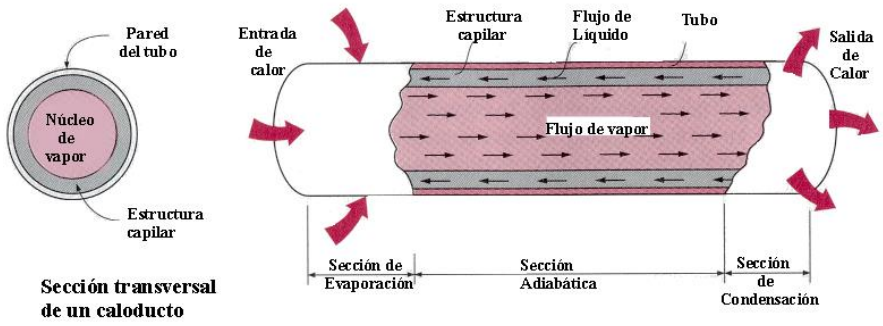
1.2. Principio de Funcionamiento de los Caloductos.

Al caloducto se le ha definido en más de una forma, dependiendo de sus propiedades, de su estructura o su función, pero, todas estas concepciones, finalmente, describen un dispositivo de enorme aplicación fundamentado en su principio básico de funcionamiento; el ciclo de evaporación-condensación de su fluido de trabajo.

De acuerdo a esto, al caloducto se le considera como un recipiente al vacío, herméticamente sellado, que tiene la particularidad de llenarse a un nivel con un fluido apropiado (fluido de trabajo) el cual sirve como medio de transferencia de calor. De esta manera se obtiene un dispositivo utilizado para transportar calor desde un lugar a otro por medio de la evaporación y subsecuente condensación del fluido de trabajo, en el que su circulación es garantizada por fuerzas capilares [18].

En su forma más simple consiste en un tubo hueco cuya pared interna tiene unas cuantas capas de tamiz de alambre que actúa como relleno poroso (estructura capilar) [5]. Básicamente, este tubo sellado posee esta estructura capilar forrando la superficie interna que actúa como una bomba pasiva, haciendo circular el condensado dentro del caloducto, mediante la acción capilar, de una pequeña cantidad del fluido introducido como líquido que se satura una vez que se inyecta al dispositivo.

Figura 8. Caloducto [7]



En la figura 8, se puede apreciar un corte transversal del caloducto con sus tres secciones: la sección del evaporador, en un extremo, donde el calor se absorbe y el fluido se vaporiza, la sección del condensador en el otro extremo, donde el vapor es condensado y el calor

eliminado y la sección adiabática en medio, donde las fases de vapor y líquido del fluido fluyen en direcciones opuestas a lo largo del centro del tubo y de la estructura capilar respectivamente.

El tipo de fluido y la presión de operación interior del caloducto depende de la temperatura de operación del mismo. En el caso del agua sus temperaturas, crítica y de punto triple, son 374.1 y 0.01 °C, respectivamente. Por consiguiente, el agua puede experimentar procesos de cambio de fase líquido a vapor o vapor a líquido en este rango de temperatura únicamente, y por tanto no sería un fluido apropiado para aplicaciones que involucren temperaturas fuera de este rango.

Además, el agua experimentará un proceso de cambio de fase a una temperatura específica únicamente sí su presión es igual a su presión de saturación a esta temperatura. Un caloducto con agua como fluido de trabajo diseñado para remover calor a 70 °C, deberá mantener una presión interna de 31.19 kPa (0.3078 atm), la cual es la presión de ebullición del agua a esta temperatura.

Este valor es inferior a la presión atmosférica de 101.325 kPa, y, por lo tanto, el caloducto operará en condiciones de vacío en este caso. Si la presión interna se mantiene a la presión atmosférica, la transferencia de calor resultará en un incremento en la temperatura de evaporación del agua. El agua es el fluido apropiado a utilizar para cuando se va a trabajar en un moderado rango de temperaturas, el cual, es el caso de un gran número de aplicaciones terrestres [7].

Cuando se aplica calor, se evapora el fluido de trabajo dentro del área donde se aplica. El vapor generado es ligeramente mayor en su temperatura que aquél que se encuentra en otras regiones del caloducto y, por tanto, se encuentra a una presión local más alta. Como resultado de este gradiente de presión, el vapor fluye a las regiones frías del caloducto donde se condensa.

El condensado retorna, entonces, a la región de evaporación a través de la estructura capilar. Este modo de transferencia de calor en dos fases provee al caloducto con una conductividad térmica efectiva muy elevada [18]. Un caloducto simple con agua como fluido de trabajo

tendrá una conductividad térmica efectiva del orden de 100,000 W/m°C que, comparado con los 400 W/m°C del cobre, es 250 veces mayor.

No sería poco común, que un caloducto tuviera una conductividad térmica efectiva de 400,000 W/m°C, lo cual es 1000 veces mayor que la del cobre. Un caloducto cilíndrico horizontal de 15 cm de largo y 0.6 cm de diámetro con agua en su interior puede incluso transferir un flujo de calor de 300 W [7].

Normalmente hay una pequeña diferencia de presión entre los extremos del evaporador y del condensador, y por tanto una pequeña diferencia de temperatura entre los dos extremos del caloducto. Esta diferencia de temperatura usualmente está entre 1 y 5 °C [7].

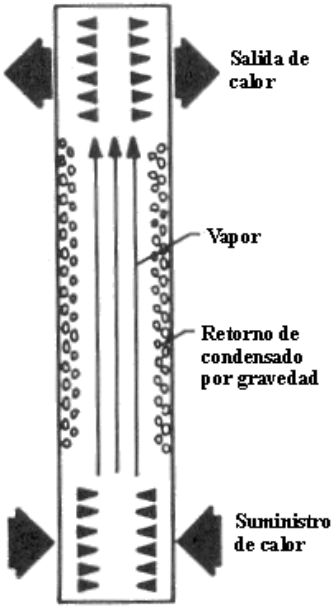
La capacidad del caloducto para transportar calor a distancias apreciables sin necesidad de fuerzas externas para hacer circular el fluido que transfiere el calor es una de sus más útiles propiedades [1].

Los caloductos al igual que los termosifones operan en un ciclo cerrado bifásico y utilizan el calor latente de vaporización para transferir calor aún con un muy pequeño gradiente de temperatura. Sin embargo, la operación de estos dos dispositivos es significativamente diferente. Como se ilustra en la figura 9, el calor adicionado en la parte baja de un termosifón vaporiza el fluido de trabajo. Durante este proceso de cambio de fase, el fluido toma el calor asociado con su calor latente de vaporización.

Debido a que el vapor en la región del evaporador está a una temperatura más alta y por tanto a una mayor presión que el vapor en el condensador, el vapor se eleva y fluye a la zona fría del condensador donde cede el calor latente de vaporización (las fuerzas de flotación asisten este proceso).

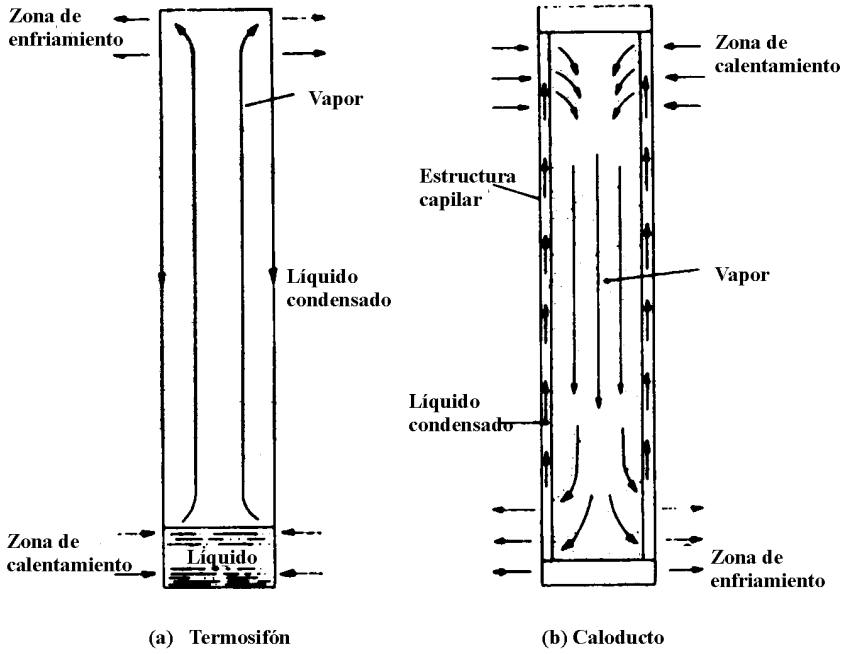
Las fuerzas de gravedad provocan que la película condensada fluya de regreso por la pared interna del caloducto donde puede ser nuevamente vaporizada. No obstante, a la superficie interna de un termosifón ocasionalmente se le puede ranurar o colocar una estructura porosa para promover el retorno del condensado al evaporador e incrementar el coeficiente de transferencia de calor; los termosifones dependen de la aceleración gravitatoria para el retorno del líquido desde el condensador al evaporador.

Figura 9. Operación de un termosifón típico [3].



Por definición, entonces, para la apropiada operación de un termosifón, figura 10 (a), el evaporador deberá estar por abajo del condensador de lo contrario ocurrirá el secado del evaporador.

Figura 10. Operación del (a) termosifón y del (b) caloducto [2]



Alternativamente los caloductos utilizan alguna clase de estructura capilar para promover el flujo del líquido desde el condensador hacia el evaporador lo que permite que puedan ser utilizados en forma horizontal, en condiciones de microgravedad, o hasta en aplicaciones donde la estructura capilar deberá bombear el líquido en contra de la gravedad desde el condensador al evaporador, figura 10 (b). Es esta simple característica, -la dependencia del campo gravitacional local para promover el flujo de líquido desde el condensador hasta el evaporador-, lo que diferencia a los caloductos de los termosifones [3].

Aunque la idea básica es actuar en ausencia de gravedad, el caloducto puede estar inclinado de modo que el condensador esté a una altura mayor que el evaporador. En este caso, la acción de la gravedad sirve para acelerar localmente el líquido por la estructura capilar, hacia abajo. Esto se denomina inclinación favorable. Por el contrario, cuando el condensador está colocado más abajo que el evaporador, la acción de la gravedad dificulta el flujo de líquido en la estructura capilar y se dice que el caloducto tiene una inclinación adversa [4]. En un caloducto la estructura capilar se satura con líquidos como el sodio o el litio para altas temperaturas, o bien con agua, amoníaco o metanol para temperaturas moderadas. Al calentarse un extremo del tubo y enfriarse el otro, el líquido se evapora en el extremo caliente y se condensa en el extremo frío.

A medida que el vapor sale de la sección de evaporación, se forman huecos en la superficie debido a que el líquido se adhiere a los alambres de la estructura capilar. Entre tanto, en la sección de condensación, la estructura capilar se satura. La tensión superficial que actúa en la interface cóncava líquido-vapor en la sección de evaporación hace que la presión del vapor sea mayor que la del líquido.

El vapor transmite esta presión a la sección condensadora inundada, donde las presiones del líquido y del vapor son casi iguales, y así el líquido es impulsado del condensador al evaporador a través de la estructura capilar.

En un campo gravitatorio el evaporador puede ubicarse debajo del condensador para facilitar el flujo del líquido. Si la estructura capilar resulta innecesaria, entonces el dispositivo es un tubo de Perkins.

Los fluidos de trabajo que se usan en los caloductos tienen una entalpía de vaporización elevada. Por lo tanto, un pequeño flujo de vapor a través del tubo puede transportar una gran cantidad de energía térmica.

La diferencia de temperatura total necesaria, para que este pequeño flujo de vapor transporte la mayor cantidad de calor a través del tubo y se tenga un mayor rendimiento térmico y por consecuencia una óptima operación del caloducto, es la suma de las diferencias que se requieren para conducir el calor a través de la pared y de la estructura capilar del evaporador, a través de la pared y de la estructura capilar del condensador y la diferencia para crear la diferencia de presión del vapor que impulsa a éste del evaporador al condensador.

Además de una elevada entalpía de evaporación, otras propiedades que convienen que tenga el fluido de trabajo incluyen una gran tensión superficial y una viscosidad baja a fin de mejorar el bombeo por capilaridad en el interior del relleno poroso, así como una alta conductividad térmica en el estado líquido para reducir las caídas de temperatura en el evaporador y el condensador.

La estructura capilar o relleno poroso debe tener: (1) poros superficiales para generar presión de bombeo por capilaridad, (2) canales internos de flujo a fin de que el líquido pueda regresar al evaporador y (3) una trayectoria adecuada para el flujo de calor desde la pared interior del tubo a la interfaz líquido-vapor.

Las estructuras capilares o rellenos porosos pueden ser de tamiz de alambre, metal sinterizado, espuma metálica, fieltro metálico, malla de alambre tejido o surcos axiales, como se muestra más adelante en la figura 26. La estructura capilar de tamiz enrollado es fácil de instalar; sin embargo, la caída de temperatura a través de un relleno de este tipo tiende a ser elevada. Si la caída de temperatura es un factor importante en el diseño, es preferible usar estructuras capilares de polvo de metal sinterizado o de surcos axiales.

Una solución intermedia es la estructura capilar de surcos cubiertos. Una malla fina genera una elevada presión de bombeo por capilaridad, en tanto que los surcos reducen la resistencia al flujo del líquido y la resistencia al flujo de calor a través de la estructura capilar [5].

Las estructuras capilares de porosidad graduada presentan una malla más fina en la sección de evaporación a fin de aumentar la presión capilar y una malla más gruesa en el condensador para facilitar el flujo del líquido [5].

De acuerdo a lo anterior la operación de un caloducto está basada en los siguientes principios físicos:

- A una presión específica, un líquido vaporizará o un gas condensará a cierta temperatura, llamada temperatura de saturación. De este modo, fijando la presión interna del caloducto se fija la temperatura a la cual el cambio de fase tendrá lugar.

- A una presión o temperatura especificada, la cantidad de calor absorbido por unidad de masa de líquido vaporizado es igual a la cantidad de calor rechazado por unidad de vapor condensado.

- La presión capilar desarrollada en la estructura capilar moverá el fluido aún en contra del campo gravitatorio como resultado del efecto capilar.

- El fluido en un canal fluye en la dirección del decremento de la presión.

Estando en un estado saturado, el líquido en el extremo del evaporador vaporizará como resultado de cualquier transferencia de calor, causando que la presión de vapor allí se incremente. Esta diferencia de presión resultante controla el vapor a través del centro del caloducto desde el evaporador hacia la sección del condensador. Con el extremo del condensador del caloducto en un ambiente más frío, su superficie se encuentra ligeramente más fría también.

El vapor que se encuentra en contacto interno con esta superficie enfriadora, condensa desprendiendo el calor de vaporización al medio ambiente circundante. El líquido, entonces, retorna al extremo del evaporador del caloducto a través de la estructura capilar como resultado de la acción capilar en esta, completando el ciclo según se puede apreciar en la figura 8.

Los procesos de ebullición y condensación están asociados con coeficientes de transferencia de calor extremadamente altos, y por lo tanto es natural esperar que el caloducto sea un

dispositivo de transferencia de calor extremadamente efectivo, puesto que su operación se basa en la ebullición y condensación alterna del fluido de trabajo [7].

1.3. Límites de Funcionamiento.

Existen factores que pueden limitar el transporte de calor bajo ciertas circunstancias. De entre los factores más importantes se tienen la obstrucción del flujo de vapor, el arrastre de líquido por el flujo de vapor y la ebullición del líquido en el relleno del evaporador.

La obstrucción, o limitación sónica, sólo depende del tamaño del núcleo del vapor. La limitación por arrastre se incrementa usando rellenos con poros más pequeños en la interfaz vapor-líquido. La limitación por ebullición puede incrementarse usando rellenos de alta conductividad térmica efectiva.

Dos limitaciones más, la viscosa y la capilar, se constituyen por igual en factores importantes en el estudio del transporte de calor en caloductos.

Se ha determinado que a bajas temperaturas las fuerzas viscosas son dominantes en el flujo bajo de vapor del tubo debido a que la viscosidad del líquido aumenta a bajas temperaturas mientras que el del vapor disminuye. El flujo axial de calor se incrementa conforme la presión en el condensador se reduce ocurriendo así el máximo flujo de calor [2].

Un fenómeno de relevancia que interviene en el correcto funcionamiento de un caloducto lo es la capilaridad. Capilaridad se refiere a la capacidad de la interfase entre un líquido y un gas o vapor en una estructura fina porosa, a mantener una diferencia de presión a través de esta superficie.

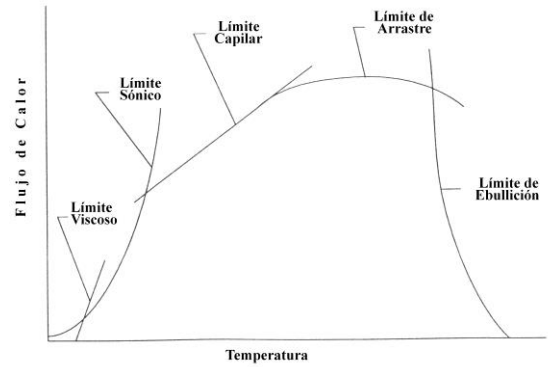
La magnitud de la diferencia de presión que se debe mantener es llamada presión capilar. Esta depende del radio de curvatura de la superficie líquida, la tensión superficial del líquido y su ángulo de contacto. La capilaridad juega un papel importante en el transporte de calor a través de caloductos debido a que proporciona el mecanismo para la recirculación automática del fluido.

De hecho, la capilaridad de la estructura capilar de un caloducto es el principal factor que establece la capacidad de transporte de calor. Para determinar el grado de limitación del

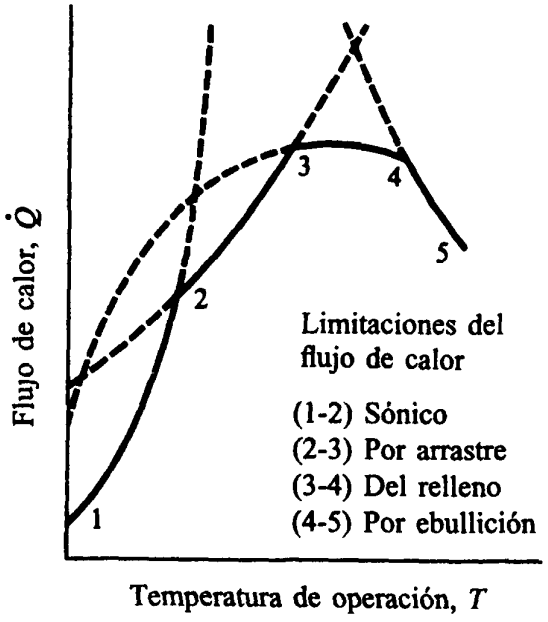
transporte de calor deben analizarse por igual los conceptos de tensión superficial y humectabilidad [1].

Las figuras 11, a y b, muestran la manera en que estas limitaciones afectan el funcionamiento de un caloducto típico [3,5]. Estos cinco límites de funcionamiento separados definen rangos operacionales que combinados delimitan la región o la combinación de temperaturas y capacidades de transporte de axial a los cuales el caloducto funciona efectivamente.

Figura 11. Esquemas típicos de los límites de funcionamiento de un caloducto, según a) Peterson [3] y b) Mills [5].



(a)



(b)

Si la temperatura de vapor adiabática es tal que cantidad de calor suministrado al caloducto queda fuera de esta región operacional, se tendrían fallas debido a alguno de estas condiciones limitantes.

Los límites para el flujo térmico axial básicamente se deben a dos causas:

- Al insuficiente regreso de líquido al evaporador y,
- Al alcance de los límites debidos al flujo de vapor.

Es necesario que el punto de operación del caloducto se encuentre en el área localizada bajo estas curvas. La forma de esta área depende del fluido de trabajo, del material de la estructura capilar y varía apreciablemente para diferentes caloductos [2].

1.4. Aplicación de los Caloductos.

Los caloductos son particularmente útiles en equipos de conservación de la energía en los que se quiere recuperar calor de los gases calientes para aplicaciones de precalentamiento de aire o de calentamiento suplementario. En algunos casos, el caloducto puede sustituir a combinaciones más caras de bombas, tuberías y configuraciones de doble cambiador de calor [4].

Los caloductos han sido y continúan siendo estudiados para una amplia variedad de aplicaciones, cubren el más amplio espectro de temperaturas encontradas en los procesos de transferencia de calor.

Las aplicaciones de los caloductos abarcan desde el uso de caloductos de helio líquido utilizados en el enfriamiento de aceleradores de partículas hasta el enfriamiento de reactores nucleares y el desarrollo potencial dirigido a la obtención de nuevas técnicas de medición para el rango de temperaturas de 2000-3000 °C.

En general las aplicaciones de los caloductos se encuentran dentro de grupos bien definidos, cada uno de los cuales describe alguna de sus propiedades. Estos grupos son:

- De acuerdo a las fuentes y eliminación de calor
- Temperatura de la superficie

- Transformación del calor de flujo
- Control de la temperatura
- Diodos e interruptores térmicos

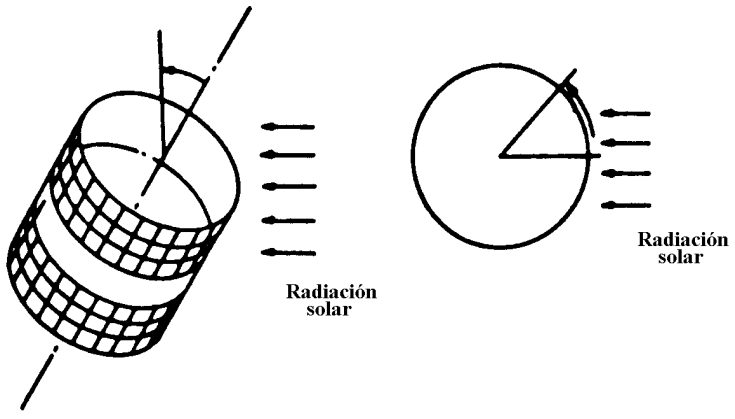
La elevada conductividad térmica efectiva de un caloducto facilita el que el calor pueda ser transferido con buena eficiencia a través de distancias considerables. En muchas aplicaciones, donde se requiere el enfriamiento de un componente, puede ser inconveniente o térmicamente indeseable disipar calor mediante aletas o radiadores adjunto al componente.

El aislamiento térmico de las secciones intermedias del caloducto minimiza las pérdidas de calor; razón por la que se recomienda el aislamiento y la posterior conexión a los disipadores colocados al exterior de la sección.

La segunda propiedad, temperatura de superficie, está fielmente relacionada con la separación entre la fuente y el sumidero. Como el caloducto, por su naturaleza, tiende a operar a temperatura uniforme, este puede ser utilizado para reducir los gradientes térmicos entre las áreas desigualmente calentadas de un cuerpo.

El cuerpo puede ser la superficie exterior de un satélite, parte del cual está de frente al sol, con la sección de refrigeración a la sombra, figura 12. Alternativamente, un arreglo de los componentes electrónicos internos montados sobre un tubo simple tendería a ser sometidos a un retorno de calor, creándose así compensación de temperatura.

Figura 12. Satélite con arreglo de caloductos [2].



La transformación del flujo de calor tiene su principal aplicación en la tecnología de reactores; en termoiónica, por ejemplo, para la transformación de un comparativamente bajo flujo de calor, generado por isótopos radiactivos, en flujo de calor suficientemente elevado capaz de ser utilizado eficientemente en generadores termoiónicos, como ha sido intentado [2].

La cuarta área de aplicación, es el control de la temperatura, el transporte de calor al exterior se lleva cabo de mejor manera utilizando caloductos de conductancia variable. Pueden ser utilizados para controlar de forma precisa la temperatura de dispositivos montados sobre la sección del evaporador. El diodo térmico tiene numerosas aplicaciones especializadas donde el transporte de calor en una sola dirección es prerrequisito.

Como cualquier otro dispositivo, el caloducto deberá cumplir ciertos criterios antes de que pueda ser ampliamente aceptado en aplicaciones industriales. Por ejemplo, en la fundición e inyección de la industria del moldeo, el caloducto tendrá que ser:

Confiable y seguro

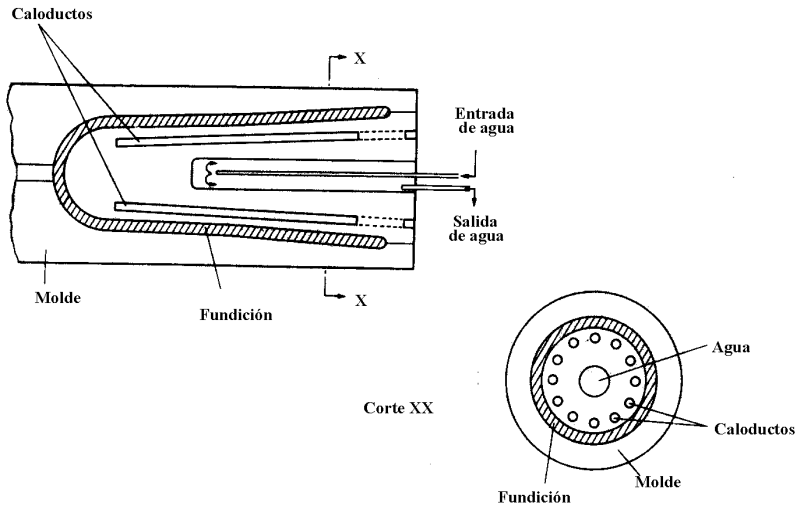
- Funcional para lo que es requerido
- De bajo costo
- Fácil de instalar y remover

Los caloductos tienen una gran diversidad de aplicaciones, de entre las cuales se pueden citar, con amplia profundidad:

a) Troqueles de fundición y moldes de inyección.

El caloducto puede utilizarse para uniformizar el gradiente de temperaturas externas de troqueles y sus líneas de agua mediante su inserción en el interior del cuerpo principal conectándolo externamente al circuito del agua de enfriamiento, figura 13.

Figura 13.- El uso de caloductos reduce los gradientes de temperatura de la pared del troquel [2].



b) Enfriamiento de componentes electrónicos.

La aplicación más extensa de los caloductos se constituye en el enfriamiento de componentes electrónicos tales como transistores, otros dispositivos semiconductores y paquetes de circuitos integrados.

Las aplicaciones de los caloductos pueden subdividirse también, de acuerdo a la geometría del sistema, en tres categorías:

- Tubular
- Placa plana
- Contacto directo

Mediante caloductos tubulares

En su forma tubular (con sección transversal redonda, ovalada, rectangular u otras), se identifican dos funciones primordiales:

- Transferencia de calor hasta un punto remoto
- Formación de un compacto sumidero de calor (disipador)

Mediante caloductos de placa plana

La aplicación de las unidades de placa plana se puede resumir en:

- Temperatura de superficie de un arreglo multicomponentes
- Enfriamiento de un arreglo multicomponentes
- Como módulo de doble pared o placa montada

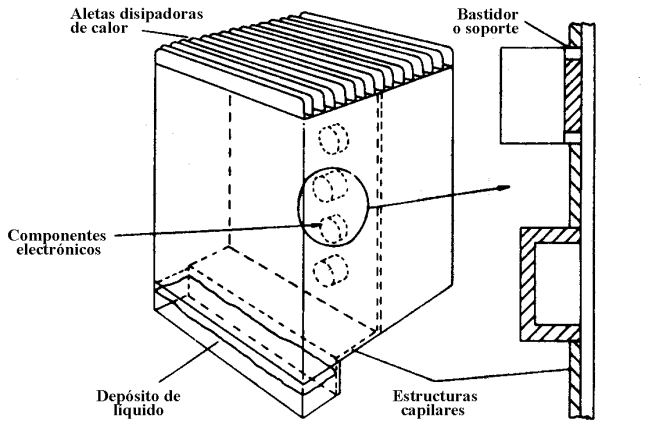
Mediante sistemas de contacto directo

Uno de los problemas en la integración de los caloductos y los componentes electrónicos es el montaje del dispositivo y la minimización de la resistencia de interfaz. Para esto se han propuesto dos maneras de disminuir el problema:

El primer método desarrollado por Marconi, involucra el uso de un caloducto moldeable, o más exactamente, de placa, la cual puede ser presionada hasta contactar íntimamente con el componente generador de calor, con una mínima interfaz térmica entre esta y la estructura capilar.

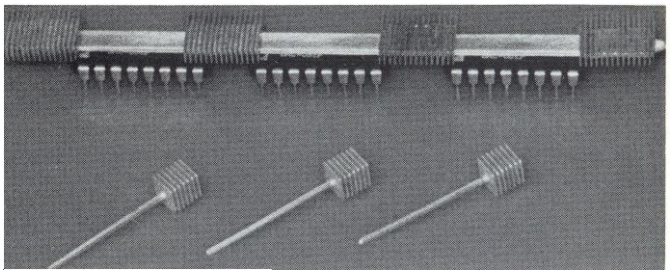
El segundo involucra la remoción del caloducto completamente de la pared y el uso de un depósito de líquido para alimentar la estructura capilar que cubre los componentes a ser enfriados. En este caso el módulo será una unidad sellada, provista de un mecanismo localizado externamente para la extracción del calor, figura 14.

Figura 14. Enfriamiento de componentes electrónicos por contacto directo [2].



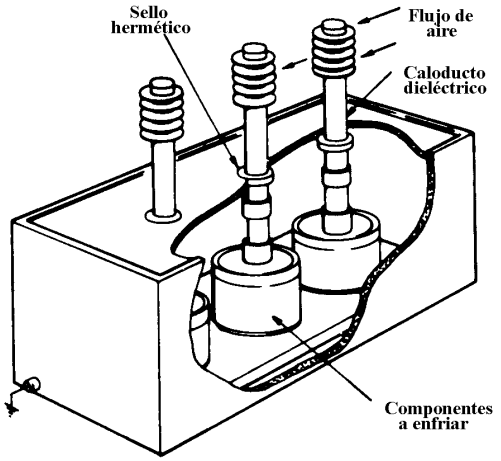
El rango de caloductos utilizados en aplicaciones electrónicas es considerable, algunos de 1 mm de espesor por 9 mm, usados en paquetes de circuitos integrados, y otros con sección transversal de 25 mm por 12 mm pueden transferir desde 12.5 hasta 150 W, respectivamente. El enfriamiento de elementos microcomponentes puede realizarse también utilizando microcaloductos planos, figura 15.

Figura 15. Enfriamiento de componentes microelectrónicos utilizando micro-caloductos [2].



Donde los componentes son parte de un sistema de alto voltaje, se hace necesario usar un caloducto aislado eléctricamente, y su pared, estructura capilar y fluido no deberán ser conductores. Los materiales utilizados en estos casos pueden ser vidrio, estructura capilar de fibras de cerámica y el fluido un inerte como el hidrofluorocarbono, figura 16.

Figura 16. Enfriamiento de componentes de alto voltaje utilizando caloductos aislados eléctricamente [2].



c) Aeroespacial

Los caloductos, ciertamente a temperaturas de vapor por arriba de los 200 °C, tienen ganado un mayor desarrollo en las aplicaciones aeroespaciales que en cualquier otra área. El caloducto de conductancia variable es un primer ejemplo de esta tecnología.

Algunas aplicaciones se tienen en:

- La igualación de la temperatura en artefactos espaciales
- Enfriamiento de componentes, control de temperatura y diseño de radiadores.

La aplicación más amplia de los caloductos de conductancia variable y el mayor uso de las unidades básicos de caloductos se encuentra en la remoción del calor de componentes electrónicos y otros dispositivos generadores de calor en satélites.

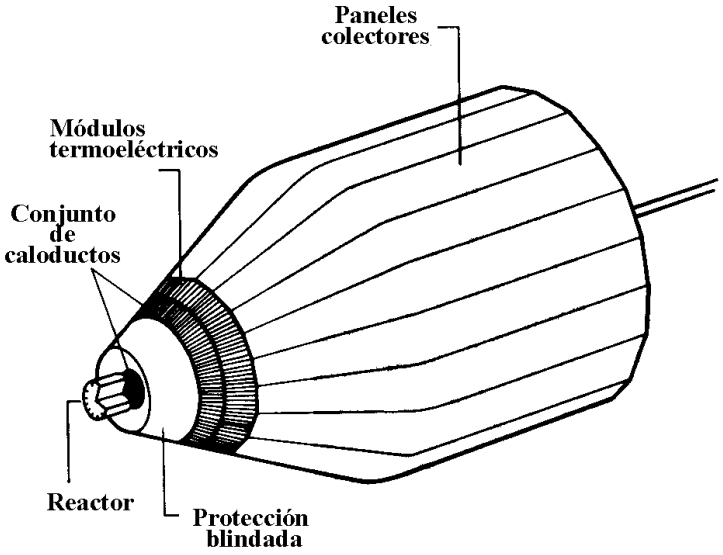
Los caloductos de conductancia variable ofrecen un control de temperatura dentro de estrechos márgenes, adicional a la función básica de transporte de calor para lo que han sido diseñado los caloductos convencionales.

Una característica importante del diseño del reactor SPAR (space power systems design) es el uso abundante de caloductos, confiables por su baja pérdida del calor transferido a alta temperatura, figura 17.

El SPAR está diseñado para utilizar la alta temperatura del reactor nuclear y proveer calor a un sistema de conversión de energía termoeléctrica, para generar energía eléctrica por una cantidad de 100 kW.

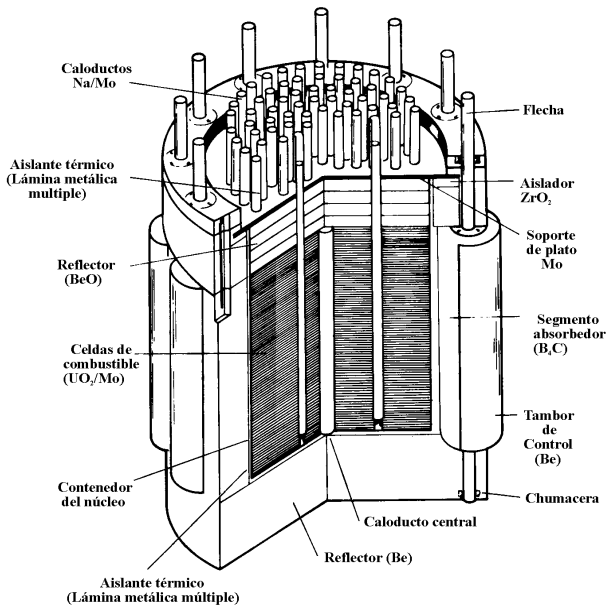
El SPAR utilizan tres series de caloductos en este dispositivo. Estos incluyen caloductos de sodio/molibdeno en el núcleo termoeléctrico del reactor convertidor del calor transferido, unidades de potasio/niobio para unir el sistema de conversión al radiador y caloductos de potasio/titanio para distribuir el calor rechazado a través de la superficie del radiador, figura 18.

Figura 17. Localización del reactor SPAR y sus caloductos [2].



Los caloductos son usados, o propuestos, hoy en día en naves espaciales y misiles incluyendo Satélites de energía solar, el transbordador espacial, el laboratorio espacial y en los misiles Trident.

Figura 18. El SPAR y la disposición de capas mostrando el núcleo del reactor y sus caloductos sodio/molibdeno [2].



d) Conservación de energía

Debido a su alta eficiencia, los caloductos son los principales candidatos para aplicaciones que involucran la conservación de la energía, y han sido utilizados en avanzados sistemas de recuperación de calor, así como en dispositivos convertidores de energía. La conservación de la energía está incrementando su importancia debido a los elevados costos del combustible y a la disminución de las reservas.

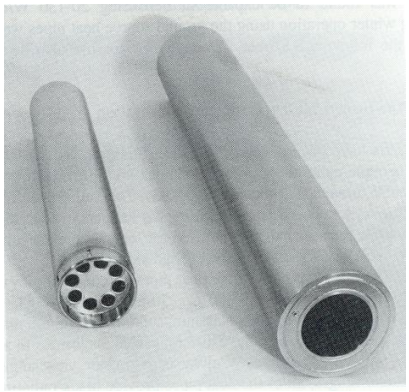
e) Fusión y descongelación de nieve

Un área reciente de aplicación es el uso de caloductos para derretir nieve y prevenir la formación de hielo. La operación principal del sistema de caloductos para la fusión de nieve está basada en el uso del calor almacenado en la tierra como el calor suministrado al evaporador del caloducto [2].

f) Calibración de termómetros

Los espacios de trabajo isotérmicos pueden ser utilizados para procesos sensibles a la temperatura, tales como puntos de calentamiento fijos de elementos, crecimiento de cristales y recocimiento. Ariel (1997), propone en su trabajo de tesis el uso de un termosifón para la calibración de instrumentos de medición [21].

Figura 19. Caloductos insertados [2].

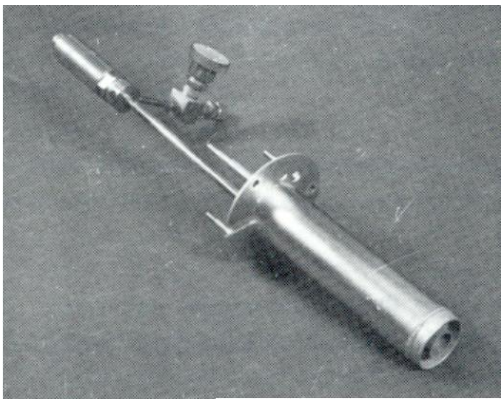


Los caloductos insertados han sido desarrollados para una variedad de servicios incluyendo la calibración de termocoples. El recinto de la estructura proporciona las condiciones isotérmicas, un requisito necesario para la calibración de sensores de temperatura, figura 19.

g) Caloductos para hornos de alta temperatura

El corazón del horno consiste de un caloducto de conductancia constante (constant conductance heat pipe) tipo Dewar, CCHP, hecho de molibdeno y 41% renio que emplea litio como fluido de trabajo. Para detectar la presión de vapor del fluido de trabajo, el caloducto es conectado con un sensor de presión mediante un pequeño tubo, figura 20. [2].

Figura 20. Caloducto quemador de litio [2].



En la actualidad el uso de los caloductos para el manejo térmico de componentes electrónicos es totalmente aceptado y la gama de aplicaciones tecnológica terrestres y aeroespaciales bastante amplia; la seguridad y flexibilidad son algunos de los atributos de gran valor de los caloductos por lo que cada vez más industrias los adoptan como herramientas de conducción térmica.

2. Diseño del Caloducto.

Las especificaciones técnicas constituyen los datos que el fabricante ofrece para el conocimiento inmediato del dispositivo en cuestión. Información vital que nos permite reconocer tanto su estructura, como su tamaño, las partes que lo componen, las opciones y diversidad de su funcionalidad, así como sus limitaciones.

2.1. Especificaciones Técnicas.

Las especificaciones típicas que describen perfectamente a los caloductos son:

Caloducto ranurado.

Fluido de trabajo:		
Volumen total de fluido cargado:	$V_{tf} =$	ml
Longitud del caloducto:	$L =$	cm
Material de construcción:		
Diámetro interior:	$d_i =$	cm
Diámetro exterior:	$d_e =$	cm
Diámetro nominal:	$d_n =$	cm
Diámetro máximo del alma de vapor:	$d_v =$	cm
Espesor del tubo:	$s =$	cm
Longitud del evaporador:	$Le =$	cm
Longitud del condensador:	$Lc =$	cm
Longitud de la zona adiabática:	$La =$	cm
Presión de vacío:	$P_{vacío} =$	mbar
Rango de temperaturas de Operación:	$T =$	°C
Flujo de calor a 200 °C:	$Q =$	kW/cm^2
Estructura capilar:		Ranurado axial
Número de ranuras:	$N =$	
Profundidad de ranuras:	$\delta^* =$	mm
Ancho de ranuras:	$w =$	mm
Amplitud entre ranuras:	$w_f =$	mm

Caloducto de mallas

Fluido de trabajo:		
Volumen total de fluido cargado:	$V_{tf} =$	ml
Longitud del caloducto:	$L =$	cm
Material de construcción:		
Diámetro interior:	$d_i =$	cm
Diámetro exterior:	$d_e =$	cm
Diámetro nominal:	$d_n =$	cm
Diámetro máximo del alma de vapor:	$d_v =$	cm
Espesor del tubo:	$s =$	cm
Longitud del evaporador:	$Le =$	cm
Longitud del condensador:	$Lc =$	cm
Longitud de la zona adiabática:	$La =$	cm
Presión de vacío:	$P_{vacío} =$	mbar
Rango de temperaturas de Operación:	$T =$	°C
Flujo de calor a 200 °C:	$Q =$	kW/cm^2
Estructura capilar:		Mallas
Número de la malla:	$N =$	
Número de mallas:		
Número de espacios entre mallas:		
Diámetro de alambre:		mm

Las especificaciones técnicas de los caloductos permiten conocer tanto sus capacidades como sus limitaciones en el transporte de calor. Los materiales y el diseño de fabricación del cuerpo del dispositivo y de su estructura capilar, así como el tipo de fluido de trabajo y las

condiciones de operación a que pueden ser sometidos los caloductos nos permiten conocer sus capacidades, posibilidades y áreas de aplicación.

Se pueden fabricar los caloductos con material de cobre, un material fácil de manejar y muy común en tubos existentes en una diversidad de diámetros y con una buena conductividad térmica, de 394 W/m°C, dentro del rango de temperaturas de 0 a 100 °C; rango de temperaturas sobre las que se ha trabajado de forma idónea el fluido de trabajo sin alcanzar limitaciones o problemas de funcionamiento [21].

La longitud mínima recomendada es de 500 mm para 16.0 mm de diámetro exterior y 13 mm de diámetro interior en razón de ser las dimensiones mínimas de tubería que se pueden utilizar para el ranurado axial y por las condiciones de vacío a la que sería sometido.

Uno de los fluidos de trabajo más utilizados es el agua por las ventajas que ofrece su compatibilidad con materiales como el cobre, por ser un elemento fácil de conseguir y dado el rango de temperaturas medio que se puede trabajar y conseguir, de 5 a 230 °C, con el caloducto y con elementos calefactores disponibles fácilmente en el mercado, respectivamente.

La combinación del cobre, como material para la fabricación del contenedor y la estructura capilar, y del agua como fluido de trabajo conforman, además de lo anteriormente expuesto dentro de las aplicaciones pertinentes y de acuerdo a recientes estudios realizados por Toth y Meyer (1992), elementos satisfactorios para la fabricación de este tipo caloductos que proporcionan periodos de funcionamiento promedio de entre 80,000 y 100,000 h sin degeneración [3].

2.2. Diseño Térmico del Caloducto.

Dentro de los puntos básicos de partida para el diseño de caloductos, deben de conocerse los valores de flujo de calor que se desea transmitir y el rango de temperatura en el que se deberá operar el dispositivo. Más aún, habiendo determinado el fluido de trabajo, resta determinar el material con el que se habría de diseñar el caloducto; uno que resulte compatible y no afecte el funcionamiento que, por esta causa, se dan en los caloductos.

Deben de involucrarse, por tanto, la mayor conductancia térmica y el máximo factor de transporte del material seleccionado compatible con el fluido de trabajo.

Se toma como base, el máximo calor a transmitir y las propiedades de fluido y se estima el diámetro de la zona reservada al flujo de vapor de tal manera que la velocidad de éste no sea excesiva y se mantenga en el régimen subsónico con un pequeño gradiente de presión. De esta manera se asegura un gradiente axial de temperaturas reducido y un funcionamiento estable. El criterio generalmente aceptado es el número de Mach del flujo de vapor, definido mediante la ecuación:

$$M_v = \frac{Q}{A_V \rho h_{fg} C} < 1 \qquad (2.2.1)$$

Donde C es la velocidad del sonido y A_V es el área transversal por donde pasará el vapor [10].

2.2.1. Consideraciones Preliminares de Diseño.

El diseño y fabricación de caloductos es un proceso extremadamente complejo que involucra muy diferentes variables físicas tales como el tamaño, la forma, el peso y el volumen del dispositivo, las propiedades termofísicas del fluido de trabajo, la estructura capilar y las propiedades del material de fabricación, además de algunos otros aspectos tales como, la carga térmica, la distancia de transporte, la longitud del evaporador/condensador, un gradiente de temperatura aceptable, el rango temperatura de operación, la condición gravitacional, la interfaz fuente-sumidero, la cantidad de fluido, duración/precisión y la seguridad.

Sumado a lo anterior, el diseño y fabricación de caloductos está gobernado por tres consideraciones operacionales:

- el rango de temperatura de operación efectiva, el cual está determinada por la selección del fluido de trabajo,

- la potencia máxima que el caloducto es capaz de transportar, la cual está determinada por la capacidad de bombeo de la estructura capilar y,

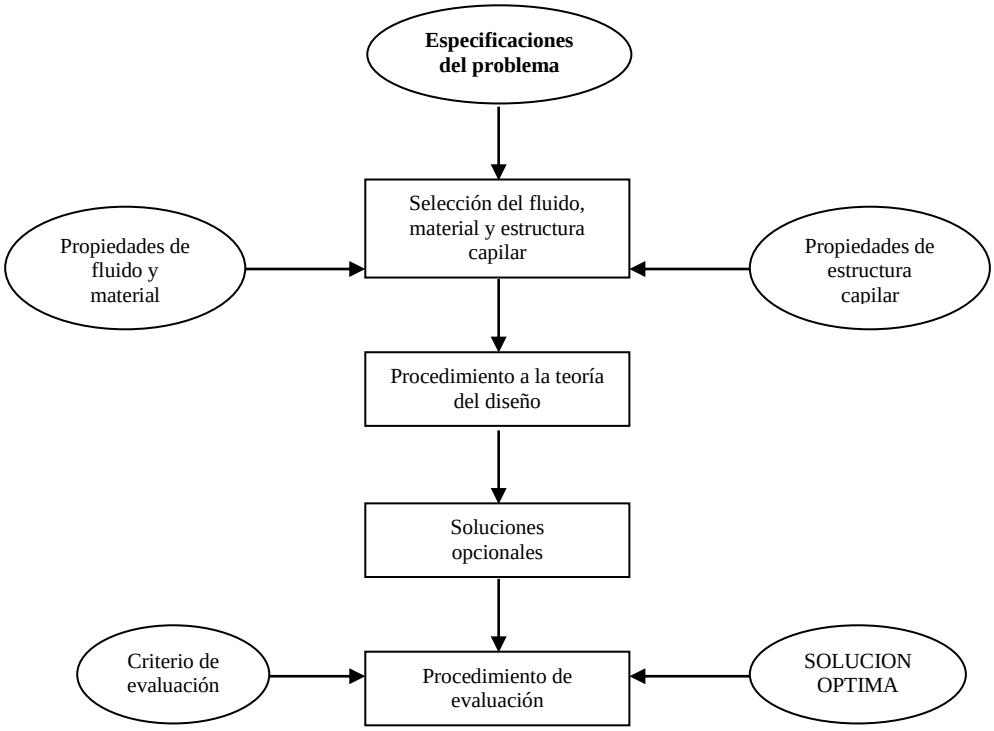
- el máximo flujo de calor en el evaporador, el cual está determinado por el punto al cual ocurre la ebullición nucleada.

Tal como se ilustra en la figura 21, las tres consideraciones operacionales deberán incluirse en el proceso de diseño que requiere primeramente que las especificaciones de diseño para el caloducto en consideración sean claramente identificadas. Una vez que esto se ha llevado a cabo, la selección preliminar del fluido de trabajo, la estructura capilar y el material del recipiente deberán ser probadas.

Quizás la parte más difícil del proceso de diseño sea la determinación del cómo los diversos componentes utilizados en la construcción del caloducto afectan los diferentes requerimientos del diseño.

La tabla 1 presenta una matriz que nos indica el cómo cada uno de los tres componentes primarios, el fluido de trabajo, el material capilar y el material del recipiente, pueden afectar los diversos requerimientos del diseño.

Figura 21. Carta de flujo para el diseño de un caloducto [3].



Como se muestra, un simple componente no parece ser más importante que cualquier otro y, muy pocos requerimientos de diseño son afectados por solamente uno de los tres componentes.

Las reacciones químicas entre el fluido de trabajo y la pared o estructura capilar o, la descomposición del fluido de trabajo puede llevar a la formación de gases no condensables o problemas asociados con la corrosión. Debido al efecto perjudicial de los gases no condensables sobre el rendimiento del caloducto, deberán tenerse especiales consideraciones para la selección del fluido de trabajo, de la estructura capilar y del material del contenedor de manera tal que se prevengan el acontecimiento de estos problemas sobre la vida operacional del caloducto.

Tabla 1. Componentes del caloducto y su influencia sobre los requerimientos del diseño [3].

Requerimiento del diseño	Fluido de trabajo	Material capilar	Material del recipiente
Rendimiento térmico			
Capacidad de transporte	F	F	D
Rango de temperaturas de operación	F	D	D
Caída de temperatura	M	D	D
Mecánicos			
Requerimientos físicos (peso, tamaño, étc)	D	D	M
Espesor de pared-presión interna	D	N	F
Interfaz de sumidero-fuente	N	N	F
Cargas Dinámica/estática	M	F	M
Fiabilidad y seguridad			
Compatibilidad del material	F	F	F
Corrosión externa	N	N	
Fabricación	M	M	M
Presión del compartimiento/fugas	D	M	F
Toxicidad	F	D	D
Ambiente gravitacional			
> 1g	F	F	F
1g	M	M	D
< 1g	D	M	D

F, Factor fuerte; M, Factor moderado; W, factor débil; N, factor despreciable.

El efecto de la formación de gases no condensables puede dar lugar a la disminución del rendimiento o falla total. Los problemas de corrosión pueden conducir a la degradación física de la estructura capilar puesto que partículas sólidas son transportadas hacia la estructura capilar del evaporador y depositadas allí reduciendo eventualmente la permeabilidad capilar.

Basiulis and Filler (1971), Zaho (1987) y otros efectuaron un gran número de ensayos de compatibilidad para varias combinaciones entre el fluido de trabajo y las estructuras capilares, que se resumen en la tabla 2.

Tabla 2.- Datos de compatibilidad entre el fluido de trabajo y contenedor [3].

Material	**Agua**	**Acetona**	**Amoniaco**	**Metanol**	**Dow-A**	**Dow-B**	**Freón 11**	**Freón 113**
Cobre	RU	RU	NU	RU	RU	RU	RU	RU
Aluminio	GNC	RL	RU	NR	UK	NR	RU	RU
Acero inoxidable	GNT	PC	RU	GNT	RU	RU	RU	RU
Níquel	PC	PC	RU	RL	RU	RL	UK	UK
Refrasil	RU	RU	RU	RU	RU		UK	UK

Fuente: Dunn and Reay, 1982

Donde:

RU Recomendado por sucesos satisfactorios

RL Recomendado por la literatura

PC Probablemente compatible

NR No recomendado

NU No utilizado

UK Desconocido

GNC Generación de gas a todas temperaturas

GNT Generación de gas a elevadas temperaturas cuando hay presente óxido.

Algunos factores como el ciclo térmico, temperatura media de operación y así sucesivamente deberán incluirse en las consideraciones preeliminares del diseño.

2.2.1.1. Selección del Fluido de Trabajo.

Debido a que la base de operación de un caloducto es la vaporización y condensación del fluido de trabajo, la selección de éste es quizás el aspecto más importante del proceso de diseño y fabricación. Los factores que afectan la selección del fluido de trabajo apropiado incluyen el rango de temperaturas de operación, la presión de vapor, la conductividad térmica, la compatibilidad con la estructura capilar y el material del contenedor, la estabilidad y su toxicidad.

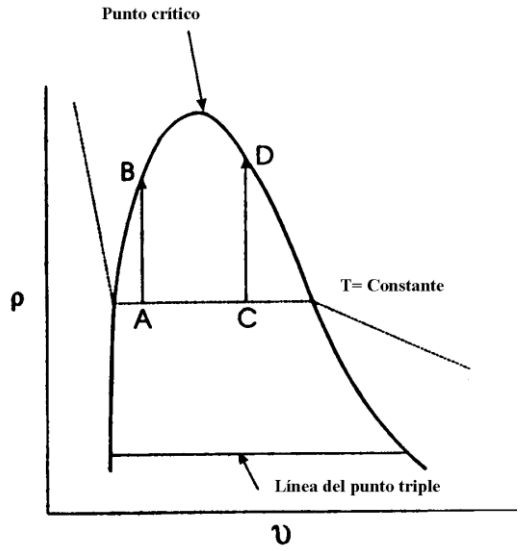
El rango teórico de temperaturas de operación para un caloducto dado típicamente se encuentra entre la temperatura critica y la del punto triple del fluido de trabajo. Por arriba de la temperatura crítica, el fluido de trabajo existe en estado de vapor y ningún incremento de la presión lo forzará a retornar al estado líquido.

Como resultado, cuando el fluido de trabajo se encuentre por arriba de su temperatura crítica, el mecanismo de bombeo capilar suministrado por la estructura capilar deja de funcionar. De forma similar, cuando la temperatura de operación se encuentra por debajo del punto triple, el fluido de trabajo existe en los estados de sólido y de vapor.

Si bien, la temperatura crítica y el punto triple proporcionan teóricamente los límites más alto y bajo, respectivamente, el rango óptimo de temperaturas de operación puede ser significativamente menor que la región definida por estas temperaturas. Este hecho se aprecia en la figura 22, la cual muestra un proceso de adición de calor a volumen constante.

Si el volumen del contenedor del caloducto y la masa del fluido de trabajo son tales que el volumen específico interior del caloducto es menor que el volumen especifico del punto crítico, la adición de calor a volumen constante resultará en una reducción de la calidad y, por tanto, en un máximo de la temperatura de operación, la cual es inferior a la del punto crítico; ilustrado por la vía A-B.

Figura 22. Efectos de la calidad inicial sobre la operación del caloducto [3].



Para situaciones donde el volumen específico es sustancialmente mayor que el volumen específico del punto crítico, el cual es el caso más frecuente, un fenómeno similar ocurre excepto que aquí el fluido de trabajo va desde una relativamente baja calidad hasta una calidad elevada, ilustrada por la línea C-D.

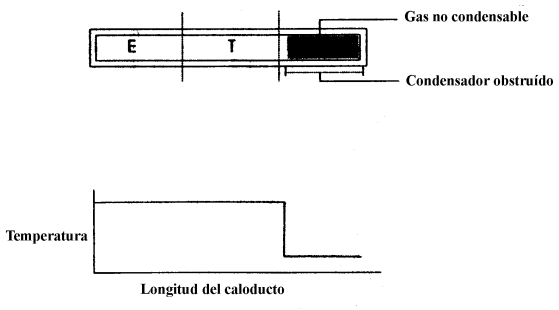
La presencia de impurezas en el fluido de trabajo puede tener efectos perjudiciales significativos en la operación de los caloductos. Estos efectos pueden ser subdivididos en:

- degradación del rendimiento, originado por la presencia o formación de gases no condensables y,
- la degradación del rendimiento, originado por impurezas sólidas o líquidas.

En el primero de los casos, la presencia de gases no condensables resulta en la disminución del rendimiento debido al parcial o total bloqueo del condensador. En la figura 23, se ilustran los efectos de la presencia de gases no condensables (NCG) como resultado de una inapropiada carga o debido a la generación de gases no condensables causada por impurezas.

Antes de la operación, el gas no condensable se encuentra uniformemente distribuido en todo el espacio por donde fluye el vapor en el caloducto. Una vez que el calor se adiciona al extremo del evaporador, el flujo de vapor barre con los gases no condensables a lo largo del caloducto hacia el condensador, donde queda atrapado bloqueando la región.

Figura 23. Efectos de gas no condensable sobre la distribución de temperaturas [3].



La presencia de gases no condensables se caracteriza por una improvisada y aguda disminución del perfil de temperatura en la dirección axial del caloducto.

La segunda clasificación de impurezas son las impurezas sólidas o líquidas, resultado de los inapropiados procedimientos de limpieza y carga. Estas impurezas pueden degradar el rendimiento debido a cambios en el ángulo de humectación o en la viscosidad del fluido de trabajo, al atascamiento de los finos poros de la estructura capilar, o a la corrosión interna del material del caloducto; con lo cual, resultará también la generación de gases no condensables, fomentando aún más la disminución del rendimiento.

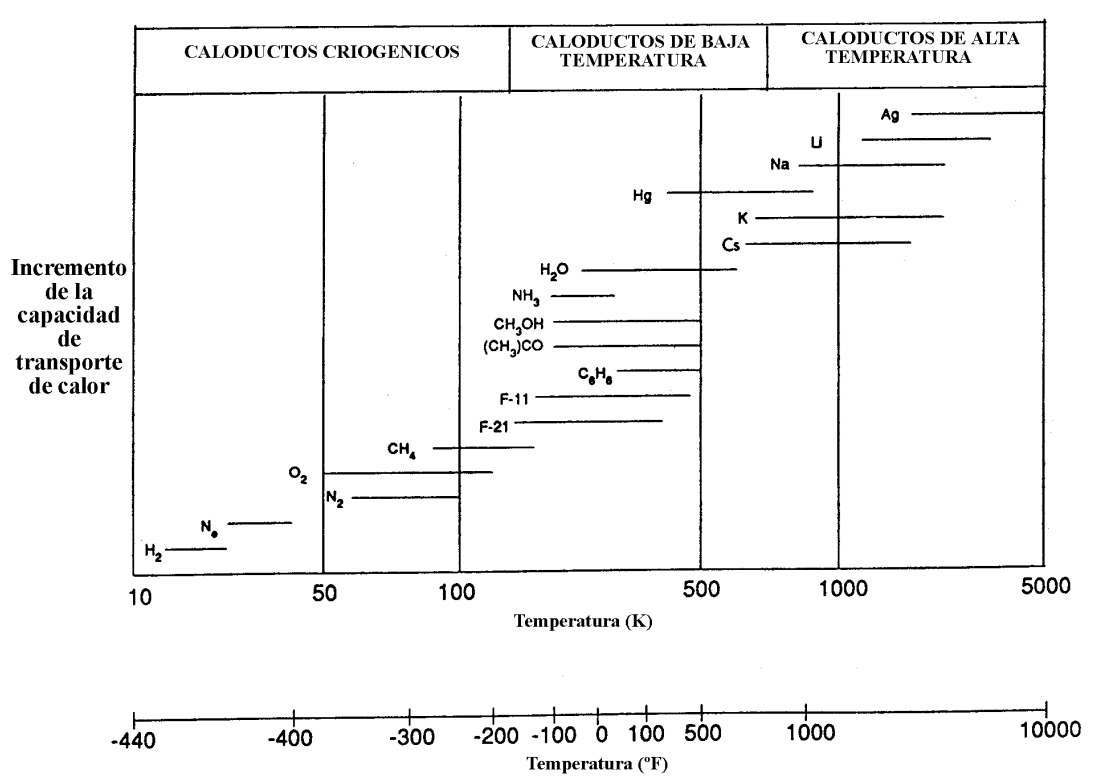
Los caloductos poseen la facultad de operar dentro de rangos de temperaturas desde moderados hasta extremos al utilizar fluidos desde líquidos criogénicos hasta metales líquidos. Una clasificación, de acuerdo al nivel de temperatura, en el que pueden trabajar es:

- Criogénicos.
- Temperaturas medias.
- Metales líquidos.

La figura 24, ilustra los rangos de temperatura de operación típicos de varios fluidos de trabajo utilizados en caloductos.

Para caloductos limitados por la estructura capilar, lo que con mayor frecuencia sucede en aplicaciones electrónicas, las características de un buen fluido de trabajo se constituyen por un elevado calor latente de vaporización, una elevada tensión superficial, una elevada densidad y baja viscosidad del líquido y de su vapor, elevada conductividad térmica, y buena estabilidad térmica.

Figura 24. Típicos rangos de operación para fluidos de trabajo de caloductos [3]



Chi (1976) combinó estas propiedades en un parámetro conocido como factor de transporte del líquido o figura de Merit,

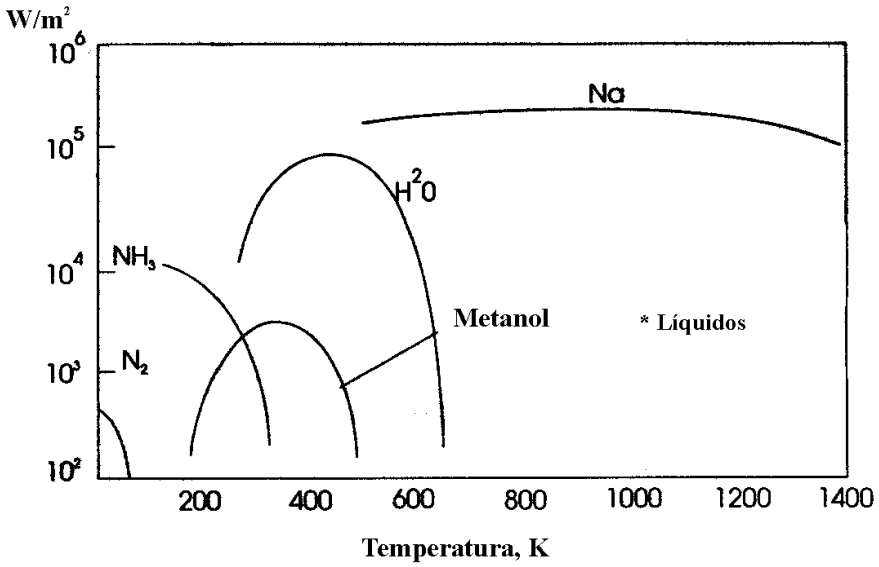
$$N_l = \frac{\rho_l \sigma \lambda}{\mu_l} \qquad (2.2.2)$$

el cual puede ser utilizado para evaluar la efectividad de varios fluidos de trabajo a temperaturas de operación específicas.

La figura 25, ilustra la figura de Merit para fluidos de trabajo dentro de las tres regiones de temperatura de operación, descritas arriba.

Como se puede apreciar el sodio proporciona la figura de Merit más alta para un líquido dentro de un amplio rango de temperaturas, pero es típicamente inapropiado a temperaturas menores de 500 K. El agua aparece como el fluido que tiene la segunda más alta figura de Merit y para muchas aplicaciones terrestres puede ser el más conveniente.

Figura 25. Figura de Merit para varios fluidos de trabajo (Dunn y Reay, 1982) [3].



La tabla 3, muestra algunos fluidos de trabajo aplicables al enfriamiento de componentes electrónicos. La figura de Merit se determina por comparación con las propiedades de fluidos más relevantes, las cuales se utilizan en el establecimiento de la capacidad de transporte de potencia de un caloducto. Como se puede observar en la tabla, la temperatura del caloducto tiene una influencia significativa sobre la selección del fluido apropiado. Esto es debido a que la presión interna del caloducto está en función de la presión de saturación del fluido de trabajo.

Cuando el fluido es inyectado, al interior del recipiente evacuado, el sistema alcanzará el equilibrio en condiciones de saturación. Por tanto, un caloducto que utiliza agua operando cerca de los 0 °C no trabajará tan bien como un caloducto de metanol debido a que la presión de vapor del caloducto de agua a cerca de 0 °C es muy baja.

Tabla 3. Figuras de Merit para fluidos de trabajo [18].

Figura de Merit (10^6 W/cm^2)	50 °C	75 °C	100 °C	125 °C	150 °C
Amoniáco	9	6	3	0.6	N/A
Freón	1	0.9	0.8	0.6	N/A
Metanol	7	8	9	N/A	N/A
Agua	16	75	80	85	88

Para la mayoría de las aplicaciones en enfriamiento electrónico comerciales el fluido de trabajo preferido es el agua debido al rango de temperatura que maneja (50-150 °C), además de:

- Baja viscosidad para asegurar el bombeo.
- Elevado calor latente para aumentar el flujo de calor.
- Alta tensión superficial para asegurar un adecuado bombeo.
- Buenas características de humectación por la misma razón anterior.
- Alta conductividad térmica para ayudar a la transferencia de calor entre el fluido y la pared de la estructura.
- Alta densidad para reducir la resistencia al flujo.
- Puntos de condensación y operación compatibles con la gama de operación.
- Estabilidad química [8].

La tabla 4, muestra los rangos de temperatura de funcionamiento y la máxima cantidad de calor a los que se puede operar y transmitir en un caloducto, respectivamente, en función de la combinación fluido de trabajo-material del recipiente.

Tabla 4. Características de operación en Caloductos [6].

Fluido de trabajo	**Material**	**Rango de Operación, °C**	**Flujo de calor, kW/cm²**
Nitrógeno líquido (N_2)	Acero inoxidable	-220 a –80	0.068 a -163 °C
NH_3 líquido	Níquel, Aluminio, Acero Inoxidable	-70 a 60	0.295
CH_3OH	Cobre, Níquel, Acero	-45 a 120	0.45 a 100 °C
H_2O	Cobre, Níquel	5 a 230	0.67 a 200 °C
Hg-Mg	Acero Inoxidable	190 a 550	25.1 a 360 °C
Na	Níquel, Acero Inoxidable	500 a 900	9.1 a 80 °C
Ag	Tántalo-Tungsteno	1500 a 2000	4.1

En el apéndice A se dan las propiedades físicas básicas de fluidos de trabajo que pueden utilizarse en caloductos y que se contemplaron en el programa de cómputo CALCA.

2.2.1.2. Estructura Capilar.

La selección de una estructura capilar para el caloducto depende de muchos factores, algunos de los cuales están estrechamente vinculados a las propiedades del fluido de trabajo.

La estructura capilar tiene dos funciones en la operación del caloducto: es el vehículo y el mecanismo a través del cual el fluido de trabajo retorna desde el condensador hasta el

evaporador y la de asegurar que esté uniformemente distribuido circunferencialmente sobre toda la superficie del evaporador.

Como se muestra en la figura 26, las diversas estructuras capilares pueden ser divididas en tres grandes categorías:

- Simples y homogéneas.
- Composición común.
- Diseños avanzados.

Las estructuras capilares homogéneas están típicamente formadas de un material simple y está distribuido uniformemente a todo lo ancho y largo del caloducto. Dentro de los tipos más comunes de estructuras capilares homogéneas se incluye al caloducto axialmente ranurado.

Con objeto de proveer una vía con baja resistencia al flujo a través de la cual el líquido pueda retornar desde el condensador hasta el evaporador, es deseable una estructura de poro abierto con elevada permeabilidad. Sin embargo, para incrementar la presión de bombeo capilar, es necesario un poro de tamaño pequeño. Con un radio de poro pequeño y una capacidad de bombeo elevada, se tendrá, por tanto, una elevada capacidad de transferencia de la energía suministrada.

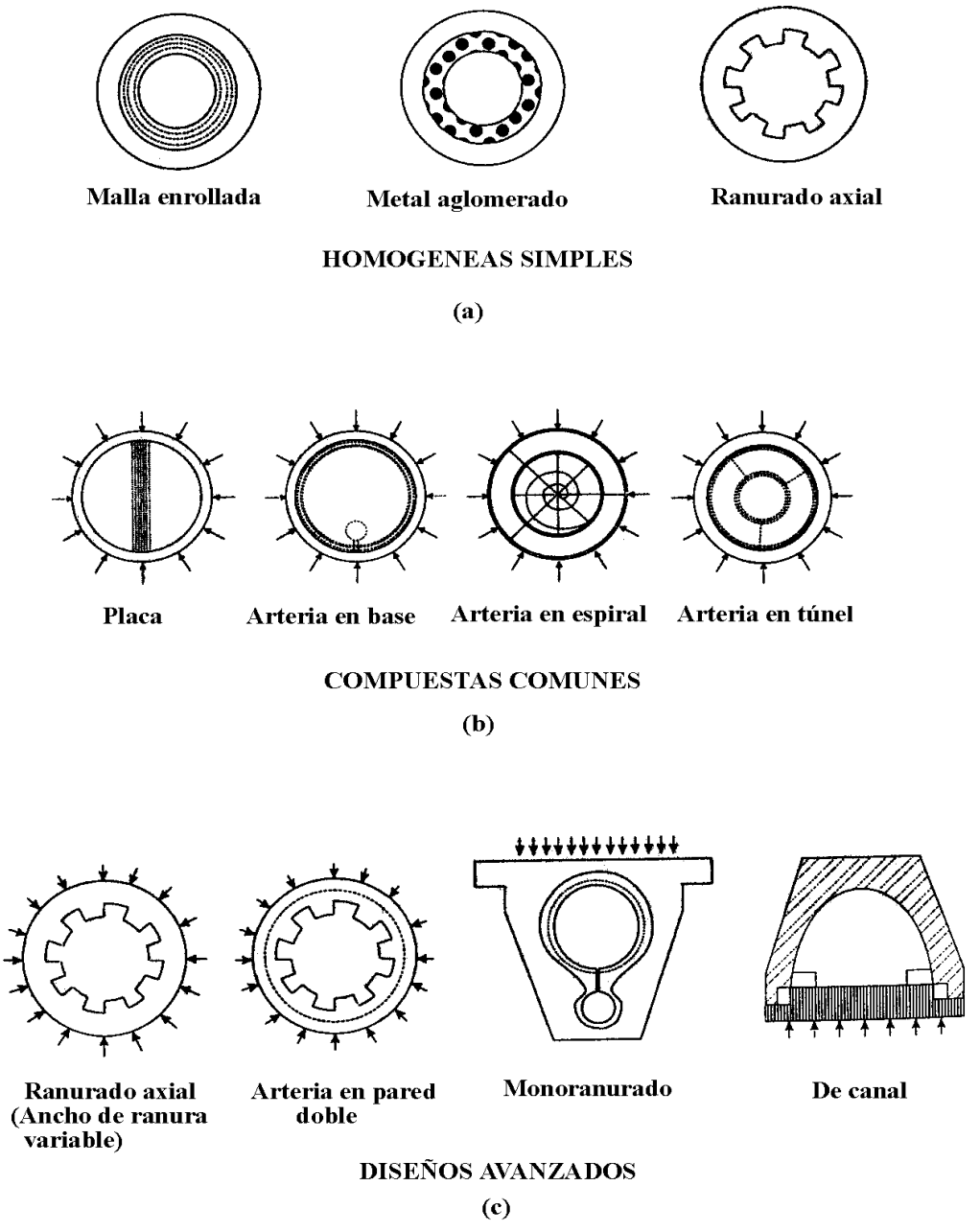
La limitación en su capacidad de bombeo limita la energía máxima que el caloducto puede admitir a la vez que disminuye la capacidad del mismo a funcionar en orientaciones donde la estructura capilar es requerida para lograr el flujo del fluido de trabajo contra un campo gravitacional. Por ejemplo, en casos donde el área de suministro de calor al caloducto esta localizado físicamente por arriba de las regiones frías del caloducto.

Las estructuras capilares de malla metálica pueden ser hechas con un tamaño de poro fino y, por lo tanto, ofrecer un mejor funcionamiento que las estructuras capilares con ranuras. La estructura capilar de metal pulverizado y aglomerado, está constituida de pequeñas estructuras de metal poroso, 50% aproximadamente denso, el cual está íntegramente formado dentro del caloducto cubriendo su superficie interna. Dado que el tamaño de las

partículas que se utilizan en la estructura aglomerada puede variar, se puede fabricar una estructura capilar de elevado rendimiento utilizando este proceso.

Los caloductos con estructura capilar de metal pulverizado aglomerado son fabricados para trabajar en cualquier orientación, aún con el tubo vertical y la fuente de calor en el extremo. Esta capacidad hace de la estructura de metal aglomerado un sistema de muy alto rendimiento, particularmente apropiado para aplicaciones donde la orientación es incierta [18].

Figura 26. Diferentes tipos de estructuras capilares [3].



2.2.1.3. Material del Contenedor.

Deberá tenerse cuidado en las consideraciones a tomar para seleccionar el material con el que habrá de fabricarse el contenedor del caloducto. Algunos de los factores que deberán considerarse son:

- El rango de temperaturas de operación del dispositivo propuesto.
- Compatibilidad con la estructura capilar y el fluido de trabajo.
- La presión de operación interna.
- Tamaño y forma tanto del evaporador como del condensador y.
- La posibilidad de corrosión externa.

Uno de los principales problemas al no analizar la relación fluido-material es la generación de gases no condensables. La degradación o contaminación del contenedor o del material que se utiliza lleva a reacciones químicas con el fluido de trabajo y, por tanto, a la generación de gases no condensables (NCGs).

Dentro de los requerimientos básicos de los caloductos se incluye un contenedor capaz de mantener un sello a prueba de fugas, que permita mantener la diferencia de presión a través de su pared, y ser una estructura integra, a todo su largo, con la entrada del rango de presiones a las cuales el caloducto puede ser expuesto. La función del contenedor es la de aislar el fluido de trabajo del medio ambiente y facilitar la transferencia de calor al interior y desde el fluido de trabajo.

2.2.2. Preparación del Tubo Caloducto.

La primera etapa en el proceso de fabricación de cualquier caloducto envuelve la selección del fluido de trabajo y los materiales apropiados para el contenedor y la estructura capilar.

La generación de gases no condensables y la corrosión son solamente dos de los factores que se han considerado como fuentes de dificultad potenciales cuando se llega a la selección de los materiales y fluidos de trabajo; sin embargo, se deben incluir la humectación entre el

líquido y estructura capilar, la relación resistencia-peso, la conductividad térmica, estabilidad y costos de fabricación.

Una vez que se han tomado los cuidados necesarios para seleccionar los materiales compatibles, debemos asegurarnos que el proceso de fabricación empleado sea el más apropiado.

2.2.2.1. Preparación Interna del Tubo.

En la construcción de caloductos de arterias, axialmente ranurados con alguna estructura capilar o de configuraciones más complicadas requieren del contacto permanente entre la estructura capilar y la pared interna del tubo, lo cual se logra mediante la incorporación de un resorte. Es necesario mantener un buen contacto entre estos dado que la resistencia que aquí se presenta puede tomar un valor significativamente importante del total de la resistencia térmica del caloducto.

2.2.2.2. Limpieza.

El procedimiento de limpieza a ser utilizado en un determinado caloducto depende de la combinación entre el material del contenedor y de la estructura capilar con el fluido de trabajo que se utilice.

La mayoría de los procedimientos describen al menos las mismas etapas básicas: la limpieza inicial y la remoción de cualquier fragmento heterogéneo de tierra y/o arena, materia orgánica, limaduras de metal entre otros; un proceso de limpieza química para remover cualquier película de agua o grasa del contenedor o estructura capilar; una serie de enjuagues para remover cualquier remanente de solvente o químico corrosivo; y, en algunos de los casos, un procedimiento de vacío a alta temperatura en el cual el caloducto es calentado y evacuado para remover cualquier gas disuelto.

Los métodos de limpieza de caloductos incluyen limpieza con solvente, limpieza alcalina, limpieza con ácido de acción superficial o desoxidación, recubrimiento protector electródico, limpieza ultrasónica y vacío a alta temperatura.

La limpieza con solvente es el proceso mediante el cual las grasas y aceites u otros contaminantes se logran disolver utilizando solventes orgánicos o inorgánicos.

El procedimiento de limpieza se puede llevar a cabo después de haber ensamblado el caloducto o incluso antes de hacerlo. Si se realiza antes de ensamblarlo, sin embargo, deberá tenerse cuidado de que las distintas partes del caloducto no sean expuestas al contacto con la piel y evitar con ello que la grasa corporal las contamine.

La limpieza alcalina puede utilizarse por igual para la remoción de residuos grasos u otros contaminantes del contenedor o estructura capilar de la misma manera en que se especificó con el solvente. La limpieza alcalina puede incluir compuestos a base de carbonatos, fosfatos, silicatos o hidróxidos, sin que aún así exista un procedimiento universal de limpieza para todos los materiales.

La tercera alternativa de limpieza es el uso de un ácido de acción superficial o una solución desoxidante. Estos métodos, aunque limpian de aceites, grasas y otros contaminantes, son particularmente útiles para la remoción de capas de óxido que se forman en la superficie del contenedor o de la estructura capilar.

La diferencia entre el ácido de acción superficial y el desoxidante debe ubicarse en su grado de reacción o severidad de acción. El primero se utiliza en procesos donde se requiere remover películas superficiales de óxido, mientras que el ácido desoxidante se utiliza para remover costras metálicas (Brennan and Kroliczek, 1979).

El acabado protector es un tratamiento de limpieza químico típicamente utilizado en aceros inoxidables para remover partículas de hierro incrustadas en la superficie debido a los procesos de mecanizado y rectificado.

La técnica más común de acabado protector involucra la aplicación de un solvente suave para remover remanentes de aceites y grasas proveniente de los procesos de maquinado o extrusión seguido de la aplicación de una solución de ácido nítrico para disolver las partículas de hierro o acero [3].

Para configuraciones que no se prestan al escobillado, puede utilizarse el siguiente procedimiento con buenos resultados:

- Sumergir en una solución de acetona y enjuagar las superficies para remover aceites y grasas.

- Empapar en una solución alcalina, 50% de ácido fosfórico y 50% de ácido nítrico, a temperatura ambiente por 15 minutos.

- Enjuagar con el fluido de trabajo puro y dejar remojando por 1 hora a 50 °C.

- Repetir con un enjuague final utilizando fluido de trabajo puro y entonces secar completamente con aire seco o nitrógeno.

2.2.3. Procedimiento de Carga.

La primera etapa durante el proceso de carga es determinar la cantidad de fluido que se requiere para un sistema en particular. Se puede realizar una aproximación de la carga requerida por estimación del volumen ocupado por la estructura capilar además del volumen ocupado por cualquier arteria, ranura y otros.

Durante esta estimación deberá asegurarse que el volumen específico del fluido de trabajo utilizado para estos cálculos se obtenga para una temperatura cercana a la temperatura de operación.

Un caloducto puede ser cargado adecuadamente, a temperatura ambiente, pero a la temperatura de operación requerida podría tener una cantidad insuficiente del fluido de trabajo para funcionar apropiadamente.

Para una aceleración gravitacional de “1g”, un ligero exceso de carga resulta en la formación de un pequeño encharcamiento en la parte baja del caloducto. Durante períodos de elevada transferencia de calor, este encharcamiento puede ser barrido hacia el condensador o, en el peor de los casos, resultar en un arrastre prematuro debido al flujo de vapor por la superficie del líquido libre.

En una condición de microgravedad o gravedad cero, una pequeña sobrecarga puede acumularse en el condensador, causando un bloqueo parcial y una pequeña reducción del rendimiento. Sin embargo, sin tener en cuenta el campo gravitacional, una carga baja puede

dar lugar a un secado prematuro de la estructura capilar en el evaporador y consecuentemente a la falla total.

Por esta razón, los caloductos son sobrecargados a propósito con el 10 al 20% de su volumen total libre.

Una vez que se conoce la cantidad de fluido que se requiere, es necesario introducirlo en el caloducto de manera tal que únicamente existan el sólido, líquido o vapor puros. Esto puede realizarse mediante alguna de las siguientes formas:

a) utilizando una técnica de generación de vacío y llenado,

b) utilizando una técnica de llenado de líquido y generación de vapor,

c) utilizando una técnica de llenado de sólido y sublimación y,

d) una técnica de carga utilizando un vapor supercrítico.

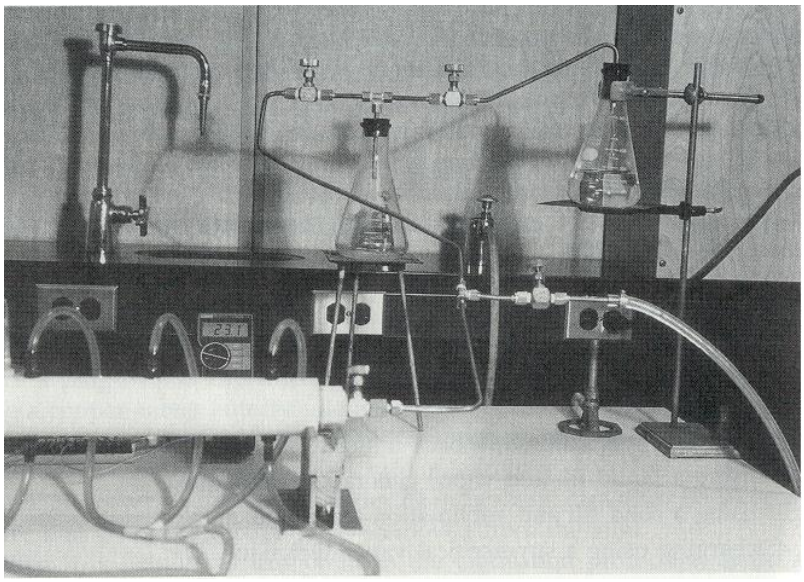
En el método de generación de vacío y llenado, el caloducto es fabricado, limpiado, enjuagado y entonces evacuado. Una vez que esto se ha completado, el fluido de trabajo pasa por un proceso de destilación múltiple, donde el fluido es destilado desde un contenedor a otro y finalmente introducido al caloducto.

Las figuras 27 y 28, ilustran el dispositivo utilizado en este proceso. Como se observa, el sistema de llenado consiste de una serie de cuatro válvulas, dos cámaras de fluido y el caloducto. Las cuatro válvulas son colocadas en el sistema para controlar el flujo del líquido y de las regiones a las que se les están originando vacío.

La válvula 1 localizada entre dos frascos, la válvula 2 localizada entre el frasco 1 y la conexión en “Te” que comunica al caloducto con la bomba de vacío, la válvula 3 localizada sobre la línea al sistema de vacío, y la válvula final, la válvula 4, localizada entre la “Te” y el caloducto.

El proceso inicia con el calentamiento del fluido de trabajo en el frasco 2 mientras que la válvula 2 está cerrada y las válvulas 1, 3 y 4 están abiertas, destilando de este modo el fluido desde el frasco 2 al frasco 1. Durante este proceso se obtiene un vacío sobre el caloducto, esto es, con las válvulas 3 y 4 abiertas.

Figura 27. Carga y doble destilación [3].



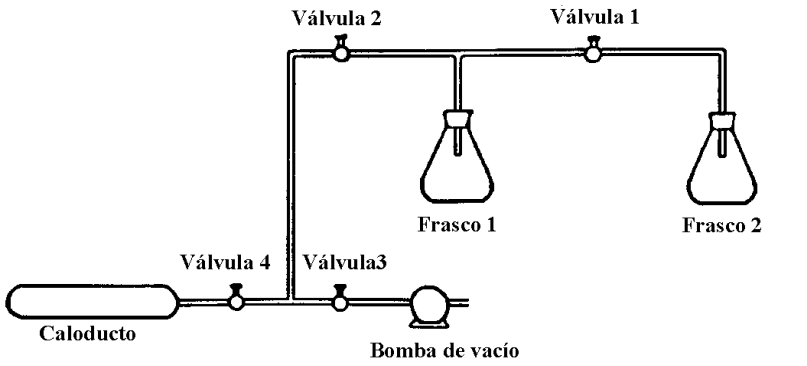
Destilada la cantidad adecuada de fluido de trabajo desde el frasco 2 al frasco 1, las válvulas 1 y 3 son cerradas y la 2 abierta. El fluido en el frasco 1 se destila entonces al interior del caloducto. Después de que el fluido ha sido vaporizado, se cierra la válvula 4 y el caloducto se pesa para verificar la cantidad de fluido de trabajo.

Los segundo y tercer métodos son considerablemente menos complicados. En estos procedimientos, el fluido de trabajo está literalmente derramado en el interior en el caso del líquido (método 1) o colocado en el caso del sólido (método 2). El caloducto es entonces calentado y originado su vacío para remover cualquier cantidad de aire o gases no condensables presentes.

El cuarto y último método señalado es el de la carga utilizando una técnica de vapor supercrítico. Esta técnica es particularmente aplicable para el uso con fluidos de trabajo criogénicos o para la carga de microcaloductos, los cuales son extremadamente sensitivos a la inundación.

En el caso de estos caloductos es necesario un cuidadoso control de la cantidad de fluido de trabajo presente. En este proceso, el micro-caloducto o el arreglo entero de caloductos se coloca en una cámara de alta presión, la cual es evacuada a una presión de aproximadamente de $1x10^{-5}$ mm Hg.

Figura 28. Esquema de la doble destilación y carga [3].



Después de la evacuación de la cámara, se adiciona entonces una predeterminada cantidad de fluido de trabajo y se calienta a un punto por encima de la temperatura crítica del fluido de trabajo. En estas condiciones, el fluido se encuentra en estado supercrítico y existe únicamente como vapor, el cual impide cualquier variación gravitacional o de temperatura, con una densidad relativamente uniforme, eventualmente distribuido por todo el micro-caloducto y la cámara.

El caloducto es sellado en el interior de la cámara utilizando un proceso de soldado iónico o ultravioleta. Cuando la cámara es abierta y la temperatura reducida, una porción del fluido de trabajo condensa en el interior de los microcanales.

Independientemente del método de carga utilizado, puede ser necesario drenar el fluido de trabajo y recargar el caloducto después de un corto período de operación para asegurar la limpieza completa.

Una vez que esto se ha realizado, el caloducto puede ser operado por un corto período y entonces cualquier remanente de gas no condensable sea evacuado a través del tubo de llenado mediante la apertura momentánea de la válvula que comunica a la bomba de vacío.

Una vez ventilado este gas no condensable, se aprieta fuertemente el tubo de llenado y se somete el caloducto a la verificación final de fugas. En muchas de las aplicaciones, puede ser conveniente incluir una pequeña cantidad de gas helio con el fluido de trabajo. Esto permite el uso de equipo convencional para la detección de fugas y determinar la integridad del contenedor [3].

2.2.3.1. Cálculo Analítico de la Cantidad de Fluido de Trabajo.

Una característica del diseño de los caloductos, muy importante para cuando se consideran pequeños caloductos para usos espaciales, es la cantidad de fluido de trabajo.

Es una práctica común incluir un ligero exceso de fluido, adicional al que se requiere para saturar la estructura capilar, pero cuando el espacio del vapor es de un volumen pequeño puede darse un gradiente de temperatura notable en el condensador, similar al que indica la presencia de gas no condensable. Esto reduce la longitud efectiva del condensador y, por tanto, perjudica el rendimiento del caloducto.

Si existe insuficiencia de fluido de trabajo, el caloducto puede fallar debido a la imposibilidad de cualquier arteria o ranura de llenarse [2].

La cantidad de fluido que debe incorporarse a un caloducto axialmente ranurado, (AGHP), consiste de la masa del líquido en las ranuras y la masa del vapor en el espacio central.

Desde el instante en que el caloducto es un contenedor cerrado bajo condiciones de saturación, la masa del fluido de trabajo en el caloducto está dado por:

$$m_t = m_v + m_l = \frac{V_{VS}}{v_v} + \frac{GV_{gr}}{v_l} \qquad (2.2.3)$$

donde $G = \frac{V_l}{V_{gr}}$ es la razón del volumen del líquido al volumen total de las ranuras. El volumen del espacio de vapor es:

$$V_{VS} = \frac{\pi}{4} D_{VS}^2 L_t + V_{gr}(1-G) \qquad (2.2.4)$$

El segundo término de la ecuación 2.2.4., estima el incremento o decremento del volumen de espacio del vapor cuando el parámetro G es variado. El volumen total de las ranuras esta dado por:

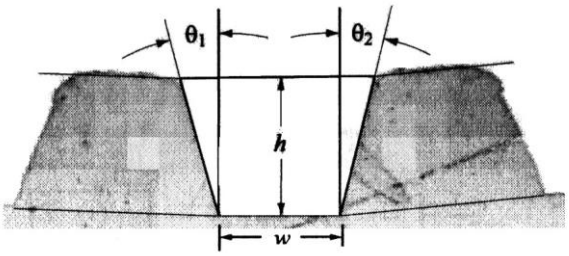
$$V_{gr} = L_{gr} N_{gr} A_{gr} \qquad (2.2.5)$$

El área de sección transversal de una ranura trapezoidal está dada por:

$$A_{gr} = wh + \frac{1}{2}h^2(\tan\theta_1 + \tan\theta_2) \qquad (2.2.6)$$

Las variables físicas de la ecuación 2.2.6., para el cálculo de la sección transversal de las ranuras deben medirse, según se muestra en la figura 29, [14].

Figura 29. Geometría de ranura axial [14].



2.2.3.2. Estación de Llenado de Caloductos.

Una estación de llenado para colocar fluidos de trabajo de baja temperatura (i.e, agua, etanol, metanol) en caloductos se muestra en la figura 30.

La estación consiste de un conjunto de válvulas y tubería en acero inoxidable interconectadas por tramos cortos (del orden de los 2 cm), un depósito para el fluido de trabajo, una bureta, una bomba de vacío y un contenedor de gas de nitrógeno seco comprimido.

Los tubos que se interconectan al tubo vertical principal entre las válvulas 2 y 5, de la figura 30, conforman una estructura especial y parten en forma diagonal desde aquél. El propósito de este diseño es reducir la posibilidad de que burbujas de vapor se adhieran a las paredes de la tubería y con ello ocasionar errores en la cantidad de fluido adicionado.

Por momentos, la válvula de alivio sobre la válvula 1 se gira a intervalos en varias ocasiones hasta mantener una presión de 1 psig (0.06894 bar). Las válvulas 2 y 5 se giran también a intervalos mientras se observa el desplazamiento del menisco dentro de la bureta. Si el menisco se desplaza más de 0.06 cm^3, el vapor muy probablemente ha sido atrapado dentro de la válvula. La válvula en cuestión se gira hasta que la burbuja sea expulsada.

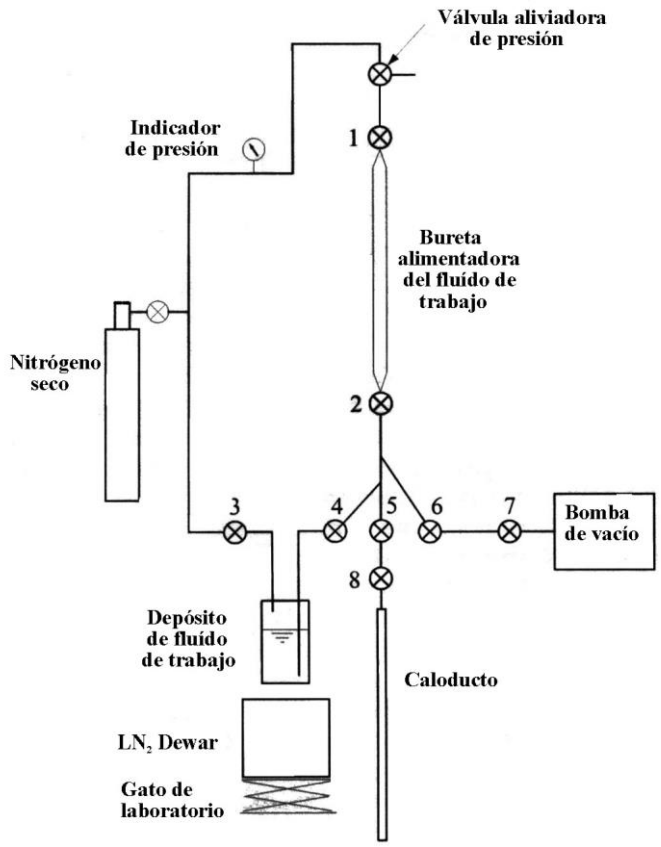
Para llenar el caloducto, primeramente, se vacía el contenedor a una presión de 10^{-6} Torr utilizando una bomba de vacío turbomolecular.

El tubo sellado se conecta a la estación de llenado a través de la válvula 5. El fluido de trabajo se congela y deshiela repetidamente para reducir la cantidad de aire disuelto. A la estación de llenado entera se le origina el vacío mediante la bomba a excepción del depósito de fluido de trabajo.

Después de la evacuación, el fluido de trabajo se sube al interior de la bureta y de la tubería de interconexión. Posteriormente, se observa la altura del menisco y se regula la cantidad de fluido deseada al interior del caloducto mediante la apertura cuidadosa de la válvula 8. La diferencia en la altura de la columna de líquido se relaciona con la masa de fluido de trabajo suministrada.

Se debe atender de forma rigurosa la calibración de la estación que permita determinar la relación precisa entre el cambio en el volumen leído en la bureta y el cambio en la masa de una segunda bureta receptora sujeta, por ejemplo, a la válvula 5, donde se cuantifica la cantidad de fluido de trabajo adicionado [14].

Figura 30. Diagrama esquemático de la estación de llenado [14].



2.2.4. Pruebas de Seguridad y Vida de Funcionamiento.

Investigaciones realizadas por Creed (1973) [3], indican que con la combinación cobre-agua, con una apropiada limpieza y carga de líquido se pueden obtener caloductos con una expectativa de vida de diez años.

Las fallas de los caloductos pueden ser clasificada dentro de varias categorías. Estas incluyen fallas tempranas que ocurren entre los 0-1000 horas y las fallas en periodos de tiempo más largos como las que ocurren después de una operación de 10,000 horas.

La falla de los caloductos en períodos de tiempo relativamente cortos es típicamente el resultado de fugas o incompatibilidades. Las fugas generalmente resultan en la falla del dispositivo entre las 0-100 horas y son el resultado de problemas asociados con los procesos de fabricación. La segunda razón principal de falla de los caloductos, en períodos cortos, es resultado de la incompatibilidad de los materiales y el fluido de trabajo.

Para caloductos que presentan fallas por arriba de las 10,000 horas generalmente se debe a fugas causadas por la corrosión externa o a largo plazo, como resultado de las incompatibilidades, a la generación de gases no condensables.

En suma, la experiencia ha demostrado que la limpieza mecánica del contenedor y de la estructura capilar con un solvente apropiado combinado con un ácido suave y la generación de un vacío a alta temperatura en un horno permite fabricar caloductos libres de contaminantes que experimenten una despreciable disminución de su rendimiento (menor al 5%) durante un tiempo de vida de 10 años [3].

2.2.5. Fabricación del Caloducto.

En el diagrama de bloque de la figura 31, se detallan las operaciones y pruebas de calidad básicas para la fabricación de caloductos.

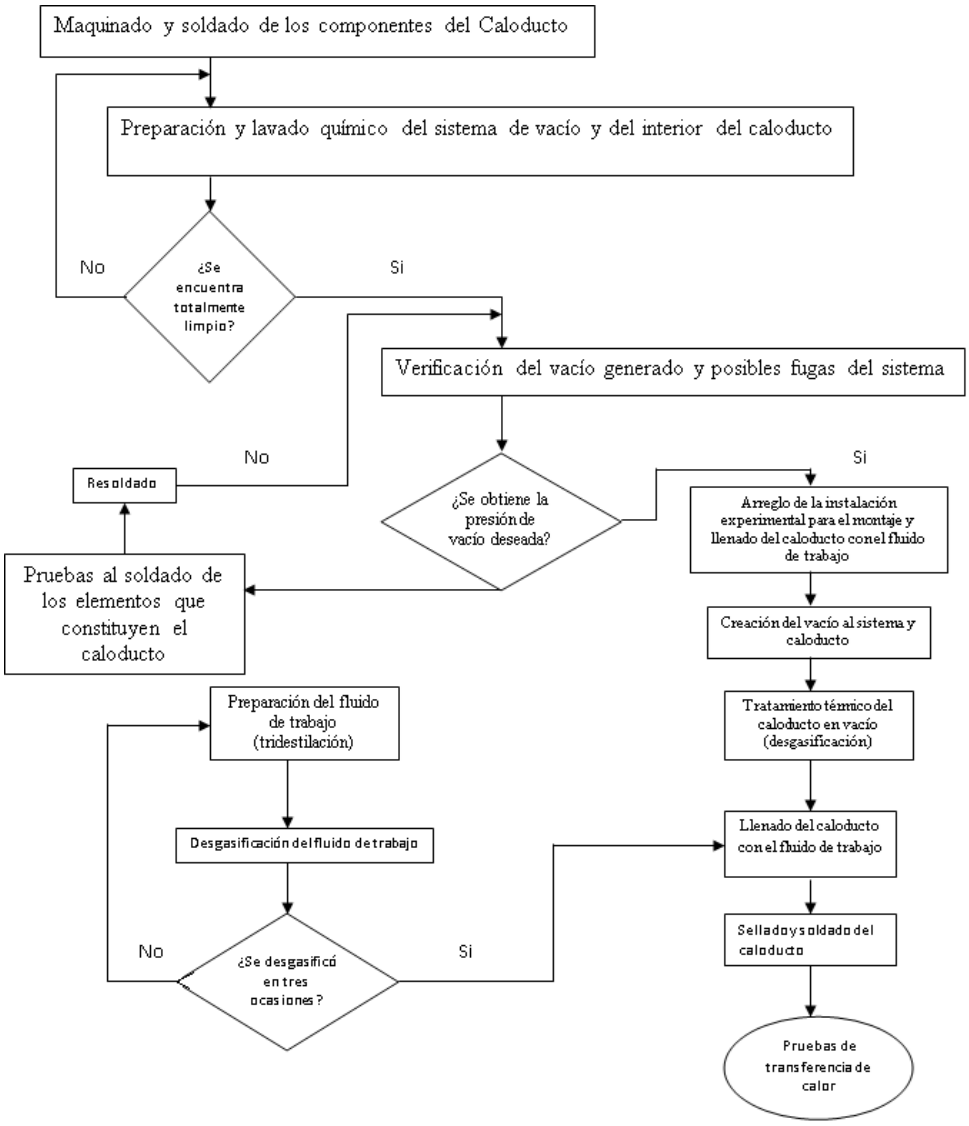
En las referencias [22], [8] y [21], se pueden encontrar a detalle las operaciones básicas para la fabricación de los caloductos, así como el procedimiento de operación del sistema de desgasificación, llenado y sellado de un caloducto.

2.2.6. Ejemplo de la Determinación de Dimensiones para el Diseño de un Caloducto.

Como se ha señalado al inicio, el diseño de un caloducto debe considerar el diámetro interior del recipiente como el reservado para el vapor, para el caso de todos los ranurados, y el diámetro interior de la estructura capilar para el caso de aquellos caloductos que cuentan con ella.

Este diámetro, junto con la presión del vapor del fluido de trabajo a la temperatura de operación y el material del caloducto (compatible con el fluido de trabajo) determinan el espesor que deben tener las paredes del tubo y la de las tapas en sus extremos, con lo que se tiene así, una selección preliminar de las dimensiones del caloducto.

Figura 31. Diagrama de bloques para la fabricación de caloductos [8].



Se sabe que para un caloducto dado que funciona a una temperatura dada se localiza el límite que alcanza más rápido y con ello se determinan sus dimensiones.

Para el caso de un caloducto fabricado en cobre, axialmente ranurado, con agua como fluido de trabajo y con una temperatura de funcionamiento de 100 °C, cuyas propiedades ideales de vapor de saturación son:

$P = 101.35$ kPa

$h_{fg} = 2{,}257$ kJ/kg

$\rho = 0.5977$ kg/m^3

la velocidad del sonido utilizando la relación de calores específicos, $\gamma = Cp/Cv$, igual a 1.4 y un peso molecular de 18 gr/gmol para el agua, estará dado por:

$$C = \sqrt{\gamma g_c RT} = \sqrt{(1.4)(1\frac{kg-m}{N-s})(461.9\frac{J}{kg-K})(373.5K)} = 491.22 \text{ m/s}$$

Siendo el diámetro del tubo de 1.3 cm, el área de flujo de vapor es de:

$$A_v = \pi \frac{D_v^2}{4} = \pi \frac{(0.013)^2}{4} = 1.3273x10^{-4} m^2$$

Sustituyendo en la ecuación 2.2.1., se obtiene un número de Mach de:

$M_v = (1.55 \text{ kW})/(1.3273\text{x}10^{-4})(0.5977 \text{ kg/m}^3)(2{,}257 \text{ kJ/kg})(491.22 \text{ m/s}) = 0.01762$

lo que implica que el flujo de vapor es subsónico y es igual a:

$$V_v = M_v C = (0.01762)(491.22) = 8.6564 \text{ m/s}$$

Dependiendo de la longitud de la resistencia eléctrica que se utilice es que se fija automáticamente la longitud del evaporador; una resistencia con longitud de 0.2 m determina una longitud de este de 20 cm.

Con la consideración de una eficacia de 90% para la sección del condensador y una diferencia de temperatura a través de la pared del caloducto de 0.25 °C [21], se puede estimar la longitud de este mediante:

$$L = \frac{Q \ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{2\pi k \Delta T} = \frac{1550 \ln\left(\frac{0.008}{0.0065}\right)}{2\pi(394)(0.25)} = 0.52 \text{ m}$$

El resultado aparentemente implica un tamaño del condensador de 52 cm o el suministro de calor menor a 1550 W. Con este procedimiento se deberá obtener una longitud para el condensador de aproximadamente 19 cm.

La longitud de la zona adiabática se toma cuando menos como un 14 por ciento de la longitud total del termosifón para aplicaciones relacionadas con intercambio de calor, en las que cerca del 86 por ciento se destina a las demás zonas, para aumentar la superficie de transferencia de calor.

Esto implica, de acuerdo a los cálculos realizados, una longitud mínima de 12 cm para la zona adiabática y 84 cm de longitud total del caloducto.

Sin embargo, cuando se predetermina un caloducto de longitud total de 50 cm y de acuerdo a los cálculos realizados se pudiera considerar hasta una longitud de 11 cm para esta sección adiabática, un 22 por ciento de la longitud total del caloducto, lo que implica una mayor superficie con características isotérmicas dado la ausencia de gradientes de temperatura a lo largo de esta sección, al no existir transferencia de calor.

Para nuestro caso, las dimensiones del caloducto bien pudieran quedar definidas por:

$Le = 20$ cm

$Lc = 20$ cm

$La = 10$ cm

Como material para construir el termosifón, se selecciona la tubería de Cobre tipo L la cual soporta una presión de 35 bar. La presión de saturación para 100 °C, temperatura de funcionamiento esperada, es de 1.01 bar.

El volumen de fluido de trabajo adicionado se tomó como un 15% del volumen libre del caloducto de acuerdo con las recomendaciones señaladas [8,21]

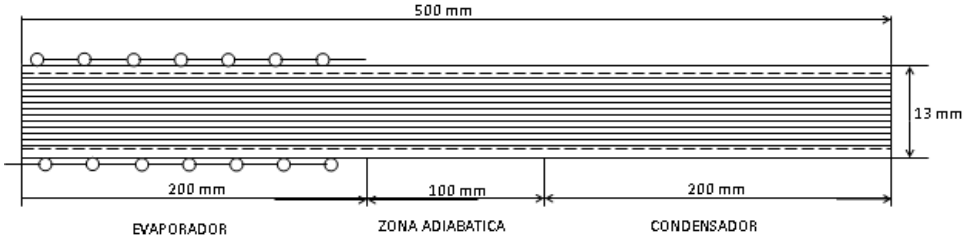
Considerando el volumen del espacio de vapor, ecuación 2.2.3., con el valor de G igual a 1, e incluso despreciable por las dimensiones de la ranura se tiene para el volumen del caloducto:

$V_{VS} = \frac{\pi}{4} D_{VS}^2 L_t$ = (1.3273x10^{-4} m^2)(0.5 m) = 6.63x10^{-5} m^3 $\quad V_{VS} =$ 66.3 cm^3

lo cual implica la adición de 9.94 ml de fluido de trabajo. Se considera la adición de 10 ml de agua.

En la figura 32, se muestra una vista gráfica del caloducto con las longitudes de todas las zonas, su diámetro y longitud y disposición de la resistencia.

Figura 32. Diagrama de las dimensiones del caloducto.



Es claro que el material y las dimensiones del caloducto se encuentran en función del tipo de fluido, así como de los flujos de calor que se transmitirán y que están en dependencia del tipo de aplicación a que será sometido el dispositivo.

2.3. Instalación Experimental para la Fabricación de Caloductos.

Para la construcción del caloducto, una vez que éste a partir del tubo simple se ha ranurado axialmente, limpiado químicamente y soldado en sus extremos hasta el apéndice, se requiere de una instalación especial tanto para su desgasificación como para su llenado con el fluido de trabajo con la previa evacuación del aire hasta un punto de vacío predeterminado. El objetivo

final de la instalación experimental es la obtención del caloducto listo para su prueba de funcionamiento y caracterización.

En la figura 31, se ha representado un diagrama de flujo donde se encuentran todas las principales operaciones que se efectúan en la fabricación de caloductos.

Elementos constitutivos.

Los elementos que conforman el diseño experimental para la fabricación de caloductos consisten básicamente en:

- Equipos completos como motor y bomba de vacío, y
- Accesorios

Equipos

Para la generación del vacío de trabajo en la instalación y caloductos se puede utilizar una bomba de vacío con las siguientes especificaciones técnicas como mínimo:

Motor		
	220/380	V
	2.5/1.5	A
	0.75	Ps
	s	1
	0.55	Kw
	$\cos\theta$	0.76
	1655	1/min
	60	Hz
Bomba	Typ	D16A
	Kat	11067

Fabr.Nr 1177170077

Accesorios

Los accesorios y cantidades siguientes representan los mínimos necesarios para el armado de la instalación experimental para la fabricación de caloductos, salvo cualquier modificación que pudiera surgir:

8 Válvulas de bola 3/8”, número 10, acero inoxidable con brida para abrazadera (174-94).

4 Tes 3/8”, número 10, en acero inoxidable, con brida para abrazadera (A941300136)

18 Abrazaderas 3/8”, en acero inoxidable.

4 Bridas 3/8”, en acero inoxidable.

1 Codo 3/8”, en acero inoxidable, con brida.

3 Soportes para colocación y fijación de la instalación.

4 Abrazaderas atornillables de ½”.

1 Varilla del Soporte Universal.

1 Pinza para bureta.

1 Matraz balón de 1000 ml.

1 Pinza para matraz.

1 Sensor de vacío con lector digital(Vacuómetro).

5 Abrazaderas de una 3/8”.

1 Tapón monohoradado.

3 Tramos de tubo de 1/2” de aprox. 5 cm de largo, en acero inoxidable.

1 Bureta graduada de 50 ml.

Manguera gruesa flexible de (4 -5 mm) de espesor.

3 Resistencias eléctricas helicoidales, 1 m largo por 3 cm de diámetro en sus helicoidales.

1 Control de temperatura Pyroplastik (Reóstato 50-450 °C).

Tubo de acero de 1 m largo x 10 cm diámetro.

Lana de vidrio.

Lámina de aluminio 1x0.60 m.

Tornillos de acero.

Estructura metálica para montar horno eléctrico.

En la referencia [8] se puede encontrar el dispositivo para verificar el vacío del sistema y el monitoreo de la temperatura de desgasificación, así como parte del montaje de la instalación principal para fabricar un caloducto.

2.4. Instalación Experimental para la Prueba de los Caloductos.

Con el caloducto ya construido se procede a probar su funcionalidad sometiéndolo a pruebas de las que se obtendrá información acerca de sus características térmicas y limitaciones.

Para estudiar su comportamiento y características de operación se hace necesario recurrir al diseño de una instalación experimental apropiada para tal efecto.

Elementos constitutivos.

Los elementos que conforman el diseño experimental para la prueba de caloductos consisten básicamente en:

- Equipos completos como bomba y depósitos de agua con líneas de recirculación, y
- Accesorios

Equipos

Bomba de agua

Marca	
Succión/Descarga	25x25 mm
lts/min	70/40

Motor

HP	½”
R.P.M.	2900
Volts	125
Amperaje	1.1
Peso	2.5 kg

Reóstato

Type	117Cu
Voltaje	0-120
Amperaje	12
KVA	1.4
IN.V.	120 OUT

Caja de Fusibles

2 Polos, 30 Amperes

Indicador de temperatura

Tipo	Digital

	Marca	Omega
	Modelo	HH-22
Depósitos de agua		
	Unidades	2
	Capacidad Unitaria	1 m^3

Accesorios

Manómetro	0-1 kg/cm^2 (0-100 Psi)
Rotámetro	Blue White 0.0 – 0.25 GPM (0.1 –1.0 LPM)
Termopar	Omega Serp-K-2, Conector OST
Conector	Tipo NMP-K-M
Conector hembra	Tipo OST, CAT. OST-K-F
Alambre Duplex	Tipo K, CAT. TT-K-36
Válvulas de paso	2 de 25 mm
Mangueras	Tramos de 32 y 25 mm de diámetro
Resistencia eléctrica de banda	1550 W, 10.4 Ohms
Potenciómetro digital	Marca Omega, Modelo HH-22

Montaje de la instalación.

Una vez seleccionados los equipos y la instrumentación, se procede al montaje de la instalación para realizar las pruebas de funcionamiento. La figura 33, muestra el diseño básico de la instalación experimental para la prueba de caloductos donde se observan todos principales elementos constitutivos.

1) Tanque de suministro de agua al condensador del caloducto.

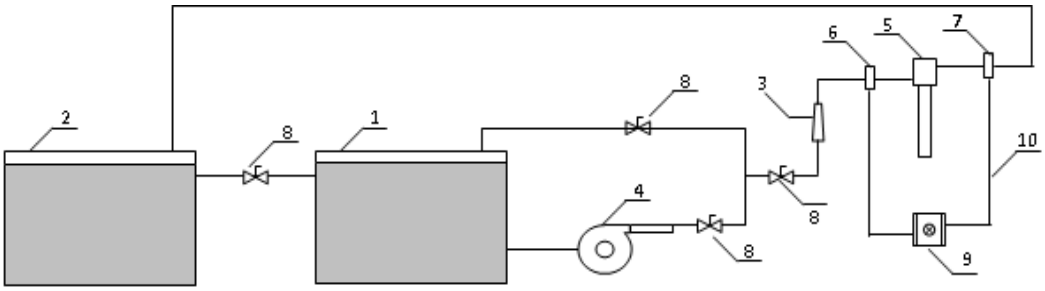
2) Tanque receptor del agua de rechazo del condensador.

3) Rotámetro.

4) Bomba de agua de enfriamiento.

5) Caloducto.

Figura 33. Diagrama de la instalación experimental [21].



6) Termopar para medir la temperatura de entrada del agua de enfriamiento.

7) Termopar para medir la temperatura de salida del agua de enfriamiento.

8) Válvulas para regular el flujo de agua a través del condensador y sistema.

9) Conmutador selector.

10) Cable de señal.

El procedimiento para el funcionamiento de la instalación experimental es el siguiente:

1) Verificar que el nivel de agua en el depósito que suministra el fluido refrigerante (1) tenga el nivel adecuado y se provea al condensador adecuadamente, sin interrupciones ni variaciones.

2) Conectar la bomba de agua (4) con el fin de recircular el agua al interior de la instalación.

3) A través de la válvula (8), regular el flujo de agua de enfriamiento deseado.

4) Para la toma de las lecturas de temperatura verificar que el Multímetro o conmutador (9) marque cero Volts.

5) Conecte el Multímetro y espere a que no exista variación en los valores de temperatura que arrojen los termopares (6, 7).

6) Tome los valores de temperatura.

El diseño puede sufrir variantes según el criterio del experimentador y los resultados ser dependientes del instrumental conectado; sobre todo, de los elementos indicadores de voltaje y potencia y del arreglo para el intercambio de energía en la zona de condensación del caloducto. Sin embargo, el arreglo inicial supone los elementos básicos mostrados.

2.5. Instalación para Caracterizar el Caloducto.

Una vez que se tiene el caloducto construido se debe probar su funcionalidad y, para esto, se procede a la construcción de la instalación para realizar las pruebas de funcionamiento pertinentes una vez que son determinadas las características del equipo y dimensionados los componentes.

En las referencias [8] y [21] podemos encontrar las indicaciones suficientes para la construcción de la instalación, tales como el arreglo de la resistencia eléctrica, en la zona de suministro de calor, y el arreglo del intercambiador de calor, en la zona de rechazo de calor. Para la caracterización del caloducto deberá tomarse especial consideración en el posicionamiento de los termopares pues a partir de estos es que tendremos la información de un perfil de temperaturas.

3. Límites de Funcionamiento Estable de los Caloductos.

Durante la operación en estado estacionario, existen importantes mecanismos que pueden limitar la cantidad máxima de calor que un caloducto en particular puede transferir. Algunos de estos son el límite viscoso, el límite sónico, el límite de arrastre y el límite de ebullición.

Los límites viscoso y capilar de la estructura tienen que ver con las caídas de presión que ocurren en las fases del líquido y vapor respectivamente. El límite sónico resulta en el momento que existe una obstrucción del flujo de vapor, mientras que el límite de arrastre es debido a los elevados esfuerzos de corte líquido-vapor desarrollados en la fase de vapor que transita en contracorriente a través de la estructura capilar saturada de líquido.

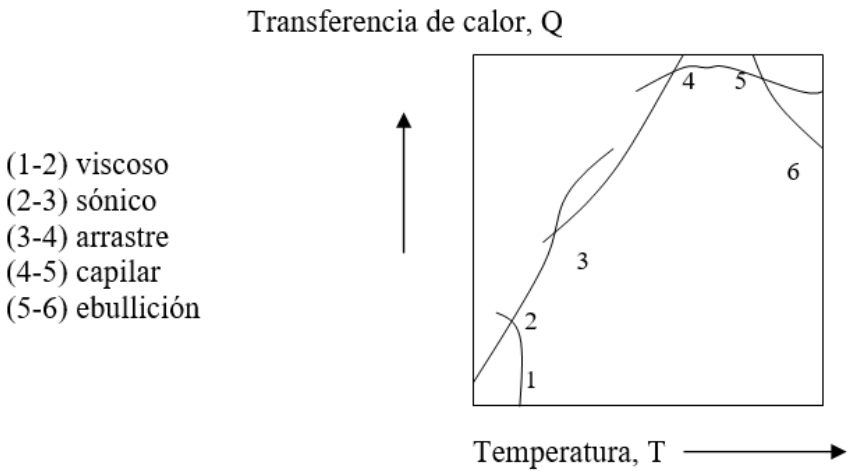
Todos estos límites constituyen límites axiales al flujo del calor; es decir, están en función de la capacidad de transporte axial de calor del caloducto.

El límite de ebullición, sin embargo, es un límite para el flujo de calor de forma “radial” y se alcanza cuando el flujo de calor aplicado en la zona del evaporador es tan alto que dentro de la estructura capilar de la misma zona ocurre una ebullición nucleada. Esto origina burbujas de vapor que bloquean parcialmente el retorno del fluido y pueden por último llevar al secado prematuro del evaporador.

Los límites de funcionamiento representan los límites máximos de transporte de calor a la temperatura especifica de salida del evaporador.

El efecto de los límites de transporte de calor en un caloducto, se observa en la figura 34. La magnitud de estas limitaciones depende de las propiedades de los fluidos de trabajo y de las dimensiones del caloducto. Si se diseñara un caloducto por encima de la línea continua, este no operaría por encontrarse en una “zona de bloqueo”.

Figura 34. Limites de funcionamiento de los caloductos [2].



3.1. Límite Viscoso.

A muy bajas temperaturas de operación, la diferencia de presión de vapor entre las regiones del evaporador y el condensador de un caloducto puede ser extremadamente pequeña. En algunos casos, las fuerzas viscosas dentro de la región de vapor pueden ser mucho más grandes que los gradientes de presión causados por la temperatura de trabajo local impuesta.

Cuando esto ocurre, los gradientes de presión dentro de la región de vapor pueden no ser suficientes para generar flujo y por tanto ocasionar el estancamiento del vapor. Esta falta de flujo o condición de flujo lento del vapor de un caloducto se le conoce como limitación viscosa.

Dado que las presiones de vapor deberán ser muy bajas para que esto ocurra, el límite viscoso se observa frecuentemente en caloductos criogénicos y en caloductos con regiones de condensador extremadamente largo, entre otros [3].

La manera más fácil de evitar las limitaciones viscosas encontradas durante el inicio de operación se logra incrementando el flujo de calor aplicado al evaporador. El riesgo que se tiene con este procedimiento es que, a bajas presiones de vapor, tal como las que se encuentran cerca del límite viscoso, la operación de los caloductos puede fácilmente pasar desde un límite viscoso a un límite sónico [3].

En base a los resultados que sobre el límite viscoso se han hecho en investigaciones recientes, se puede suponer un flujo de vapor isotérmico el cual se comporta como un gas ideal. Bajo estas suposiciones se ha desarrollado un modelo bidimensional de flujo de vapor.

Matemáticamente esta expresión se escribe como:

$$Q_{vis\cos o} = \frac{A_v r_v^2 h_{fg} \rho_v P_v}{16 \mu_v L_e} \qquad (3.1.1)$$

donde p_v y ρ_v son la presión y la densidad al final del evaporador del caloducto

Se tiene un criterio bajo el cual el límite viscoso puede ser evitado; este es cuando la condición de la relación siguiente se observa:

$$\frac{\Delta P_{va}}{P_v} < 0.1 \qquad (3.1.2)$$

El límite viscoso podría resultar una condición limitante durante condiciones iniciales de estado de enfriamiento o congelación, o durante el paso rápido hacia o cerca del punto triple [3].

A bajas temperaturas las fuerzas viscosas predominan en el flujo de vapor a través del caloducto. Busse [2], ha demostrado que el flujo axial de calor se incrementa a la vez que la presión en el condensador se reduce. El máximo flujo de calor ocurre cuando la presión se reduce a cero.

Busse, realizó un análisis en dos dimensiones encontrando que la componente radial de la velocidad tiene un efecto significativo, bajo la siguiente ecuación:

$$Q_{viscoso} = \frac{A_v r_v^2 h_{fg} \rho_v P_v}{16 \mu_v L_{eff}} \qquad (3.1.3)$$

Ambas expresiones aplicables a caloductos ranurados axialmente. Este límite generalmente solamente es de importancia en algunas unidades durante el inicio [2].

Una expresión desarrollada para el límite viscoso para la mayoría de los caloductos, incluyendo los ranurados axialmente, donde se considera al vapor como un gas ideal isotérmico y donde los efectos inerciales pueden considerarse dominantes está dada por:

$$Q_{viscoso} = d_v^2 h_{fg} A_v \frac{P_v \rho_v}{64 \mu_v L_e} \qquad (3.1.4)$$

El límite viscoso se establece bajo la condición de que la presión de vapor nunca debe ser menor de cero. En este caso, la máxima caída de presión es la presión de estancamiento del evaporador, no la capacidad capilar de la estructura capilar [3,11].

3.2. Límite Sónico.

En una tobera convergente un gas compresible se acelera hasta la velocidad del sónico debido al cambio de área. En un caloducto el vapor puede acelerarse hasta la velocidad del sonido añadiendo masa en el evaporador.

Si el flujo de vapor en un caloducto se ve obstruido, una disminución adicional en la temperatura del condensador no tiene efecto alguno sobre la temperatura del evaporador; existiendo así, una limitación sónica para el transporte axial de calor por unidad de área de la sección transversal del núcleo.

La limitación sónica es de particular importancia en el funcionamiento de un caloducto de metal líquido en el extremo inferior de su intervalo de temperatura de trabajo debido a que la densidad de vapor es pequeña.

La tabla 5, proporciona la limitación sónica de diversos metales líquidos. La limitación sónica puede aparecer al iniciarse la operación del caloducto, cuando el evaporador está frío, aún cuando no sea importante en el punto de operación considerado en el diseño [5].

Tabla 5. Limitación sónica para tubos de calor de metal líquido [5].

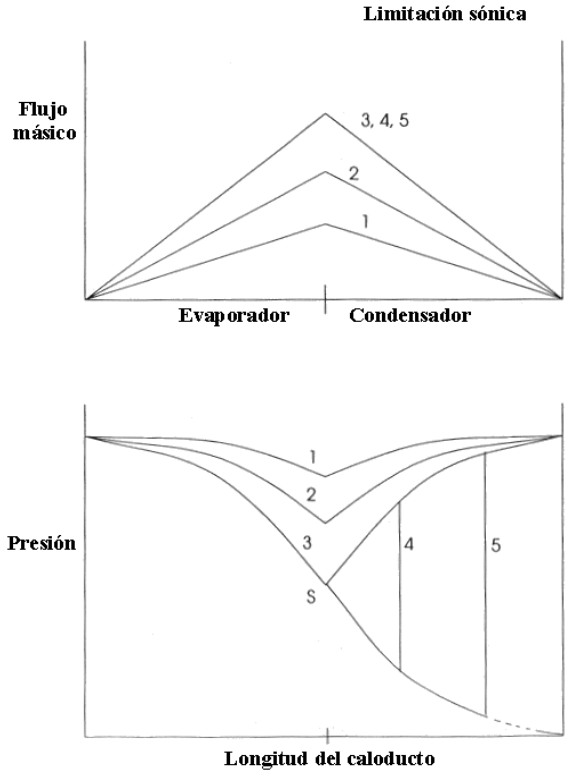
Temperatura de salida del evaporador, °C	**Limitación sónica para el flujo de calor, kW/cm²**			
	Cesio	**Potasio**	**Sodio**	**Litio**
400	1.0	0.5	-	-
566	4.6	2.9	0.6	-
600	14.9	14.9	3.5	-
700	37.3	37.3	13.2	-
800			38.9	1.0
900			94.2	3.9
1000				12.0
1100				31.1
1200				71.0
1300				143.8

La figura 35, ilustra el rango de flujo másico como una función de la posición axial a todo lo largo del evaporador y condensador con la correspondiente distribución de presión, en función también, de la distancia axial a lo largo del tubo para cinco cargas térmicas.

En las curvas 1, 2 y 3 la carga térmica es incrementada de manera paulatina. Como se aprecia, la velocidad de flujo másico del vapor se incrementa con reducciones correspondientes en la presión del condensador.

Eventualmente, de cualquier forma, la velocidad del vapor alcanza la velocidad del sonido al final del evaporador, mostrado como punto S sobre la curva 3. De aquí se puede deducir que el flujo másico no depende de la diferencia de presiones ΔP. Dado que el flujo ha alcanzado la velocidad del sonido, posteriores reducciones de la presión en el condensador no resultarán en incremento de la velocidad de flujo de masa.

Figura 35. Flujo de masa y distribución axial de presión [3].



Una vez que el régimen de flujo continuo alcanza el final del condensador se forma una onda de choque, según se ve en la curva 5, de la figura 38. Esta onda de choque progresa lentamente corriente arriba y crece muy débilmente hasta que desaparece eventualmente a la salida del evaporador. En este punto el régimen ha sido restaurado a condiciones subsónicas [3,8].

La figura 36, ilustra las relaciones entre la temperatura de vapor y la posición axial del caloducto. La curva A representa la distribución de temperaturas típica de un caloducto con condiciones de flujo subsónico y la recuperación de la presión parcial.

Como en el caso de la presión, en la figura 35, incrementando la velocidad de calor rechazado y disminuyendo la temperatura del condensador disminuirá la temperatura del evaporador, como se muestra en la curva B.

Continuando con el incremento en el flujo de calor y con reducciones de la temperatura del condensador se tendrá una disminución de la temperatura de vapor promedio del vapor. Sin

embargo, en algunos puntos la velocidad de vapor al final del evaporador alcanza la velocidad del sonido y existen condiciones de flujo críticas o de bloqueo u obstrucción.

Figura 36. Temperatura en función de la posición axial [3].

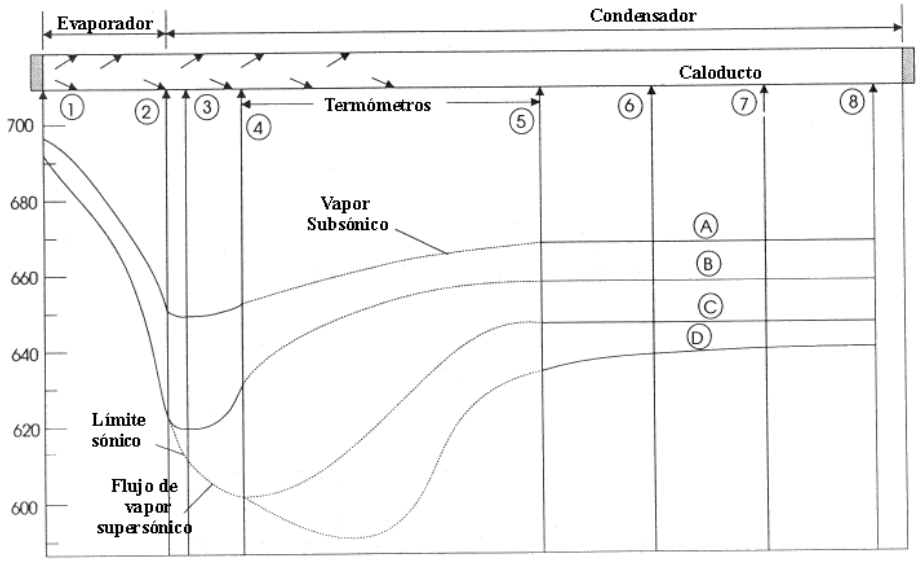
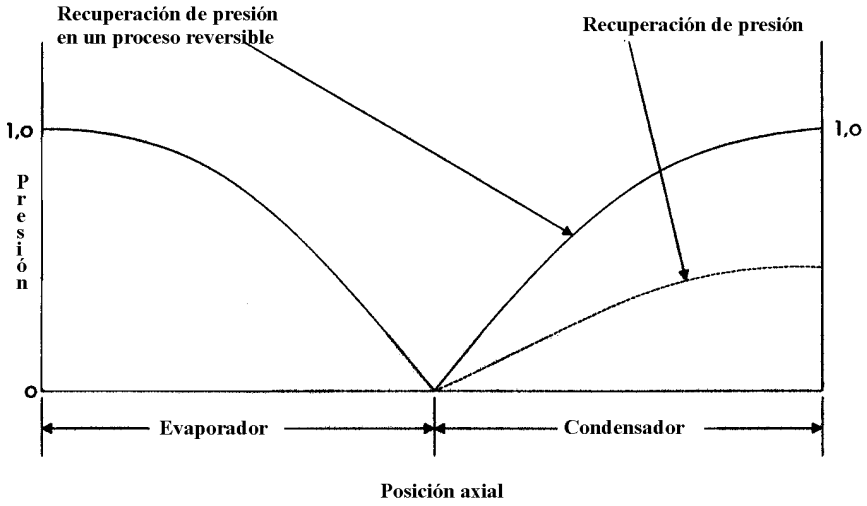


Figura 37. Recuperación completa de presión (Cotter, 1967) [3].



Se ha determinado que la caída de presión en el vapor es el resultado principal de dos factores, los efectos de inercia y de viscosidad. En un proceso reversible, las condiciones de inercia en el evaporador y en el condensador tendrían signos opuestos y se cancelarían el uno con el otro, según se muestra en la figura 36.

En una situación real, es razonable suponer que únicamente ocurrirá una recuperación parcial de la presión, figura 37.

Contrariamente a los demás límites de transporte de calor, la limitación sónica actualmente sirve como el límite más elevado a la capacidad de transporte axial de calor y no necesariamente resulta en un secado de la estructura capilar en el evaporador o la falla total del caloducto [3].

La limitación axial sónica del flujo de calor en el caloducto está dada por la siguiente expresión, donde el subíndice cero denota condiciones de estancamiento al inicio del evaporador y P_t es la presión a la entrada del condensador donde el número de Match es uno:

$$Q_{sónico} = h_{fg}\left(\frac{P_0\rho_0}{A}\right)^{0.5}\left[\left(\frac{P_t}{P_0}\right)\left(1-\frac{P_t}{P_0}\right)\right]^{0.5} \qquad (3.2.1)$$

donde A es un factor de corrección del perfil de velocidades. Cerca del límite de transporte sónico puede verse que A= 1.11 y $P_t/P_0 = 2.08$ de manera tal que:

$$Q_{sónico} = 0.474\, A_v h_{fg}\left(\rho_0 P_0\right)^{0.5} \qquad (3.2.2)$$

Cuando un espacio adiabático está presente, las fuerzas viscosas causan que el flujo se acelere en la región adiabática.

CALCA realiza los ajustes necesarios para determinar, por iteración, la condición de estancamiento en el evaporador correspondiendo a Match 1 al ingresar al condensador.

El límite sónico es, entonces, calculado por:

$$Q_{sónico} = MA_v h_{fg}\left(\rho_v P_v\right)^{0.5} \qquad (3.2.3)$$

donde *M,* el número de Mach, ρ_v, densidad del vapor y P_v, presión del vapor, son tomados a la salida del evaporador.

En el caso de tubos sin estructura capilar, el área de sección transversal del espacio que ocupa el vapor esta determinada por el área de sección transversal total del caloducto menos el espesor de la película de líquido. Se tiene buena aceptación entre este modelo, ecuación 3.2.2, y los resultados experimentales [11].

Para el cálculo del límite sónico de un caloducto axialmente ranurado se han determinado ecuaciones muy semejantes que responden con cierta proximidad a las determinaciones experimentales, entre las cuales se tienen:

$$Q_{sónico} = 0.474 h_{fg} A_v \left(\rho_v P_v\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (3.2.4)$$

donde ρ_v y P_v son la densidad y la presión de vapor al final del evaporador [3].

Una relación para el cálculo del límite sónico, en función de las propiedades termofísicas, tiene la forma:

$$Q_{sónico} = V h_{fg} \left(\frac{\rho_v P_v}{A_v}\right)^{\frac{1}{2}} \left[\frac{P_t}{P_v}\left(1 - \frac{P_t}{P_v}\right)\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (3.2.5)$$

donde se asume que los caloductos son operados en la región donde los efectos inerciales son dominantes, se tiene comportamiento ideal del vapor isotérmico y

$$V = \pi r_v^2 L_{eff} \qquad (3.2.6)$$

es el volumen del caloducto donde se desplazan predominantemente las moléculas de vapor [3].

Una de las expresiones más utilizada en el cálculo del flujo axial de calor en términos de las propiedades físicas, dimensiones geométricas y el número de Mach está dada por:

$$Q = \frac{A_v \rho_o h_{fg} \left(\gamma_v R_v T_0\right)^{1/2} M_v \left(1 + \frac{1}{2}\left(\bar{v}_v - 1\right) M_v^2\right)^{1/2}}{1 + \left(\bar{v}_v / 2\right) M_v^2} \qquad (3.2.7)$$

Sabiendo de que el número de Mach deberá ser igual a la unidad en campos de velocidad sónica, se tiene una expresión para el máximo transporte de calor axial:

$$Q_{sónico} = A_v \rho_0 h_{fg} \left[\frac{\gamma_v R_v T_0}{2(\gamma_v + 1)} \right]^{1/2} \qquad (3.2.8)$$

antes de que comience la obstrucción del flujo, donde $R_v = \bar{R} / PM$.

Es importante notar que mientras que esta expresión tiene el propósito inicial de utilizarse a la salida del evaporador, también es válida para la sección del condensador. Sin embargo, en esta región el número de Mach puede ser mucho mayor que la unidad [3].

3.3. Límite de Arrastre.

En la operación de caloductos, el líquido y el vapor fluyen en direcciones opuestas. La interacción entre el líquido y flujo de vapor en contracorriente y las fuerzas de corte viscosos que ocurren en la interfase líquido-vapor pueden inhibir el retorno de líquido al evaporador. Cuando esto ocurre, se dice que el caloducto ha alcanzado el límite de arrastre o de inundación.

Incrementos adicionales en el calor suministrado resultan en un incremento en las velocidades de vapor, las cuales pueden causar que el flujo de líquido venga a ser inestable. En los casos más drásticos, se pueden formar ondas y los esfuerzos de corte en la interfaz pueden ser más grandes que las fuerzas de tensión superficial del líquido, dando como resultado gotas de líquido atrapadas o arrastradas en el flujo de vapor y llevadas al condensador.

Este arrastre de gotas de líquido, el cual puede limitar el flujo axial de calor, se le conoce como el límite de arrastre.

No obstante que ambos, el arrastre y el inundamiento, son el resultado de la acumulación de líquido en exceso en el condensador y secan la estructura capilar del evaporador, pueden ser diferenciados por la presencia de gotas de líquido arrastradas en la corriente de vapor (Peterson and Bage, 1991) [3]. El estudio del fenómeno de arrastre/inundamiento en caloductos es aún un tanto limitado.

Si el flujo de la cantidad de movimiento por unidad de área del vapor es suficientemente elevado, el esfuerzo que ejerce el vapor sobre la superficie del líquido puede bastar para generar ondas y arrancar gotitas de líquido de sus crestas.

El arrastre de gotas de líquido provoca un aumento sustancial en la velocidad de circulación del fluido, y si la presión capilar no es suficiente el relleno poroso del evaporador puede secarse repentinamente.

Cuando el arrastre es intenso, las gotas que inciden sobre el extremo del condensador pueden producir un sonido audible. El cociente del flujo de la cantidad de movimiento por unidad de área del vapor y las fuerzas de tensión superficial que actúan sobre el líquido es proporcional al Número de Weber,

$$W_E = \frac{\rho_v V_v^2 L}{\sigma} \qquad (3.3.1)$$

En esta expresión, L, es el diámetro hidráulico de los poros de la superficie del relleno. Este diámetro es igual a la separación entre los alambres para un relleno de tela de alambre, al doble de ancho del surco para un relleno de surcos y a 0.82 veces el radio de las esferas en el caso de un relleno de esferas empacadas. Un valor del We de aproximadamente igual a 1 indica el límite por arrastre.

Se puede decir, que el límite de arrastre es causado por la interacción viscosa entre los flujos de vapor y líquido en la estructura capilar.

Las gotas de líquido dentro de la estructura capilar son atrapadas en el interior del flujo de vapor en contracorriente y transportadas hasta el condensador antes de alcanzar la sección del evaporador, obstruyendo con esto el flujo del líquido y originando el secado de la sección de evaporador, Faghri, 1995 [17].

La mayoría de los trabajos se han realizado a la fecha sobre caloductos asistidos por la gravedad. Busse y Kemme (1980) han expresado sus dudas acerca de cómo ocurre el arrastre en caloductos impulsados por capilaridad, a partir de que la estructura debiera en su mayor parte, probablemente, retardar el crecimiento de ondas en cualquier superficie.

Tien and Chung (1978) presentaron correlaciones para termosifones y para caloductos horizontales, verticales, ranurados y rotatorios. De estas, solamente una es aplicable para los caloductos verticales (asistidos por gravedad), estos utilizan la ecuación:

$$q_m = C^2(1/4\pi d_i^2)h_{fg}[\rho_l^{-0.25} + \rho_v^{-0.25})^{-2}[\sigma_l g(\rho_l - \rho_v)]^{0.25} \qquad (3.3.2)$$

aplicada a termosifones.

Esta ecuación fue aplicada en datos reportados por Kemme (1976), quien expandió el criterio del número de Weber sugerido por Cotter (1967) para incluir el balance de fuerzas en términos de flotabilidad, o

$$Q_{arrastre} = A_v h_{fg}\left[\left(\frac{\rho_v}{A^*}\right)\left(\frac{2\pi\sigma_l}{\iota} + \rho_l g d_{tubo}\right)\right]^{0.5} \qquad (3.3.3)$$

Prenger (1984) desarrolló una correlación para caloductos con pared estriada, asistido por gravedad. Un ensayo sobre un modelo de este tipo consideró los efectos inerciales del líquido y del vapor encontrándose que, para caloductos con pared rayada, la inercia del líquido fue predominante debido a que el líquido fue parcialmente encubierto por el flujo de vapor.

Este hecho permitió que la inercia del vapor fuera despreciada y el modelo se redujera a:

$$Q_{arrastre} = 2A_v h_{fg}\frac{d_{ranura,alambre}}{d_{tubo}}\left(\frac{\rho_l\sigma_l}{\pi d_{tubo}}\right)^{0.5} \qquad (3.3.4)$$

Esta expresión correlaciona bien los datos previamente dados por Prenger and Kemme.

Weber-Carstanjen (1987) presentó un modelo para caloductos con superficie estriada, como lo hizo Prenger. (1984). El modelo derivó de la correlación de inundación de Wallis basada en el número Kutateladze, haciendo de esta una expresión similar a la propuesta por Tien and Chung (1978).

La correlación Weber-Carstanjen (1987):

$$Q_{seco} = A_v h_{fg}\left((\rho_l)^3\sigma_l g\right)^{0.25} C\left[\left(\frac{\rho_l}{\rho_v}\right)^{0.25} + \left(\frac{A_v}{A_l}\right)^{0.25}\right]^n \qquad (3.3.5)$$

es una expresión empírica desarrollada de datos obtenidos por diferentes investigadores. Los valores para las constantes C y *n,* se determinan gráficamente.

En todos los modelos previamente presentados, excepto tanto el de Prenger como la ecuación (3.3.2), se asume que la estructura capilar ha sido inundada. Sin embargo, la teoría del caloducto clásico sugiere que la estructura capilar normalmente no está inundada y el líquido es retenido en el interior de la estructura capilar.

Con lo anteriormente expuesto y con la suposición de que solamente la diferencia de presión entre el líquido en la estructura capilar y el vapor es la cinética principal del flujo de vapor, Rice and Fulford (1987) derivaron la expresión:

$$Q_{arrastre} = A_v h_{fg} \left(\frac{8\sigma_l \rho_v}{\iota} \right)^{0.5} \qquad (3.3.6)$$

El valor de ι puede ser aproximadamente el doble del radio de curvatura de la gota más grande que pueda formarse sobre lo más profundo de la malla.

Se cuenta con un método mediante el cual se puede determinar la limitación por arrastre durante la operación de un caloducto. Este procedimiento utiliza el numero de Weber, definido como la razón de las fuerzas viscosas de corte a las fuerzas resultantes de la tensión superficial y dado por la expresión:

$$We = \frac{2 r_{h,w} \rho_v v_v^2}{\sigma_l} \qquad (3.3.7)$$

La relación entre la velocidad del vapor y la capacidad de transporte de calor al flujo axial de calor está dada por:

$$v_v = \frac{Q_{arrastre}}{A_v \rho_v h_{fg}} \qquad (3.3.8)$$

Asumiendo que, para prevenir el arrastre de gotas de líquido por el flujo de vapor, el número de Weber deberá ser menor que la unidad, se puede finalmente escribir una ecuación para el cálculo de la máxima capacidad de transporte por arrastre:

$$Q_{arrastre} = A_v h_{fg} \left(\frac{\sigma_l \rho_v}{2 r_{h,w}} \right)^{\frac{1}{2}} = A_v h_{fg} \left(\frac{\sigma_l \rho_v}{2w} \right)^{\frac{1}{2}} \qquad (3.3.9)$$

donde $r_{h,w}$, es el radio hidráulico de la estructura de la estructura capilar, utilizada para una variedad de caloductos incluyendo los axialmente ranurados. Donde w es el ancho de las ranuras de los caloductos axialmente ranurado. En el apéndice J, se muestran algunos valores de $r_{h,w}$, [3, 17].

El límite de arrastre es el resultado de una interacción de cizalla entre las corrientes a contraflujo del líquido y vapor. La tensión de cizalladura ejercida por el vapor sobre el líquido impide el retorno del líquido al evaporador, causando el secamiento de la estructura capilar en el evaporador.

La estabilidad de la interface está relacionada con un valor crítico del número de Weber, el cual se acepta sea de 1. Esta relación define una velocidad de vapor crítica que puede ser relacionada con la capacidad del caloducto. Sí

$$W_e \equiv \frac{\lambda \rho_v v^2}{2\pi \sigma_l} = 1 \qquad (3.3.10)$$

donde la velocidad crítica puede ser definida como

$$v_{crit} = \left(\frac{2\pi \sigma_l}{\lambda \rho_v} \right)^{0.5} \qquad (3.3.11)$$

Combinando la ecuación 3.3.11 con la ecuación de continuidad, podemos correlacionar el límite de arrastre mediante el uso de los siguientes parámetros adimensionales:

$$Q_{arrastre} = \frac{q_{ent}}{\rho_v A_v h_{fg}^{1.5}} \qquad (3.3.12)$$

y

$$E_t = \frac{\sigma_l}{\rho_v h_{fg} \delta_1} \qquad (3.3.13)$$

donde δ es una dimensión característica de la superficie.

Se asume que la correlación es de la forma:

$$Q_{arrastre} = aE_t^b \qquad (3.3.14)$$

con a y b determinadas empíricamente.

Para caloductos de superficie lisa, verticales, la dimensión característica se basa en la longitud de onda para un modelo con película de líquido suspendida:

$$\delta_1 = \left[\frac{\sigma_l}{(\rho_l - \rho_v)g} \right]^{0.5} \qquad (3.3.15)$$

En este caso, el límite de arrastre está predicho por:

$$Q_{arrastre} = 2.99E_t^{0.545} \qquad (3.3.16)$$

Para caloductos sin estructura capilar con paredes rayadas, así como para caloductos con estructura capilar, el arrastre está dado por:

$$Q_{arrastre} = 33.7\delta_1 E_t^{0.5} \qquad (3.3.17)$$

con δ en centímetros. La dimensión característica, δ, se toma como la profundidad de las estrías o ranurado de la pared interna del caloducto y como el diámetro medio para caloductos con estructura capilar de tela de alambre metálica.

Una modificación al parámetro de arrastre está basada en la densidad del líquido y definida por:

$$E_t = \frac{\sigma_l}{\rho_l h_{fg} \delta_2} \qquad (3.3.18)$$

y de igual manera, una modificación a la característica profundidad basado en el cálculo del llenado de las ranuras está dada por:

$$\delta_2 = \left[\frac{(32\mu_l Q_{arrastre})}{(\pi \rho_l^2 h_{fg} g N sen\phi)} \right]^{0.25} \qquad (3.3.19)$$

El arrastre está entonces determinado por:

$$Q_{arrastre} = 6.59x10^{-7} (E_t)^{-0.284} \qquad (3.3.20)$$

Para simplificar la entrada, se asume a ϕ como 45º y *N* se calcula en base a un ángulo de corte de 90°, para que la textura del espaciado entre cresta y cresta sobre una circunferencia sea dos veces la profundidad de corte [11].

Algunas expresiones más para el cálculo del límite de arrastre están dadas por:

$$Q_{arrastre} = \sqrt{\frac{2\pi \rho_v h_{fg}{}^2 \sigma_l}{z}} A_v \qquad (3.3.21)$$

donde el número de Weber está dado por:

$$W_e = \frac{\rho_v v^2 z}{\sigma_l} = 1 \qquad (3.3.22)$$

y

$$v_{cr} = \sqrt{\frac{2\pi \sigma_l}{\rho_v z}} \qquad (3.3.23)$$

donde

$$z = d_{ranura,alambre} + w_f \qquad (3.3.24)$$

A partir de que el flujo axial de energía es:

$$q = \rho_v h_{fg} \bar{v}_v \qquad (3.3.25)$$

$\rho_v h_{fg}{}^2 \sigma_l$ es una figura de Merit para fluidos de trabajo desde el punto de vista del arrastre [2].

Los límites de arrastre se correlacionaron con un modelo físico y un número de Weber crítico dando por resultado la ecuación:

$$Q_{arrastre} = \sqrt{\frac{2\pi E_t}{\alpha}} \frac{\delta_1}{\delta^*} \qquad (3.3.26)$$

donde E_t es un parámetro de arrastre adimensional y es igual a;

$$E_t = \frac{\sigma_l}{\rho_l h_{fg} \delta_1} \qquad (3.3.27)$$

mientras que, α, se encuentra en función de la relación de presión en el evaporador y tiene como máximo un valor de 1.234 para flujo laminar y de 2.22 para un flujo totalmente desarrollado [2,15].

La característica de longitud en la formulación del número de Weber fue la profundidad de la estructura capilar (o la profundidad de las ranuras en el caso de caloductos axialmente ranurados). Para el caso de estructuras capilares de mallas, δ^*, se considera como ($d_{alambre}/2$) [2].

3.4. Límite de Ebullición o de Calentamiento Crítico.

No resulta conveniente que se formen burbujas en el relleno de un evaporador porque esto puede producir zonas calientes que obstruyan el flujo del líquido.

Mientras que las limitaciones del recubrimiento, sónicas y por arrastre restringen el flujo axial de calor por unidad de área, la limitación por ebullición, impone una restricción sobre el flujo radial en el evaporador.

Pueden darse problemas para el cálculo confiable del tamaño de los lugares de nucleación, el efecto de los gases disueltos en el líquido y el efecto de los gradientes de temperatura de la fase líquida.

La limitación por ebullición resulta insignificante en el caso de un caloducto de metal líquido, pero puede ser un grave problema para uno de agua, ya que el agua no llena fácilmente los lugares de nucleación [5].

Un análisis estático de la frecuencia de formación de burbujas, condujo a la relación siguiente que se utiliza para obtener el límite de flujo de calor en calentamiento crítico.

$$\left(\frac{Q_{ebull}}{A_{cr}}\right)_{máx} = k_3 \rho_v h_{fg}\left[\frac{\sigma(\rho_l - \rho_v)g}{\rho_v^2}\right]^{\frac{1}{4}} \qquad (3.4.1)$$

donde k_3 , es un factor de corrección que depende de la combinación del material y del fluido de trabajo y se encuentra en función de la rugosidad superficial (número de puntos de nucleación) y del ángulo de contacto entre la burbuja y la superficie de calefacción , y A_{cr} es el máximo de transferencia de calor axial por unidad de área de sección transversal en la limitación por ebullición [8].

El límite de ebullición se tiene desde el inicio mismo de la ebullición nucleada dentro de la estructura capilar. Las condiciones de ebullición representan una máxima velocidad de transferencia de calor.

La formación de burbujas (nucleación) dentro de la estructura capilar de un caloducto afecta adversamente su funcionamiento y rendimiento. El crecimiento y movimiento de burbujas dentro de la estructura capilar puede cerrar la vía de retorno del líquido, causando el secado del evaporador [17].

La ebullición nucleada ocurre cuando se alcanza el sobrecalentamiento en la líquida y está dada por la aproximación lineal de la ecuación de Clausius-Clapeyron:

$$\Delta T_{ebull} = \frac{2\sigma_l T_s}{\rho_v h_{fg} r_{nuc}} \qquad (3.4.2)$$

La existencia de sobrecalentamiento en el límite de ebullición es la suma de la caída de temperatura a través de la capa de líquido y la caída de temperatura a través de la interfaz líquido-vapor. Estas son respectivamente:

$$\Delta T_l = \frac{\delta_w Q_{ebull}}{\pi D L_e k_w} \qquad (3.4.3)$$

y

$$\Delta T_{l-v} = \left[\frac{(2\pi R T_s)^{0.5} R T_s^2 Q_{ebull}}{A_{l-v} P h_{fg}^2}\right] \qquad (3.4.4)$$

La conductividad térmica, k, en la ecuación 3.4.3 es la conductividad térmica de la estructura capilar saturada, k_w [11]. Estableciendo que $\Delta T_{ebull} = \Delta T_l + \Delta T_{l-v}$ y resolviendo para Q_{ebull} se tiene que:

$$Q_{ebull} = \frac{\left[\frac{2\sigma_l T_s}{\rho_v h_{fg} r_{nuc}}\right]}{\left[\frac{\delta_w}{\pi D_{tubo} L_e k_w} + \frac{\left(2\pi R_{tubo} T_s\right)^{0.5} R_{tubo} T_s^2}{A_{l-v} P_t h_{fg}^2}\right]} \qquad (3.4.5)$$

La determinación de flujo de calor o límite de ebullición se basa en la teoría de ebullición nucleada y está comprendido de dos fenómenos –la formación de burbujas y el subsecuente crecimiento o colapso de las burbujas-.

La formación de burbujas está gobernada por el número y tamaño de los sitios de nucleación sobre una superficie sólida y la diferencia de temperatura entre la pared del caloducto y el fluido de trabajo.

Esta diferencia de temperatura, llamada supercalentamiento, gobierna la formación de las burbujas y puede típicamente estar definida en términos del flujo máximo de calor según:

$$Q_m = \left(\frac{k_{eff}}{T_w}\right)\Delta T_{cr} \qquad (3.4.6)$$

donde ΔT_{cr} es el sobrecalentamiento crítico, definido por Marcus (1972) como

$$\Delta T_{cr} = \left(\frac{T_{sat}}{h_{fg}\rho_v}\right)\left(\frac{2\sigma_l}{r_n} - \Delta P_{i,m}\right) = \left(\frac{2\sigma_l T_{sat}}{h_{fg}\rho_v}\right)\left(\frac{1}{r_n} - \frac{1}{r_c}\right) \qquad (3.4.7)$$

en la primera igualdad a la derecha de la ecuación 3.4.7, mientras que para la segunda igualdad en la misma ecuación, sugerida por Faghri (1995), $r_n = 10^{-7} m$ [17].

Aquí T_{sat} es la temperatura de saturación del fluido y r_n es el radio de nucleación crítico del sitio que, de acuerdo con Dunn y Ray, se puede considerar de 2.54×10^{-5} m para caloductos convencionales metálicos.

El crecimiento o colapsamiento de una burbuja dada, una vez que está establecida sobre una superficie plana, es dependiente de la temperatura del líquido y su correspondiente diferencia de presión a través de la interfaz líquido-vapor causada por la presión de vapor y tensión superficial del líquido.

Realizando un balance de presión sobre cualquier burbuja dada y utilizando la ecuación de Clausius-Clapeyron para relacionar la temperatura y la presión, se desarrolló una expresión para el flujo de calor, más allá del cual el crecimiento de la burbuja ocurrirá, para caloductos axiales ranurados y los ya señalados (Chi, 1976).

Esta expresión, la cual está en función de las propiedades del fluido, permite determinar el límite de ebullición para caloductos axialmente ranurados además de las configuraciones mostradas en la figura 26, y puede ser escrita como:

$$Q_{ebull} = \left(\frac{2\pi L_{eff} k_{eff} T_v}{h_{fg} \rho_v \ln\left(\frac{r_i}{r_v} \right)} \right) \left(\frac{2\sigma_l}{r_{nuc}} - \Delta P_{c,m} \right) \qquad (3.4.8)$$

donde k_{eff} es la conductividad térmica efectiva de la combinación líquido-estructura capilar, en la sección del evaporador para caloductos ranurados axialmente, según Chi, 1976, r_i es el radio interior del caloducto y r_n es el radio del sitio de nucleación [17].

Se tiene que

$$k_{eff} = \frac{\left(w_f k_l k_w \delta\right) + w k_l \left(0.185 w_f k_w + \delta k_l\right)}{\left(w + w_f\right)\left(0.185 w_f k_w + \delta k_l\right)} \qquad (3.4.9)$$

y

$$r_n = 2.54x10^{-5} - 2.54x10^{-7}\, m$$

donde r_n puede tomar cualquiera de los valores que se encuentren dentro del rango o el promedio de los límites [3].

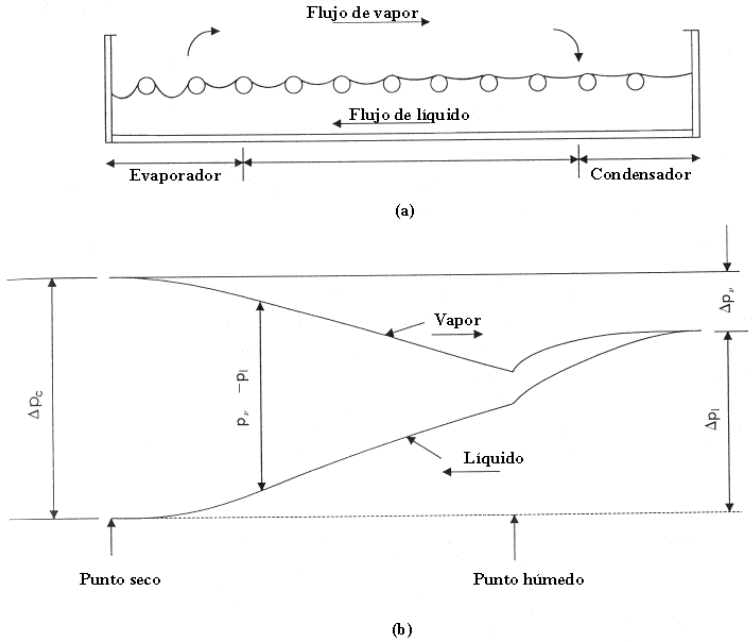
En apéndice B se muestran algunos valores de k_{eff} .

3.5. Límite Capilar.

La evaporación en la sección del evaporador de un caloducto origina que el menisco retroceda en el interior de la estructura capilar y la condensación en el condensador causa inundamiento.

El efecto combinado de esta evaporación y condensación está ilustrado en la figura 38 a, y resulta en un menisco con radio de curvatura que varía a lo largo de la longitud axial del caloducto. El punto en el cual el menisco tendrá un mínimo radio de curvatura se denominado como el punto de "secado" y usualmente ocurre en el evaporador en el punto más alejado de la región del condensador.

Figura 38. (a) Variación de curvatura de menisco en función de la posición axial. (b) Típicas distribuciones de presión de vapor y de líquido en caloductos [3].



El punto húmedo ocurre en aquél punto donde la presión de vapor y la presión del líquido son aproximadamente iguales o donde el radio de curvatura es el máximo. La localización de este punto puede ocurrir en cualquier posición de las secciones del condensador o adiabática pero típicamente ocurre en un punto localizado cerca del final del condensador, lo más alejado del evaporador.

La figura 38 b, ilustra la relación entre las presiones estáticas del líquido y del vapor en la operación del caloducto. Como se observa, el gradiente de presión capilar a través de la interfaz líquido-vapor es igual a la diferencia de presión entre las fases del líquido y del vapor en cualquier posición axial dada.

Para que un caloducto funcione apropiadamente, la diferencia de presión capilar neta entre los puntos "húmedo" y "seco" identificados en la figura 38 b, deberá ser mayor que la sumatoria de todas las pérdidas de presión ocurridas a lo largo de las vías de flujo del líquido y de vapor. Esta relación, conocida como la limitación capilar, puede ser expresada matemáticamente como:

$$\left(\Delta P_c\right)_m \geq \int_{L_{eff}} \frac{\partial P_v}{\partial x} dx + \int_{L_{eff}} \frac{\partial P_l}{\partial x} dx + \Delta P_{ph,e} + \Delta P_{ph,c} + \Delta P_{+} + \Delta P_{\Downarrow} \qquad (3.5.1)$$

donde:

$\left(\Delta P_c\right)_m =$ máxima diferencia de presión capilar generada en el interior de la estructura capilar entre los puntos húmedo y seco.

$\int_{L_{eff}} \frac{\partial P_v}{\partial x} dx =$ suma de las caídas de presión inercial y viscosa ocurridas en la fase de vapor.

$\int_{L_{eff}} \frac{\partial P_l}{\partial x} dx =$ suma de las caídas de presión inercial y viscosa ocurridas en la fase líquida.

$\Delta P_{ph,e} =$ gradiente de presión a través del cambio de fase en el evaporador.

$\Delta P_{ph,c} =$ gradiente de presión a través del cambio de fase en el condensador.

$\Delta P_{+} =$ caída de presión hidrostática normal.

$\Delta P_{\Downarrow} =$ caída de presión hidrostática axial.

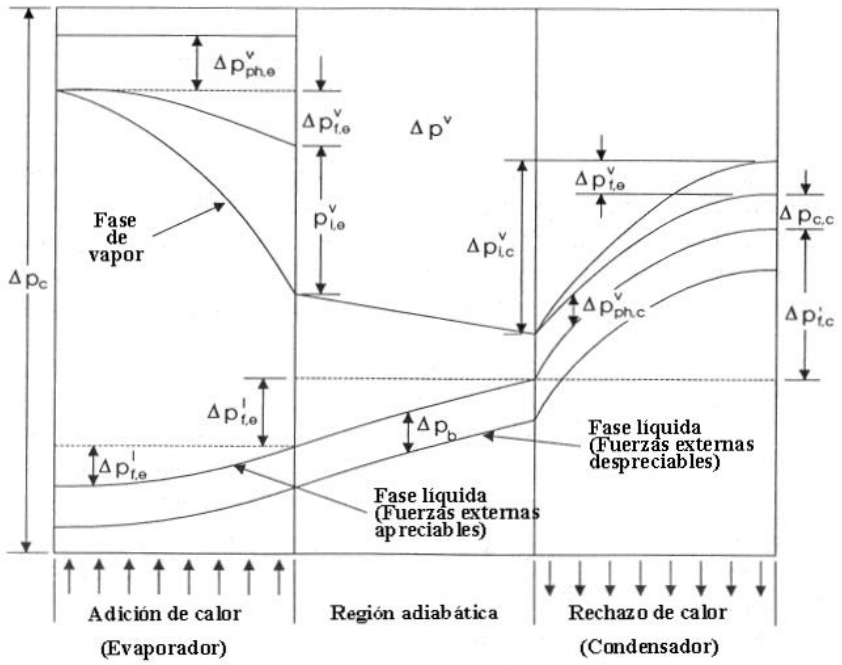
Cuando la presión capilar máxima es igual o mucho mayor que la sumatoria de estas caídas de presión, la estructura capilar es capaz de retornar una cantidad adecuada del fluido de trabajo para prevenir el "secado" de la estructura capilar del evaporador.

Cuando la sumatoria de las seis caídas de presión exceden la presión de bombeo capilar máxima, el fluido de trabajo no es reemplazado lo suficientemente rápido al evaporador para compensar la pérdida de líquido a través de la vaporización y la estructura capilar llega a secarse.

Esta condición, denominada como limitación capilar, varía de acuerdo a la estructura capilar, el fluido de trabajo, el flujo de calor en el evaporador y la temperatura de operación.

La figura 39, da una representación más exacta de la distribución de presión que ocurre durante la operación de un caloducto.

Figura 39. Representación gráfica de las caídas de presión durante la operación de un caloducto [3].



Tres curvas separadas están representadas; la primera de estas representa la distribución de presión del vapor.

Los factores que contribuyen a la variación de presión en el evaporador son la caída de presión a través de la transición de fase líquido-vapor $\Delta P_{ph,e}$, la caída de presión por fricción , y el gradiente inercial de presión $\Delta P_{i,e}$. En la región adiabática el único factor que contribuye a

las variaciones en la distribución es la caída de presión por fricción $\Delta P_{f,a}$ resultando en una variación lineal de la presión con la posición axial.

Los factores que afectan la variación de presión en el condensador son similares a aquellos que ocurren en el evaporador, esto es, la caída de presión a través de la transición de fase líquido-vapor $\Delta P_{ph,c}$ y la caída de presión por fricción $\Delta P_{f,c}$, la cual suministra al condensador la recuperación de algo de presión.

Las otras dos curvas mostradas en la figura representan la distribución de presión en la fase líquida.

La más baja se da en caloductos en los cuales las fuerzas en conjunto son despreciables, y la más alta de las dos incluyen todas las fuerzas en conjunto constantes y uniformes. Mientras la aceleración gravitacional es la fuerza más obvia del conjunto, las fuerzas adicionales se presentan en caloductos rotatorios o en caloductos que experimentan fuerzas de aceleración.

Como se ilustra en la figura 39, los factores que afectan la distribución de presión en la fase líquida en la región del condensador consisten en la caída de presión que ocurre a través de la transición de fase líquido-vapor $\Delta P_{ph,c}$ y la caída de presión por fricción $\Delta P_{f,c}$. En la región adiabática el único factor que afecta la distribución de presión es la caída de presión por fricción mientras que, en el evaporador, los principales factores son la caída de presión a través de la transición de fase líquido-vapor $\Delta P_{ph,e}$ y la caída de presión por fricción $\Delta P_{f,e}$.

Como se mencionó previamente, el gradiente de presión inercial en la fase líquida es despreciado y por lo tanto omitido.

La presión capilar total, a través de la interfaz líquido-vapor, deberá ser mucho más alto que la sumatoria de todas las caídas de presión que ocurren a lo largo de las vías de flujo líquido-vapor. Si esto no se verifica, el fluido de trabajo no retornará al evaporador, causando que el nivel de líquido en la estructura capilar de esta región se agote, llevando al “secado” [3].

La caída de presión de la fase de vapor es en general mucho menor que la de la fase líquida. A menudo es posible no considerarla o hacer sólo un cálculo muy aproximado. Puede suponerse que el flujo es incompresible siempre y cuando el número de Mach sea menor que alrededor

de 0.3. El flujo regularmente considerado laminar, nos permite utilizar la ecuación 3.5.23., para un flujo totalmente desarrollado; con un flujo en los extremos del tubo, no totalmente desarrollado.

Están, además, la caída de presión necesaria para acelerar el vapor en el interior del evaporador y una recuperación de presión debida a la desaceleración del vapor en el condensador. Sin embargo, estos efectos se autocompensan, por lo que en general no se les toma en cuenta en el diseño de caloductos [5].

Con lo anterior, se tienen las bases o principios de los límites de funcionamiento y el porqué se deben evitar ciertas zonas por arriba de sus valores.

Cuando la presión capilar no es suficiente para promover el flujo de líquido desde el condensador hasta el evaporador, se dice que el caloducto ha alcanzado el límite capilar y ocurre el secado del evaporador.

La localización del punto húmedo influye en el diseño del caloducto y puesto que su localización depende del gradiente de presión entre las fases de vapor y líquido este es llamado algunas veces el “límite de gradiente de presión”.

CALCA determina la posición del punto húmedo, el cual a su vez define la longitud para la caída de presión. El límite de potencia capilar es alcanzado cuando:

$$\Delta P_{cap} = \Delta P_v + \Delta P_l + \Delta P_z = \Delta P_v + \Delta P_l + \Delta P_{+} + \Delta P_{\Downarrow} \quad (3.5.2)$$

Donde para la segunda igualdad se consideran despreciables las caídas de presión por cambio de fase y efectos inerciales, asumiendo a la vez flujo laminar.

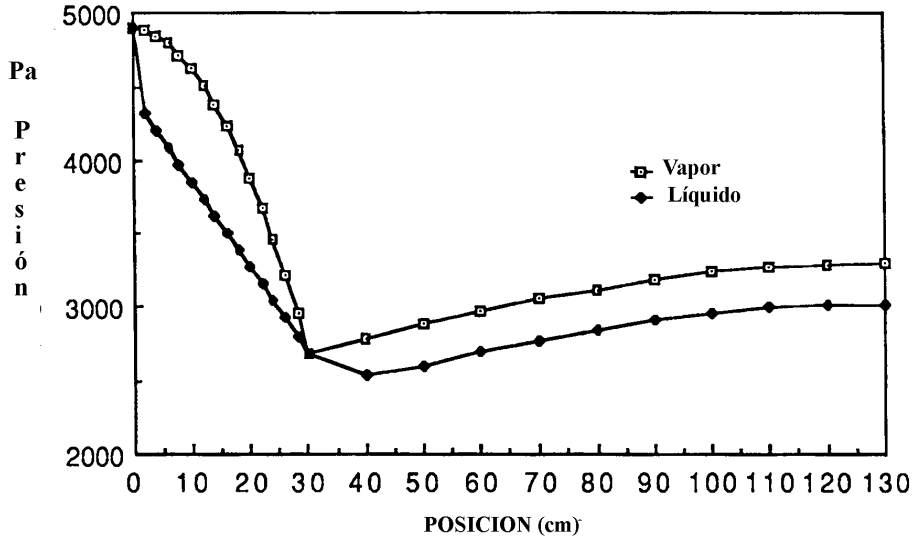
ΔP_{cap} es la máxima caída de presión sostenible a través de la interfaz líquido-vapor:

$$\Delta P_{cap} = \frac{2\sigma_l}{R_c} = \frac{2\sigma_l \cos\theta}{r_c} = \frac{2\sigma_l}{r_{poro}} Cos\theta \qquad (3.5.3)$$

donde r_{por} es el radio del poro y R_c es el radio de curvatura de la interfaz líquido-vapor.

La figura 40, muestra el perfil de presiones y los puntos húmedo y seco; existen dos puntos húmedos, uno a la entrada del evaporador y el otro a la salida del mismo. En la mayor parte de la longitud del condensador, las presiones del líquido y del vapor difieren debido a la capacidad capilar de la estructura capilar, definido por la ecuación 3.5.3.

Figura 40. Perfil de presiones en un caloducto de estructura capilar homogénea, asistido por gravedad [11].



Esta condición existe debido a la elevada diferencia de presión originada por el líquido al retroceder por el interior de la estructura capilar, en consecuencia, se eleva la presión. Sin embargo, en el evaporador, el líquido solamente puede regresar al punto donde se dio el segundo punto húmedo, a la salida del evaporador. Como resultado, la diferencia de presión local de la interfaz vapor-líquido en algún punto en el evaporador puede exceder la diferencia de presión crítica, definida por la ecuación 3.5.3, lo cual resulta en una condición de secado (dry-out) [11].

3.5.1. Presión Capilar en la Interfaz Líquido-Vapor.

La diferencia de presión capilar en una interfaz líquido-vapor, definida como P_v-P_l, o ΔP_c, se puede ser determinar con la ecuación de Laplace-Young,

$$\Delta P_c = \sigma_l \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \qquad (3.5.4)$$

donde r_1 y r_2 son los radios principales de curvatura y σ es la tensión superficial.

Para muchas estructuras capilares, la presión capilar máxima puede ser escrita en términos de un radio de curvatura simple, r_c .

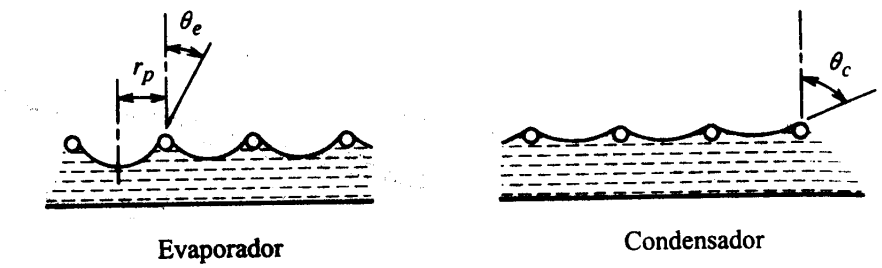
De esta manera, la presión capilar máxima entre los puntos húmedos y seco se puede expresar por:

$$\Delta P_{c,m} = \frac{2\sigma_l}{r_{c,e}} - \frac{2\sigma_l}{r_{c,c}} = 2\sigma_l \left(\frac{\cos\theta_e}{r_{por}} - \frac{\cos\theta_c}{r_{por}} \right) \qquad (3.5.5)$$

y como la diferencia entre la presión capilar a través del menisco en el punto húmedo y la presión capilar en el punto seco, o la altura capilar disponible para impulsar el líquido a través del relleno.

La vaporización que ocurre en el evaporador origina que el menisco de líquido retroceda dentro de la estructura capilar, reduciendo el radio capilar local, mientras que, en la sección del condensador, la condensación causa el inundamiento de la estructura capilar. Esta inundación ocasiona el incremento del radio capilar local $r_{c,c}$. Esto es, $\Delta P_{c,m}$, alcanza el valor máximo cuando $\cos\theta_e = 1$ y $\cos\theta_c = 0$, figura 41. La diferencia resultante entre los dos radios de curvatura origina una diferencia de presión y, por tanto, el bombeo del líquido desde el condensador al evaporador.

Figura 41. Meniscos de líquido en el relleno poroso de un caloducto el radio de curvatura es menor en el evaporador [5].



Durante la operación en estado estacionario, generalmente se asume que el radio capilar en el condensador o en el punto húmedo, $r_{c,c}$, se aproxima al infinito, de tal manera que la

presión capilar máxima para la operación del caloducto en estado estacionario en muchos de los casos puede ser expresada como una función solamente del radio efectivo capilar de la estructura capilar del evaporador,

$$\Delta P_{c,m} = \frac{2\sigma_l}{r_{c,e}} = \frac{2\sigma_l}{r_{por}} \qquad (3.5.6)$$

En apéndice D, se proporcionan valores para el radio capilar efectivo r_c para algunas de las más comunes estructuras capilares [3,5].

El incremento de θ conduce a una disminución de la presión capilar máxima y generalmente se debe a una inadecuada limpieza de la estructura capilar.

3.5.2. Caída de Presión en el Vapor.

Las pérdidas de presión en el caloducto se pueden calcular a través de la opción del límite de funcionamiento, en el cual la potencia transportada por el caloducto es una variable dependiente calculada por:

$$Q = \dot{m} h_{fg} \qquad (3.5.7)$$

donde la velocidad de flujo del fluido es determinada con un balance de presiones sobre el caloducto. Las ecuaciones de pérdida de presión se resumen en los siguientes párrafos [11].

La distribución de la presión de vapor en función de la posición axial se ilustra en la figura 39. Esta variación en la presión de vapor es principalmente el resultado de la caída de presión viscosa ocurrida a lo largo de la vía de flujo del vapor. Sin embargo, en la región del evaporador, la caída de presión viscosa puede estar emparejada con los cambios de moméntum requeridos para acelerar el escape de las moléculas de vapor desde el seno del líquido, lo cual favorece la baja de presión.

En la sección adiabática del caloducto, el gradiente de la presión de vapor es típicamente lineal y resulta únicamente de la fricción viscosa que ocurre entre el vapor que fluye y la estructura y paredes del caloducto.

En la región del condensador, los efectos inerciales causados por la desaceleración de las moléculas de vapor pueden ser restablecidos (aunque no completamente) a causa de la disminución de la velocidad de flujo másico causado por la condensación de algo del vapor.

Esta condensación resulta en la recuperación de algo de presión y disminuye efectivamente la velocidad a la cual la presión decrece.

3.5.2.1. Caída de Presión del Vapor en el Evaporador.

La metodología y ecuaciones utilizadas en el cálculo de ambos términos dependen de sí una condición de frontera, como potencia constante o temperatura constante, es especificada.

Con un suministro de energía constante, la caída de presión de vapor viscosa en el evaporador está dada por:

$$\Delta P_v = 4 f \rho_v \bar{v}_v^2 L_e / D \qquad (3.5.8)$$

Debido a que la estabilización del flujo influencia la adición radial de masa, el flujo de vapor en el evaporador se supone es laminar. El factor de fricción, f, para flujo laminar será:

$$f = 16 / \mathrm{Re}_D \qquad (3.5.9)$$

donde Re_D es el Número de Reynolds axial en función del flujo axial local, definido por:

$$\mathrm{Re}_D = \rho_l \bar{v}_v D / \mu_l = \frac{4\dot{m}}{\pi D_v \mu_v} = \mathrm{Re}_a \qquad (3.5.10)$$

Si las condiciones de frontera especificadas incluyen una fuente de temperatura constante, entonces la caída de presión nodal se determina en base a una entrada uniforme de calor en toda la longitud.

En este caso, se puede utilizar una ecuación diferencial parcial semiempírica:

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \frac{-8\mu_v \bar{v}_v (1 + 0.667a)}{r_v^2} \qquad (3.5.11)$$

o bien $$\Delta P_v = \frac{-8\mu_v \bar{v}_v (1+0.667a)}{r_v^2} z^2 \qquad (3.5.12)$$

donde el factor de corrección del perfil de velocidades, "a", representa una corrección analítica aproximada al perfil de velocidades parabólico de Poiseuille para justificar la adición radial de masa:

$$a = \left(\frac{15}{22}\right)\left\{5 + \frac{18}{\mathrm{Re}_{r,e}} - \left[\left(5 + \frac{18}{\mathrm{Re}_{r,e}}\right)^2 - \frac{44}{5}\right]^{0.5}\right\} \qquad (3.5.13)$$

y varía desde a=0 para el perfil de velocidades de Poiseuille donde el número de Reynolds radial alcanza el valor de cero, hasta a=0.665 para cuando el número de Reynolds radial se aproxima al infinito (∞).

El número de Reynolds radial en el evaporador está definido por:

$$\mathrm{Re}_{r,e} = \frac{\dot{m}}{2\pi L_e \mu_v} \qquad (3.5.14)$$

Si se ha especificado una fuente de temperatura como una de las condiciones de frontera, entonces la caída de presión en un punto se determina por integración de:

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\frac{4}{3} r_v \frac{d\left[(\bar{v})^2\left(1 - \frac{a}{6} + \frac{2a^2}{45}\right)\right]}{dz} \qquad (3.5.15)$$

donde el factor de corrección del perfil de velocidades, "a", está definido por la ecuación 3.5.13., y el número de Reynolds radial por la ecuación 3.5.14.

En la integración, se supone que las variaciones de P y $(\bar{v})^2$ pueden ser aproximadas a la linealidad y que $\mathrm{Re}_{r,e}$ es constante.

Si la fuente de temperatura no está especificada como una condición de frontera, se utiliza una solución aproximada a la ecuación 3.5.15., donde la caída de presión inercial en el evaporador está dada por:

$$\Delta P_{i,e} = C r_v (\bar{v})^2 \qquad (3.5.16)$$

El factor de corrección del perfil de velocidades, C, está dado por:

$$C = 0.61\mathrm{Re}_{r,e} + \left(\frac{0.61\mathrm{Re}_{r,e}}{3.6 + \mathrm{Re}_{r,e}} \right) \qquad (3.5.17)$$

El perfil inercial de presiones está determinado por la distribución de $(\bar{v})^2$ a lo largo del evaporador asumiendo una entrada uniforme de calor [11].

En la sección del evaporador de un caloducto la aproximación al flujo de Poiseuille es razonable para números de Reynolds que se aproximan a cero; sin embargo, cuando el número de Reynolds tiende al infinito, el perfil de velocidades puede estar lo más aproximado a una función de coseno.

El perfil de presiones que se obtiene resulta en:

$$P(x) \approx P(x=0) - 4\mu_v \frac{\bar{v}_v L_e}{r_v^2} \left[1 + 0.61\mathrm{Re}_{r,e} + \frac{0.61\mathrm{Re}_{r,e}}{3.6 + \mathrm{Re}_{r,e}} \right] \frac{z_e^{\,2}}{L_e^2} \qquad (3.5.18)$$

con un suministro de energía y temperatura de operación constantes.

Donde $\bar{v}$ es la velocidad de vapor media al final de la sección del evaporador y Re_r es el número de Reynolds radial (Busse, 1967) [3].

3.5.2.2. Caída de Presión del Vapor en la Zona Adiabática.

En esta sección deben considerarse los efectos de compresibilidad. La fricción sobre la pared, dada por las ecuaciones 3.5.9, 3.5.26 y 3.5.27 acelera el flujo de vapor y por tanto incrementa la caída de presión del vapor [11].

Un balance de masa sobre una sección de la región adiabática del caloducto asegura que, para la operación continua, la velocidad de flujo de masa líquida y la velocidad de flujo de másico de vapor deberá ser igual.

Debido a la gran diferencia en la densidad de estas dos fases, la velocidad de vapor deberá ser significativamente mucho más alto que la velocidad de la fase líquida. Se tiene que para el cálculo del gradiente de presión de vapor, donde los efectos de la presión dinámica son despreciados, se tiene la expresión:

$$\Delta P_v = \left(\frac{C\left(f_v \operatorname{Re}_v\right)\mu_v}{2\left(r_{h,v}\right)^2 A_v \rho_v h_{fg}} \right) L_{eff} Q_{cap} \qquad (3.5.19)$$

donde $r_{h,v}$ es el radio hidráulico del espacio del vapor y C es una constante que depende del número de Mach. El área de sección transversal del espacio de vapor estará proporcionada por:

$$A_v = \pi d_v^2 / 4 \qquad (3.5.20)$$

Durante la operación en estado estacionario, la velocidad de flujo másico de líquido en cualquier posición axial, $\dot{m}_l$, deberá ser igual a la velocidad de flujo másico de vapor, $\dot{m}_v$, y mientras el régimen de flujo del líquido es siempre laminar, el flujo de vapor puede ser laminar o turbulento. Por lo tanto, es necesario determinar el régimen de flujo en función del flujo de calor.

Esto puede estar acompañado por la evaluación del número de Reynolds local axial en el vapor, definido como:

$$\operatorname{Re} = \frac{2\left(r_{h,v}\right)Q_{cap}}{A_v \mu_v h_{fg}} = \frac{d_v Q_{cap}}{A_v \mu_v h_{fg}} \qquad (3.5.21)$$

En suma, es necesario determinar si el flujo deberá ser tratado como compresible o incompresible mediante la evaluación del número local de Mach, definido como:

$$M_v = \frac{Q_{cap}}{A_v \rho_v h_{fg} \left(R_v T_v \gamma_v\right)^{1/2}} \qquad (3.5.22)$$

donde R_v es la constante del gas, T_v es la temperatura del vapor y γ_v, es la razón de calores específicos, la cual adquiere un valor de acuerdo al tipo de gas (Apéndice E).

Investigaciones realizadas por Kraus y Bar-Cohen [1983] han demostrado que las combinaciones de estas condiciones, mostradas en la tabla 6, pueden ser utilizadas con razonable seguridad:

Tabla 6. Combinaciones de algunas constantes aplicadas al vapor [5].

Re_v	M_v	$(f_v Re_v)$	C
<2300	<0.2	16	1.00
<2300	>0.2	16	$\left[1+\left(\frac{\gamma_v-1}{2}\right)M_v^2\right]^{-1/2}$
>2300	<0.2	$0.038\left(\frac{2(r_{h,v})q}{A_v\mu_v h_{fg}}\right)^{3/4}$	1.00

Para el cálculo de la caída de presión de vapor en un caloducto axialmente ranurado se cuenta con la expresión siguiente:

$$\Delta P_v = \left(\frac{16\mu_v}{2(r_{h,v})^2 A_v \rho_v h_{fg}}\right) L_{eff} Q_{cap} = \frac{64}{\mathrm{Re}_{D_{h,v}}} \frac{L_{eff}}{D_{h,v}} \left(\frac{1}{2}\rho_v v_v^2\right) \quad (3.5.23)$$

Busse encontró que, en el caso de la sección adiabática del caloducto, el perfil de presiones está lo más aproximado al flujo de Poiseuille mediante:

$$P(x) \approx P(x=0) - 8\mu_v \frac{\bar{v}_v x}{r_v^2}\left[1+\frac{0.106\,\mathrm{Re}_r}{18+5\,\mathrm{Re}_r}\frac{1-e^{(-30x/\mathrm{Re}_a r_v)}}{x/\mathrm{Re}_a r_v}\right] \quad (3.5.24)$$

donde x es la coordenada medida desde el comienzo de la región adiabática y Re_a es el número de Reynolds axial.

En la región adiabática el factor de corrección depende del perfil de velocidades a la entrada de esta zona adiabática. Si el perfil está aproximado a una función coseno, el factor de corrección varía desde 0.665 y disminuye exponencialmente por un factor de aproximadamente 10 por cada distancia de un diámetro [3,5].

3.5.2.3. Caída de Presión de Vapor en el Condensador.

En el condensador, puede existir el flujo turbulento. Además, la turbulencia puede existir a números de Reynolds axiales mucho menor que 2,000 como resultado de la remoción de masa. Sin embargo, la remoción de masa aún no está bien correlacionada.

Con una condición de temperatura constante en el sumidero y a números de Reynolds radiales mucho más grandes que (-2.25), definido como negativo en el condensador:

$$\mathrm{Re}_{r,c} = \frac{-\dot{m}}{(2\pi L_c \mu_v)} \qquad (3.5.25)$$

las caídas de presión viscosa e inercial en el condensador son calculadas utilizando las ecuaciones 3.5.11., y 3.5.15, respectivamente, utilizando la misma suposición impuesta sobre el evaporador y un factor de corrección del perfil de velocidad definido para el condensador.

Nótese que, en el condensador, $\mathrm{d}(\bar{v})^2/\mathrm{dz}$, será negativo, el cual puede resultar en una recuperación de presión, dependiendo de $a = f(z)$, el cual está en función del número de Reynolds radial. Por simplicidad, la recuperación adicional de presión causada por (da/dz) es ignorada suponiendo que "a" permanece constante.

Si no se ha especificado una temperatura de sumidero como una condición de frontera, o si el número de Reynolds radial es menor que –2.25, la caída de presión viscosa es calculada en base al factor de Fanning utilizando la ecuación 3.5.8.

El factor de fricción, f, para flujo laminar está dado por ecuación 3.5.9., y para flujo turbulento:

$$f = 0.0791\mathrm{Re}_D^{-0.25} \qquad (2{,}000<\mathrm{Re}_D<20{,}000) \qquad (3.5.26)$$

y

$$f = 0.046\mathrm{Re}_D^{-0.20} \qquad (\mathrm{Re}_D>20{,}000) \qquad (3.5.27)$$

con Re_D definido por la ecuación 3.5.10 [11].

En la región del condensador de un caloducto en operación, la distribución axial de presiones está dada por:

$$P(x) = P(x = L_c) + \frac{4\mu_v \bar{v}_v L_c}{r_v^2}\left[1 - \mathrm{Re}_{r,c}\left(\frac{7}{9} - \frac{8a}{27} + \frac{23a^2}{405}\right)\right]\left(1 - \frac{z_c}{L_c}\right)^2 \qquad (3.5.28)$$

donde, "a", es el factor de corrección del perfil de velocidad que compensa la desviación del flujo de Poiseuille.

En la región del condensador, el factor de corrección, "a", es nuevamente dependiente del valor del Reynolds radial a la entrada del condensador.

En Apéndice F se ilustra la corrección en función del número de Reynolds radial y la distancia medida desde la entrada a la región del condensador para los dos casos, a_0=0 (velocidad de Poiseuille a la entrada del condensador) y a_0=0.665 (perfil de velocidad coseno a la entrada del condensador) [3].

3.5.3. Gradiente de Presión Inercial.

En la mayoría de los caloductos la velocidad del líquido es tan pequeña que los efectos inerciales causados por la evaporización y la condensación pueden prácticamente ignorarse. Esto no es así en micro-caloductos, debido a las pequeñas cantidades de masa que contienen en el pasaje del líquido.

Para consideraciones de flujo laminar de un fluido incompresible en una corriente de vapor en caloductos cilíndricos con adición y rechazo uniforme de calor, se tiene que la contribución de efectos inerciales se determina mediante:

$$\Delta P_i = \frac{\rho_v \bar{V}_v^2}{2g}\left[\frac{28}{9} - \frac{0.68\,\mathrm{Re}_v}{(29L_e/d_v) + \mathrm{Re}_v} e^{\left(-\frac{60L_a}{\mathrm{Re}_v\, d_v}\right)}\right] \qquad (3.5.29)$$

donde $$\bar{V}_v = \frac{Q_{cap}}{\rho_v A_v h_{fg}} \qquad (3.5.30)$$

y $$\mathrm{Re}_v = \frac{\rho_v \bar{v}_v d_v}{\mu_v} \qquad (3.5.31)$$

La expresión 3.5.29., puede bien ser reducida, según se este manejando el régimen laminar (Re_v<<2300) y turbulento (Re_v >>2300), respectivamente como:

$$\Delta P_i = \frac{1.41 Q_{cap}^2}{g \rho_v A_v^2 h_{fg}^{\ 2}} \qquad (3.5.32)$$

$$\Delta P_i = \frac{1.22 Q_{cap}^2}{g \rho_v A_v^2 h_{fg}^{\ 2}} \qquad (3.5.33)$$

Cuando la contribución inercial a la caída de presión de vapor se toma en cuenta para calcular el límite capilar, es común suponer que el 80% de la caída de presión es recuperada en el condensador.

La caída de presión neta es entonces 20% de la caída de presión inercial en el evaporador [3], la cual puede ser obtenida mediante:

$$\Delta P_{i,neta} = 20\%(\Delta P_i) \qquad (3.5.34)$$

Para la remoción uniforme de calor y $Re_{r,c}$ > -2.25, la recuperación de presión inercial en el condensador está dado por:

$$\Delta P_i = P_{z=Lc} - \left(\frac{4 \mu_v \bar{v}_v L_c}{r_v^2} \right) \left[\mathrm{Re}_{r,c} (0.778 - 0.296a + 0.057a^2) \right] \left(1 - \frac{z_c}{L_c} \right)^2 \qquad (3.5.35)$$

donde la velocidad $\bar{v}_v$ es la velocidad promedio a la entrada del condensador.

En el condensador, el factor de corrección del perfil de velocidad varía, desde 0.0, correspondiente a un perfil de velocidades parabólico, hasta 0.665. correspondiente a un perfil de velocidades de coseno cuadrado.

Para $Re_{r,c}$ < -2.25, la recuperación de presión en el condensador se toma como un porcentaje de la presión inercial a la entrada del condensador. Este porcentaje está determinado por la correlación de Joe Kemme [11]:

$$\% = (-\mathrm{Re}_{r,c} - 2.0) / \left[-1.23 \mathrm{Re}_{r,c} + (2L_e + 4L_a)/L_c \right] \qquad (3.5.36)$$

La recuperación de presión inercial es entonces:

$$\Delta P_i = \%\rho_v \bar{v}_v^{\,2} \qquad (3.5.37)$$

donde $\bar{v}$ es la velocidad promedio a la entrada del condensador.

En el límite, como $Re_{r,c}$ se aproxima al infinito negativo, el porcentaje de la presión inercial recuperada se aproxima a 81.3 [11].

3.5.4. Caída de Presión del Líquido, ΔP_l.

La distribución de presión del líquido en función de la posición axial se aprecia en la figura 39. El gradiente de presión del líquido es también el resultado de los efectos combinados de las fuerzas inerciales y viscosas.

El incremento en el gradiente de presión en la sección del evaporador no es lineal, debido a la inyección de fluido de trabajo al interior de la corriente de vapor con la presión del líquido incrementándose a lo largo del caloducto moviéndose desde el evaporador hacia el condensador.

Se tiene que las fuerzas viscosas en el líquido resultan en una caída de presión, dP_l / dx, los cuales se oponen al flujo capilar a través de la estructura capilar porosa.

Debido a que el gradiente de presión puede variar a lo largo de la longitud axial del caloducto, la caída de presión total del líquido puede ser determinada por integración del gradiente de presión en toda de la longitud del paso del flujo, o

$$\Delta P_l(x) = -\int_0^x \frac{dP_l}{dx} dx \qquad (3.5.38)$$

donde los límites de la integración son desde el final de la zona de evaporación (x=0) hasta el final del condensador (x=L) y $\frac{dP_l}{dx}$ es el gradiente de la presión de líquido resultante del arrastre por fricción. Este arrastre por fricción, debido a los esfuerzos cortantes, puede ser escrita como:

$$\frac{dP_l}{dx} = -\frac{2\tau_l}{\left(r_{h,l}\right)} \qquad (3.5.39)$$

donde τ_l es el esfuerzo cortante friccional en la interfaz líquido-sólido y $\left(r_{h,l}\right)$ es el radio hidráulico, definido como dos veces el área de sección transversal dividida por el perímetro húmedo.

En este punto, el número de Reynolds, Re_l, y el coeficiente de arrastre, f_l pueden ser introducidos como:

$$\mathrm{Re}_l = \frac{2\left(r_{h,l}\right)\rho_l v_l}{\mu_l} \qquad (3.5.40)$$

$$f_l = \frac{2\tau_l}{\rho_l v_l^2} \qquad (3.5.41)$$

donde v_l es la velocidad local del líquido, el cual está relacionado con el flujo local de calor por,

$$v_l = \frac{Q_{cap}}{\varepsilon A_w \rho_l h_{fg}} \qquad (3.5.42)$$

En esta expresión, A_w es el área de sección transversal de la estructura capilar, ε es la porosidad de la estructura capilar y h_{fg} es el calor latente de vaporización.

Combinando las ecuaciones se tiene la siguiente expresión:

$$\frac{dP_l}{dx} = \left(\frac{\left(f_l\,\mathrm{Re}_l\right)\mu_l}{2\varepsilon A_w \left(r_{h,l}\right)^2 h_{fg}\rho_l}\right) Q_{cap} \qquad (3.5.43)$$

Esta puede reescribirse como:

$$\frac{dP_l}{dx} = \left(\frac{\mu_l}{K A_w h_{fg}\rho_l}\right) Q_{cap} \qquad (3.5.44)$$

donde K es la permeabilidad, expresada como:

$$K = \frac{2\varepsilon\left(r_{h,l}\right)^2}{f_l \,\mathrm{Re}_l} \qquad (3.5.45)$$

Kay (1966) ha presentado un método para el calculo del producto número de Reynolds-factor de fricción para pasajes de flujo rectangular y anular. Estos métodos se presentan en forma gráfica en Apéndice G, figuras (a y b), respectivamente. Utilizando la relación de forma α, la cual es el ancho de la ranura dividida entre su profundidad, en un caloducto ranurado axialmente, el producto número de Reynolds-factor de fricción se puede determinar del Apéndice G, figura (a), para un amplio rango de tamaños de ranura [3].

La porosidad se conoce como la porosidad de volumen y puede definirse como la razón del volumen de poro V_{por} al volumen total V_{tot}, o

$$\varepsilon = \frac{V_{por}}{V_{tot}} = 1 - \frac{1}{4}\pi SNd \qquad (3.5.46)$$

donde S es la razón del volumen de líquido que llena el cuerpo al volumen total del cuerpo.

Para caloductos ranurados $V_{tot} = V_{por} = V_{ranura}$ suponiéndose el llenado total de las ranuras y por consiguiente $\varepsilon = 1$.

Para caloductos con geometría diferente al ranurado, ε, se define como la relación del fluido de trabajo en la estructura capilar al volumen total de la misma.

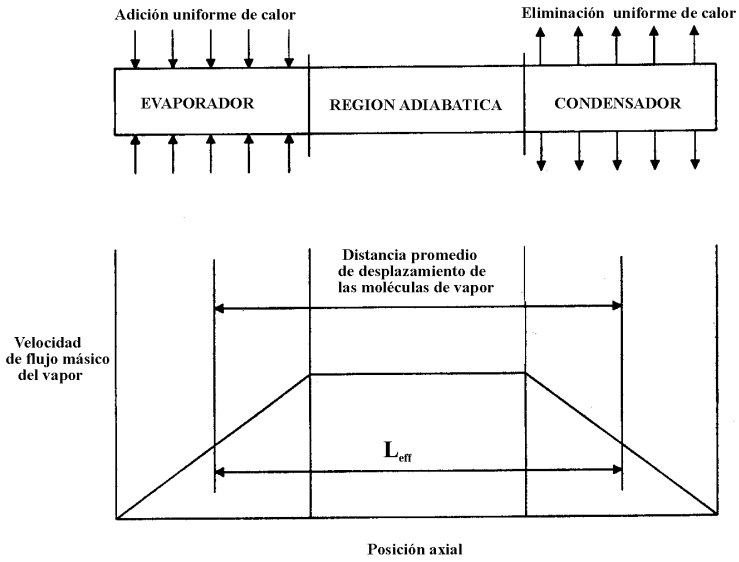
Para el cálculo de la caída de presión en la fase líquida es de especial interés la longitud efectiva, la cual se define, según la figura 42, como:

$$L_{eff} = 0.5L_e + L_a + 0.5L_c \qquad (3.5.47)$$

Se tiene para el radio hidráulico:

$$r_{h,l} = \frac{2w^2}{4w} \qquad (3.5.48)$$

Figura 42. Longitud efectiva para la adición y eliminación constante de calor [3]



para el caso de caloductos ranurados axialmente con profundidad y amplitud de ranura iguales y donde se considera igual a $r_{h,w}$.

En este caso se tiene también que el área de sección transversal total de la estructura capilar estará dada por:

$$A_w = N \cdot w^2 = \frac{\pi(d_i^2 - d_v^2)}{4} \qquad (3.5.49)$$

donde para caloductos ranurados

$$d_i = d_{vapor} + 12 d_{alambre} \qquad (3.5.50)$$

y para mallas

$$d_i = d_v + 2(n_{capas} d_w + n_{espacios} d_w) \qquad (3.5.51)$$

Finalmente, para x=L y con la ecuación 3.5.44, la caída de presión del líquido puede determinarse mediante:

$$\Delta P_l = \left(\frac{\mu_l}{K A_w h_{fg} \rho_l} \right) Q_{cap} L_{eff} = \frac{64}{\mathrm{Re}_{D_{h,l}}} \frac{L_{eff}}{D_{h.l}} \left(\frac{1}{2} \rho_l v_l^2 \right) \qquad (3.5.52)$$

para un caloducto axialmente ranurado [3,5].

De forma similar, el cálculo de la caída de presión dentro de la estructura capilar mediante la ley de Darcy se determina por:

$$\Delta P_l = -\frac{\nu_l \dot{m}_l L}{K A_w} \qquad (3.5.53)$$

donde ν_l, es la viscosidad cinemática, igual a $\left(\frac{\mu_l}{\rho_l}\right)$.

La permeabilidad, K, cuantifica el flujo de líquido que pasa a través del medio poroso. En general, esta puede calcularse mediante:

$$K = \frac{\varepsilon D_h^2}{32} \qquad (3.5.54)$$

con el diámetro hidráulico definido por:

$$D_{h,(l,v)} = \frac{4A_{(l,v)}}{Pe} \qquad (3.5.55)$$

D_h se ha derivado para una diversidad de estructuras capilares y configuraciones de canales de flujo de líquido e incorporado en una expresión para el cálculo de permeabilidad.

La caída de presión en caloductos con arterias, ranurados, anulares o acanalado se calcula utilizando la ecuación de flujo laminar de Hagen-Poiseuille con un radio hidráulico apropiado [11].

3.5.5. Caída de Presión Hidrostática Normal.

El gradiente de presión hidrostática que ocurre en caloductos básicamente se debe a fuerzas gravitacionales dentro de las fases de vapor y líquida. En caloductos, con el evaporador localizado abajo del condensador, las fuerzas de conjunto gravitacionales resultan en un incremento lineal de la contribución de presión en la fase líquida y en un decremento lineal de la contribución de presión en la fase de vapor.

Es importante notar el efecto de las fuerzas de conjunto gravitacional sobre el punto de secado al interior de la sección transversal de la configuración del caloducto. Dado que algunos gradientes de presión hidrostática existen en un caloducto, incluso en uno operando en una orientación horizontal, el primer punto que experimenta secado de la estructura capilar ocurre, regularmente, en el extremo del evaporador lo más alejado del condensador y a la más alta elevación.

La caída de presión hidrostática normal, ΔP_{+}, ocurre únicamente en caloductos en los cuales es posible la comunicación circunferencial de líquido en la estructura capilar. La caída de presión hidrostática normal se puede expresar como:

$$\Delta P_{+} = \rho_l g d_v \cos\psi \qquad (3.5.56)$$

3.5.6. Caída de Presión Hidrostática Axial.

La caída de presión hidrostática axial, $\Delta P_{\Downarrow}$, resulta de la componente del conjunto de fuerzas que actúan a lo largo del eje longitudinal. Esta puede determinarse mediante la expresión dada por:

$$\Delta P_{\Downarrow} = \rho_l g L sen\psi \qquad (3.5.57)$$

donde ψ es el ángulo de inclinación del caloducto y L es longitud total del caloducto.

En un ambiente gravitacional, la presión hidrostática axial puede favorecer o impedir el proceso de bombeo capilar dependiendo de sí la inclinación del caloducto promueve o impide el flujo de líquido hacia el evaporador (i.e., el evaporador se encuentra abajo o arriba del condensador). En condiciones de gravedad cero, las caídas de presión hidrostáticas normal y axial pueden despreciarse debido a la ausencia de fuerzas [3].

La caída de presión hidrostática causada por la carga hidrostática del líquido está dada por:

$$\Delta P_z = \rho_l g Z sen\theta \qquad (3.5.58)$$

En esta ecuación, Z no siempre corresponde a la longitud total del caloducto. En general, Z es igual a la longitud de la columna de líquido sobre el punto húmedo [11].

En todas las ecuaciones anteriores de este apartado, donde se consideran tanto condiciones de estancamiento como el Número de Mach, se manejan expresiones como:

$$\frac{P_0}{P_v} = 1 + \frac{\gamma_v}{2} M_v^2 \qquad (3.5.59)$$

$$\frac{T_0}{T_v} = 1 + \frac{\gamma_v - 1}{2} M_v^2 \qquad (3.5.60)$$

$$\frac{\rho_0}{\rho_v} = \frac{1 + (\gamma_v / 2) M_v^2}{1 + (\frac{\gamma_v - 1}{2}) M_v^2} \qquad (3.5.61)$$

$$M_v = \frac{\bar{v}_v}{C} = \frac{\frac{\dot{m}}{A_v}}{\sqrt{\gamma_v g_c R_v T_v}} \qquad (3.5.62)$$

donde $$C = (\gamma_v g_c R_v T_v)^{\frac{1}{2}} \qquad (3.5.63)$$

$$\gamma_v = \frac{Cp}{Cv} \qquad (3.5.64)$$

y $$R_V = \frac{\bar{R}}{PM} \qquad (3.5.65)$$

Algunas más son:

$$P_v - P_t = \rho_v \bar{v}_2 \qquad (3.5.66)$$

$$y = y_1 + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}(y_2 - y_1) \qquad (3.5.67)$$

El cálculo del flujo másico se realiza mediante el empleo de la ecuación 3.5.68., donde se tiene una igualdad de flujo entre los caudales de vapor y de líquido de retorno, esto es, $\dot{m} = \dot{m}_l = \dot{m}_v$.

$$\dot{m} = \frac{\rho_l^2 g L K A_w \pi \rho_v r_v^4}{L_{eff}(\mu_l \pi \rho_v r_v^4 + 8\mu_v \rho_l K A_w)} \qquad (3.5.68)$$

Con la anterior finalmente, se puede determinarse el calor transferido por el caloducto mediante el empleo de la ecuación 3.5.7.

Finalmente la ecuación 3.5.1., permite determinar el cálculo del límite de transporte de calor capilar, Q_{cap}, mediante la sustitución de los valores de las diferentes caídas de presión. Se corrobora la suposición que se haya hecho en el número de Reynolds para avalar el resultado obtenido de Q_{cap}.

Omitiendo la caída de presión a través de la transición de fase y el gradiente de presión inercial, el balance de presión asociado con la limitación capilar en un caloducto axialmente ranurado puede expresarse como:

$$\Delta P_{c,m} = \Delta P_v + \Delta P_l + \Delta P_+ + \Delta P_{\Downarrow} \qquad (3.5.69)$$

Todas las expresiones contempladas en este apartado constituyen la base para el desarrollo del programa de cómputo que nos permitirá determinar y analizar paramétricamente cada modelo de caloducto para cada limitación, incluyendo los perfiles de temperatura y presión teóricos del vapor y del líquido.

4. Desarrollo del Programa de Cómputo Calca.

En este apartado se describen el algoritmo de cálculo, los diagramas de flujo, algunas consideraciones de las propiedades de los fluidos de trabajo y materiales de fabricación, así como la información requerida de entrada y los resultados que arroja el programa de cómputo CALCA.

El programa CALCA, cálculo en caloductos, se escribió en el lenguaje de programación Visual Basic con entradas interactivas que facilitan las variaciones paramétricas para optimizar el diseño de caloductos.

El programa CALCA durante el funcionamiento en estado estacionario de un caloducto tiene como propósitos fundamentales, la determinación de:

1) Los perfiles de presión y de temperatura a lo largo del caloducto y,

2) Los límites de funcionamiento.

Para el desarrollo de la metodología se pensó en el cálculo, análisis y caracterización de caloductos axialmente ranurados y otras geometrías del capilar mediante un programa de cómputo que permita obtener los límites de operación y el comportamiento y perfil térmico del dispositivo.

Esta metodología comprende básicamente el cálculo de los siguientes límites de funcionalidad:

Límite Viscoso.

Límite Sónico.

Límite de Arrastre.

Límite de Ebullición.

Límite Capilar.

El cálculo de los límites de funcionamiento se realiza en base a una temperatura especifica de operación y asumiendo como constante la condición de suministro de energía.

CALCA predice los límites de funcionamiento en función de la temperatura de salida del evaporador y calcula los perfiles de presión y temperatura a lo largo del eje del caloducto.

El modelo está diseñado en base a un balance de presiones en las direcciones de flujo del líquido y del vapor. Este balance de presiones define el límite de la estructura capilar o límite viscoso, dependiendo de sí la capacidad de bombeo de la estructura capilar o la presión de estancamiento delimitan la presión limitante disponible.

El programa utiliza un modelo hidrodinámico para un caloducto que es capaz de manipular el retorno del líquido en las tres primeras configuraciones mostradas en la figura 26.

El programa incorpora una subrutina de propiedades del fluido para agua, metales alcalinos como sodio y potasio, litio, y algunos otros compuestos orgánicos. Se pueden adicionar al

programa algunos otros fluidos de trabajo conociendo sus datos de propiedades termodinámicas e hidrodinámicas [11].

4.1. Algoritmo de Cálculo y Diagramas de Flujo.

Mediante el empleo de las diferentes formulaciones y modelos matemáticos expresadas en el apartado 3, y detallados en apéndice L, se procedió a realizar el algoritmo de cálculo del programa de cómputo CALCA.

Con la descripción del algoritmo de cálculo del programa se pretende dar a conocer a detalle cada una de las funciones de las diversas rutinas que lo conforman. Se intenta poner de manifiesto las posibilidades de cálculo y los alcances de la información con el fin de entender y manejar el programa para poder realizar las variaciones paramétricas adecuadas y asociarlas correctamente con los resultados arrojados por el programa CALCA.

En la figura 43, se presenta el algoritmo de cálculo de los límites de funcionamiento en caloductos, CLFC.

En el se puede apreciar la secuencia para el cálculo de los límites de funcionamiento, describe la ruta que se sigue en las operaciones matemáticas y el orden en que la información se debe recabar.

Se describe únicamente el Algoritmo para el cálculo de los límites de funcionamiento por ser estos el análisis medular del presente trabajo.

De igual manera, se muestra el orden en que los resultados son proporcionados por el programa CALCA de acuerdo a la información que se le va proporcionando y que el programa mismo pide.

En apéndice M, se muestran las abreviaturas de las subrutinas y rutinas empleadas en el programa CALCA.

Figura 43. Diagrama de flujo del algoritmo de cálculo.

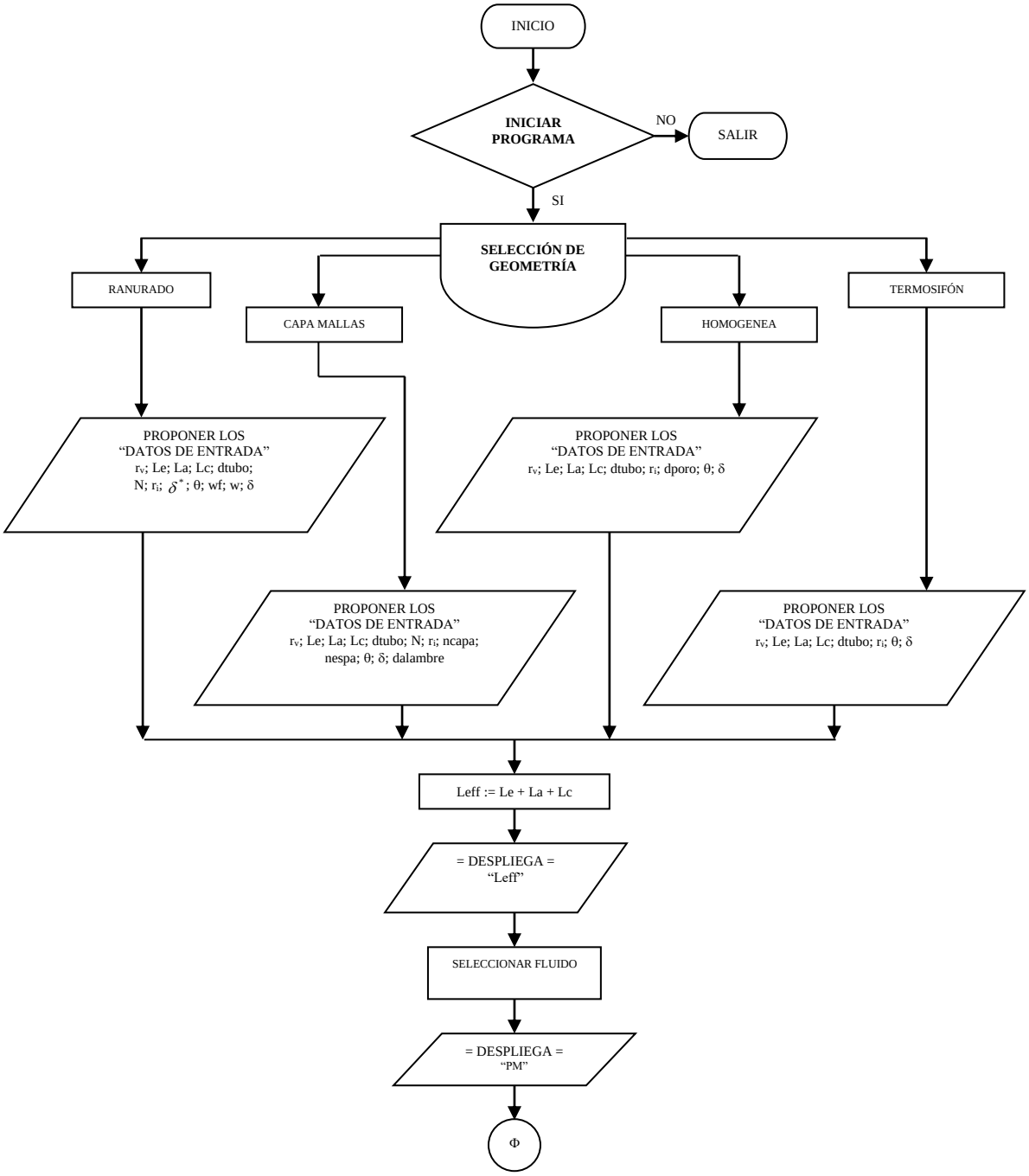


Figura 43. (Continuación). Diagrama de flujo del algoritmo de cálculo.

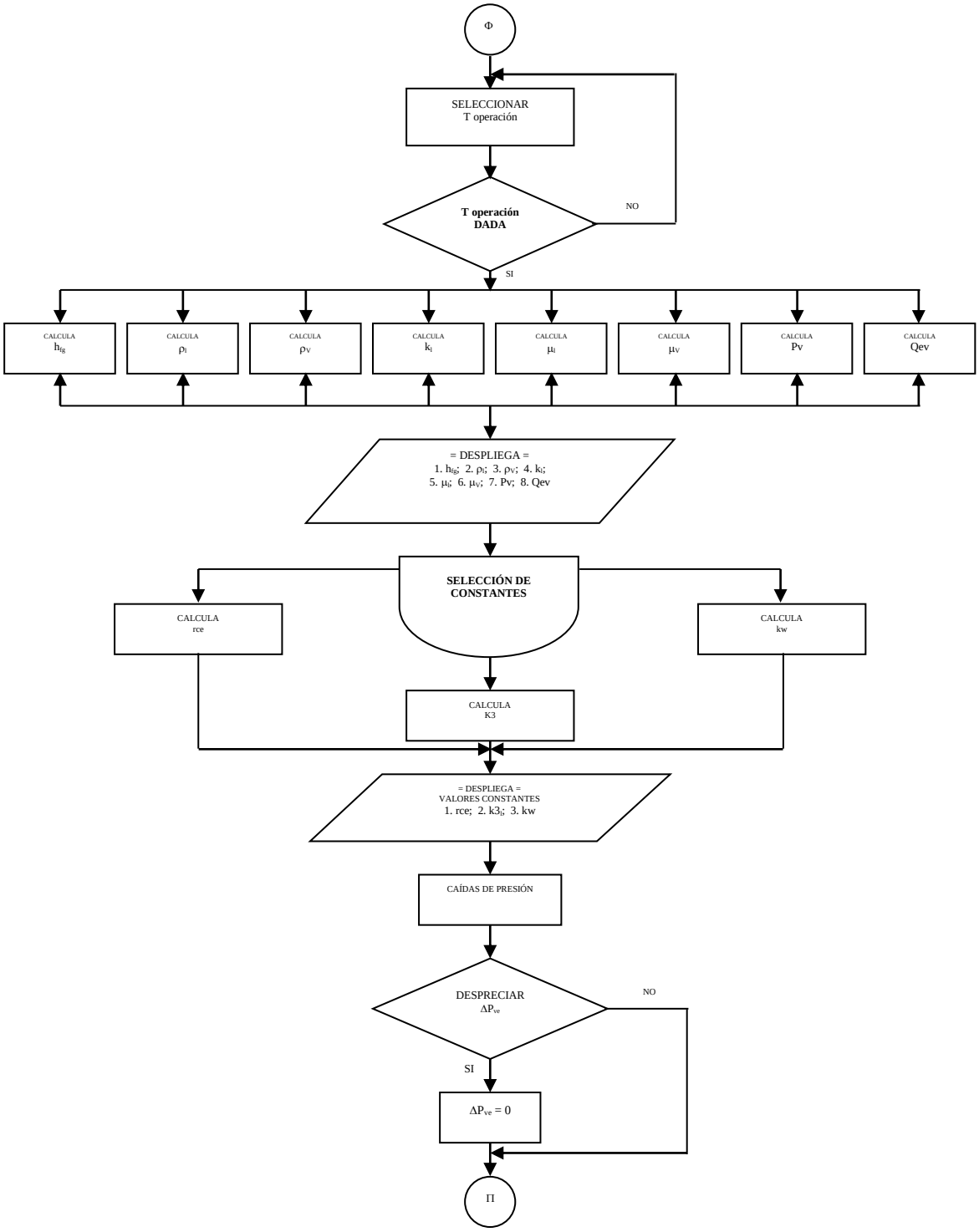


Figura 43. (Continuación). Diagrama de flujo del algoritmo de cálculo.

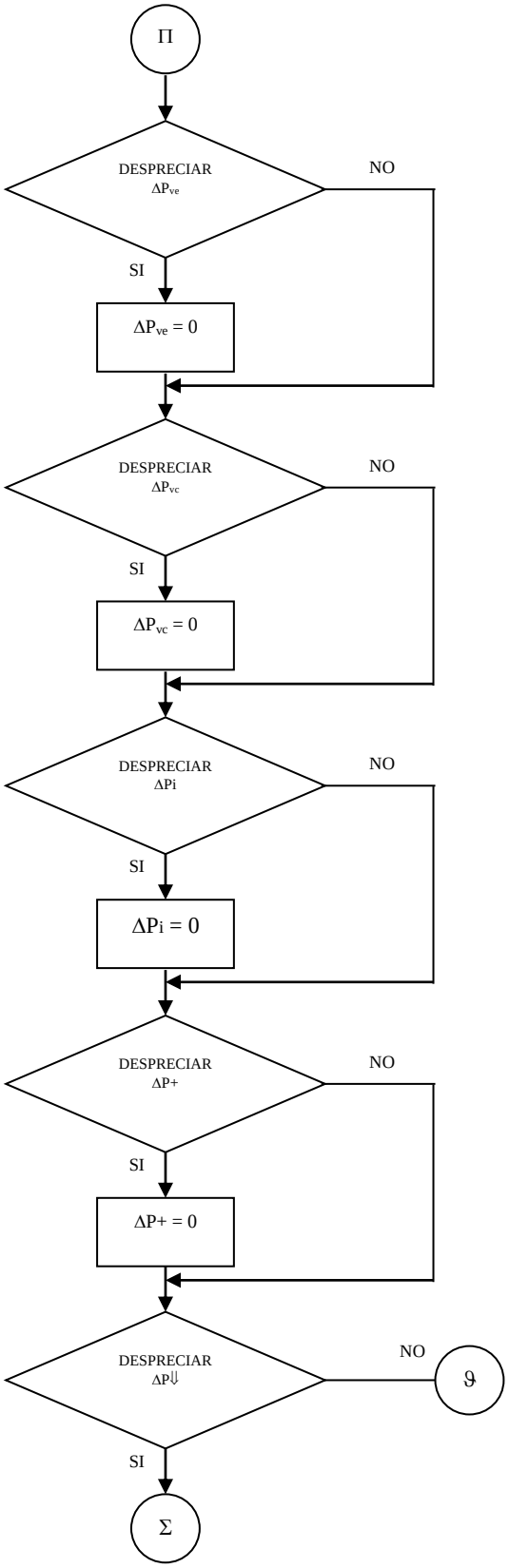


Figura 43. (Continuación). Diagrama de flujo del algoritmo de cálculo.

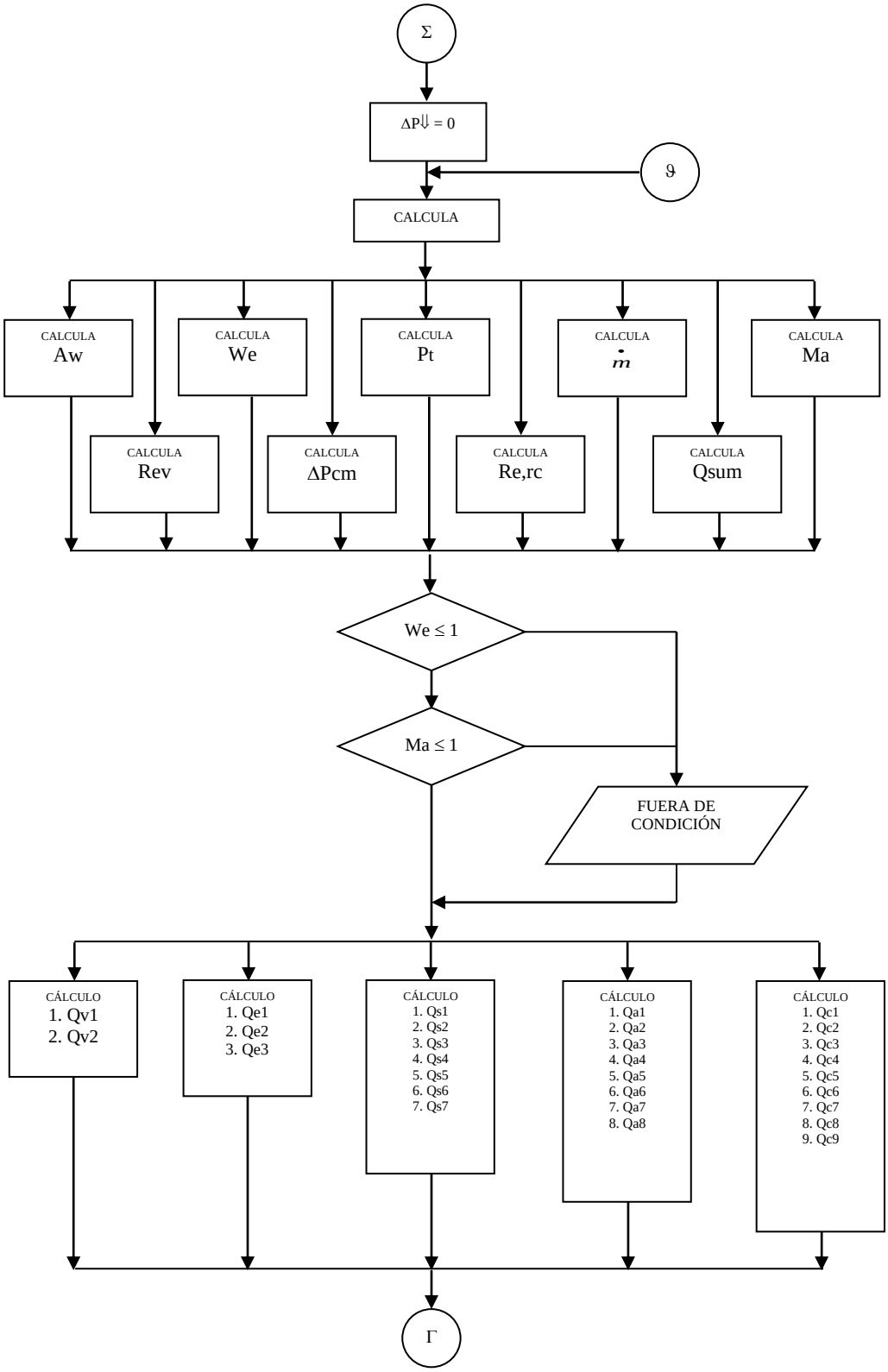
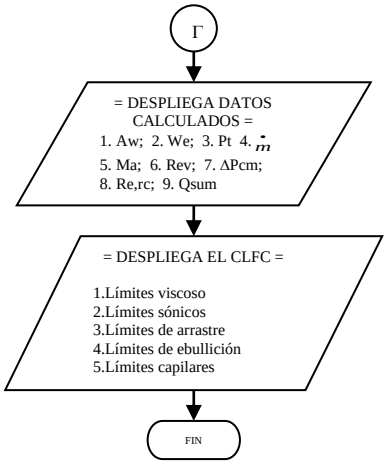


Figura 43. (Continuación). Diagrama de flujo del algoritmo de cálculo.



4.1.1. Cálculo de los Límites de Funcionamiento en Caloductos.

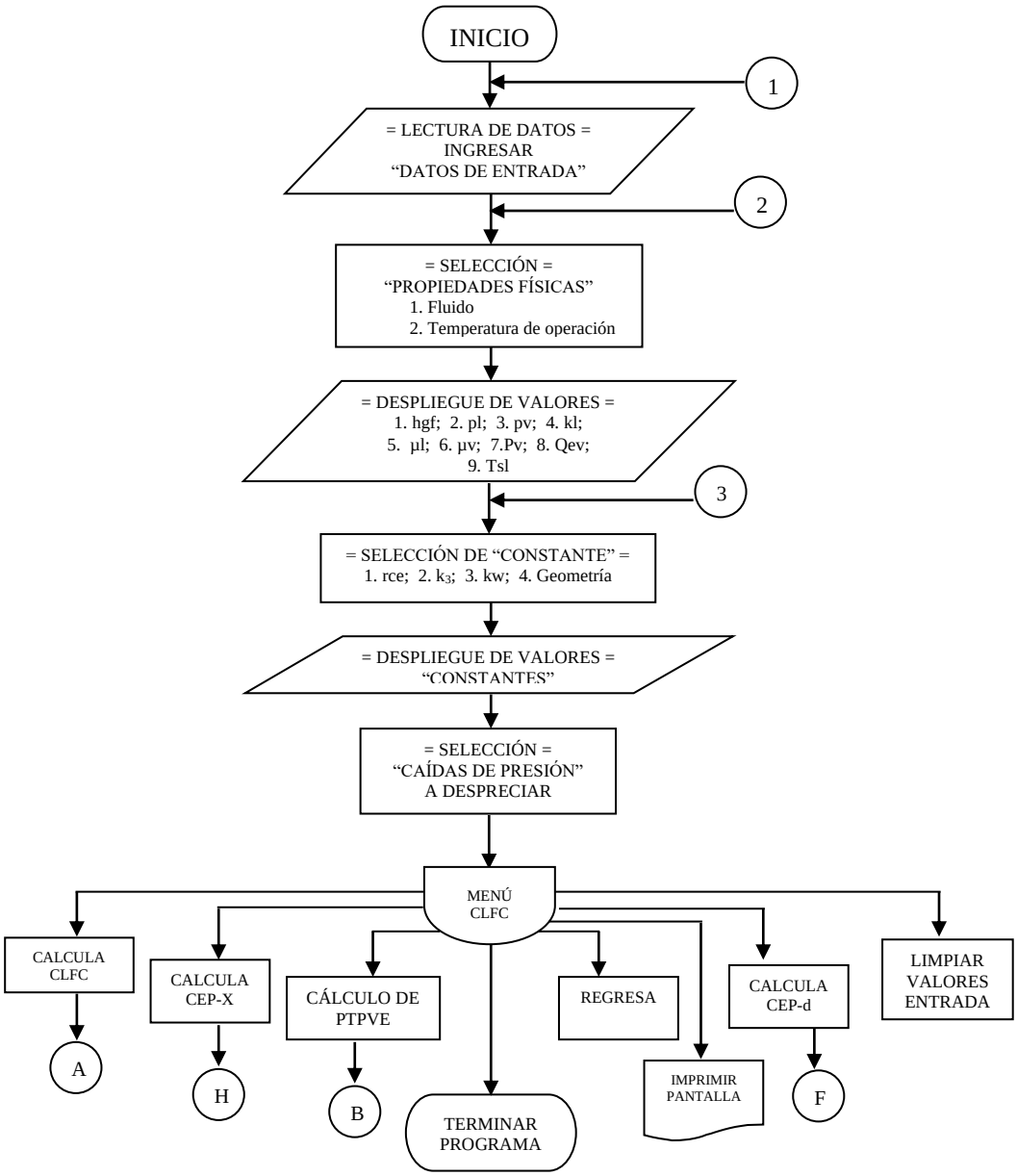
El programa de cómputo CALCA, inicia mediante la rutina “acceso al programa” (AP); rutina que da inicio a dos subrutinas previas al llamado menú principal o rutina “cálculo de los limites de funcionamiento en caloductos” (CLFC).

Se inicia el programa CALCA, dando paso a dos subrutinas. La primera permite seleccionar la geometría que se pretende trabajar para así pasar a la segunda que pide la información de los datos de entrada principales para la geometría seleccionada, “selección de geometría” (SG) y “datos de entrada” (DE), respectivamente.

El programa CALCA, incorpora la rutina principal denominada CLFC en la que se introducen, en cuatro secciones bien definidas, los llamados datos de entrada, las propiedades físicas del fluido de trabajo y su temperatura de operación, la geometría y algunas constantes del caloducto y, mediante un botón de acceso, las caídas de presión que se considere pueden ser o no despreciadas, figura 44.

Se integran a estas tres secciones más; la primera, estructurada por un conjunto relevante de datos calculados, la segunda conformada por un conjunto de valores calculados para cada uno de los límites de funcionamiento del caloducto y una tercera donde se muestran algunos botones de acceso que permiten ejecutar o complementar esta primera rutina con otras adicionales.

Figura 44. Diagrama de flujo de presentación de la rutina CLFC en el programa de cómputo CALCA.



Dentro de los datos de entrada se encuentran aquellos valores que tienen que ver con las dimensiones, secciones, la estructura capilar, la geometría, el posicionamiento y la máxima capacidad de transporte del caloducto. Estos datos son rv (radio ocupado por el vapor), Le (Longitud efectiva del caloducto), La (Longitud de la zona adiabática), Lc (Longitud del condensador), dtubo (Diámetro interior del tubo), dporo (Diámetro de poro capilar), N (Número de la malla o de ranuras), ncapa (Número de mallas), nespa (Número de espacios entre mallas), ri (Radio interior), δ^* (Profundidad de ranura), dalam (Diámetro de alambre),

wf (Amplitud entre ranuras) , Teta (Angulo de inclinación), w (Ancho de ranura), Ts (Temperatura de saturación) y δ (Espesor promedio de película).

La variación de estos parámetros se puede realizar con el programa CALCA en cualquier momento de acuerdo a las necesidades de diseño.

Dentro del módulo llamado propiedades físicas se incorpora una base de datos con un total de diez fluidos de trabajo empezando con el Agua y seguido por el Heptano, Amoniáco, Nitrógeno, Sodio, Litio, Metanol, Acetona, Potasio y el Etanol y de entre los cuales debe seleccionarse el fluido con que se trabaja en el caloducto. Esta base se puede ampliar con más fluidos.

La temperatura de operación se puede seleccionar dentro del rango especificado para cada fluido o bien por introducción manual, hasta el primer decimal, para cualquier valor no especificado. Antes de especificar cualquier valor de la temperatura primeramente deberá seleccionarse el fluido de trabajo. A cada valor de temperatura, de forma inmediata y a través de una subrutina dentro de la rutina CLFC, se calculan la mayoría de las propiedades físicas requeridas para el cálculo de los límites de funcionamiento.

Entre las propiedades termodinámicas y de transporte que se requieren se encuentran: hfg (Calor latente), pl (Densidad del líquido), pv (Densidad del vapor), kl (Conductividad térmica del líquido), µl (Viscosidad del líquido), µv (Viscosidad del vapor), Pv (Presión del vapor), Qev (Calor específico del vapor) y Tsl (Tensión superficial del líquido).

El tercer módulo está estructurado por cuatro datos que se deben seleccionar. El primero es, rce (Relación de calores específicos) que, dependiendo del fluido de trabajo su vapor puede seleccionarse como Mono, Di o Poliatómico asignándose así el valor adimensional correspondiente o bien realizarse de forma manual.

El segundo, asigna un valor adimensional a k3 (Factor de corrección) dependiendo de la combinación material del caloducto-fluido de trabajo pudiéndose incluso asignarse de forma manual.

El tercer dato, introduce la kw (Conductividad térmica) para materiales como Aluminio, Latón, Cobre, Vidrio, Níquel, Acero templado, Acero inoxidable, Teflón y Aluminio 2024-T6; nueve

diferentes materiales con los que pueden fabricarse los caloductos. Por selección del material apropiado se asigna automáticamente el valor de kw e incluso la asignación manual del valor se es permitido.

El cuarto dato a introducir, desde la subrutina de inicio, permite trabajar algunas de las cuatro geometrías internas consideradas para el caloducto, el ranurado rectangular, capa de mallas, la homogénea y propiamente el llamado termosifón.

Todos los cálculos se efectúan a través de una subrutina dentro de la rutina CLFC.

Mediante la rutina "selección de las caídas de presión" (SCP), el botón de Caídas de Presión permite despreciar o no cualesquiera de las pérdidas de presión ΔP_{ve} (Caída de presión en el evaporador), ΔP_{vc} (Caída de presión en el condensador), ΔP_i (Caída de presión inercial), ΔP_+ (Caída de presión hidrostática normal) y $\Delta P_{\Downarrow}$ (Caída de presión hidrostática axial), dependiendo de la geometría y de sí pudieran o no presentarse estos fenómenos en el caloducto.

El programa considera no despreciable las pérdidas de presión si esta opción no se selecciona. Para considerar despreciable cualquiera de estas primeramente debe seleccionarse y darse por aceptada.

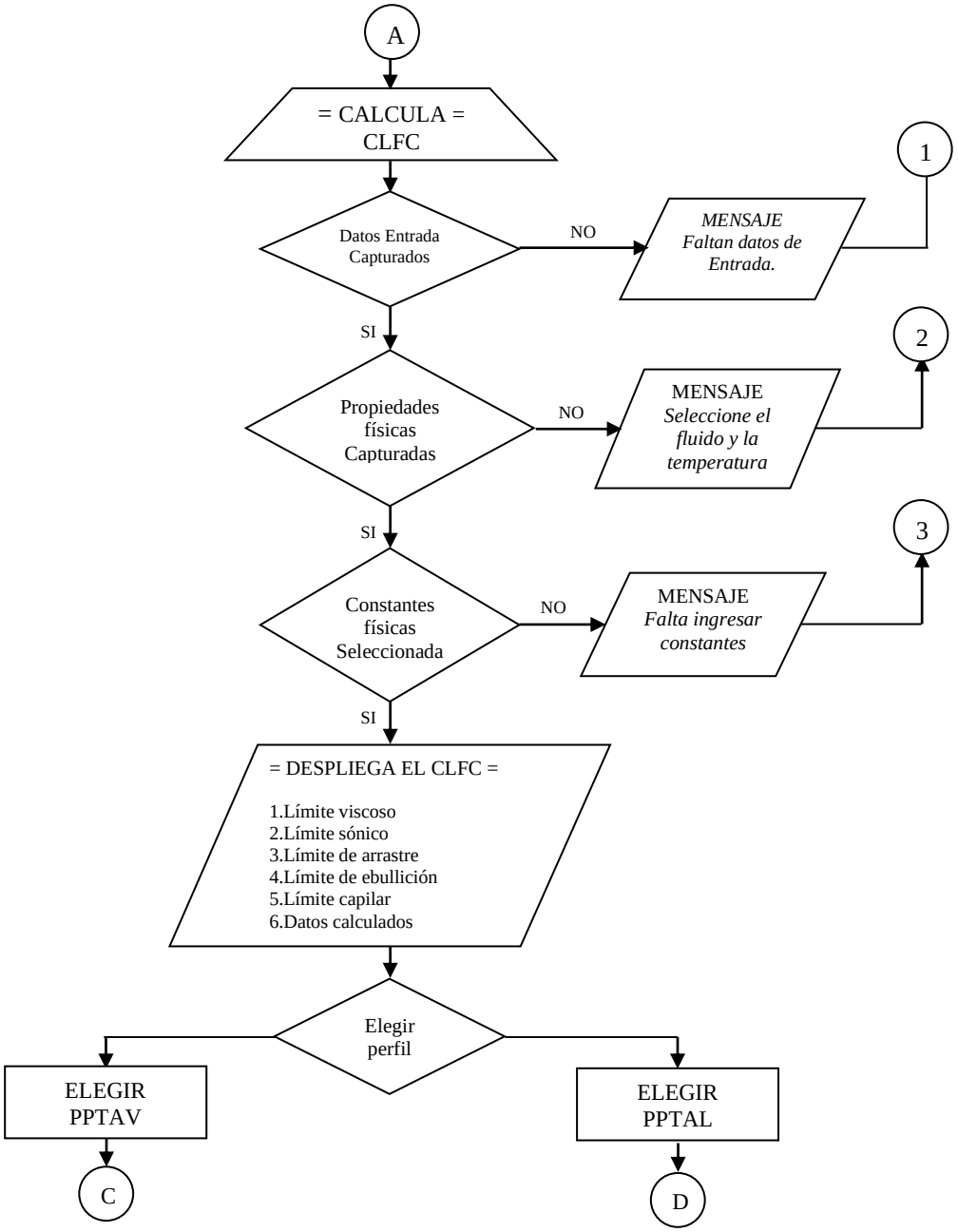
Aquí se dan dos subrutinas más para el "cálculo del espesor de película-d" (CEP-d) y para el "cálculo del espesor de película-X" (CEP-X), para cuando el diámetro del tubo permanece constante y para cuando el espesor adimensional de película permanece constante, respectivamente.

La subrutina de datos relevantes calculados, dentro de la rutina CLFC, permite obtener información acerca de la Leff (Longitud efectiva), Tv (Temperatura del vapor), Pm (Peso molecular), Aw (área de sección transversal de la estructura capilar), Weber (Número de Weber), Pt (Presión de trabajo), $\dot{m}$ (Flujo másico del vapor), Mach (Número de Mach), Rev (Número de Reynolds), ΔP_{cm} (Máxima presión capilar), Re,rc (Reynolds radial en el condensador) y Qsum (Calor suministrado).

La rutina de CLFC, figura 45, permite el cálculo de dos valores para el límite viscoso, tres valores para el límite de ebullición, ocho valores para el límite de arrastre, seis valores para el

límite sónico y nueve valores para el límite capilar. Siendo esta rutina la intención básica del programa CALCA, permite analizar el comportamiento de cada uno de los modelos matemáticos utilizados en el cálculo de los diferentes límites de funcionamiento o límites máximos de transporte de calor que se puede presentar en el caloducto.

Figura 45. Diagrama de flujo de la rutina CLFC para el cálculo de los límites de funcionamiento.



Con la variación paramétrica en las entradas interactivas de las subrutinas datos de entrada, propiedades físicas y constantes se puede utilizar el programa CALCA para el diseño de caloductos mediante el análisis e interpretación de la información que arroje la rutina CLFC.

Mientras que todos los valores de los límites de funcionamiento calculados, por posicionamiento del cursor en el campo del valor dado, muestran las unidades en que se dan, oprimiendo los botones “Ec” se tiene acceso al modelo matemático utilizado para el cálculo respectivo

La rutina CCLFC indica cuando alguno de los modelos matemáticos utilizados para el cálculo de los límites de funcionamiento ha violado alguna condición o restricción para su uso mediante el sombreado en color rojo del campo donde aparece el valor del límite. Oprimiendo sobre el campo del valor del límite, la rutina permite visualizar la condición matemática que no debe ser violada.

La ultima sección muestra algunos botones de acceso, entre los que tenemos a:

Calcula, que permite ejecutar la rutina CLFC una vez que se han introducido los datos de entrada, propiedades físicas, caídas de presión y constantes.

Imprimir, acceso que lleva a la subrutina para la impresión de la carátula tal como se ve en la pantalla.

Perfiles de Tl y Pl analítica, acceso que lleva a la rutina para el cálculo de los “perfiles de presión y temperatura analíticos del líquido” (PPTAL) o fluido de trabajo. Permanece desactivado mientras no se ejecute la subrutina Calcula.

Perfiles de Tv y Pv Analíticas, acceso que lleva a la rutina para el cálculo de los “perfiles de presión y temperatura analíticos del vapor” (PPTAV) del fluido de trabajo. Permanece desactivado mientras no se ejecute la subrutina Calcula.

Perfiles de Tv y Pv Experimentales, acceso que lleva a la rutina para el cálculo de los “perfiles de temperatura y presión de vapor experimentales” (PTPVE); rutina donde se efectúa el cálculo de los flujos de calor suministrado y rechazado y el perfil de presiones y temperaturas del vapor a partir de datos experimentales.

d constante, acceso que lleva a la subrutina “cálculo del espesor de película-d” (CEP-d) para cuando el diámetro del tubo permanece constante.

X constante, acceso que lleva a la subrutina “cálculo del espesor de película-x” (CEP-X), para cuando el espesor adimensional de película permanece constante.

Limpiar, acceso que permite poner al inicio a la rutina de tal manera que se puedan ingresar datos nuevos.

Terminar, acceso que finaliza el programa.

El botón Regresa, permite regresar a la selección inicial del tipo de geometría que se desea trabajar.

Todas las abreviaturas y los campos con valores numéricos en los datos de entrada, de cada dato relevante, de cada propiedad física y de las constantes calculados, por posicionamiento del cursor en ellos, señalan los nombres de las variables introducidas o propiedades calculadas, así como las unidades en que deben introducirse o se dan; se señala incluso si son adimensionales.

4.1.2. Cálculo del Perfil de Presiones y Temperaturas Analíticos del Vapor.

La rutina llamada PPTAV, figura 46, mediante entradas interactivas subdivide cada una de las secciones del caloducto, la de evaporación, la adiabática y la de condensación. Realiza el cálculo analítico de la pérdida de presión (Δ Pv), la presión (Pv_x) y la temperatura (Tv_x) del vapor en equilibrio con su líquido en cualquier posición axial (X), la temperatura de saturación al inicio de la zona adiabática (Tsa) y la temperatura de saturación al final del condensador (Tsc).

La rutina toma el valor de la temperatura de saturación al inicio de evaporador (Tse) y el tamaño de las zonas de evaporación, adiabáticas y de condensación de la rutina CLFC.

La rutina permite seleccionar directamente o de forma manual el número de subdivisiones, hasta veintisiete, para cada una de las secciones del caloducto que finalmente representan los puntos donde se leen temperaturas con termopares.

La rutina presenta los resultados en tres grupos de columnas bien definidas, una por cada sección, a su vez subdivididas en cuatro columnas más. Dentro de cada zona, la primera columna representa la posición axial (X) o el punto de análisis y cada valor es determinado por

la rutina de acuerdo a las subdivisiones seleccionadas. En las segunda y tercera columnas la rutina proporciona la pérdida de presión (Δ Pv) y la presión (Pv_x) del líquido en la posición axial (X).

En la cuarta columna, la rutina determina la temperatura del líquido (Tv_x) en la posición axial (X) a partir del valor obtenido de la presión (Pv_x), en el mismo punto (X).

Finalmente, la rutina PPTAV se vincula con otras rutinas o subrutinas a través de los botones de acceso:

Calcula intervalos, permite ejecutar la rutina PPTAV.

Imprimir, acceso que lleva a la subrutina de impresión de la carátula tal como se ve en la pantalla.

Gráfica Analítica, acceso que lleva a la rutina GAPPTV, figura 47, que permite realizar el gráfico de los valores obtenidos.

Regresar, acceso que ubica en la rutina CLFC.

Guardar Datos en Archivo, acceso que envía a una rutina que permite guardar en un directorio del disco duro la información experimental.

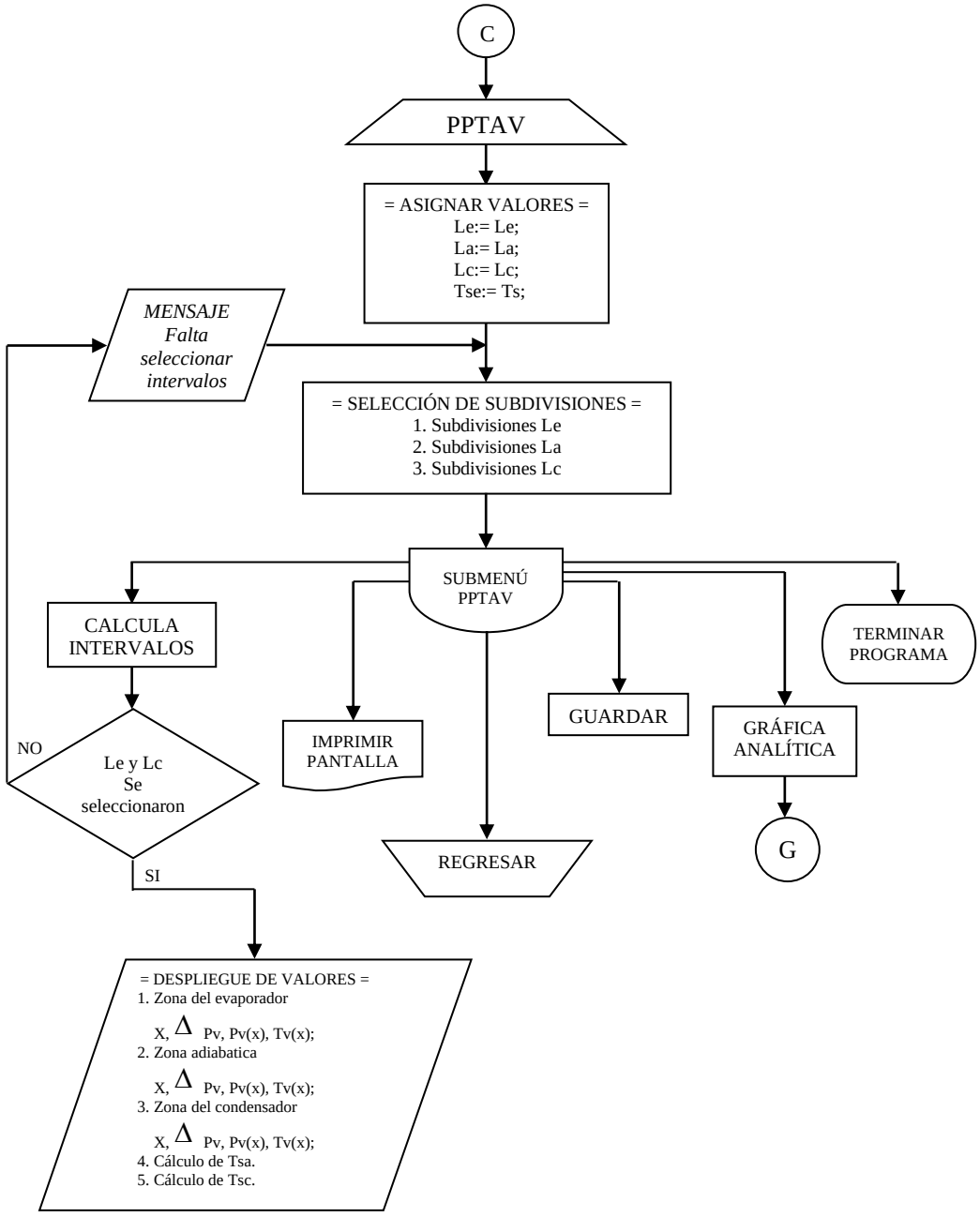
Terminar, acceso que finaliza el programa.

Todas las abreviaturas y campos de datos seleccionados o calculados, por posicionamiento del cursor en ellos, señalan el nombre de la variable, así como las unidades en que se dan.

Oprimiendo los botones (Δ Pv) y (Pv_x) la rutina permite visualizar el modelo matemático utilizado para el cálculo respectivo.

La rutina PPTAV da acceso mediante el botón Gráfica Analítica a la rutina GAPPTV donde se muestran algunas opciones de gráficado para las temperaturas y presiones calculadas teóricamente.

Figura 46. Diagrama de flujo de la rutina PPTAV.



La rutina GAPPTV, figura 47, permite:

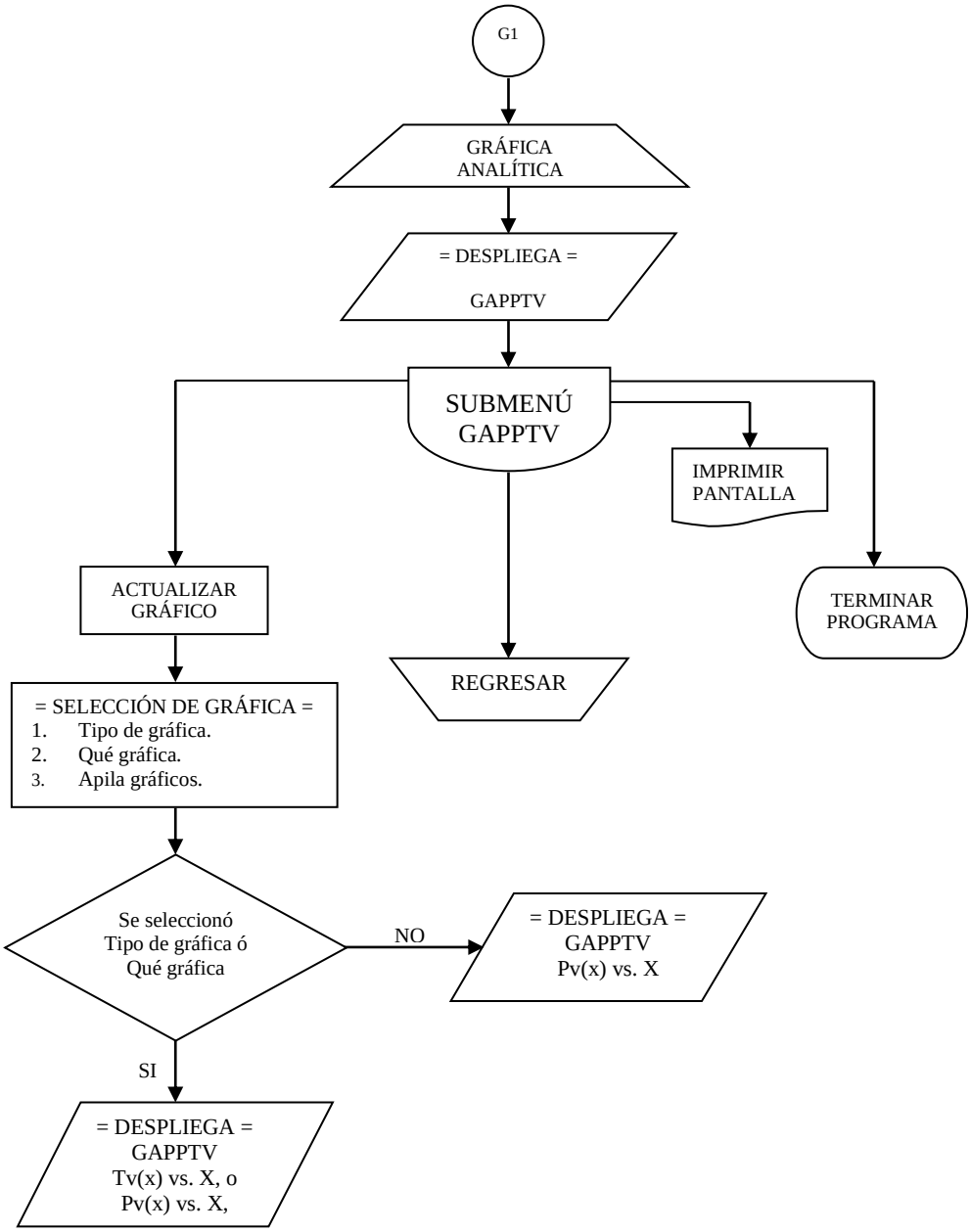
Actualizar gráfico oprimiendo el botón, una vez seleccionado el tipo de gráfica que se quiere visualizar y que se determina si se grafican o las presiones o las temperaturas.

Regresar a la rutina PPTAV.

Imprimir el gráfico tal y como aparece en la pantalla

Terminar el programa.

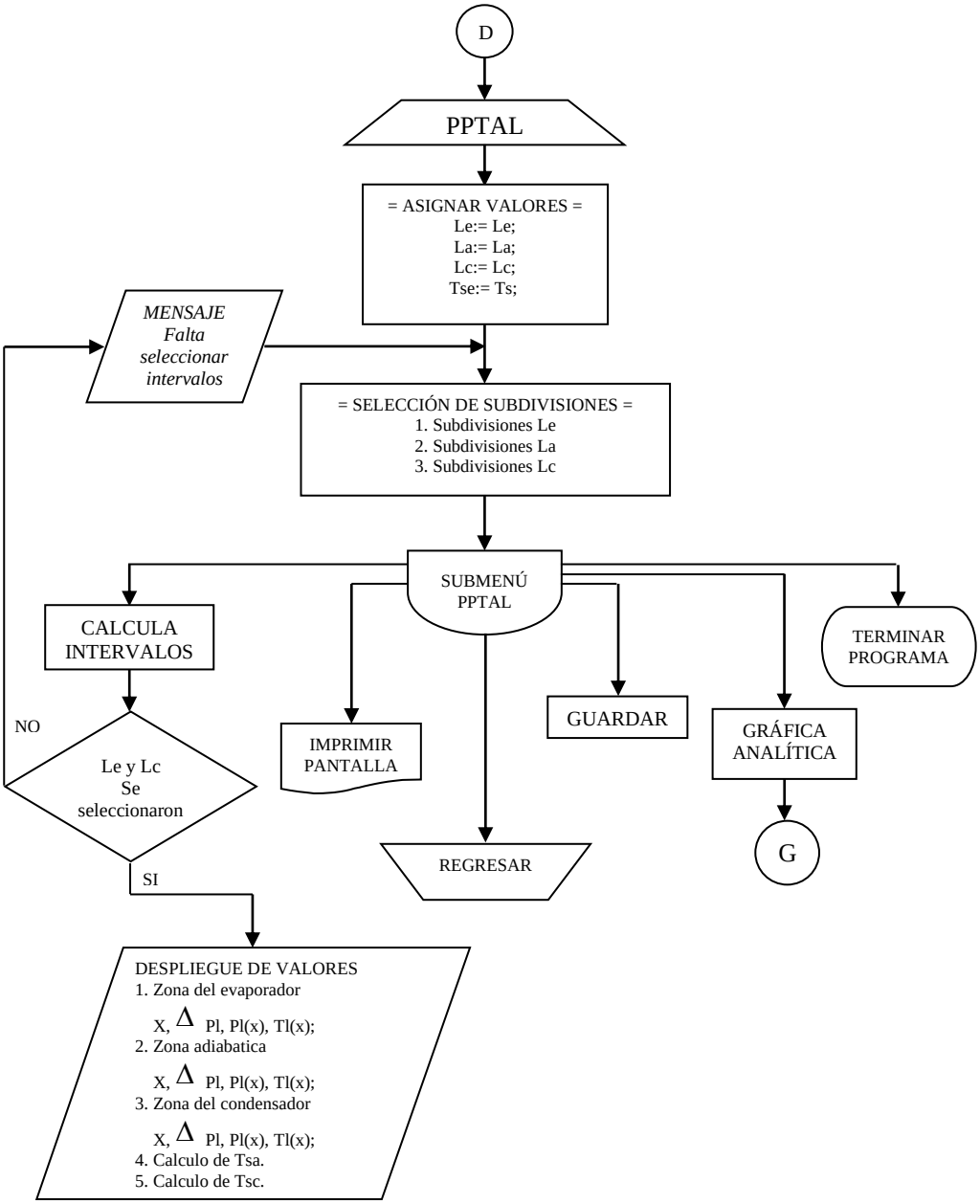
Figura 47. Diagrama de flujo de la rutina GAPPTV.



4.1.3. Cálculo del Perfil de Presiones y Temperaturas Analíticos del Líquido.

La rutina PPTAL, figura 48, trabaja de la misma forma que la rutina PPTAV con la variante de que en esta se analiza al líquido que se encuentra en equilibrio con su vapor y determina los valores de pérdida de presión (Δ Pl), la presión (Plx) y la temperatura (Tlx) del líquido, en cualquier posición axial (X).

Figura 48. Diagrama de flujo de la rutina PPTAL.



La rutina PPTAL da acceso mediante el botón Gráfica Analítica a la rutina GAPPTL, figura 49, donde se muestran algunas opciones de graficado para las temperaturas y presiones calculadas teóricamente.

La rutina GAPPTL permite:

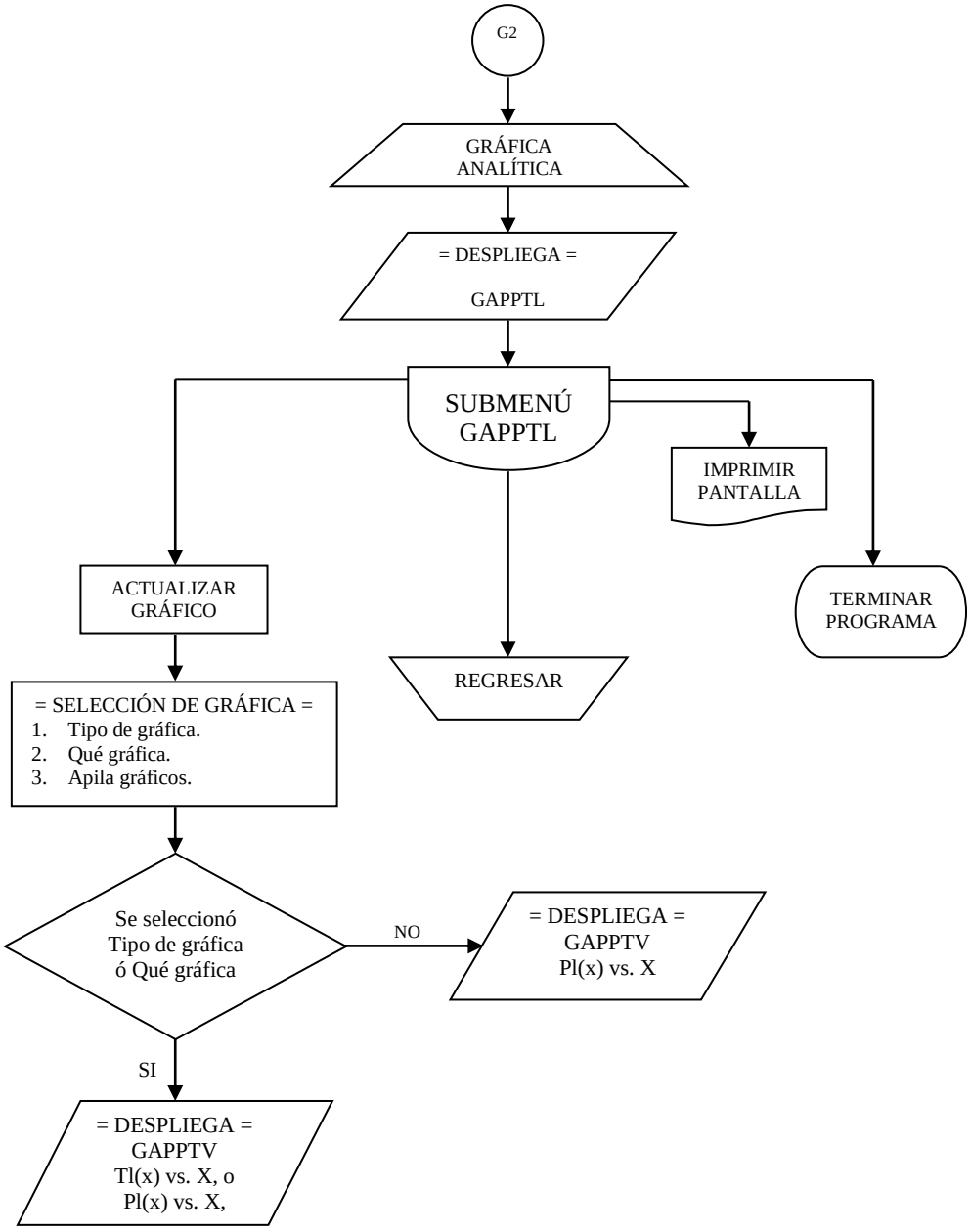
Actualizar gráfico, una vez seleccionado el tipo de grafica que se quiere visualizar y que determinamos si se grafican o las presiones o las temperaturas, oprimiendo el botón.

Regresar a la rutina PPTAL.

Imprimir el gráfico tal y como aparece en la pantalla

Terminar el programa.

Figura 49. Diagrama de flujo de la rutina GAPPTL.



4.1.4. Cálculo del Perfil de Temperaturas y Presiones Experimentales del Vapor.

La rutina CLFC mediante el botón Perfiles de Tv y Pv Experimentales permite acceder a la rutina PTPVE, figura 50, donde el calor suministrado (Qsum), el flujo másico del vapor ($\dot{m}$), el

calor rechazado (Qrech) y las presiones del vapor (Pv) se determinan a partir de datos obtenidos experimentalmente. Esta rutina permite nombrar tanto el número de corrida que se este realizando, por selección o por introducción manual, como el punto de análisis a lo largo del caloducto (X).

Se requiere conocer e introducir las variables de experimentales "Resistencia del dispositivo calefactor" (R) y Voltaje así como algunas de las propiedades y condiciones físicas de trabajo del fluido tales como el calor específico (Cp), el flujo másico ($\dot{m}_r$) y las temperaturas a la entrada (T in) y a la salida (T out) de la sección del condensador así como del "Calor latente de vaporización" (hfg) del fluido de trabajo. Para el cálculo de las presiones de vapor la rutina requiere de los valores de temperatura del vapor (Tv) medidos experimentalmente.

Finalmente podemos introducir el tiempo para cualquier referencia que se pretenda establecer con las temperaturas, Tv, y presiones, Pv, experimentales del vapor.

La rutina se vincula con otras rutinas o subrutinas, figura 51, a través de los botones de acceso:

Calcular calores, que permite ejecutar el cálculo de el calor suministrado (Qsum), el flujo másico del vapor ($\dot{m}$) y el calor rechazado (Qrech) una vez que se han introducido los datos solicitados.

Imprimir, acceso que lleva a la impresión de la carátula tal como se ve en la pantalla.

Guardar Datos en Archivo, acceso que envía a una rutina que permite guardar la información experimental en un directorio del disco duro y desde allí poder graficar con alguna aplicación como Excel.

Regresar, acceso que ubica en la rutina CLFC.

Limpiar valores, subrutina de acceso que permite poner al inicio a la rutina de tal manera que se puedan ingresar nuevos datos.

Grafica experimental, acceso que lleva a la rutina GPTPVE, figura 52, donde se realiza el gráfico de los valores experimentales y calculados.

Siguiente Pantalla, acceso que remite a una pantalla idéntica a la rutina de la figura 50 con el fin de introducir datos adicionales de temperatura tomadas experimentalmente, la figura 53, la que a su vez remite a la subrutina de la figura 54, similar a la figura 51, donde pueden llevarse a cabo algunas opciones más para el registro experimental como es la representación gráfica de valores, figura 55.

Figura 50. Diagrama de flujo de presentación de la rutina PTPVE y cálculo de los valores de Pv.

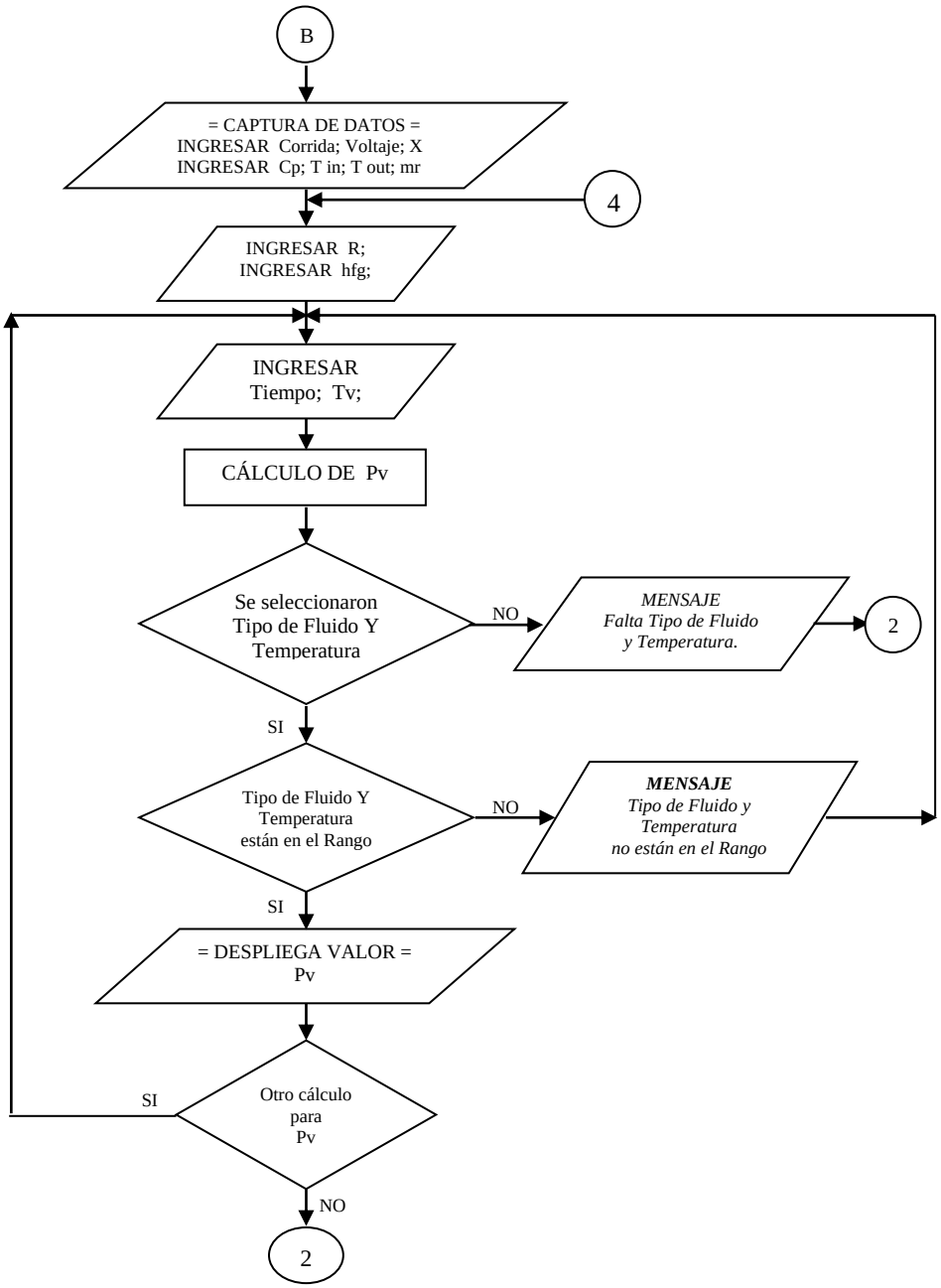
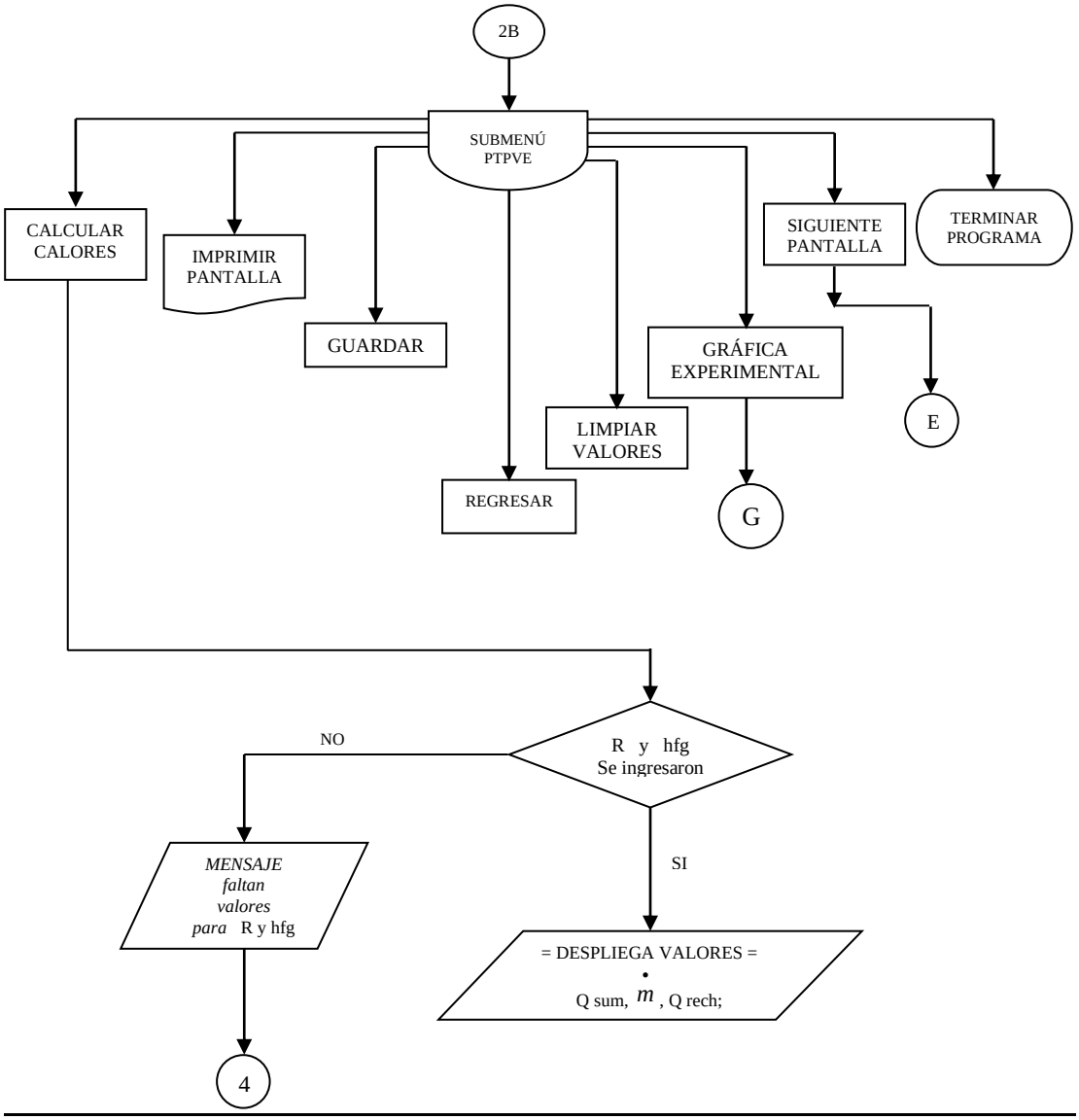


Figura 51. Diagrama de flujo de la rutina PTPVE y cálculo del valor de los calores.



Terminar, acceso que finaliza el programa.

Todas las abreviaturas y los campos con valores numéricos, por posicionamiento del cursor en ellos, señalan el nombre de la variable experimental introducida o propiedad calculada, así como las unidades en que deben introducirse o se dan. Oprimiendo los botones (Qsum), ($\dot{m}$) y (Qrech) la rutina permite visualizar el modelo matemático utilizado para el cálculo respectivo.

La rutina PTPVE da acceso mediante el botón Gráfica Analítica a la rutina GPTPVE donde se muestran las opciones de graficado para las temperaturas y presiones del vapor obtenidas experimentalmente.

La rutina GPTPVE permite seleccionar y obtener graficados diferentes para las presiones y las temperaturas oprimiendo el botón Actualizar gráfico, Imprimir el gráfico tal y como aparece en la pantalla, Regresar a la rutina PTPVE y Terminar el programa.

Figura 52. Diagrama de flujo de la rutina GPTPVE.

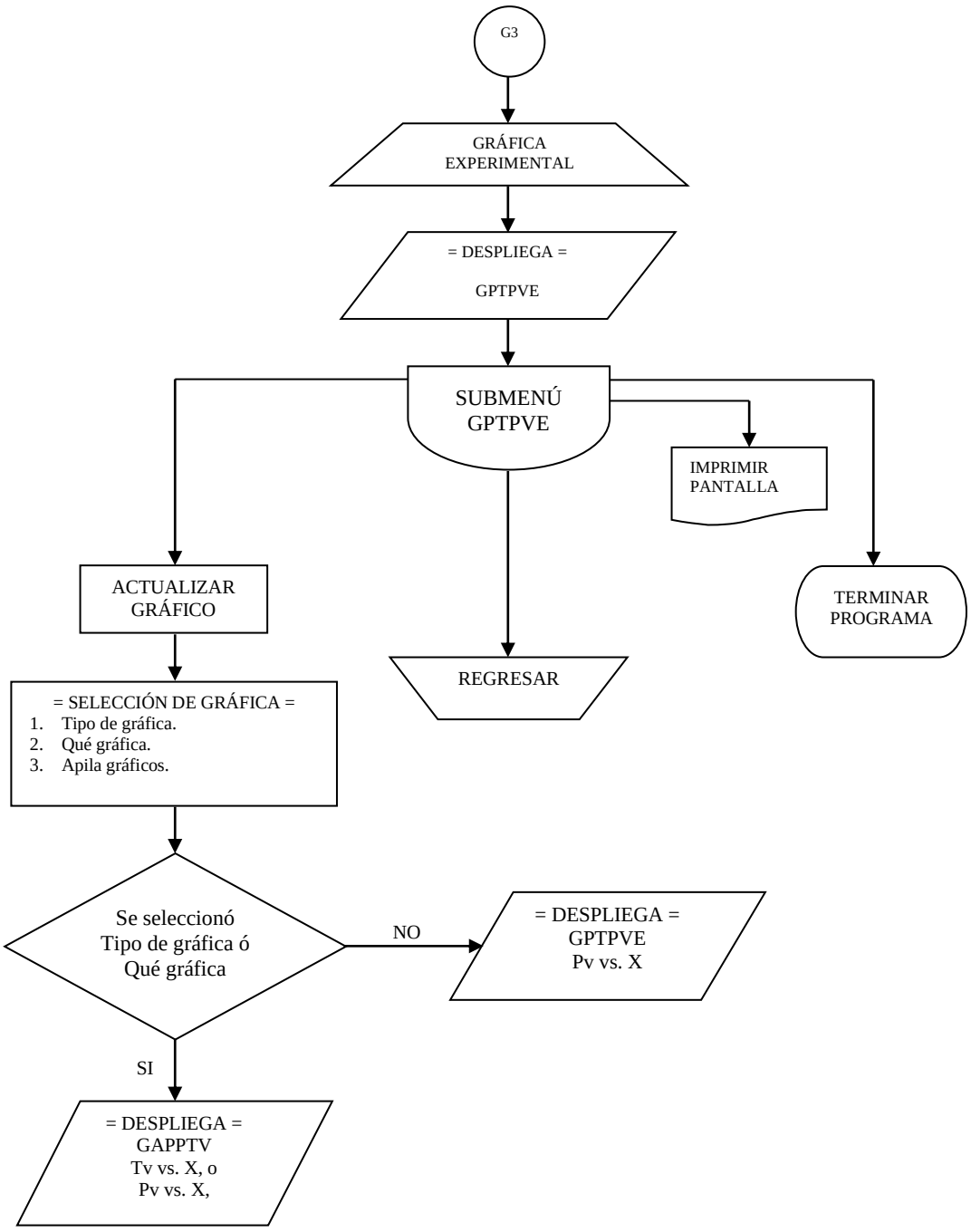


Figura 53. Diagrama de flujo de presentación de la segunda rutina PTPVE y cálculo de los valores de Pv.

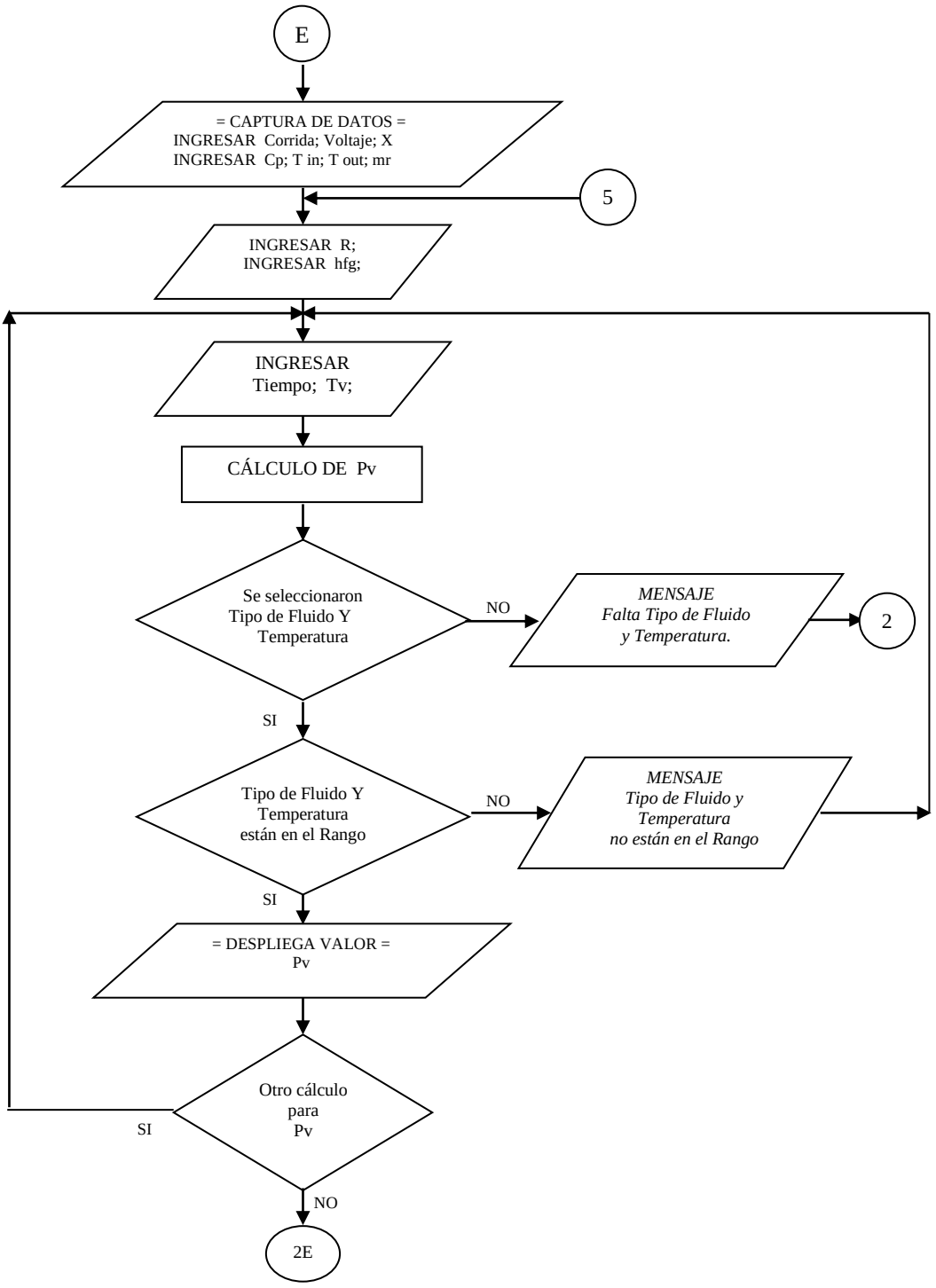


Figura 54. Diagrama de flujo de la segunda rutina PTPVE y cálculo de los valores de calores.

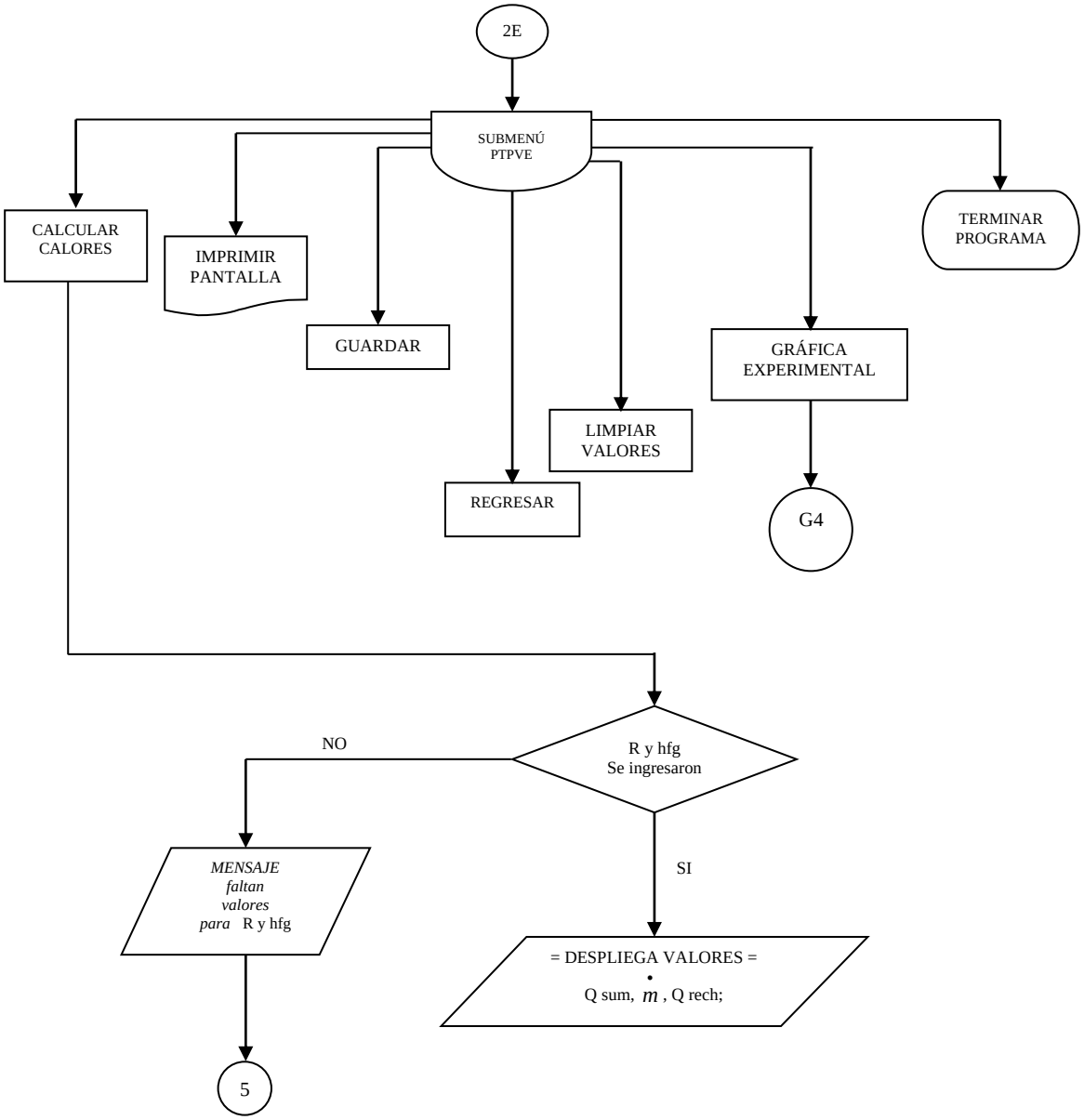
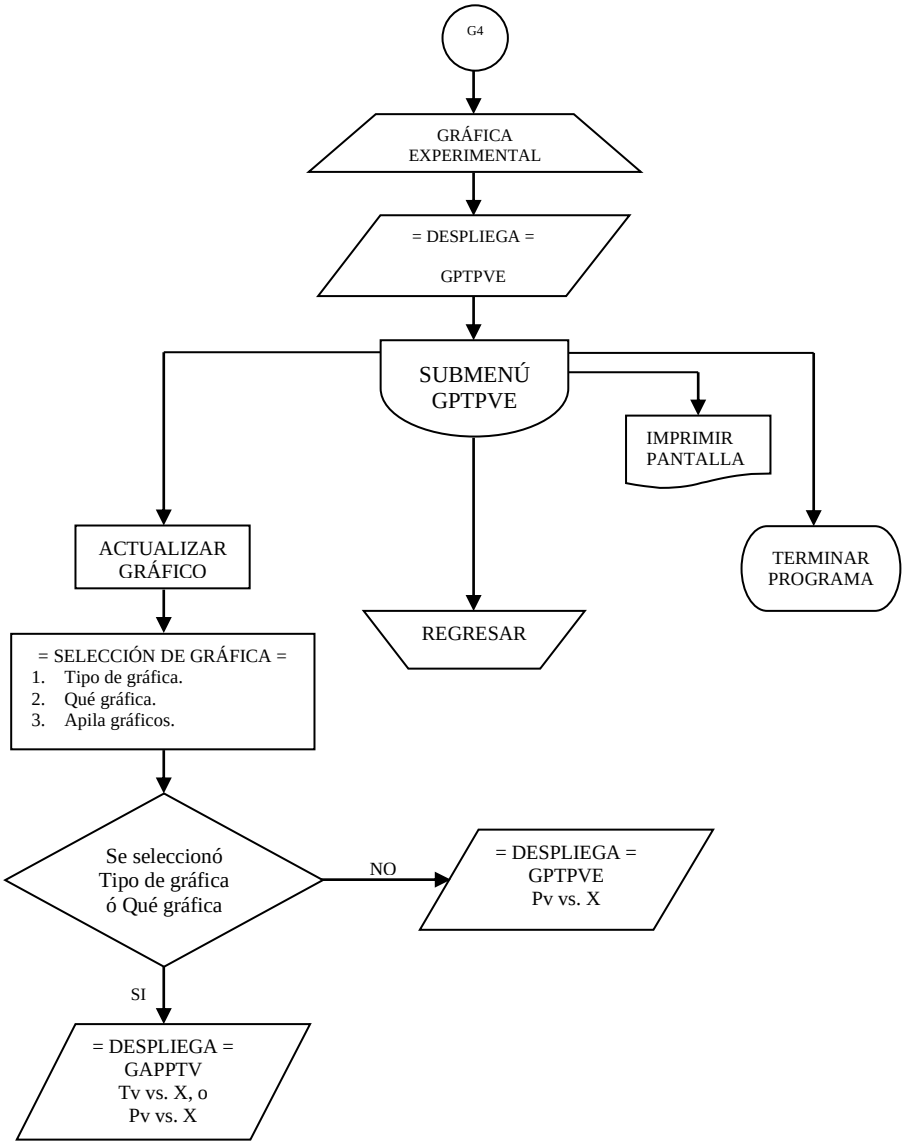


Figura 55. Diagrama de flujo de la segunda rutina GPTPVE.



4.1.5. Cálculo del Espesor de Película.

El cálculo del espesor de película, δ, se puede determinar mediante las subrutinas CEP-X, figura 56, y CEP-d, figura 57. Ambas se pueden acceder desde la rutina CLFC mediante los botones de acceso “X constante” y “d constante”.

La subrutina “cálculo del espesor de película-d”, (CEP-d), permite calcular el espesor de película dentro del caloducto para cuando su diámetro permanece constante mediante la asignación de valores al espesor adimensional de película X. Con ello el programa CALCA proporciona, para cada valor dado de X, un valor del radio que ocupa el vapor, r_v, y el espesor de película que puede estarse generando en el interior del caloducto.

La subrutina “cálculo del espesor de película-X”, (CEP-X), permite calcular el espesor de película dentro del caloducto para cuando se tiene un espesor de película adimensional constante y se asignan valores de diámetro de tubo. CALCA proporciona, para cada valor dado de dtubo, un valor del radio que ocupa el vapor, r_v, y el espesor de película, δ, en el interior del caloducto.

Ambas subrutinas, se vincula con otras, a través de los botones de acceso:

Imprimir, acceso que lleva a la subrutina para la impresión de la carátula tal como se ve en la pantalla.

Figura 56. Diagrama de flujo de la subrutina CEP-X para el cálculo del espesor de película.

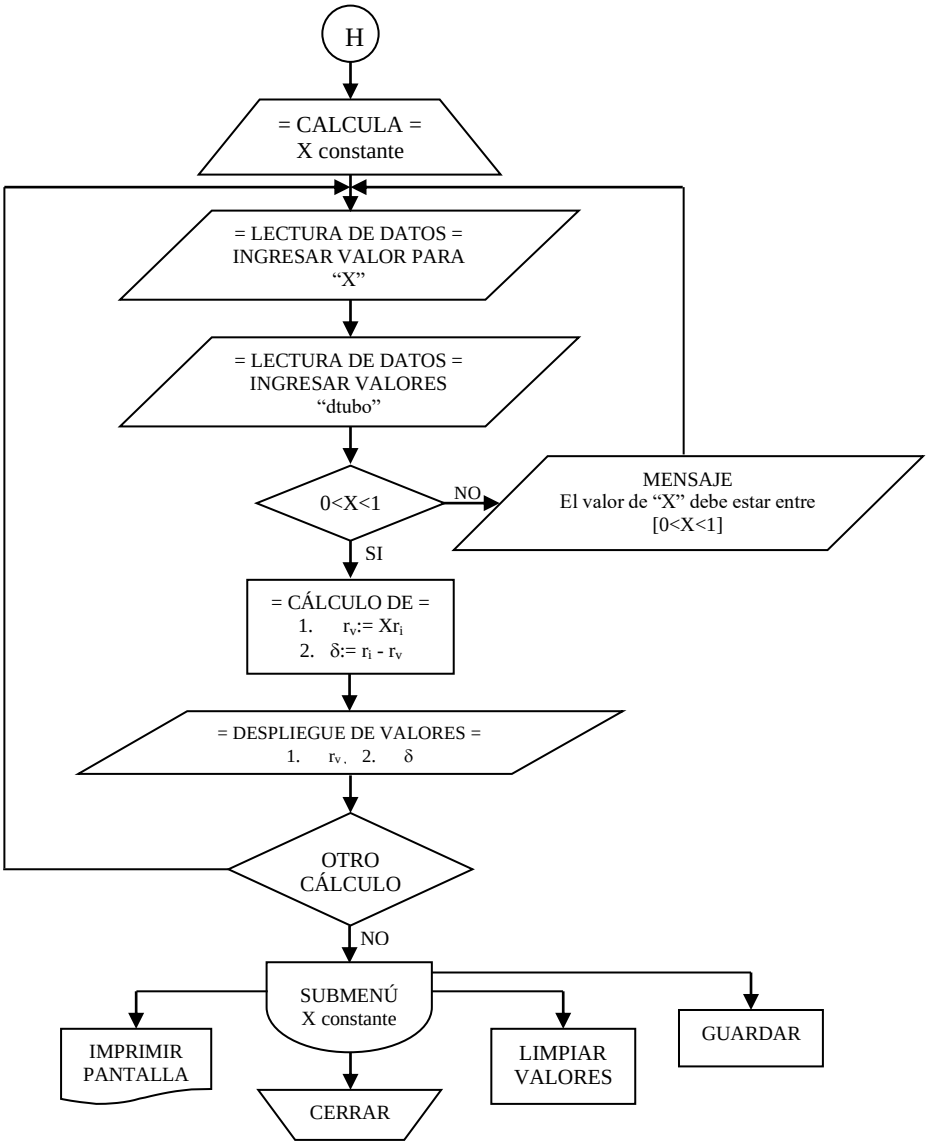
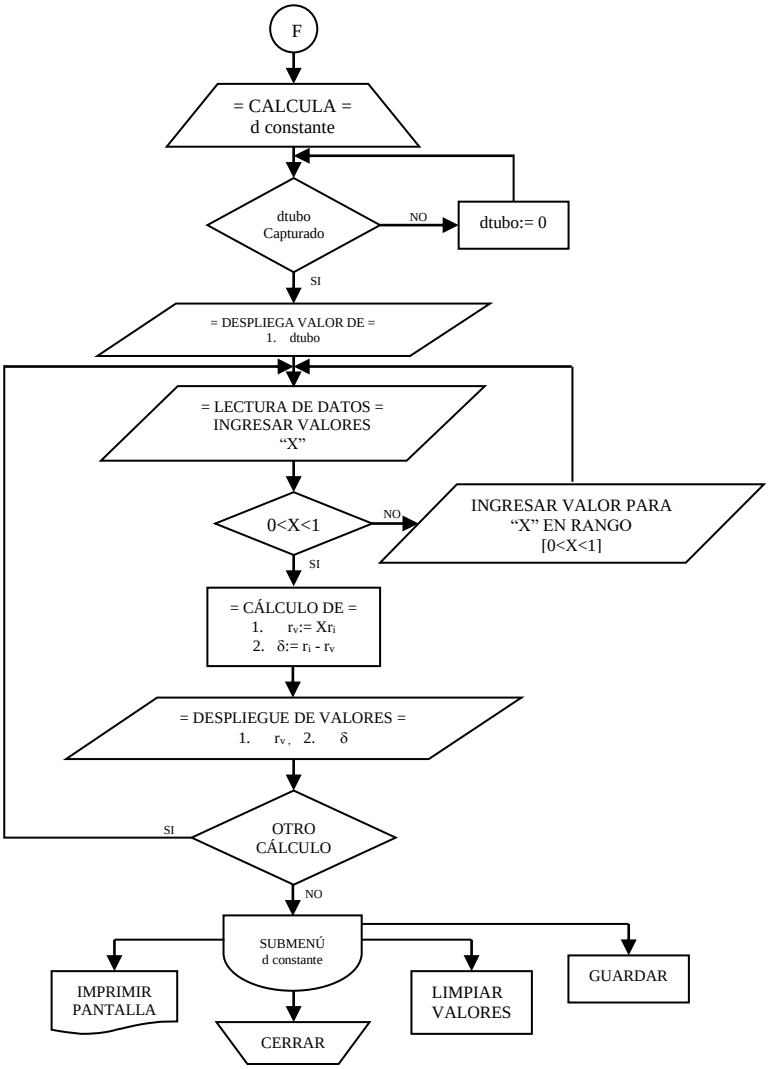


Figura 57. Diagrama de flujo de la subrutina CEP-d para el cálculo del espesor de película.



Limpiar, acceso que permite poner al inicio a la subrutina de tal manera que se puedan ingresar datos nuevos.

Guardar, acceso que envía a una subrutina que permite guardar la información experimental en un directorio del disco duro y desde allí poder graficar con alguna aplicación como Excel.

Cerrar, acceso que cierra las subrutinas CEP-d y CEP-X.

Todas las rutinas envían algún mensaje cuando falta de introducir algún dato en alguna de ellas y no permiten ningún cálculo de ser así.

4.2. Datos de Entrada.

Como se puede apreciar en los diagramas de flujo de las figuras 43, 45, 47, 49 y 52, la introducción de datos para el cálculo del diseño térmico de un caloducto es fundamental.

Para la ejecución de cada una de las rutinas que intervienen en el programa de cómputo CALCA se requiere que los llamados datos de entrada se introduzcan en un orden específico, en las unidades específicamente señaladas por el programa, generalmente del S.I., y respetando las condicionantes que se impongan para cada modelo matemático utilizado.

Los datos de entrada que se requieren se dividen de acuerdo al cálculo o a la rutina que se esté trabajando. Entre estas tenemos al:

Cálculo de los límites de funcionamiento en caloducto (CLFC)

Perfiles de presión y temperatura analíticos del líquido (PPTAL)

Perfiles de presión y temperatura analíticos del vapor (PPTAV)

Perfiles de temperatura y presión de vapor experimentales (PTPVE)

4.2.1. Datos de Entrada en la Rutina CLFC.

El diseño térmico consiste en alimentar los valores que habrán de determinar las dimensiones finales del caloducto en función de la temperatura de operación. Las unidades en que se deben suministrar estos valores se indican a la derecha de cada parámetro.

Datos del dispositivo a diseñar:

Radio ocupado por el vapor	(m)
Longitud de la zona de evaporación	(m)
Longitud de la zona adiabática	(m)
Longitud de la zona de condensación	(m)
Diámetro del tubo	(m)

Diámetro del poro capilar	(m)
Número de la malla o de ranuras	(m^{-1}) para malla
Número de mallas	
Número de espacios entre mallas	
Radio interior	(m)
Profundidad de ranura	(m)
Diámetro de alambre	(m)
Amplitud entre ranuras	(m)
Angulo de inclinación del caloducto	(grados)
Ancho de ranura	(m)

Datos del vapor generado:

Tipo de fluido de trabajo utilizado	
Temperatura de vaporización	(K)

Datos numéricos constantes:

Relación de calores específicos del vapor	Adimensional
Factor de corrección fluido-material de fabricación	Adimensional
Conductividad térmica del material de fabricación	(W/m°C)
Geometría interna de la estructura	capilar

Los datos de entrada que se deberán introducir dependerán de la geometría se esté trabajando, el ranurado rectangular, el de capa de mallas o el de estructura capilar homogénea, una vez seleccionada desde la sección de datos de datos numéricos constantes.

Debido a esto es que, no todos los datos señalados en la sección datos del dispositivo a diseñar necesitan ser capturados. El programa indica si alguno de los valores que se requieren por fuerza hace falta y lo pedirá. Sin embargo, las secciones de datos del vapor generado y datos numéricos constantes deberán introducirse para cualquiera de las geometrías seleccionadas.

4.2.2. Datos de Entrada en la Rutina PPTAV.

Datos de ubicación de termopares:

Número de termopares en la sección de evaporación

Número de termopares en la sección adiabática

Número de termopares en la sección de condensación

4.2.3. Datos de Entrada en la Rutina PPTAL.

Datos de ubicación de termopares:

Número de termopares en la sección de evaporación

Número de termopares en la sección adiabática

Número de termopares en la sección de condensación

4.2.4. Datos de Entrada en la Rutina PTPVE.

Datos del proceso experimental:

Número de corrida

Distancia axial donde se toma la lectura de temperatura (X)

Tiempo (s)

- Para el cálculo de calores

Flujo másico del fluido refrigerante (kg/s)

Calor específico del fluido refrigerante (J/kgK)

Temperatura de entrada del fluido refrigerante (K)

Temperatura de salida del fluido refrigerante (K)

Voltaje suministrado por el elemento calefactor (V)

Resistencia eléctrica del elemento calefactor (Ohms)

Calor latente de evaporización del fluido de trabajo (J/kg)

- Para el cálculo de perfiles de presión y temperatura

Temperatura de vapor experimental (K)

Los datos de entrada que se piden en las rutinas PPTAV y PPTAL, hasta veintisiete por sección, a la vez que representan posición axial bien pudieran considerarse posiciones del termopar. El programa acepta la ausencia de la sección adiabática pero no las de condensación y evaporación.

Los datos de entrada en las rutinas PTPVE se pueden subdividir en los datos requeridos para el cálculo de calores y los requeridos para el perfil de presiones y temperaturas.

Finalmente, los datos de entrada son remitidos a las rutinas y subrutinas correspondiente para el cálculo de los límites de funcionamiento y perfiles de presión y temperaturas.

4.2.5. Datos de Entrada en las Subrutina CEP-d y CEP-X.

Subrutina CEP-d.

Permite el cálculo del espesor de película con cualquier cambio en el valor del espesor adimensional de película para cuando el diámetro del caloducto permanece constante.

Datos previamente dados y desde la selección de la geometría:

Diámetro del tubo (Valor constante) (mm)

Datos a introducir:

Espesor adimensional de película Adimensional

Se pueden introducir hasta 10 valores para el espesor adimensional de película para cuando el diámetro de tubo permanece constante.

Subrutina CEP-X.

Permite el cálculo del espesor de película con cualquier cambio en el valor del diámetro del caloducto para cuando el espesor adimensional de película de este permanece constante.

Datos a introducir:

Espesor adimensional de película Adimensional

Diámetro del tubo (mm)

Se pueden introducir hasta 10 valores para cuando el espesor adimensional de película permanece constante y se varía el diámetro del tubo.

4.3. Resultados del Programa.

Posteriormente, con la introducción de todos los datos de entrada, el programa CALCA ejecuta cada una de las rutinas mediante el empleo de las ecuaciones y modelos matemáticos que se describen en el apartado 3.

Los diversos resultados arrojados por el programa para cada uno de los límites de funcionamiento tienen la intención de compararlos entre ellos mismos y analizar aquél valor que mejor describa el comportamiento experimental que de un caloducto se tenga.

Identificando que modelo se aproxima más al comportamiento experimental del caloducto se puede considerar como patrón de referencia para futuros procesos experimentales con caloductos de las mismas características o similares.

La comparación de los resultados que arroje el programa con los experimentales que se pudieran tener, indicaran la pertinencia de estos modelos para considerarlos como patrones de referencia.

En apéndice M se detalla el significado de cada abreviatura o grupo de siglas de cada rutina aquí utilizada.

4.3.1. Resultados del Programa en la Rutina CLFC.

Los resultados que se obtienen a partir de que se conoce el fluido de trabajo y la temperatura de operación se muestran enseguida.

Resultados de las propiedades físicas:

- Calor latente J/kg
- Densidad del líquido kg/m^3
- Densidad del vapor kg/m^3
- Conductividad térmica del líquido W/Mk
- Viscosidad del líquido kg/ms
- Viscosidad del vapor kg/ms
- Presión de vapor Pa
- Calor específico del vapor J/kgK
- Tensión superficial del líquido N/m

Mediante una subrutina y a partir de la temperatura se obtienen los valores de las propiedades físicas arriba señaladas desde tablas como las que se muestran en el apéndice A.

Resultados de datos calculados:

- Longitud efectiva m (3.5.47)
- Temperatura del vapor K
- Peso molecular kg/kgmol

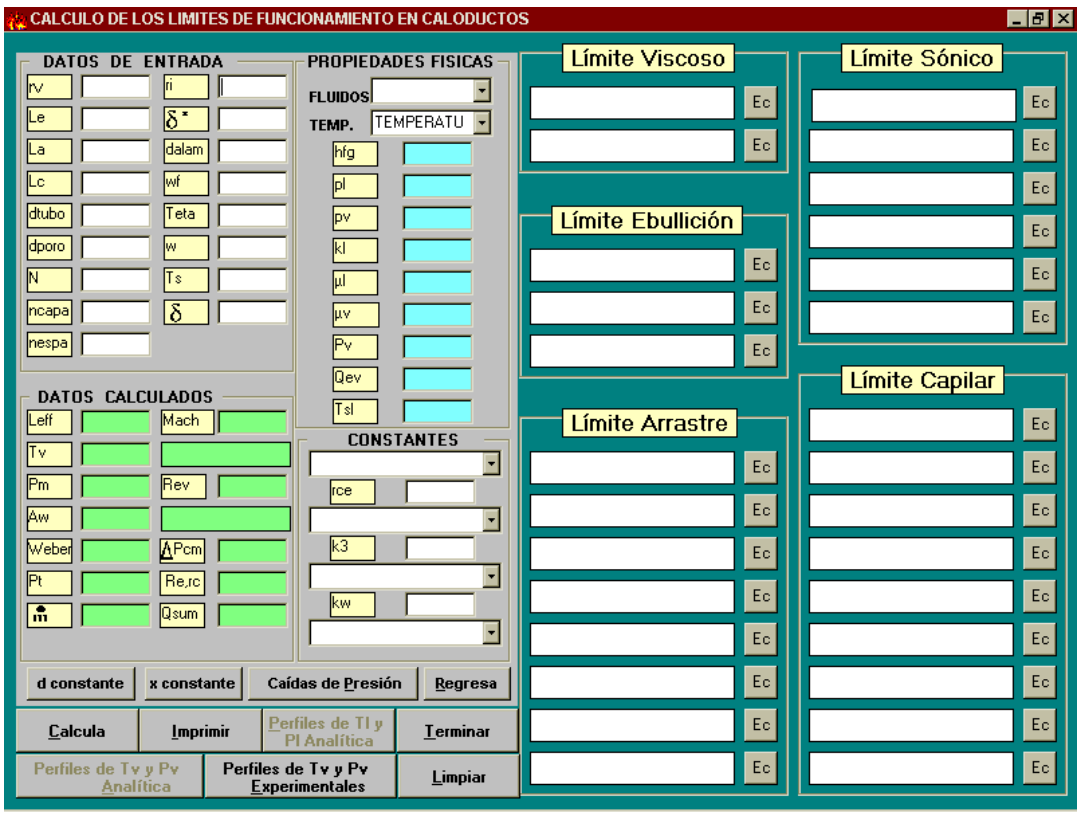
- Área de sección transversal de la estructura capilar m^2 (3.5.49)
- Número de Weber Adimensional (3.3.7)
- Presión de trabajo Pa (2.1.113)
- Flujo másico del vapor kg/s (3.5.68)
- Número de Mach Adimensional (3.5.22)
- Número de Reynolds Adimensional (3.5.10)
- Máxima presión capilar Pa (3.5.6)
- Reynolds radial en el condensador Adimensional (3.5.25)
- Calor suministrado W (3.5.7)

Resultados de los límites de funcionamiento:

- Primer Límite viscoso W (3.1.1)
- Segundo Límite viscoso W (3.1.3)
- Primer Límite de ebullición W (3.4.1)
- Segundo Límite de ebullición W (3.4.5)
- Tercer Límite de ebullición W (3.4.8)
- Primer Límite de arrastre W (3.3.3)
- Segundo Límite de arrastre W (3.3.4)
- Tercer Límite de arrastre W (3.3.9)
- Cuarto Límite de arrastre W (3.3.16)
- Quinto Límite de arrastre W (3.3.17)

- Sexto Límite de arrastre W (3.3.20)
- Séptimo Límite de arrastre W (3.3.21)
- Octavo Límite de arrastre W (3.3.26)
- Primer Límite Sónico W (3.2.4)
- Segundo Límite Sónico W (3.2.5)
- Tercer Límite Sónico W (3.2.7)
- Cuarto Límite Sónico W (3.2.8)
- Quinto Límite Sónico W (3.2.7 *)
- Sexto Límite Sónico W (3.2.8 *)
- Límite Capilares W (Apéndice L)

Figura 58. Pantalla principal de la rutina CLFC en el programa de cómputo CALCA.



La numeración en paréntesis indica los modelos matemáticos utilizados en el programa CALCA, los cuales podemos localizar en el apartado. En el mismo apartado se pueden encontrar algunas expresiones matemáticas adicionales utilizadas y que son indispensables para los resultados que el programa arroja. Las expresiones matemáticas de los nueve límites capilares se expresan en el apéndice L.

La figura 58, muestra la pantalla principal de la rutina CLFC donde se aprecian las secciones de los datos de entrada, así como la de los resultados que el programa arroja.

4.3.2. Resultados del Programa en la Rutina PPTAV.

Resultados del dimensionamiento del caloducto y de su temperatura de vapor:

- Longitud de la zona de evaporación m
- Longitud de la zona adiabática m
- Longitud de la zona de condensación m
- Temperatura de saturación en la zona de evaporación K
- Temperatura de saturación en la zona adiabática K
- Temperatura de saturación en la zona de condensación K

Resultados térmicos y de presión de vapor en el caloducto a la distancia axial X:

Zona de evaporación

- Distancia axial X m
- Pérdida de presión a la distancia axial X Pa (3.5.18)
- Presión a la distancia axial X Pa (3.5.18)
- Temperatura de vapor a la distancia axial X K

Zona adiabática

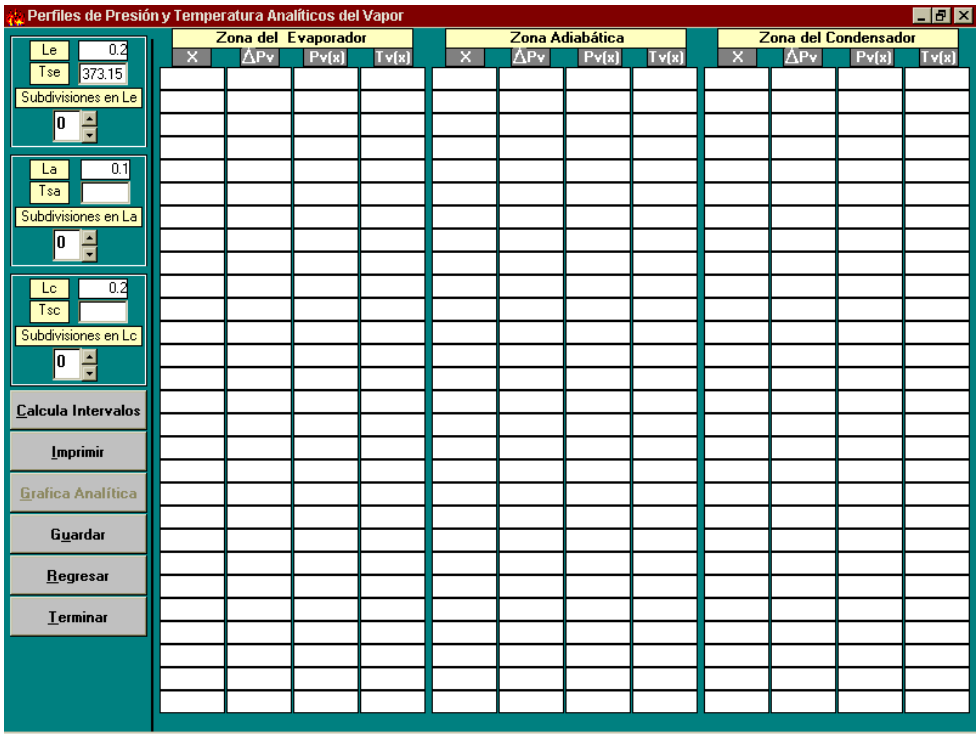
- Distancia axial X m
- Pérdida de presión a la distancia axial X Pa (3.5.24)
- Presión a la distancia axial X Pa (3.5.24)
- Temperatura de vapor a la distancia axial X K

Zona de condensación

- Distancia axial X m
- Pérdida de presión a la distancia axial X Pa (3.5.28)
- Presión a la distancia axial X Pa (3.5.28)
- Temperatura de vapor a la distancia axial X K

La figura 59, muestra la pantalla donde se mostrarán los valores arrojados por el programa CALCA una vez ejecutada la rutina de cálculo PPTAV para cada una de las zonas del caloducto.

Figura 59. Pantalla principal de la rutina PPTAV en el programa de cómputo CALCA.



La rutina PPTAV permite guardar un tabulado de los resultados obtenidos en esta rutina y la graficación de los mismos mediante la rutina GAPPTV.

La tabla 7, muestra el tipo de tabulado que se obtiene al guardar los resultados que arroja la rutina PPTAV.

Tabla 7. Tabulado de resultados de los perfiles de presión y temperatura de la rutina PPTAV.

Zona de evaporación				Zona adiabática				Zona de condensación			
X	Δ Pv	$Pv_{(X)}$	$Tv_{(X)}$	X	Δ Pv	$Pv_{(X)}$	$Tv_{(X)}$	X	Δ Pv	$Pv_{(X)}$	$Tv_{(X)}$

Las figuras 60 y 61, muestran las pantallas donde se graficarán los resultados que arroje la rutina PPTAV para los perfiles de presión y temperatura, respectivamente, de forma directa mediante la rutina GAPPTV.

Figura 60. Tipo de Gráfica para el perfil de presiones obtenida mediante la rutina GAPPTV.

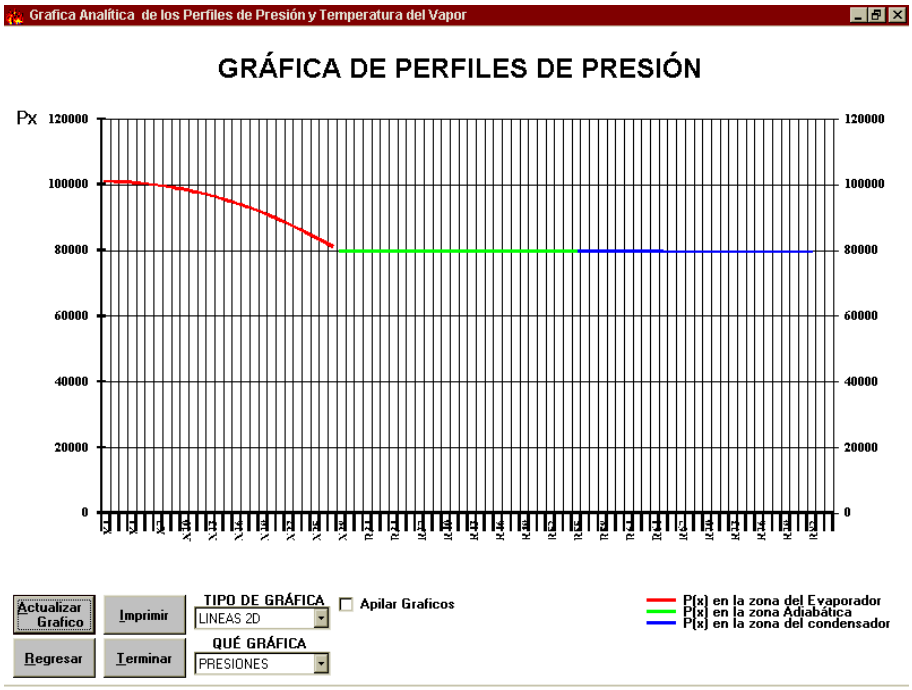
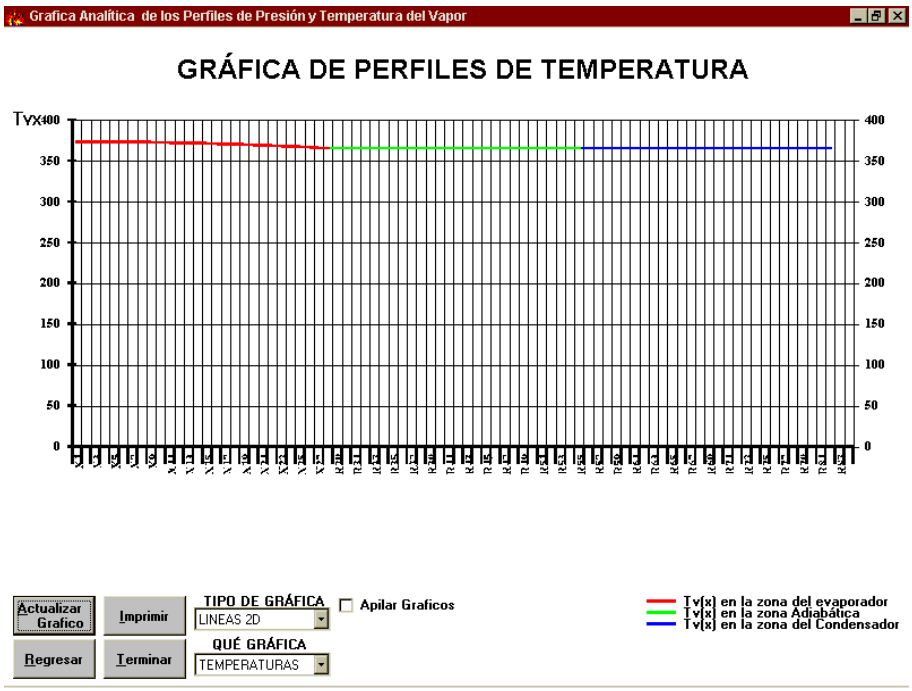


Figura 61. Tipo de Gráfica para el perfil de temperaturas obtenida mediante la rutina GAPPTV.



4.3.3. Resultados del Programa en la Rutina PPTAL.

De forma similar, la rutina PPTAL arroja la misma estructura de resultados que la rutina PPTAV como ya se mencionó arriba.

Resultados del dimensionamiento del caloducto y de la temperatura del líquido:

- Longitud de la zona de evaporación m
- Longitud de la zona adiabática m
- Longitud de la zona de condensación m
- Temperatura de saturación en la zona de evaporación K
- Temperatura de saturación en la zona adiabática K
- Temperatura de saturación en la zona de condensación K

Resultados térmicos y de presión del líquido en el caloducto a la distancia axial X:

Zona de evaporación

- Distancia axial X m
- Pérdida de presión a la distancia axial X Pa (3.5.52)
- Presión a la distancia axial X Pa (3.5.52)
- Temperatura del líquido a la distancia axial X K

Zona adiabática

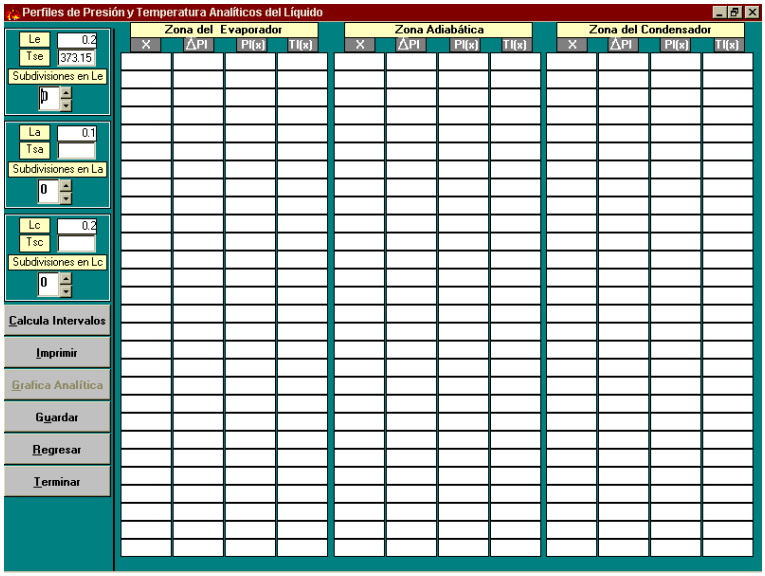
- Distancia axial X m
- Pérdida de presión a la distancia axial X Pa (3.5.52)
- Presión a la distancia axial X Pa (3.5.52)
- Temperatura de líquido a la distancia axial X K

Zona de condensación

- Distancia axial X m
- Pérdida de presión a la distancia axial X Pa (3.5.52)
- Presión a la distancia axial X Pa (3.5.52)
- Temperatura de líquido a la distancia axial X K

La figura 62, muestra la pantalla donde se mostrarán los valores arrojados por el programa CALCA una vez ejecutada la rutina de cálculo PPTAL para cada una de las zonas del caloducto. La rutina PPTAL igualmente permite guardar un tabulado de los resultados obtenidos en esta rutina y la graficación de los mismos mediante la rutina GAPPTL. La numeración en paréntesis remite a los modelos matemáticos utilizados en el programa CALCA

Figura 62. Pantalla principal de la rutina PPTAL en el programa de cómputo CALCA.



La tabla 8, muestra el tipo de tabulado que se obtiene al guardar los resultados que arroja la rutina PPTAL.

Las figuras 63 y 64, muestran las pantallas donde se graficarán los resultados que arroja la rutina PPTAL para los perfiles de presión y temperatura, respectivamente, de forma directa mediante la rutina GAPPTL.

Tabla 8. Tabulado de resultados de los perfiles de presión y temperatura de la rutina PPTAL.

Zona de evaporación				Zona adiabática				Zona de condensación			
X	Δ Pl	$Pl_{(X)}$	$Tl_{(X)}$	X	Δ Pl	$Pl_{(X)}$	$Tl_{(X)}$	X	Δ Pl	$Pl_{(X)}$	$Tl_{(X)}$

Figura 63. Tipo de Gráfica para el perfil de presiones obtenida mediante la rutina GAPPTL.

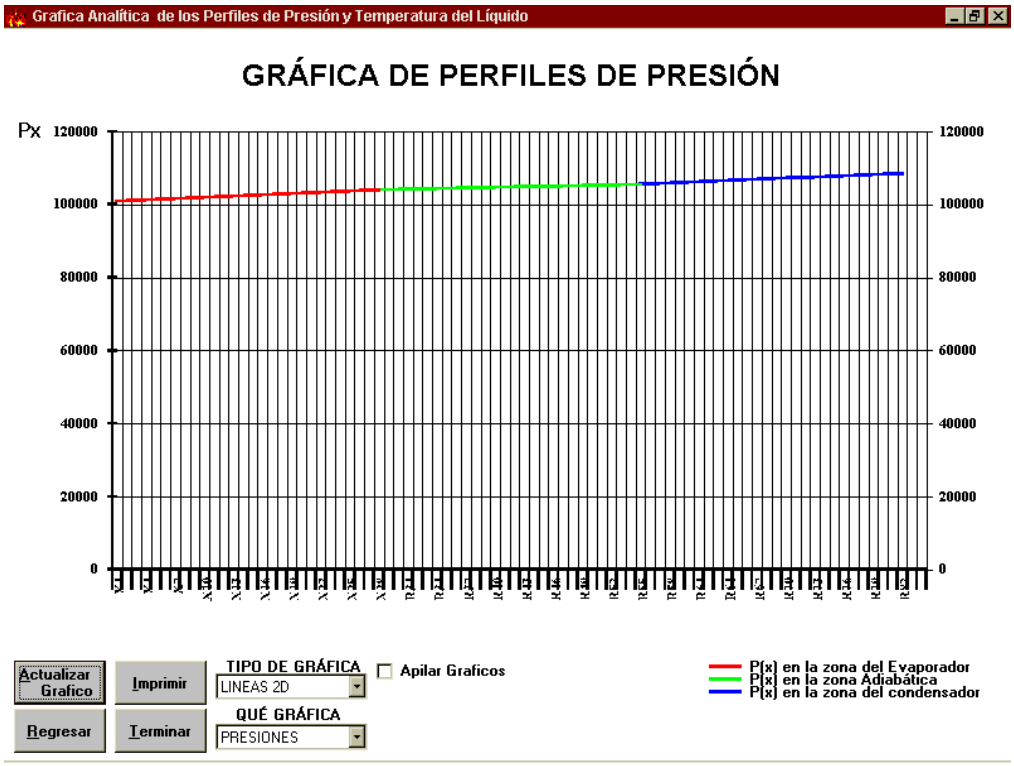
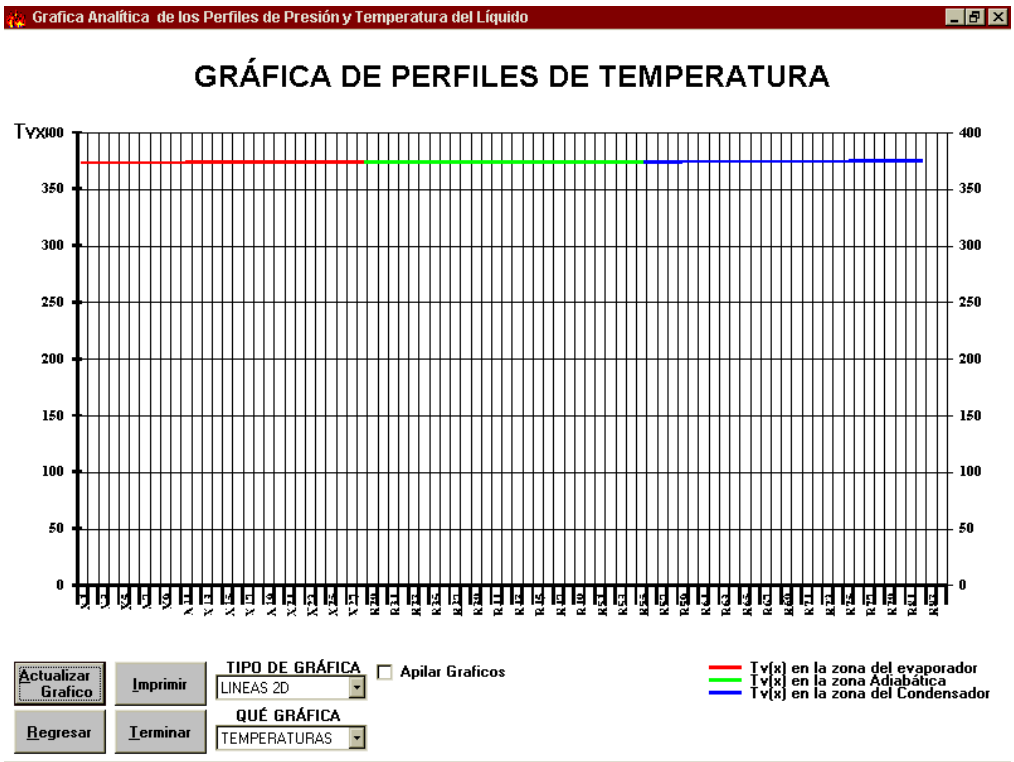


Figura 64. Tipo de Gráfica para el perfil de temperaturas obtenida mediante la rutina GAPPTL.



4.3.4. Resultados del Programa en la Rutina PTPVE.

Los resultados a los que se llegan en la rutina de cálculo de los perfiles de temperatura y presión del vapor experimental se encuentran en función de la información de entrada para el cálculo de calores y de los datos de temperatura para los perfiles.

Resultados térmicos para la generación de vapor:

- Calor suministrado W (5.1.4)
- Flujo másico del vapor kg/s (5.1.2)
- Calor rechazado W (5.1.1)

Resultados para el perfil de presión

- Presión de vapor a la distancia axial X Pa

Las figuras 65 y 66, muestran el tipo de pantallas que el programa CALCA permite visualizar al ejecutar la rutina PTPVE.

Figura 65. Pantalla principal de la rutina PTPVE en el programa de cómputo CALCA.

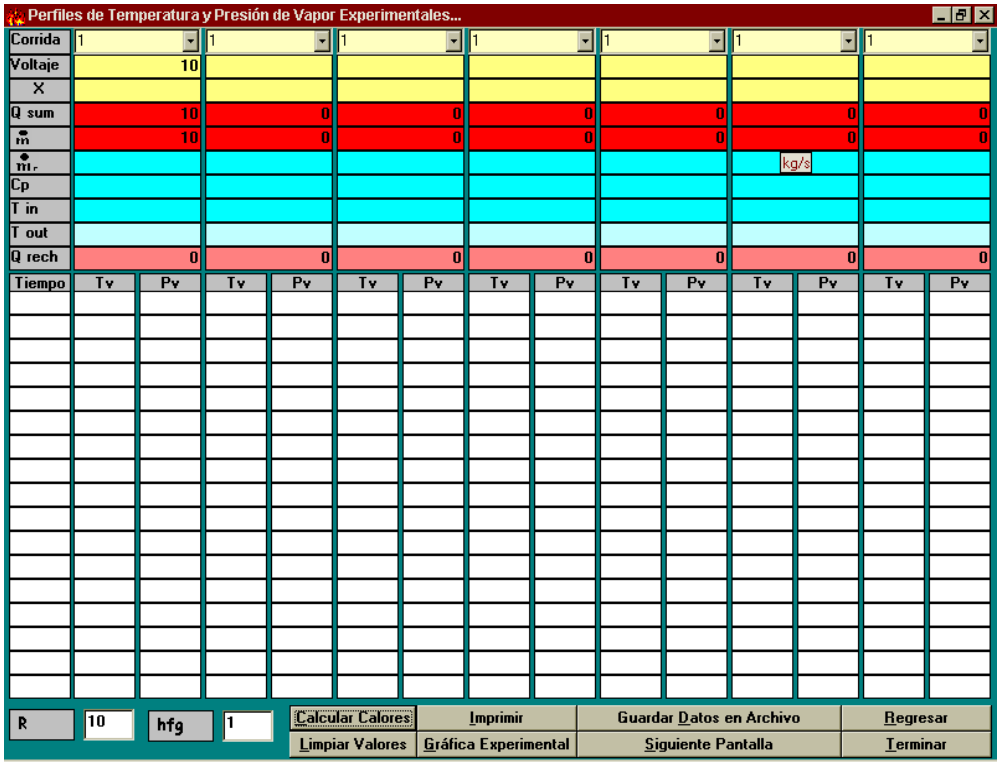
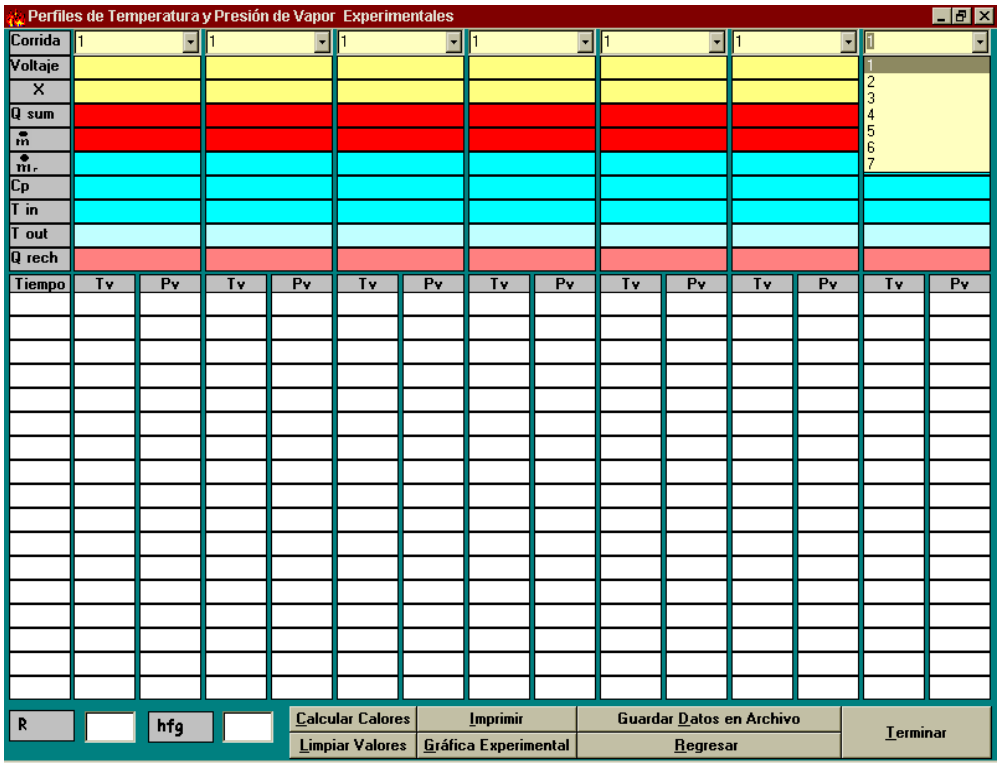


Figura 66. Segunda pantalla de la rutina PTPVE en el programa de cómputo CALCA.



En ellas podemos apreciar las secciones donde se registran los datos experimentales de entrada y la de los resultados de presiones y calores que el programa arroja.

La rutina PTPVE permite guardar en un tabulado los datos experimentales de temperatura y de presión obtenidos y la graficación de los mismos mediante la rutina GPTPVE.

La tabla 9, muestra el tipo de tabulado que se obtiene al guardar los resultados que arroja la rutina PTPVE. El número de columnas y filas resultantes dependerá de la información recabada.

Las figuras 67 y 68, muestran las pantallas donde se graficarán los resultados que arroja la rutina PTPVE para los perfiles de presión y temperatura, respectivamente, de forma directa mediante la rutina GPTPVE.

Tabla 9. Tabulado de resultados experimental para los perfiles de presión y temperatura de la rutina PTPVE.

Termopar	1		2		3		4		5		6		7	
Voltaje	20 V		40 V		60 V		80 V		100 V		120 V		140 V	
Tiempo (min.)	T	P	T	P	T	P	T	P	T	P	T	P	T	P

Figura 67. Formato de Gráfica para el perfil de presiones obtenida mediante la rutina GPTPVE.

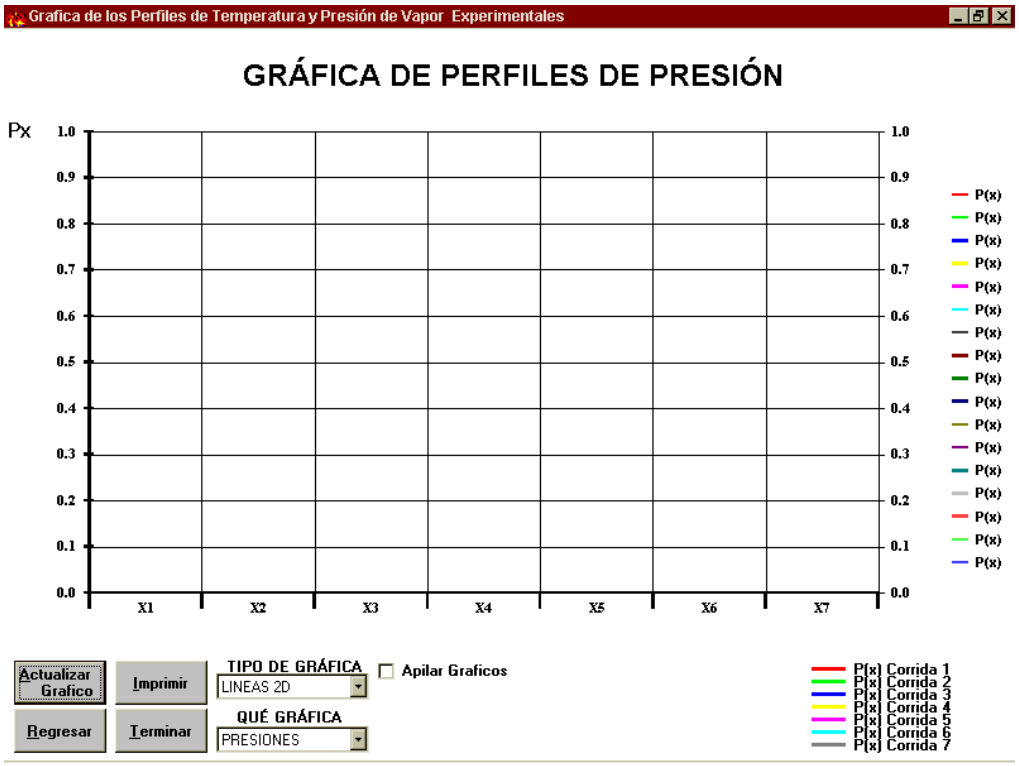
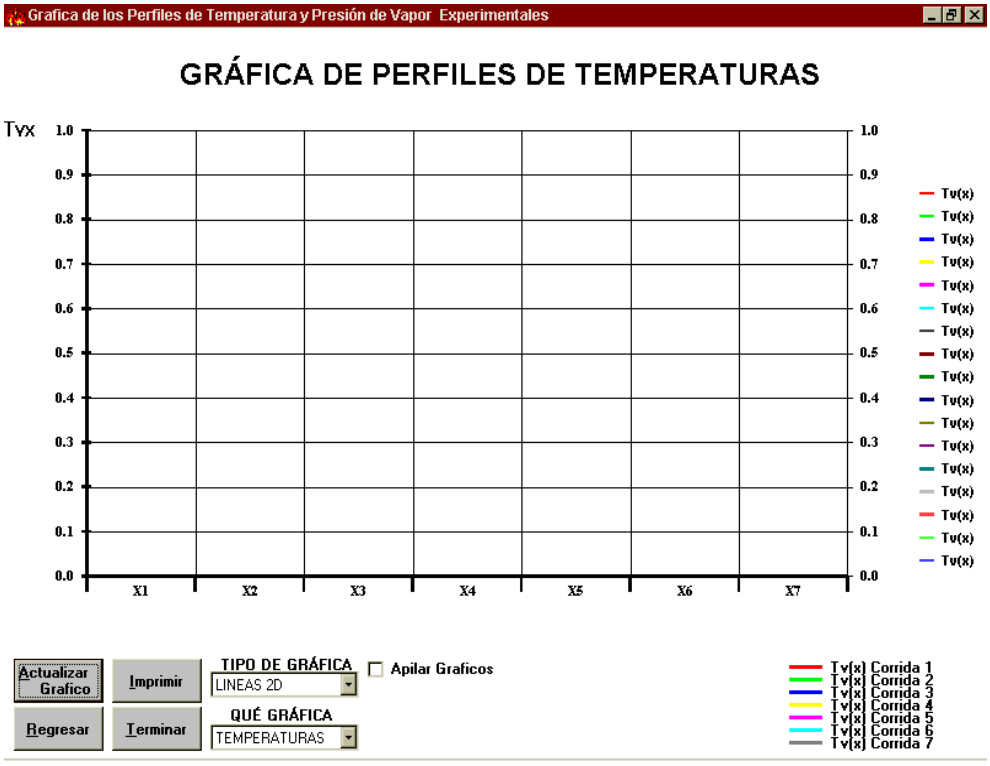


Figura 68. Formato de Gráfica para el perfil de temperaturas obtenida mediante la rutina GPTPVE.



La rutina PTPVE se introdujo en el programa de cómputo CALCA con la finalidad de proporcionar de forma rápida, al momento de introducirse en esta opción y durante la toma y registro de las lecturas de temperaturas desde termopares, las presiones de vapor. Desde aquí puede visualizarse rápidamente el comportamiento P-T del caloducto en estudio.

Esta opción permite agregar los tiempos de toma de las lecturas para generar tabulados que contengan al o a los termopares que se analizan, los voltajes que se emplean y por consecuencia los flujos de calor suministrado, los flujos de calor rechazados, los datos de temperatura tomados y los datos de presión calculados, étc.

La idea se constituye en contar con una herramienta adicional dentro del programa que permita guardar la información generada para posteriormente someterla a tratamientos estadísticos diversos.

4.3.5. Resultados del Programa en las Subrutinas CEP-d y CEP-X.

Los resultados que se obtienen con la subrutina CEP-d, una vez que se considera un diámetro de tubo, constante son básicamente dos; los mismos que para la subrutina CEP-X para cuando se considera un espesor adimensional de película constante.

Resultados del vapor:

- Radio de flujo del vapor mm

Resultados del líquido:

- Espesor promedio de película mm

La figura 69, muestra la pantalla que el programa presenta para el cálculo del espesor promedio de película considerando un diámetro de tubo constante. En esta figura se pueden apreciar diez resultados para el radio de flujo del vapor, r_v, y sus respectivos espesores promedios de película, δ, bajo diez valores de espesor adimensional de película asignados, X.

El programa CALCA en la figura 70, muestra la pantalla para el cálculo del espesor promedio de película considerando un espesor adimensional de película constante. En esta figura se

pueden apreciar diez resultados para el radio de flujo del vapor, r_v, y sus respectivos espesores promedios de película, δ, bajo diez diferentes diámetros de tubo.

Figura 69. Pantalla principal de la subrutina CEP-d para el cálculo del espesor promedio de película.

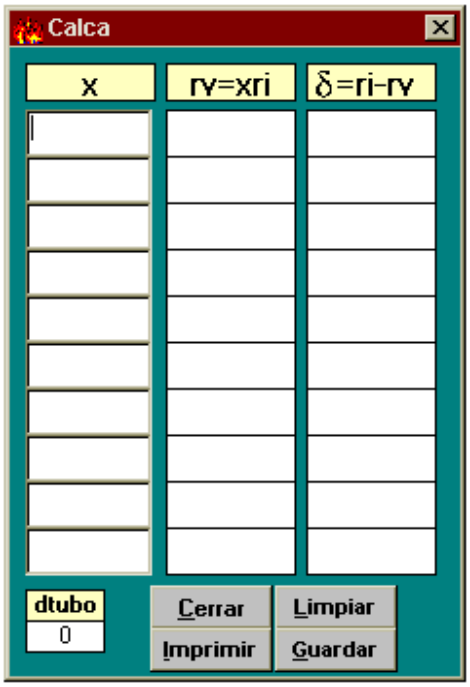
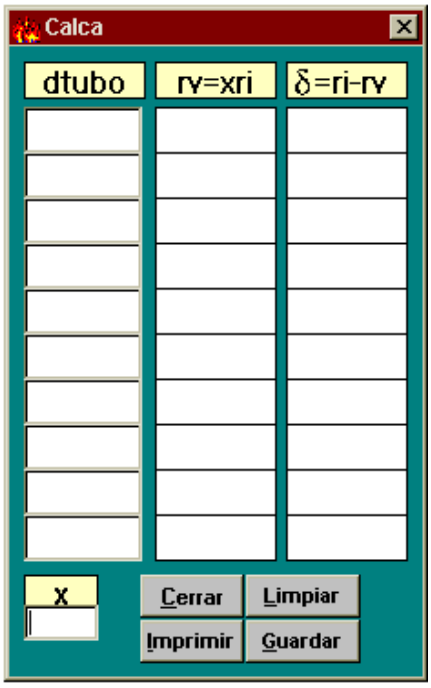


Figura 70. Pantalla principal de la subrutina CEP-X para el cálculo del espesor promedio de película.



5. Análisis Paramétrico de Caloductos Utilizando Calca.

En este apartado se lleva a cabo la aplicación del programa de cómputo CALCA para el análisis del posible comportamiento de caloductos bajo diversas condiciones de operación, estructura y geometría.

Se inicia con el diseño del experimento, donde habrán de designarse las condiciones de operación, así como las especificaciones de los caloductos a caracterizar. Se varían las condiciones de operación a diferentes valores de temperatura, principalmente en cuanto al valor del espacio que ocupa el vapor (r_v).

Se puede realizar una comparación de los diferentes modelos geométricos para la misma variación de los valores de operación para, posteriormente, realizar un análisis de los resultados arrojados por el programa. La intención básica es identificar los modelos matemáticos que rigen el comportamiento de un caloducto diseñado específicamente, y en adelante ser considerados modelos de comportamiento sin necesidad de efectuar experimentaciones. La comparación de los resultados arrojados por el programa CALCA con resultados experimentales y registrados en la literatura se describe con la intención de dar un mayor rango de confianza al uso del programa.

5.1. Diseño del Experimento.

Se utiliza el programa para determinar los modelos matemáticos que mejor describen las limitaciones de operación de un caloducto, para lo cual se realizaron diferentes corridas con diferentes valores de temperatura.

Al correr el programa de cómputo se tomaron en consideración las especificaciones de un caloducto que utiliza agua como fluido de trabajo y cuyas dimensiones son aproximadas a las reportadas en la literatura y algunas tesis de maestría.

5.1.1. Valores de Entrada en Corridas del Programa de Cómputo CALCA.

Variación de la temperatura con una relación (r_v/r_i) = 0.92.

Los datos de entrada tomados para las corridas son:

Radio ocupado por el vapor	**0.006**	**(m)**
Longitud de la zona de evaporación	0.2	(m)
Longitud de la zona adiabática	0.1	(m)
Longitud de la zona de condensación	0.2	(m)
Diámetro del tubo	0.013	(m)
Número de ranuras	20	
Radio interior	0.0065	(m)
Profundidad de ranura	0.0007	(m)
Amplitud entre ranuras	0.001342	(m)
Angulo de inclinación del caloducto	0	(grados)
Ancho de ranura	0.0007	(m)
Fluido de trabajo	Agua	
Relación de calores específicos del vapor	1.33	
Factor de corrección agua-cobre	0.013	
Conductividad térmica del cobre	394	(W/m°C)
Geometría interna de la estructura Capilar	Axial ranurado	

Variación de la temperatura con una relación (r_v/r_i) = 0.1.

Variando el espacio disponible para la circulación del vapor (r_v) bajo exactamente las mismas condiciones de entrada:

Radio ocupado por el vapor	**0.00065**	**(m)**
Longitud de la zona de evaporación	0.2	(m)

Longitud de la zona adiabática	0.1	(m)
Longitud de la zona de condensación	0.2	(m)
Diámetro del tubo	0.013	(m)
Número de la malla o de ranuras	20	
Radio interior	0.0065	(m)
Profundidad de ranura	0.0007	(m)
Amplitud entre ranuras	0.001342	(m)
Angulo de inclinación del caloducto	0	(grados)
Ancho de ranura	0.0007	(m)
Fluido de trabajo	Agua	
Relación de calores específicos del vapor	1.33	
Factor de corrección agua-cobre	0.013	
Conductividad térmica del cobre	394	(W/m°C)
Geometría interna de la estructura capilar	Axial ranurado	

Se realizan por igual un total de 11 corridas y con valores de temperatura de 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120 °C.

Variación de r_v con la temperatura.

Por variación del espacio disponible para la circulación del vapor (r_v), para tres valores diferentes de temperatura (60, 80 y 100 °C) y manteniendo constantes los siguientes parámetros:

Longitud de la zona de evaporación	0.2	(m)
Longitud de la zona adiabática	0.1	(m)

Longitud de la zona de condensación	0.2	(m)
Diámetro del tubo	0.013	(m)
Número de la malla o de ranuras	20	
Radio interior	0.0065	(m)
Profundidad de ranura	0.0007	(m)
Amplitud entre ranuras	0.001342	(m)
Angulo de inclinación del caloducto	0	(grados)
Ancho de ranura	0.0007	(m)
Fluido de trabajo	Agua	
Relación de calores específicos del vapor	1.33	
Factor de corrección agua-cobre	0.013	
Conductividad térmica del cobre	394	(W/m°C)
Geometría interna de la estructura capilar	Axial ranurado	

Se realizan un total de:

Corridas	Temperatura, (°C)	Rango de valores de r_v, (mm)
19	100	6 – 0.288
16	80	6 – 0.427248
17	60	6 – 0.6

Los resultados de las corridas efectuadas en el programa CALCA se pueden visualizar en las figuras de la siguiente sección 5.2.

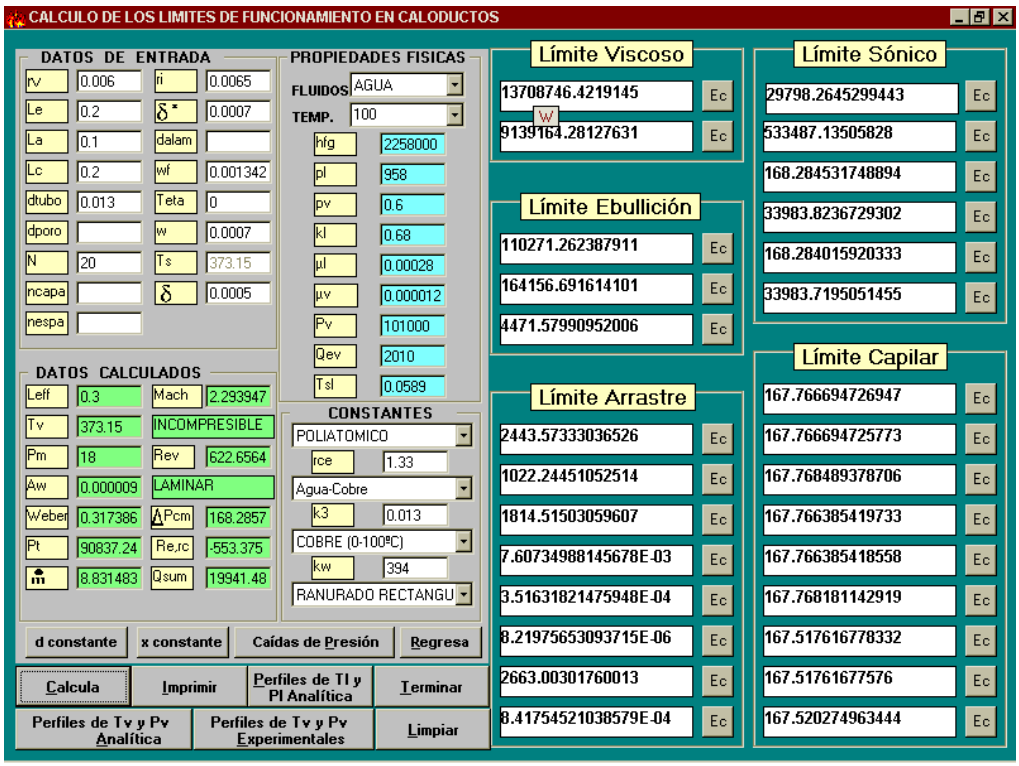
5.2. Análisis de Resultados y Comparación de Modelos.

Los resultados arrojados por el programa de cómputo CALCA se expresan y analizan de forma gráfica con la intención de apreciar el comportamiento de los principales parámetros que afectan cada uno de los modelos matemáticos, apéndice L, utilizados para el cálculo de los límites de funcionamiento. La comparación de los modelos matemáticos bajo este análisis permitirá considerar sólo a aquellos que regulan el comportamiento térmico del caloducto.

La figura 71, muestra los datos de entrada y los calculados por el programa de cómputo CALCA para las condiciones señaladas en 5.1.1., con un r_v= 6 mm y a la temperatura de operación, una vez alcanzado el estado estacionario, de 100 °C.

Algunos de los datos podrán reconocerse más adelante, en este análisis de resultados, sobre todo a esta temperatura y valor de r_v. La figura 71, es resultado de tan sólo una de las tantas corridas que se realizaron sobre el programa.

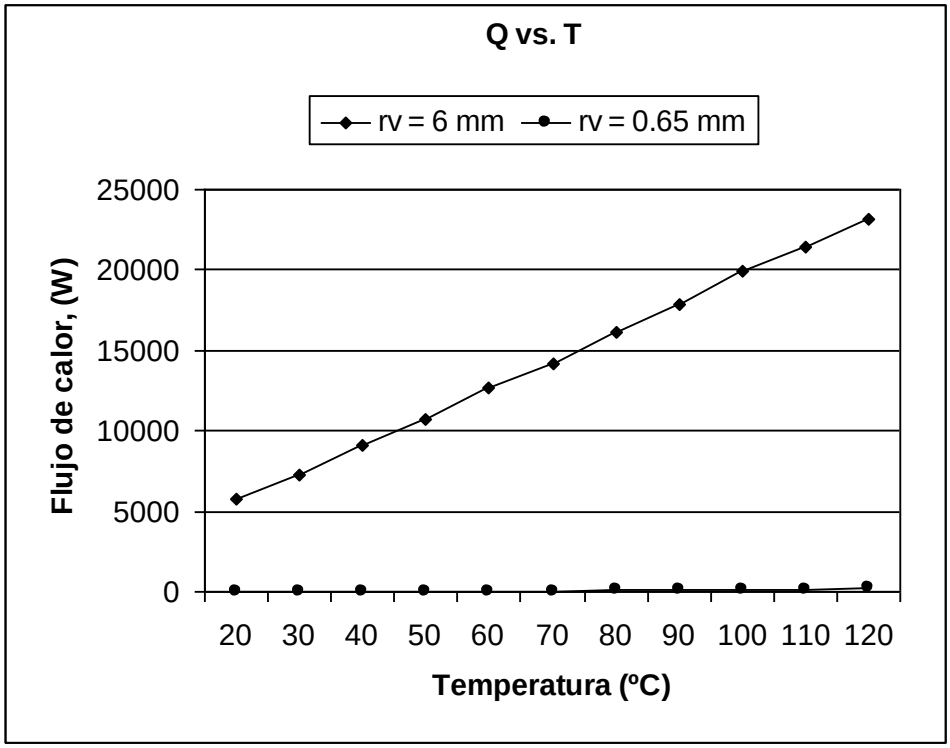
Figura 71. Cálculo de los Límites de Funcionamiento del Caloducto a r_v= 6 mm y 100 °C.



5.2.1. Máxima Capacidad de Transporte con la Temperatura.

Se iniciaron las corridas en el programa de acuerdo a las condiciones dadas en la sección 5.1.1. En las figuras 72, 73, y 74, se muestran las curvas de máxima capacidad de transporte de calor a temperaturas de 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110 y 120 °C para un caloducto ranurado de cobre que trabaja con agua como fluido de trabajo. La figura 72, muestra en conjunto las curvas para valores de (r_v/r_i) = 0.92 y (r_v/r_i) = 0.1 que se pueden dar en el caloducto bajo las condiciones especificadas.

Figura 72. Variación de la capacidad de transporte de calor del caloducto en función de la temperatura de operación.

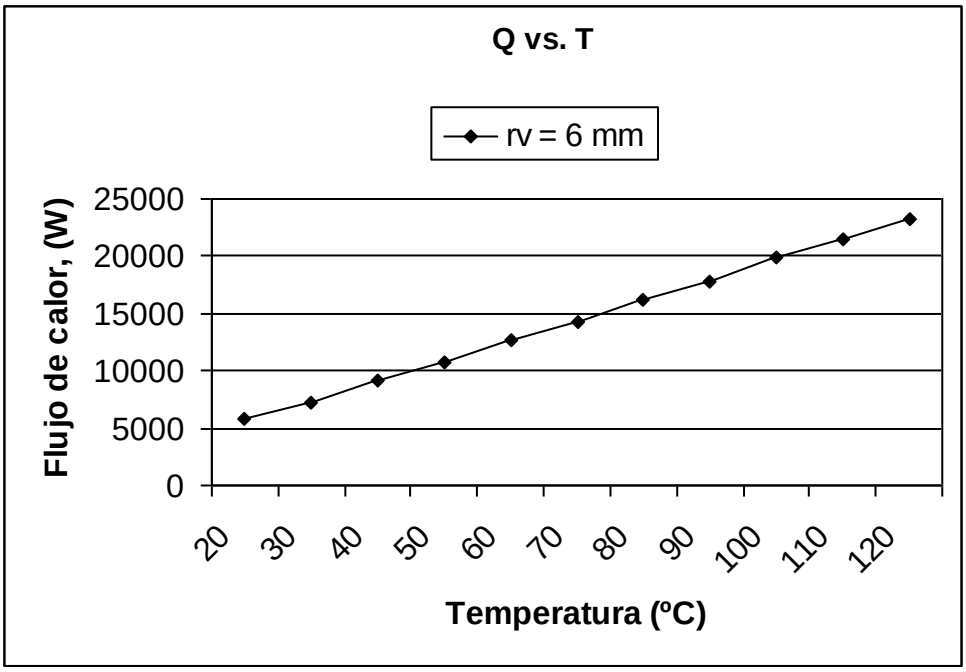


Las figuras 73 y 74, muestran las curvas para valores de (r_v/r_i) = 0.92 y (r_v/r_i) = 0.1, respectivamente. La figura 74, permite apreciar la línea de comportamiento dado los bajos valores de flujo de calor a las temperaturas de operación seleccionadas.

Se consideran los casos en que el área disponible para el flujo de calor es máxima, con un valor de r_v = 6 mm, y para cuando se tiene un área disponible para el flujo de calor mínimo, con un r_v = 0.65 mm.

Lo anterior implica situaciones en que el espesor de película es mínima y máxima, respectivamente. Esto originaría y explicaría los bajos valores de flujo de calor transferido para r_v = 0.65 mm.

Figura 73. Variación de la capacidad de transporte de calor del caloducto para una relación (r_v/r_i) = 0.92.



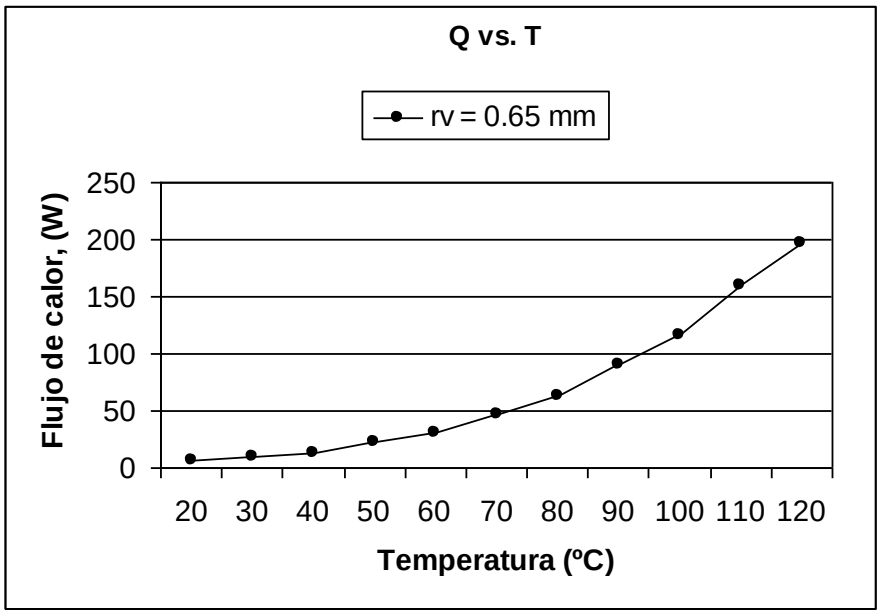
Sin embargo, la limitación del flujo axial de calor puede deberse principalmente al arrastre de líquido por el flujo de vapor y en un caso severo a la formación de espesores de película y de ondas tan grandes que se bloquea la acción total del caloducto, efecto al que se le refiere como límite de arrastre.

De igual manera, la reducción del espacio para la circulación del vapor origina que el caloducto alcance la limitación sónica al aumentar la velocidad del vapor por lo que, el segundo límite en alcanzarse es justamente el sónico.

Como se aprecia en la figura 73, para un r_v = 6 mm, con un espesor de película mínimo, el caloducto permite un mayor flujo axial de calor.

Sin embargo, para valores menores de r_v = 6 mm, la capacidad del caloducto se reduce, como se aprecia en la figura 74.

Figura 74. Variación de la capacidad de transporte de calor del caloducto para una relación $(r_v/r_i) = 0.1$.



El comportamiento lineal que se observa para r_v = 6 mm se pierde conforme disminuye el valor de r_v.

5.2.2. Modelos Matemáticos del Límite Viscoso.

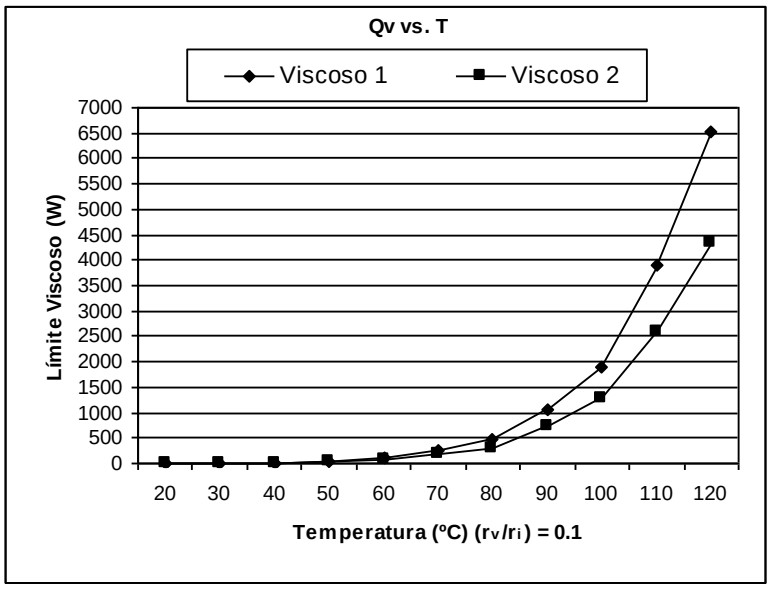
En la figura 75, se puede apreciar la variación del límite viscoso, para los dos modelos matemáticos utilizados en el programa, a diferentes temperaturas bajo las condiciones especificadas en 5.1.1 con $(r_v/r_i) = 0.1$.

Para un valor de r_v = 0.65 m, a partir de 20 °C y hasta los 60 °C se alcanza la limitación por arrastre; esta limitación ya no se presenta a temperaturas por arriba de los 70 °C y hasta los 120 °C.

Sin embargo, desde los 20 °C y hasta los 60 °C también se alcanza la limitación sónica al presentarse un número de mach mayor a la unidad. La limitación no se presenta a partir de los 70 °C y hasta los 120 °C.

La figura 75, nos permite visualizar el comportamiento térmico del caloducto antes de alcanzar la limitación viscosa.

Figura 75. Comportamiento del límite viscoso en función de la temperatura de operación y un radio de vapor de 0.65 mm.



El comportamiento de los dos modelos matemáticos utilizados para un r_v= 6 mm r_v = 0.65 mm, con la particularidad de que se tienen flujos axiales de calor demasiado elevados antes de que se alcance la limitación viscosa. De acuerdo al programa de cómputo, el número de Weber para r_v = 6 mm es mayor de la unidad desde los 20 °C hasta los 60 °C alcanzándose la limitación por arrastre mientras que a partir de los 70 °C este límite ya no se presenta.

Por debajo y hasta los datos que dan origen a las curvas presentadas, el límite viscoso no se alcanza; sin embargo, lo más factible es que por arriba de ellas el límite se alcance.

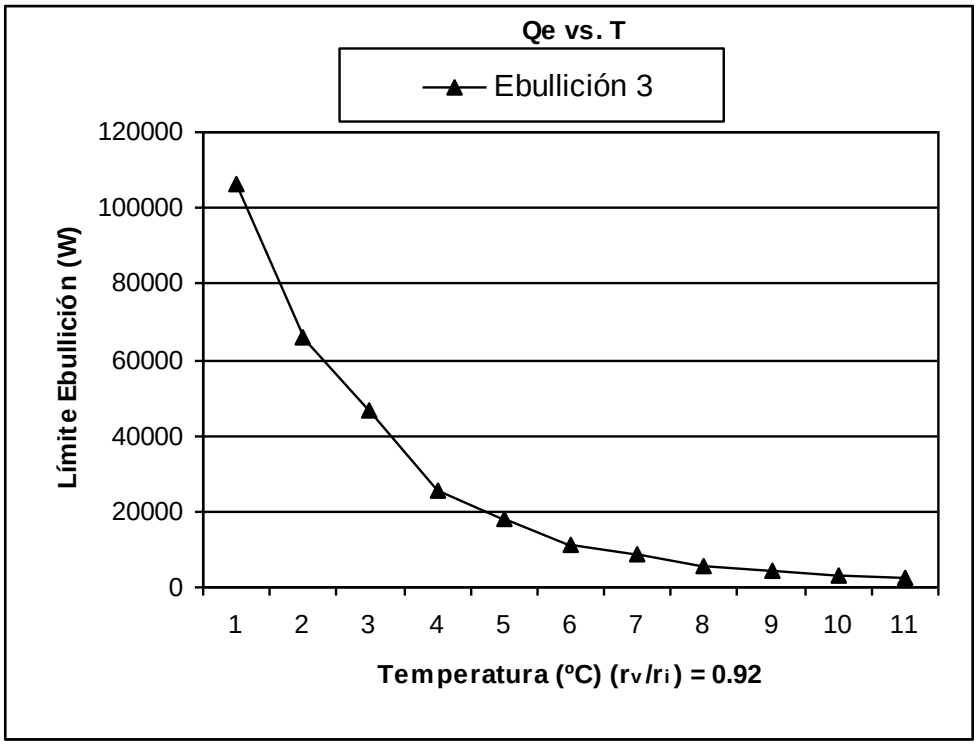
Las curvas en ambos modelos matemáticos son muy similares por lo que se puede aseverar que para un valor de (r_v/r_i) = 0.1 el comportamiento térmico del caloducto es homogéneo antes de alcanzar la limitación viscosa.

5.2.3. Modelos Matemáticos del Límite de Ebullición.

La figura 76, muestra la tendencia del límite de ebullición del tercer modelo matemático utilizado en el programa, a diferentes temperaturas bajo las condiciones especificadas en 5.1.1 y con (r_v/r_i) = 0.92. La disminución axial del flujo de calor es notoria en el modelo utilizado al verse alcanzado el límite de ebullición.

El tercer modelo matemático utilizado en el cálculo del límite de ebullición presenta un comportamiento similar para cualquier valor de r_v desde 6 mm hasta 0.65 mm y desciende al disminuir la temperatura de operación.

Figura 76. Comportamiento del tercer modelo matemático del límite de ebullición en función de la temperatura de operación y un radio de vapor de 6 mm.

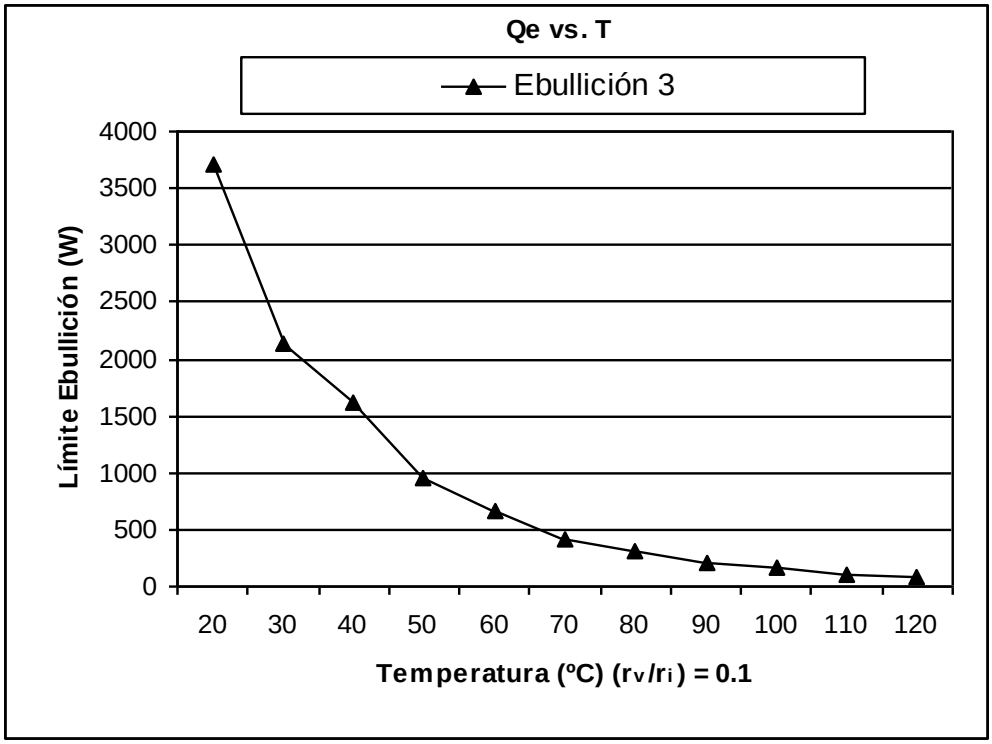


Con el incremento de la temperatura se aprecia, en la figura 76, el alcance de la limitación por ebullición cada vez a valores de suministro de calor menores para el tercer modelo matemático. Esto es, con el incremento de la temperatura la limitación por ebullición se alcanza con suministros de calor mayores.

La figura 77, muestra la tendencia del límite de ebullición del tercer modelo matemático utilizado en el programa a diferentes temperaturas bajo las condiciones especificadas en 5.1.1 y con $(r_v/r_i) = 0.1$.

En ella, donde $r_v = 0.65$ mm, se tiene un comportamiento térmico similar que para $r_v = 6$ mm con el tercer modelo matemático presentando limitación por ebullición a valores mucho más bajos de suministro de calor.

Figura 77. Comportamiento del primer y tercer modelos matemáticos del límite de ebullición en función de la temperatura de operación y un radio de vapor de 0.65 mm.



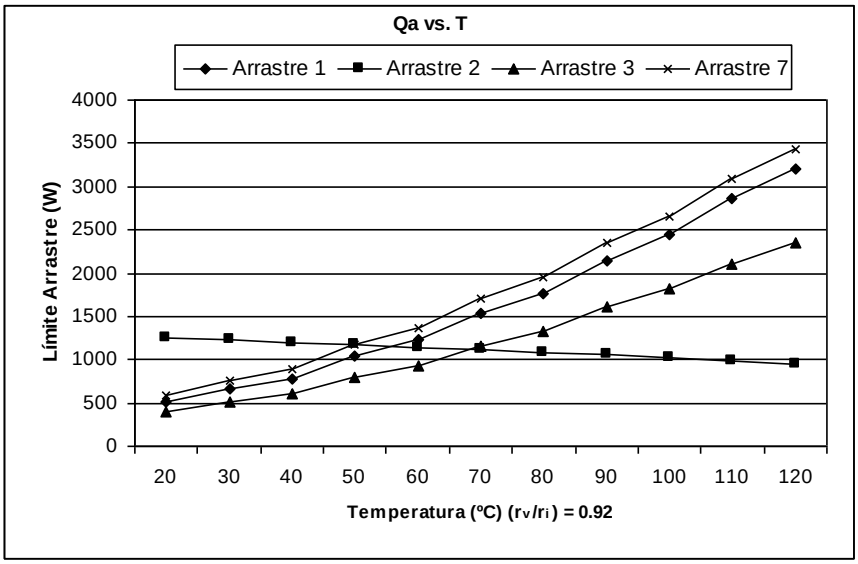
5.2.4. Modelos Matemáticos del Límite de Arrastre.

En las figuras 78 y 79, se pueden apreciar la variación del límite de arrastre con respecto de la temperatura, de cuatro de los ocho diferentes modelos matemáticos utilizados en el programa, y bajo las condiciones especificadas en 5.1.1., para valores de $(r_v/r_i) = 0.92$ y $(r_v/r_i) = 0.1$.

En la figura 78, para un $r_v = 6$ mm y con el incremento de la temperatura, tres modelos matemáticos alcanzan el límite de arrastre bajo suministros de calor cada vez mayores mientras que uno de estos, el segundo modelo, con el incremento de la temperatura alcanza cada vez más rápido la limitación.

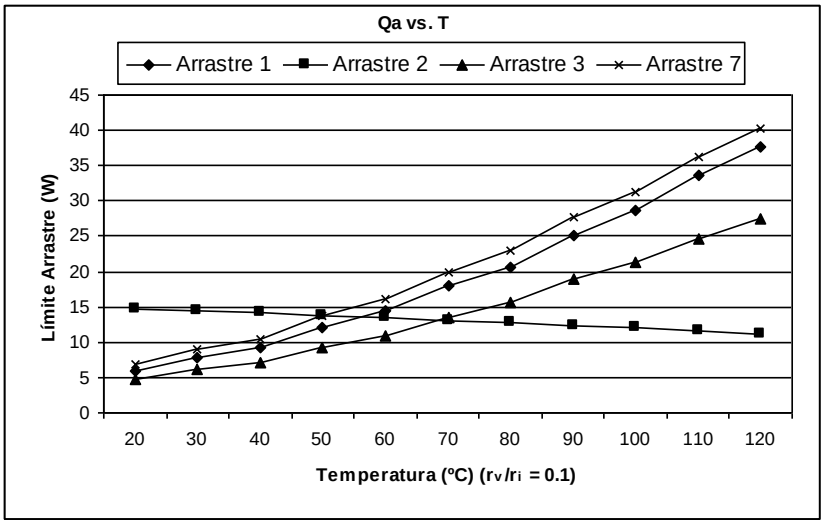
Aún cuando los modelos, según se aprecia en las figuras 78 y 79, permiten un mayor flujo axial de calor para un $r_v = 6$ mm que para un $r_v = 0.65$ mm, de acuerdo con el programa de cómputo, el límite de arrastre bajo las condiciones especificadas en 5.1.1. siempre se alcanza desde los 20 °C hasta los 60 °C para todos los modelos.

Figura 78. Comportamiento de los modelos matemáticos 1, 2, 3 y 7 del límite de arrastre en función de la temperatura de operación y un radio de vapor de 6 mm.



Es a partir de los 70 °C que el límite de arrastre se alcanza por arriba de la curva y no justamente en los puntos que la forman.

Figura 79. Comportamiento de los modelos matemáticos 1, 2, 3 y 7 del límite de arrastre en función de la temperatura de operación y un radio de vapor igual a 0.65 mm.



La figura 79, al igual que la figura 78, presenta un comportamiento térmico similar para los cuatro mismos modelos matemáticos antes de alcanzar el límite de arrastre.

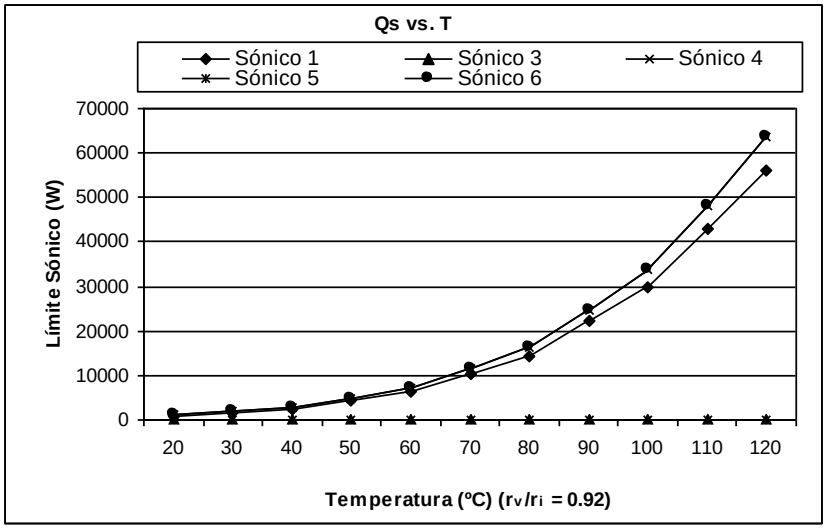
Para un r_v = 0.65 mm, los límites se alcanzan a valores de entre 5 y 45 W debido a la reducción del área de flujo de vapor mientras que, para un r_v = 6 mm el flujo axial de calor es mayor al presentarse el límite capilar a valores de entre 500 y 3500 W.

En apéndice L, se pueden observar los modelos matemáticos utilizados para el cálculo de los límites de funcionamiento y presentados en gráficas en esta sección para la comparación de su comportamiento.

5.2.5. Modelos Matemáticos del Límite Sónico.

En las figuras 80 y 81, se muestran las gráficas del comportamiento de cinco de los seis modelos matemáticos utilizados en el cálculo del límite sónico para una relación de (r_v/r_i) = 0.92 de acuerdo a las condiciones de entrada dadas en 5.1.1. En estas se visualizan el comportamiento térmico para el caloducto en el punto del límite viscoso para un r_V = 6 mm; esto es, cuando no se presenta un estrangulamiento al flujo del vapor.

Figura 80. Comportamiento del límite sónico, en algunos modelos matemáticos utilizados, en función de la temperatura de operación y un radio de vapor de 6 mm.



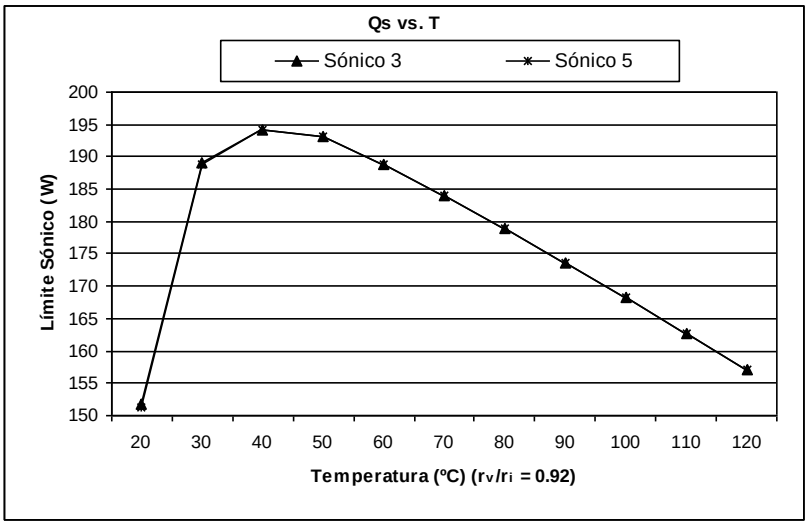
La limitación sónica para todos los modelos matemáticos se presenta por arriba de los valores que forman las curvas sónicas.

El segundo modelo sónico aún cuando permite un mayor flujo axial de calor antes de alcanzarse la limitación, comparado con los cinco modelos considerados en el gráfico,

presenta un comportamiento irregular a partir de los 20 °C y hasta los 60 °C por lo cual no se considera.

Los modelos matemáticos 1, 4 y 6, presentan un comportamiento similar al flujo axial de calor permitiendo que este sea mayor conforme al incremento de la temperatura debido a un suministro mayor de calor.

Figura 81. Comportamiento de los modelos matemáticos 3 y 5 para el cálculo del límite sónico en función de la temperatura de operación y un radio de vapor igual a 6 mm.



Las curvas correspondientes a los modelos 3 y 5 presentan un comportamiento lineal permitiendo el flujo axial de calor desde los 20 °C hasta poco antes de los 40 °C. Es a partir de los 40 °C que el caloducto indica un bloqueo y la curva desciende linealmente hasta reducir a casi los 155 W el flujo axial de calor. Cualquier valor por arriba a lo largo de la curva implica ya el alcance del límite sónico, figura 81 Aquí la velocidad del vapor alcanza la velocidad del sonido al final del evaporador.

En las figuras 82 y 83, se muestran las gráficas del comportamiento de los cinco modelos matemáticos utilizados en el cálculo del límite sónico para una relación de $(r_v/r_i) = 0.1$, de acuerdo a las condiciones de entrada dadas en 5.1.1.

Cuando se trabaja con un $r_v = 0.65$ mm, todos los modelos matemáticos alcanzan la limitación sónica por arriba de las líneas entregadas por el programa y se tiene flujos axiales de calor mucho menores que a $r_v = 6$ mm.

El segundo modelo matemático presenta un comportamiento más regular que para un r_v = 6 mm. Permite de igual forma, comparado con los cinco modelos considerados, un mayor flujo axial de calor con el incremento de la temperatura y el alcance del límite sónico a mayores suministros de calor.

Figura 82. Comportamiento del límite sónico, en algunos modelos matemáticos utilizados, en función de la temperatura de operación y un radio de vapor de 0.65 mm.

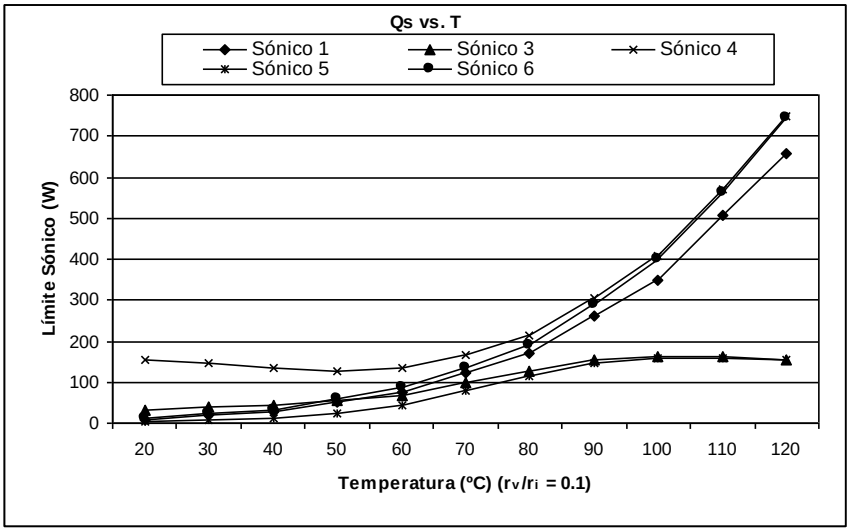
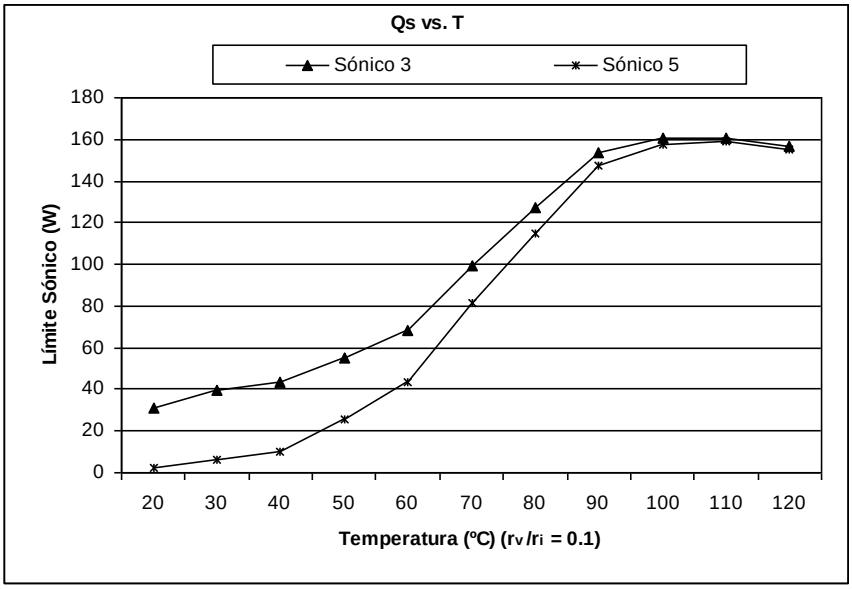


Figura 83. Comportamiento de los modelos matemáticos 3 y 5 para el cálculo del límite sónico en función de la temperatura de operación y un radio de vapor de 0.65 mm.



Para un r_v = 0.65 mm y para todos los modelos matemáticos presentados en las figuras 82 y 83, el programa nos indica que desde los 20 °C y hasta los 60 °C se alcanza el límite sónico sobre la misma línea y es a partir de los 70 °C que esta limitación se llegará a dar por arriba de las curvas bajo las especificaciones dadas en 5.1.1.

En las figuras 82 y 83, se aprecia un comportamiento mucho más regular y similar de los modelos matemáticos que en las figuras 80 y 81, pero de igual manera los modelos sónicos 3 y 5, por arriba de los 100 °C, disminuyen el flujo axial debido a la reducción del área para el flujo de vapor debido principalmente al incremento del espesor de película.

5.2.6. Modelos Matemáticos del Límite Capilar.

En la figura 84, se muestra las líneas de comportamiento de los nueve modelos matemáticos utilizados en el cálculo del límite capilar para una relación de (r_v/r_i) = 0.92, de acuerdo a las condiciones de entrada dadas en 5.1.1.

En el caso de los valores mostrados por los nueve modelos matemáticos utilizados en el programa de cómputo para el cálculo del límite capilar, se tienen flujos axiales de calor bastante similares para cuando se trabaja con $r_{v,}$ entre los 0.6 y 0.65 mm. Bajo las condiciones especificas dadas en 5.1.1., el primero de los límites que se alcanzaría sería justamente este, además de algunos modelos matemáticos del sónico, para valores de entre los 20 y hasta los 120 °C.

Existe una igualdad de resultados entre los modelos matemáticos 1 y 2, 4 y 5, 7 y 8 y una similitud entre los modelos 3 y 6 para valores de r_v entre 0.006 m y 0.00065 m. Los valores arrojados por el programa demuestran que el límite capilar se encuentra, prácticamente, en función de la temperatura de operación del caloducto más que de la variación del radio del vapor. El límite capilar se alcanza con mayor rapidez conforme el incremento de la temperatura para los nueve modelos matemáticos. Esto señala la gran relación numérica que existe entre los modelos considerados en este trabajo.

De igual manera, se puede apreciar que existe una gran afinidad al comportamiento lineal por parte de los modelos matemáticos considerados. Conforme el flujo de calor suministrado se incrementa, y se alcanza la temperatura de operación, el límite capilar se alcanza más rápido

disminuyendo su valor. El límite capilar, para relaciones (r_v/r_i) que van desde 0.92 hasta 0.1, permite una capacidad de transporte de calor desde los 208 W para temperaturas de operación de 20 °C hasta casi los 156 W para temperaturas de operación de 120 °C.

El programa considera a la temperatura que se gráfica como la temperatura de operación del caloducto, en estado estacionario, y bajo un suministro de calor constante.

Figura 84. Comportamiento de los modelos matemáticos que calculan el límite capilar en función de la temperatura de operación y un radio de vapor de 6 mm.

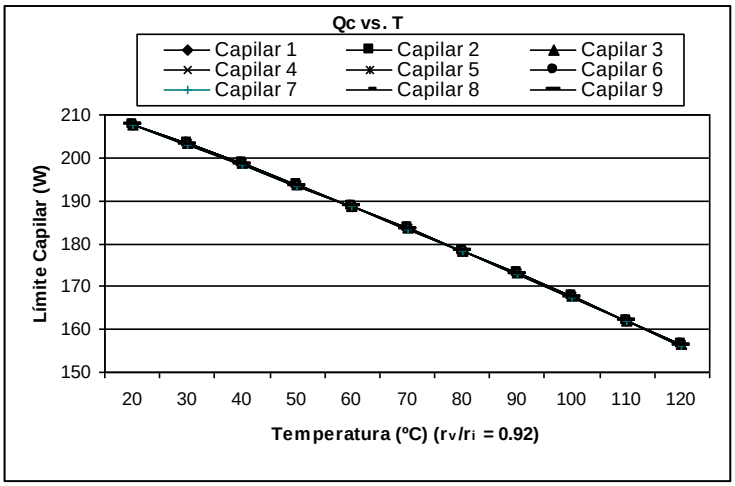
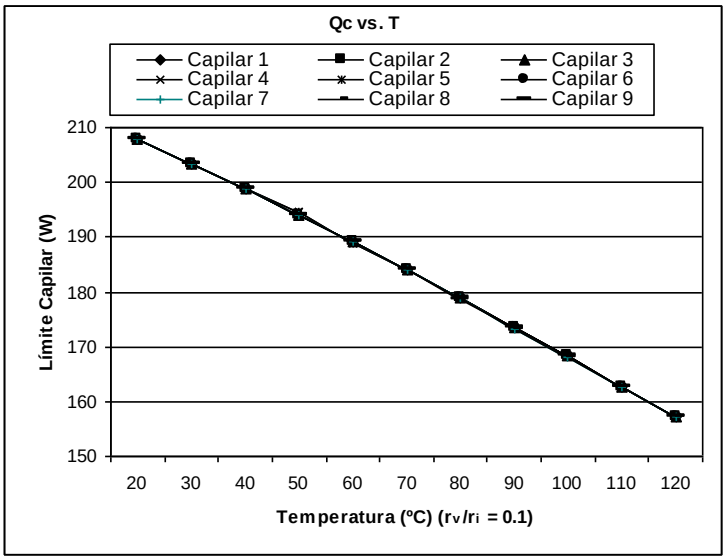


Figura 85. Comportamiento de los modelos matemáticos que calculan el límite capilar en función de la temperatura de operación y un radio de vapor de 0.65 mm.



Al igual que en la figura 84, en la figura 85, se muestran las gráficas de comportamiento de los nueve modelos matemáticos utilizados en el cálculo del límite capilar para una relación de $(r_v/r_i) = 0.1$, de acuerdo a las condiciones de entrada dadas en 5.1.1.

5.2.7. Máxima Capacidad de Transporte y Espacio Libre para el Flujo de Vapor.

Con las corridas efectuadas en el programa de cómputo, y de acuerdo a las condiciones dadas en la sección 5.1.1., se tienen las curvas de la figura 86, donde se muestra la variación del espacio disponible para el flujo de vapor con el incremento del flujo de calor a 60, 80 y 100 °C.

De acuerdo al programa de cómputo para una temperatura de 100 °C se tiene un flujo laminar para valores de r_v mayor ó igual a 1.624 mm; por debajo de este valor el flujo se vuelve turbulento y el único límite que siempre se presentará es el sónico para cuando r_v es menor ó igual a 0.287 mm debido a que el numero de Mach supera la unidad.

A 80 °C se presenta flujo laminar a r_v mayor ó igual 1.8 mm y turbulento a valores menores. El único límite que siempre se presentará para un r_v menor o igual que 0.427 m es nuevamente el sónico al superarse el número de Mach (mayor que uno).

A 60 °C, el programa de cómputo nos indica flujo laminar para valores de r_v mayor ó igual 1.99 mm y turbulento a partir de r_v menor o igual a 1.98 mm. De igual manera nos indica, bajo esta temperatura y las condiciones especificadas en 5.1.1., que desde r_v = 6 mm y hasta bajos valores de r_v de aproximadamente igual a 0.65 mm el límite de arrastre siempre se presentará a partir de r_v= 0.658 mm.

Como se ve, la transición del vapor de un flujo laminar a turbulento comienza a bajos valores de r_v y conforme disminuye la temperatura de operación estacionaria del caloducto este valor de la transición se observa a valores de r_v ligeramente mayores.

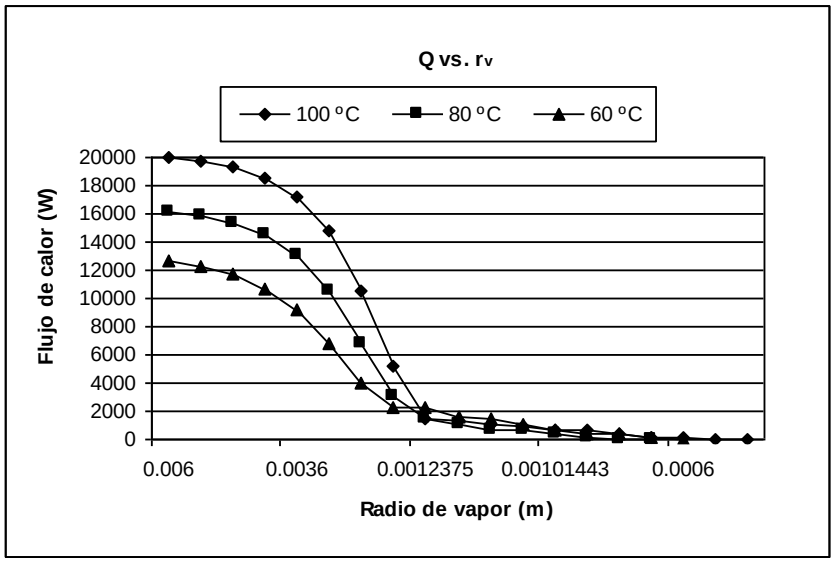
La figura 86, expresa la capacidad máxima de transporte de calor del caloducto en función de la variación del radio de flujo de vapor, r_v, a 60, 80 y 100 °C. Como se observa el conducto permite un mayor transporte de calor a valores de r_v grandes; esto es, cuando el espesor de película es pequeño. Su capacidad disminuye conforme el espesor de película aumenta reduciéndose el espacio disponible para el flujo de vapor y originando con ello un posible

incremento de su velocidad con lo que tiene una tendencia al alcance de los límites de arrastre y sónico.

A valores muy bajos de r_v se aprecia claramente la disminución de la capacidad de transporte del caloducto.

La curva a 100 °C muestra esta capacidad de transporte y se puede apreciar una suave disminución desde un r_v = 6 mm hasta aproximadamente un r_v = 3 mm. Esto es, cuando se reduce hasta la mitad el espacio libre para el flujo del vapor. Es después de este valor que disminuye drásticamente la capacidad de transporte del caloducto. A partir de r_v = 1 mm, cuando este espacio se ha reducido en un 84% la capacidad de transporte del calor del caloducto se reduce linealmente.

Figura 86. Variación de la capacidad de transporte de calor del caloducto en función del espacio libre de flujo para el vapor (r_v).



Las curvas trabajadas a 80 °C y 60 °C respectivamente, presentan un comportamiento térmico similar a la curva de 100 °C.

Se aprecia que la máxima capacidad de transporte de calor en el caloducto disminuye con la temperatura bajo un mismo valor de r_v.

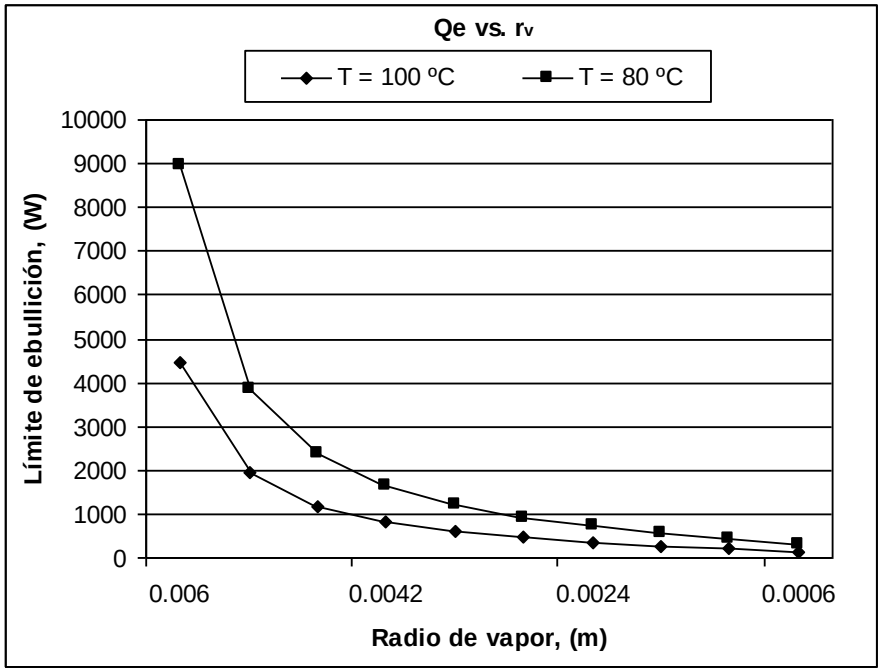
5.2.8. Relación entre Límites de Funcionamiento y Espacio Libre para el Flujo de Vapor.

De las corridas efectuadas en el programa de cómputo, y de acuerdo a las condiciones dadas en la sección 5.1.1., se logran obtener las curvas de comportamiento de los límites de funcionamiento permisibles en el caloducto. Las figuras 87 a 90, permiten analizar el comportamiento de los límites de operación del caloducto cuando se varía el espacio libre para el flujo del vapor a las temperaturas de 60, 80 y 100 °C.

Se han graficado tan sólo aquellos modelos matemáticos que, a una determinada temperatura, mejor describen cada uno de los límites operacionales del caloducto y reflejan mayor lógica en sus valores.

Las curvas del límite de ebullición, de la figura 87, se tienen a valores de transporte de calor menores que la del límite viscoso, cuyos modelos proporcionan valores del orden de Watts y por tanto, no son considerados. El mejor modelo del límite de ebullición proporciona valores coherentes a partir de los 80 °C. Se pueden apreciar las curvas a 80 °C y 100 °C.

Figura 87. Comportamiento del límite de ebullición con la variación del radio libre para el flujo de vapor a 80 °C y 100 °C.



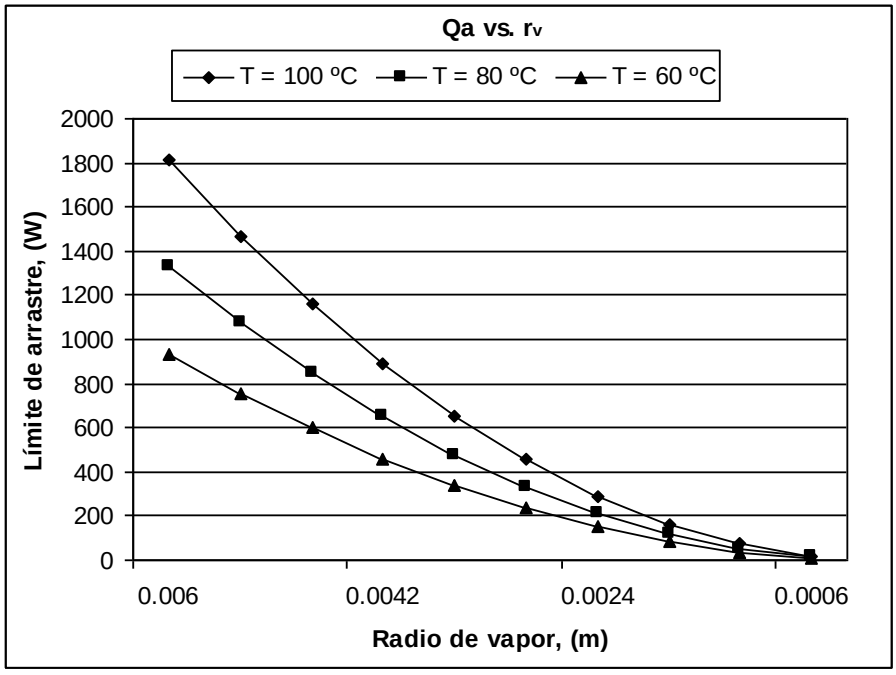
El alcance de los límites de ebullición, para cada una de las temperaturas de operación corridas en el programa, es bastante proporcional según se aprecia en el descenso de las curvas. Todas las curvas del límite de ebullición se acercan bastante entre si en la región de la transición del flujo del vapor, de laminar a turbulento.

El límite de arrastre, graficado en 88, nos indica que sólo a la temperatura de 60 °C y desde un r_v = 6 mm y hasta r_v = 0.65 mm este siempre se alcanza. Esto es, la región por debajo de la curva representa el alcance del límite de arrastre.

Para el caso de las temperaturas de 80 °C y 100 °C el límite de arrastre no se alcanza por debajo y sobre la curva misma, este se presentaría muy probablemente sobre los valores de temperatura manejados o bien para temperaturas menores de 60 °C a cualquier r_v.

Las líneas se aproximan bastante dentro de rango de transición de flujo del vapor.

Figura 88. Comportamiento del límite de arrastre con la variación del radio libre para el flujo de vapor a 60, 80 y 100 °C.

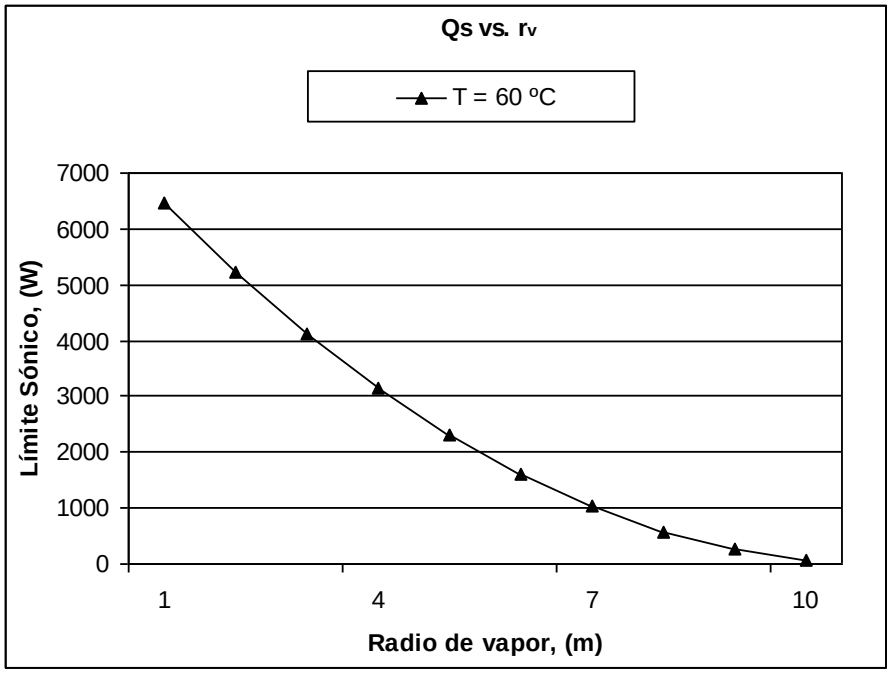


A partir de valores r_v = 0.6 mm hacia abajo se tiene irremediablemente el límite de arrastre a cualquier temperatura y el bloqueo del caloducto. De acuerdo a los valores mostrados para todos los límites, el de arrastre es de los primeros en alcanzarse.

El límite sónico de la figura 89, a 60 °C de temperatura de operación, se tiene siempre presente a valores de r_v por debajo de 0.6 mm. Es justamente en la cercanía de este valor que las curvas, de cualquier otra temperatura por arriba de los 60 °C, se aproximan bastante entre ellas.

De acuerdo al programa, el numero de Mach es mayor que la unidad para 60 °C cuando r_v alcanza los 0.658 mm.

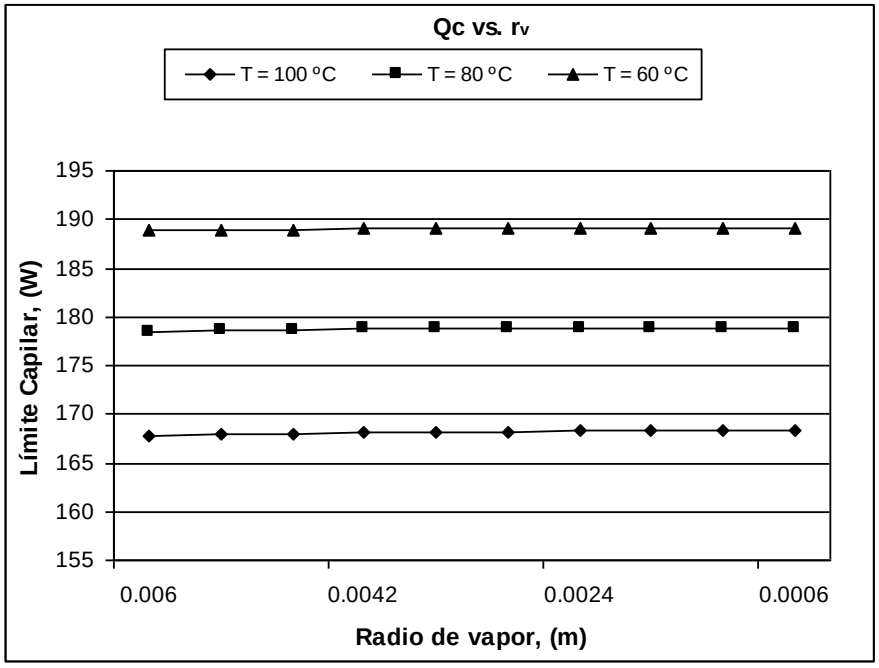
Figura 89. Comportamiento del límite sónico con la variación del radio libre para el flujo de vapor a 60 °C.



Conforme aumenta el espesor de película se tiene la disminución del área para el flujo del vapor y valores de r_v menores originando el incremento de la velocidad del vapor hasta llegar al sónico con un Mach mayor que la unidad.

Finalmente, en la figura 90, se aprecia el límite capilar más representativo de los nueve modelos matemáticos. Como se puede apreciar, bajo condiciones estacionarias, el comportamiento del límite capilar presenta prácticamente una constante bajo cualquier valor de r_v.

Figura 90. Comportamiento del límite capilar con la variación del radio libre para el flujo de vapor a 60, 80 y 100 °C.



Se puede apreciar que la limitación capilar se alcanza con mayor rapidez cuando se trabaja a 100 °C de temperatura, permitiendo alcanzar valores que van desde los 167.76 hasta los 168.26 W mientras que, a los 80 °C de temperatura, alcanza valores de 178.44 hasta 178.83 W; finalmente, a 60 °C de temperatura, alcanza valores desde 188.84 hasta 189.1 W.

Con la disminución del r_v, desde 6 mm hasta 0.6 mm, el incremento del límite capilar para cualquier temperatura considerada apenas si llega a 0.5 W lo que demuestra la casi constante de este límite.

Las máximas caídas de presión debido a la limitación capilar a 60, 80 y 100 °C son de 189.1, 178.8 y 168.2 Pa, respectivamente; por lo que, como se refleja, el límite capilar parece ser el primero en alcanzarse bajo las condiciones dadas en 5.1.1.

El orden en que se alcanzan los límites son primeramente el capilar, seguido por el de arrastre, el de ebullición, el sónico y por último el viscoso para las temperaturas de 100 °C y 80 °C.

Para 60 °C el orden en que se alcanzan los límites es similar a 80 °C y 100 °C con la variante de ser antes el sónico que el de ebullición.

Los modelos matemáticos graficados para cada límite corresponden al segundo para el viscoso, al tercero para el de ebullición, al tercero para el de arrastre, al primero para el sónico y al primero para el capilar; estos se pueden apreciar en la figura 99.

5.2.9. Perfiles de Temperatura.

Bajo las condiciones dadas en la sección 5.1.1., se obtienen las curvas de funcionamiento del caloducto. A partir de los valores obtenidos en las corridas se procede a la graficación de dichos valores para obtener la tendencia de su comportamiento a diferentes condiciones de operación.

Las figuras 91 y 92, permiten apreciar los perfiles de temperatura del vapor para las diferentes pruebas realizadas.

El radio libre para el flujo de vapor, r_v, constituye el segundo parámetro que se varía dentro de la razón de radios (r_v/r_i) y que expresa el espesor adimensional de la película. Los valores que se toman para r_v son de 6 y 0.65 mm para relaciones de 0.92 y 0.1, respectivamente.

La temperatura se constituye en el principal factor de cambio durante las corridas.

Para un valor del r_v = 6 mm, con las condiciones dadas en 5.1.1., el programa nos permite obtener el perfil de temperaturas, figura 91, para las temperaturas de operación constante de 120, 110, 100, 90, 80 y 70 °C y bajo los suministros de calor constante de 2,319, 2,143.2, 1,994.1, 1784.1, 1,612.6, 1421.6 Watts, respectivamente.

Se puede observar en los primeros 0.2 m del caloducto la disminución de la temperatura de operación. Esta sección constituye la sección de evaporación y el extremo izquierdo el punto donde se suministra la cantidad de calor necesaria para garantizar el alcance de la temperatura de operación. La zona adiabática queda comprendida en la zona media a partir de los 0.2 y hasta los 0.3 m en tanto que, los últimos 20 cm, de 0.4 a 0.5 m se reserva la zona de evaporación.

Cada corrida está representada por una temperatura de operación.

La curva del perfil de temperaturas a 70 °C, nos muestra una corrida en la que se han tomado como datos puntuales 10 termopares ubicados en cada una de las tres regiones del caloducto.

Este número de termopares se especifica en los datos de entrada de la rutina PPTAV, figura 95. Es decir, 30 en total.

Como se puede apreciar existe una disminución de la temperatura en el vapor al avanzar hasta el final de la sección del evaporador y el inicio de la zona adiabática. A partir de la zona adiabática y hasta la zona de condensación, de acuerdo a los resultados proporcionados por el programa, se observa la completa isotermicidad del caloducto.

A 70 °C, la pérdida de temperatura en la región de evaporación es 15.32 °C siendo la temperatura adiabática de 54.68 °C.

A 80 °C, la pérdida de temperatura es 11.96 °C con una temperatura adiabática de 68.04 °C.

A 90 °C la pérdida es de 4.88 °C con una temperatura adiabática de 85.12 °C.

A 100 °C la pérdida es de 4.62 °C con una temperatura adiabática de 95.38 °C.

A 110 °C la pérdida es de 2.04 °C con una temperatura adiabática de 107.96 °C.

A 120 °C la pérdida es de 1.89 °C con una temperatura adiabática de 118.11 °C.

Se puede observar que la temperatura adiabática siempre es menor a la de operación y la diferencia entre la primera y la segunda disminuye conforme aumenta la cantidad de calor suministrado.

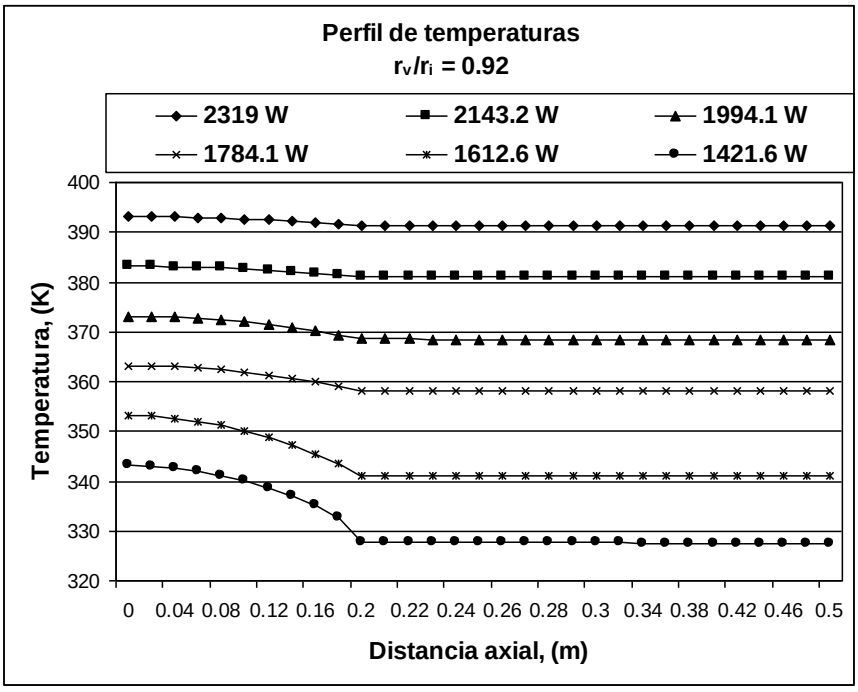
Como se puede apreciar al incrementar la temperatura de operación desde 70 °C hasta 120 °C, en seis corridas, el descenso de temperatura en el vapor al llegar al final de evaporador se reduce de forma significativa corrida a corrida de manera tal que a los 120 °C esta disminución es prácticamente muy pequeña.

El programa envía estos resultados considerando que se ha alcanzado la temperatura de operación en el punto de aplicación del calor suministrado; esto es, al inicio de la sección del evaporador. Considera, además, la temperatura en la sección del condensador sin la circulación externa de agua de enfriamiento.

Esto implica la posibilidad de reducir la temperatura del vapor al colocar un sistema de refrigeración en la zona permitiendo la extracción de calor lo que, finalmente, es la función principal del caloducto.

El programa no rige el comportamiento del vapor a temperaturas por debajo de los 60 °C con los modelos matemáticos, utilizados bajo las condiciones especificadas, por lo que deben tomarse con reservas pues muy posiblemente con el cambio de los valores de entrada esto ya no se presente, como se verá más adelante en la figura 92.

Figura 91. Perfil de temperaturas del caloducto sometido a diversos suministros de calor constante.



Para una relación (r_v/r_i) = 0.1 el comportamiento de los perfiles de temperatura en el caloducto se presenta en la figura 92. En ella se muestran dos temperaturas más que en la figura 91. no se presentan, las de 50 °C y 60 °C. Las temperaturas de operación constante de 120, 110, 100, 90, 80, 70, 60 y 50 °C se alcanzaron bajo suministros de calor constante de 197.48, 159.02, 116.46, 90.91, 62.45, 47.39, 30.77 y 22.41 Watts, respectivamente.

Las pérdidas de temperatura a lo largo de la zona de evaporación, para cada temperatura de operación, es mucho menor para un r_v = 0.65 mm (figura 92) que a un r_v = 6 mm (figura 91).

Sin embargo, entrando a la zona adiabática y aún más allá hasta la zona de condensación no se alcanza un estado estacionario pleno pues desde los 50° y hasta los 80 °C la temperatura disminuye constantemente.

Es a partir de los 90° y hasta los 120 °C que se percibe el alcance del estado térmico estacionario y sólo hasta la zona de condensación para las temperaturas de 90 °C y de 100 °C y desde la zona adiabática para los 110 °C y 120 °C.

Este comportamiento debe entenderse básicamente debido a que se está trabajando, en el caso de la figura 92, un caloducto con un espesor de película muy grande y prácticamente con los límites de arrastre y sónico alcanzados plenamente desde los 20 °C y hasta los 60 °C y por alcanzarse desde los 70 °C y hasta los 120 °C.

A temperaturas de operación por debajo de los 50 °C, reflejan justamente este comportamiento donde el programa nos señala el alcance total de ambos límites y su poca utilidad para el análisis del caloducto bajo un r_v = 0.65 mm y por las condiciones dadas en 5.1.1.

Mediante la observación de la distribución axial de la temperatura a lo largo de la superficie del caloducto, se puede determinar la máxima capacidad de transporte de calor.

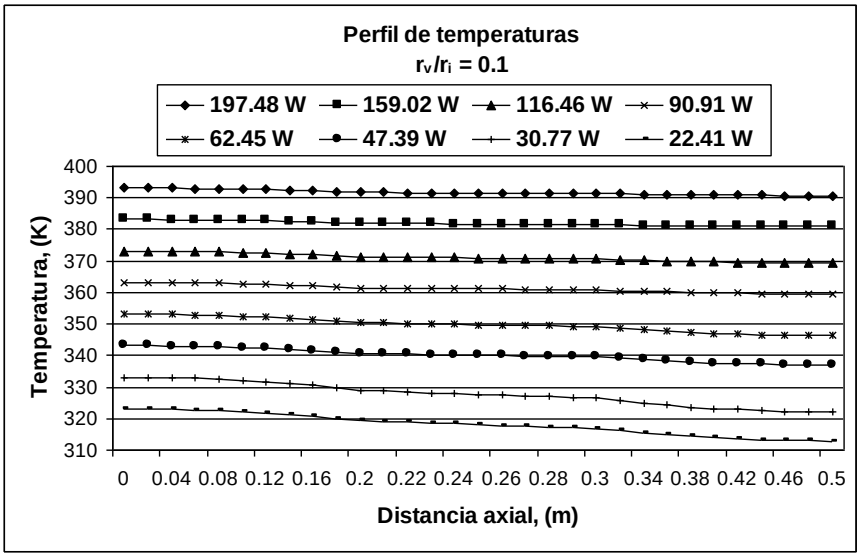
Las figuras 91 y 92, muestran los perfiles de temperatura axial típicos para diversas cargas térmicas aplicadas. Como se ve en la figura 91, el incremento de la carga suministrada o del flujo de calor origina incrementos graduales de la temperatura en las regiones del evaporador y condensador del caloducto.

En la región del evaporador de la figura 91, la distribución de la temperatura exhibe una ligera reducción de la temperatura al final del evaporador, que nos indicaría, muy posiblemente pérdidas de calor de tipo axial.

Sin embargo, en la figura 92, este comportamiento se extiende hasta la zona adiabática para las temperaturas de 110 °C y 120 °C y hasta el condensador para el resto de las temperaturas, desde los 100 °C hasta 50 °C, siendo mayores en las curvas de los 50 °C y 60 °C.

Con el incremento gradual de la carga térmica aplicada, el rápido incremento de la temperatura en el evaporador es patente. Este incremento de la temperatura en el evaporador es un indicio del secado parcial del caloducto y el alcance del límite capilar.

Figura 92. Perfil de temperaturas del caloducto sometido a diversos suministros de calor constante.



La caída de la temperatura a 50 °C en la región de evaporación es de 3.78 °C con una temperatura adiabática de 46.22 °C.

A 60 °C, la caída de la temperatura es de 4.18 °C y la temperatura adiabática de 55.82 °C.

A 70 °C, la pérdida de temperatura en la región de evaporación es de 2.39 °C siendo la temperatura adiabática de 67.61 °C.

A 80 °C, la pérdida de temperatura es de 2.71 °C con siendola temperatura adiabática de 77.29 °C.

A 90 °C la pérdida es de 1.65 °C con una temperatura adiabática de 88.35 °C.

A 100 °C la pérdida es de 1.89 °C con una temperatura adiabática de 98.11 °C.

A 110 °C la pérdida es de 1.22 °C con una temperatura adiabática de 108.78 °C.

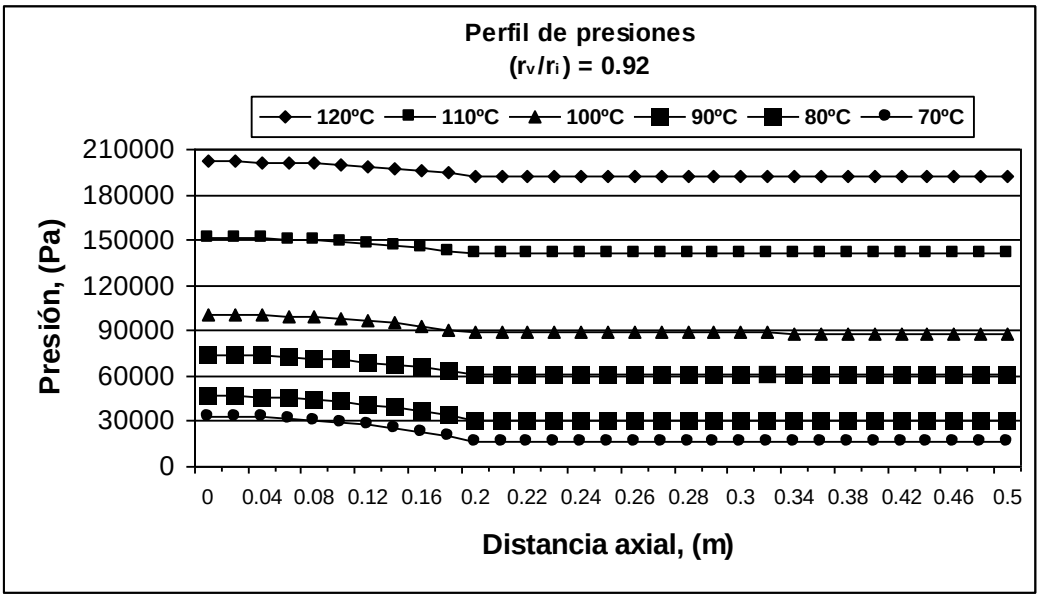
A 120 °C la pérdida es de 1.41 °C con una temperatura adiabática de 118.59 °C.

5.2.10. Perfiles de presión.

Las figuras 93 y 94, permiten apreciar los perfiles de presión del vapor para las diferentes pruebas realizadas. De igual manera el radio libre para el flujo de vapor, r_v, constituye el segundo parámetro que se varía; tomándose también dos valores, (r_v/r_i) = 0.92 y 0.1 para r_v = 6 mm y 0.65 mm, respectivamente. La temperatura se constituye en el principal factor de cambio durante las corridas.

La figura 93, muestra los perfiles de presión en función de la posición axial del caloducto para las temperaturas de operación ensayadas, desde 70 °C hasta 120 °C, con un r_v de 6 mm. Se puede observar un comportamiento análogo al señalado en la literatura desde la zona de evaporación hasta la adiabática.

Figura 93. Perfil de presiones del caloducto sometido a temperaturas de operación constante con r_v = 6 mm.



En las curvas de la figura 93, se incrementa de forma gradual la carga térmica aplicada. Como resultado, la velocidad de flujo de la masa de vapor se incrementa debido a la reducción gradual de la presión en la región del condensador.

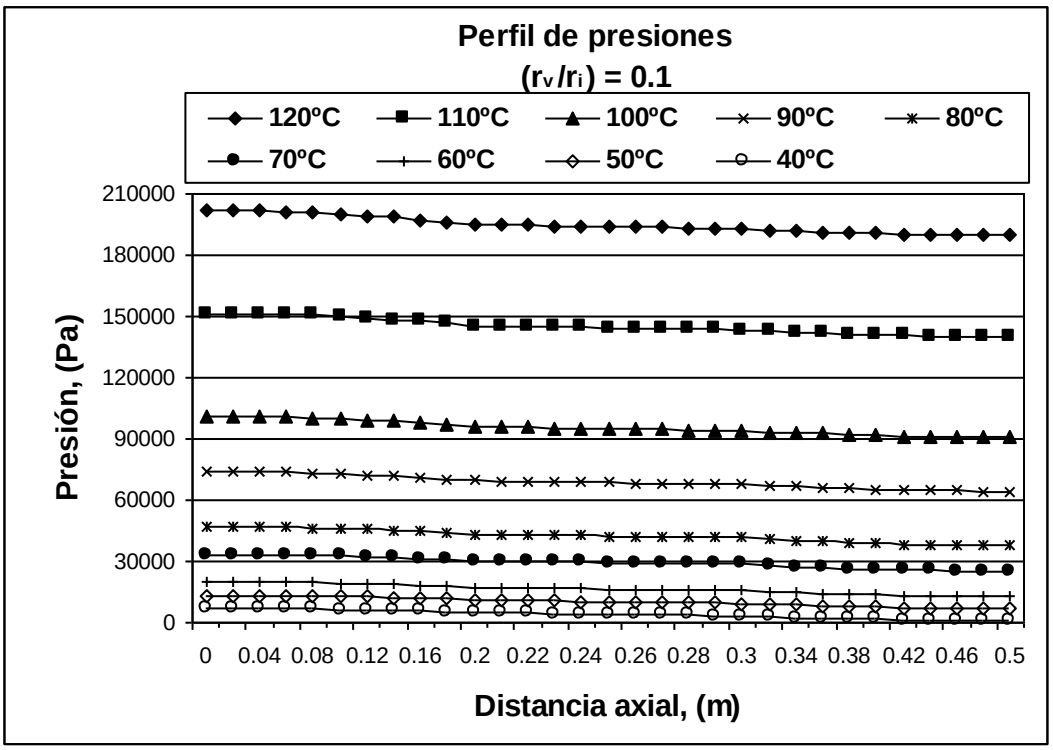
Sin embargo, para algunas temperaturas de operación, la velocidad del vapor alcanza la del sónico al salir del evaporador e incluso antes para cuando se trabajan temperaturas de 60 °C a

20 °C para un (r_v/r_i) = 0.92 y para temperaturas de operación igual o menores a 30 °C para un (r_v/r_i) = 0.1.

La figura 94, para un r_v = 0.65 mm, presenta una disminución constante de la presión incluso dentro de la zona de condensación donde, se supone, debiera existir una recuperación de ésta.

Los valores dados en perfiles de presiones a las temperaturas de operación se corresponden a los valores de los perfiles a temperatura tratados anteriormente.

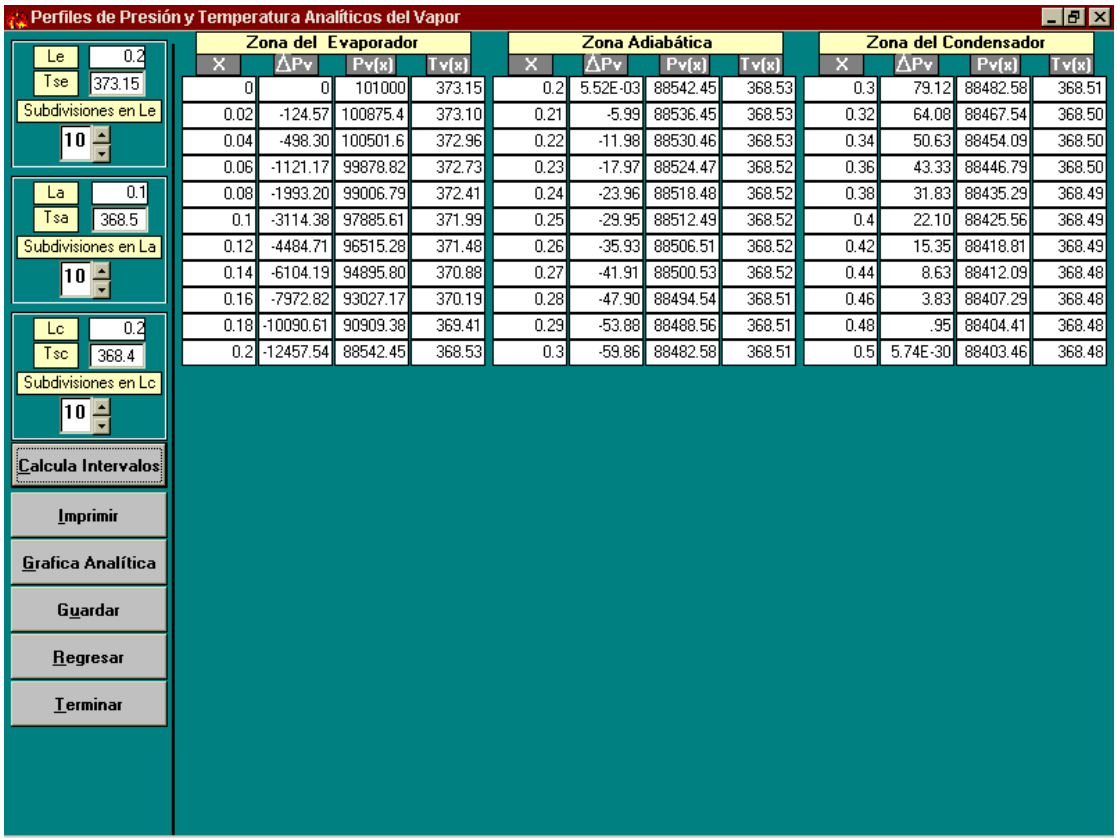
Figura 94. Perfil de presiones del caloducto sometido a diversos suministros de calor constante, con r_v = 0.65 mm.



La figura 95, a manera de ejemplo, permite visualizar una corrida, a 100 °C y un r_v = 6 mm, para el vapor. Se puede apreciar la selección de los treinta termopares, diez por cada sección, y los valores de presiones y temperaturas que proporciona el programa a lo largo del caloducto.

La figura 96, nos muestra el formato del reporte que el programa nos permite recuperar al guardar en el disco duro la información dada en la figura 95.

Figura 95. PPTAV mostrado por el programa CALCA para un r_v= 6 mm y 100 °C.



Zona del Evaporador				Zona Adiabática				Zona del Condensador			
X	ΔPv	Pv(x)	Tv(x)	X	ΔPv	Pv(x)	Tv(x)	X	ΔPv	Pv(x)	Tv(x)
0	0	101000	373.15	0.2	5.52E-03	88542.45	368.53	0.3	79.12	88482.58	368.51
0.02	-124.57	100875.4	373.10	0.21	-5.99	88536.45	368.53	0.32	64.08	88467.54	368.50
0.04	-498.30	100501.6	372.96	0.22	-11.98	88530.46	368.53	0.34	50.63	88454.09	368.50
0.06	-1121.17	99878.82	372.73	0.23	-17.97	88524.47	368.52	0.36	43.33	88446.79	368.50
0.08	-1993.20	99006.79	372.41	0.24	-23.96	88518.48	368.52	0.38	31.83	88435.29	368.49
0.1	-3114.38	97885.61	371.99	0.25	-29.95	88512.49	368.52	0.4	22.10	88425.56	368.49
0.12	-4484.71	96515.28	371.48	0.26	-35.93	88506.51	368.52	0.42	15.35	88418.81	368.49
0.14	-6104.19	94895.80	370.88	0.27	-41.91	88500.53	368.52	0.44	8.63	88412.09	368.48
0.16	-7972.82	93027.17	370.19	0.28	-47.90	88494.54	368.51	0.46	3.83	88407.29	368.48
0.18	-10090.61	90909.38	369.41	0.29	-53.88	88488.56	368.51	0.48	.95	88404.41	368.48
0.2	-12457.54	88542.45	368.53	0.3	-59.86	88482.58	368.51	0.5	5.74E-30	88403.46	368.48

Figura 96. Tabulación de resultados del PPTAV guardados por el programa CALCA para un r_v= 6 mm y 100 °C.

Zona Evaporador				Zona Adiabática				Zona Condensador			
X	ΔPv	Pv	Tv	X	ΔPv	Pv	Tv	X	ΔPv	Pv	Tv
0	0	101000	373.15	0.2	5.52E-03	88542.45	368.53	0.3	79.12	88482.58	368.51
0.02	-124.57	100875.42	373.10	0.21	-5.99	88536.45	368.53	0.32	64.08	88467.54	368.50
0.04	-498.30	100501.69	372.96	0.22	-11.98	88530.46	368.53	0.34	50.63	88454.09	368.50
0.06	-1121.17	99878.82	372.73	0.23	-17.97	88524.47	368.52	0.36	43.33	88446.79	368.50
0.08	-1993.20	99006.79	372.41	0.24	-23.96	88518.48	368.52	0.38	31.83	88435.29	368.49
0.1	-3114.38	97885.61	371.99	0.25	-29.95	88512.49	368.52	0.4	22.10	88425.56	368.49
0.12	-4484.71	96515.28	371.48	0.26	-35.93	88506.51	368.52	0.42	15.35	88418.81	368.49
0.14	-6104.19	94895.80	370.88	0.27	-41.91	88500.53	368.52	0.44	8.63	88412.09	368.48
0.16	-7972.82	93027.17	370.19	0.28	-47.90	88494.54	368.51	0.46	3.83	88407.29	368.48
0.18	-10090.61	90909.38	369.41	0.29	-53.88	88488.56	368.51	0.48	.95	88404.41	368.48
0.2	-12457.54	88542.45	368.53	0.3	-59.86	88482.58	368.51	0.5	5.74E-30	88403.46	368.48

Las figuras 97 y 98, nos muestran los gráficos de los perfiles de temperatura y presión que el programa de cómputo nos permite recuperar directamente para la corrida hecha a 100 °C y un r_v = 6 mm.

Figura 97. Gráfica del perfil de temperaturas en función de la posición axial para el vapor para un r_v= 6 mm y 100 °C.

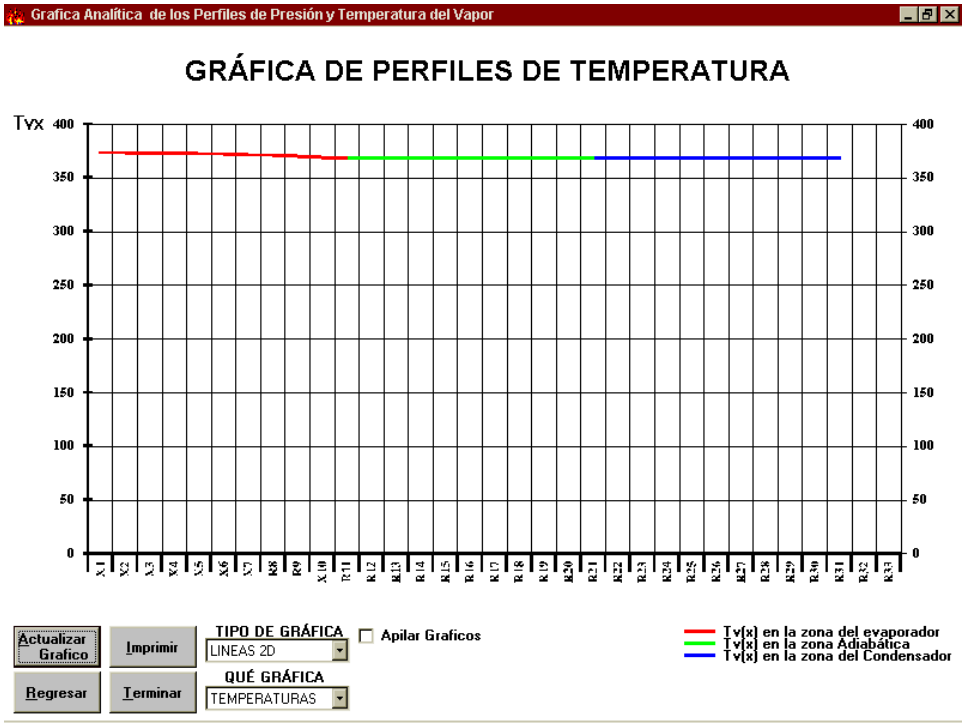
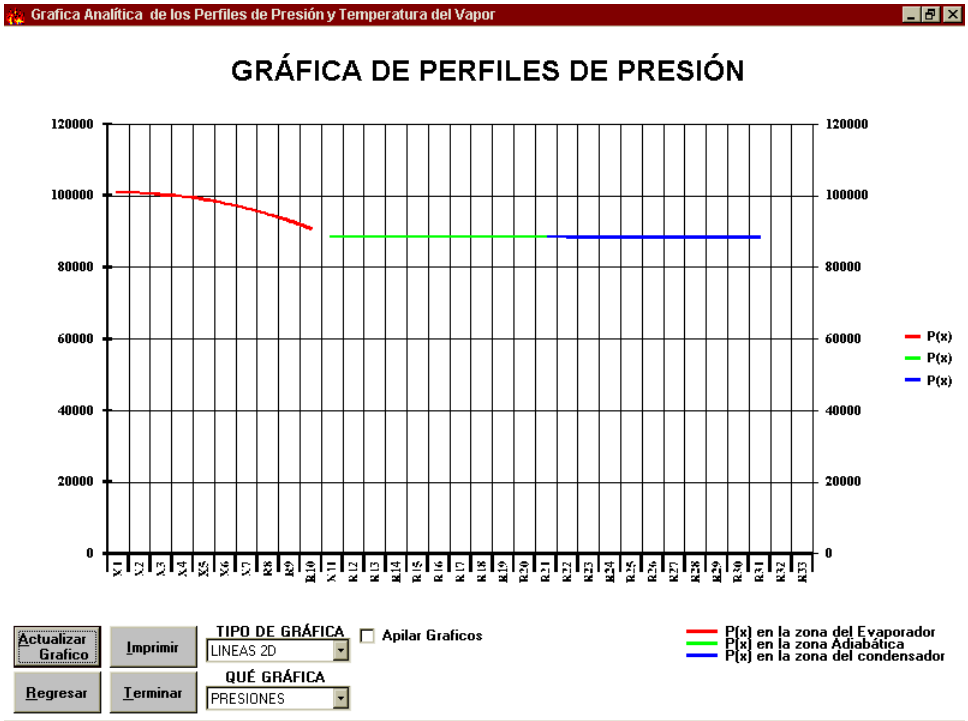
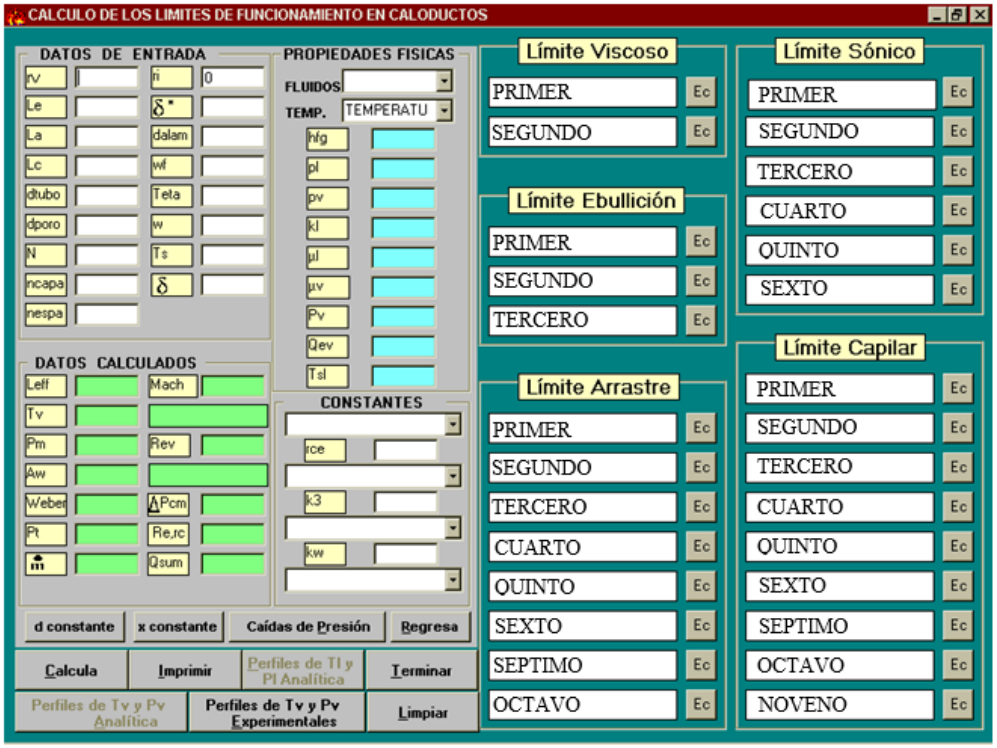


Figura 98. Gráfica del perfil de presiones en función de la posición axial para el vapor para un r_v= 6 mm y 100 °C.



En la figura 99, se señalan los límites operacionales que se consideraron de mayor confiabilidad tanto en la comparación de modelos matemáticos, bajo las condiciones especificadas en 5.1.1, como para la comparación con datos experimentales descrito en apartado 5.3.

Figura 99. Numeración de los principales modelos matemáticos utilizados en el cálculo de los límites de funcionamiento.



5.3. Comparación con Datos Experimentales.

Se efectúan dos corridas del programa de cómputo CALCA a fin de comparar los resultados que arroje, con algunos resultados experimentales registrados en la literatura, con la intención de conocer las ventajas y alcances del mismo y dar un mayor rango de confianza a su aplicación.

5.3.1. Aplicación del Programa de Cómputo CALCA.

Los dos ejemplos de aplicación registrados en la literatura y utilizados para su comparación con los resultados arrojados por el programa CALCA son:

Aplicación 5.1.- Un caloducto, de 5 mm de diámetro interior, para aplicaciones electrónicas utiliza metanol como fluido de trabajo. Las secciones del evaporador, del condensador y adiabática tienen 2 cm de longitud cada una. El diámetro para el flujo del vapor es de 4 mm mientras que la pared se construye de aluminio 2024-T6 de 1 mm de espesor. La estructura capilar está constituida por 10 ranuras axiales rectangulares de 0.5 mm de ancho y profundo. El caloducto opera a 30 °C con un ángulo de 5 grados. Se requieren determinar sus límites, capilar, sónico, de arrastre, viscoso y de ebullición considerando:

a) despreciables las pérdidas de presión a través de las transiciones de fase y la recuperación inercial de presión,

b) ninguna pérdida de presión.

Los datos de entrada tomados para las corridas son:

Radio ocupado por el vapor	2	(mm)
Longitud de la zona de evaporación	0.02	(m)
Longitud de la zona adiabática	0.02	(m)
Longitud de la zona de condensación	0.02	(m)
Diámetro del tubo	0.005	(m)
Número de ranuras	10	
Radio interior	0.0025	(m)
Profundidad de ranura	0.0005	(m)
Amplitud entre ranuras	0.00107	(m)
Angulo de inclinación del caloducto	5	(grados)
Ancho de ranura	0.0005	(m)
Fluido de trabajo	Metanol	

Temperatura de operación	30 °C	
Relación de calores específicos del vapor	1.33	
Factor de corrección metanol-aluminio 2024-T6	0.0025	
Conductividad térmica del aluminio 2024-T6	177	(W/m°C)
Geometría interna de la estructura capilar	Axial ranurado	

Los resultados de las propiedades físicas arrojados por el programa se indican en la tabla 10.

Tabla 10. Valores de las propiedades físicas resultado del programa de cómputo CALCA.

h_{fg}	Calor latente	1,155,000 J/kg
ρ_l	Densidad del líquido	782 kg/m^3
ρ_v	Densidad del vapor	0.31 kg/m^3
k_l	Conductividad térmica del líquido	0.203 W/mK
μ_l	Viscosidad del líquido	0.000521 kg/ms
μ_v	Viscosidad del vapor	0.0000098 kg/ms
P_{sat}	Presión de vapor	25,000 Pa
C_P	Calor específico del vapor	1,470 J/kgK
σ_l	Tensión superficial del líquido	0.0218 N/m

En la tabla 11, se muestran los valores de los limites de funcionamiento, objetivo de la aplicación, que la literatura proporcionan y el programa arrojan.

De acuerdo al análisis experimental los límites, capilar, de arrastre y de ebullición constituyen los primeros valores en ser alcanzados en ese orden mientras que, de acuerdo al programa de cómputo, los límites de arrastre, de ebullición y capilar se alcanzarán, en ese igual orden.

Se presenta una variación del valor para el límite de ebullición de 19.73% menor a lo reportado. Mientras que para el límite capilar la variación del valor es notoria con 72.4844 y 73.3357 W mayor a lo reportado, para cuando se consideran algunas pérdidas de presión y para cuando no las hay, respectivamente; lo que muestra una capacidad mayor del caloducto a la limitación capilar por arriba del 500%.

Existe una gran similitud entre los resultados reportados y los arrojados por el programa CALCA en cuanto a los límites viscoso, de arrastre y sónico se refiere.

Los valores de la tabla 11, se tomaron por ser los más representativos para el caloducto en cuestión por lo que los modelos matemáticos que calculan estos bien pudieran considerarse para el diseño y estudio de su comportamiento. Algunos otros resultados que el programa arroja se pueden apreciar en la tabla 12.

Tabla 11. Límites de funcionamiento experimentales y resultado del programa de cómputo CALCA.

PARÁMETRO		EXPERIMENTAL	CALCA	
			Con pérdidas	Sin pérdidas
$\Delta P_{c,m}$,	Pa	87.2	87.2	87.2
Límite viscoso,	W	71,758.4	71,737.70	71,737.70
Límite de ebullición,	W	84.2	67.58	67.58
Límite de arrastre,	W	53.4	53.36	53.36
Límite sónico,	W	606	605.64	605.64
Límite capilar,	W	13.5	85.9844	86.8357

Tabla 12. Cálculos adicionales realizados por el programa de cómputo CALCA.

L_{eff}	Longitud efectiva	0.04 m
Tv	Temperatura del vapor	303.15 K
Pm	Peso molecular	33 kg/kgmol
Aw	Área de sección transversal de la estructura capilar	0.0000025 m^2
We	Número de Weber	3.211839
Pt	Presión de trabajo	22,837.25 Pa
$\dot{m}$	Flujo másico del vapor	3.253817 x 10^{-4} Kg/s
M	Número de Mach	6.080793 x 10^{-2}
	Tipo de flujo	Incompresible
Rev	Número de Reynolds	2452.215
	Tipo de flujo	Turbulento
Re,rc	Reynolds radial en el condensador	-264.214
Qsum	Calor suministrado	375.8159 W

Las figuras 100 y 101, muestran la pantalla principal del CLFC donde se aprecian todos los valores anteriormente dados, así como algunos límites de funcionamiento más, correspondientes a modelos matemáticos que no rigen el comportamiento del caloducto en cuestión.

Figura 100. Ventana de valores de entrada para el Cálculo de los Límites de Funcionamiento del Caloducto y resultados adicionales sin desprecio de gradientes de presiones.

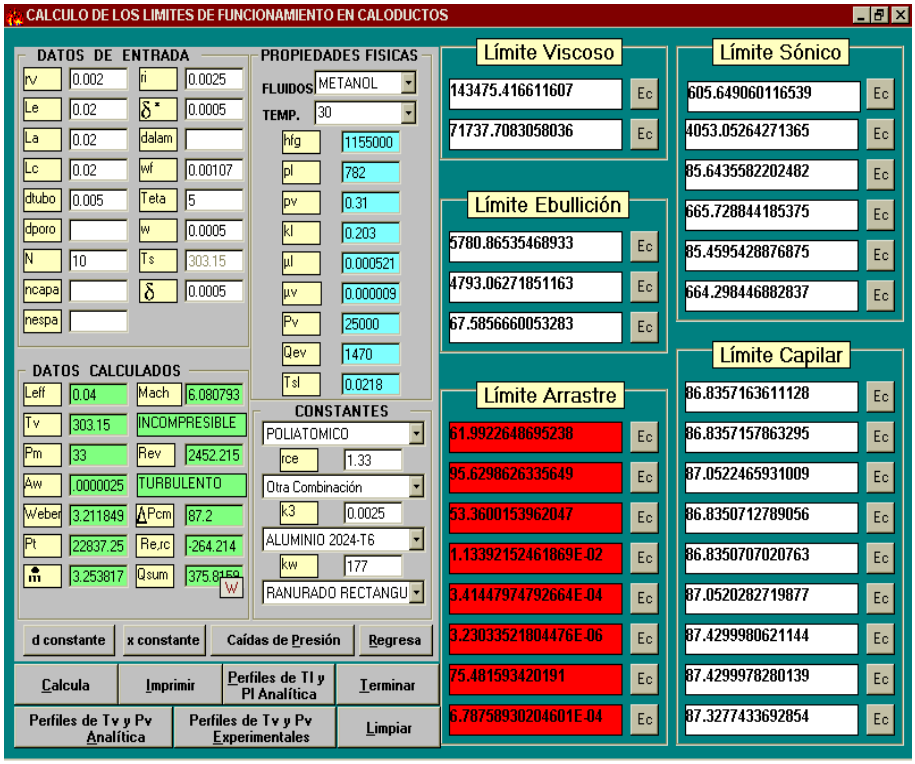
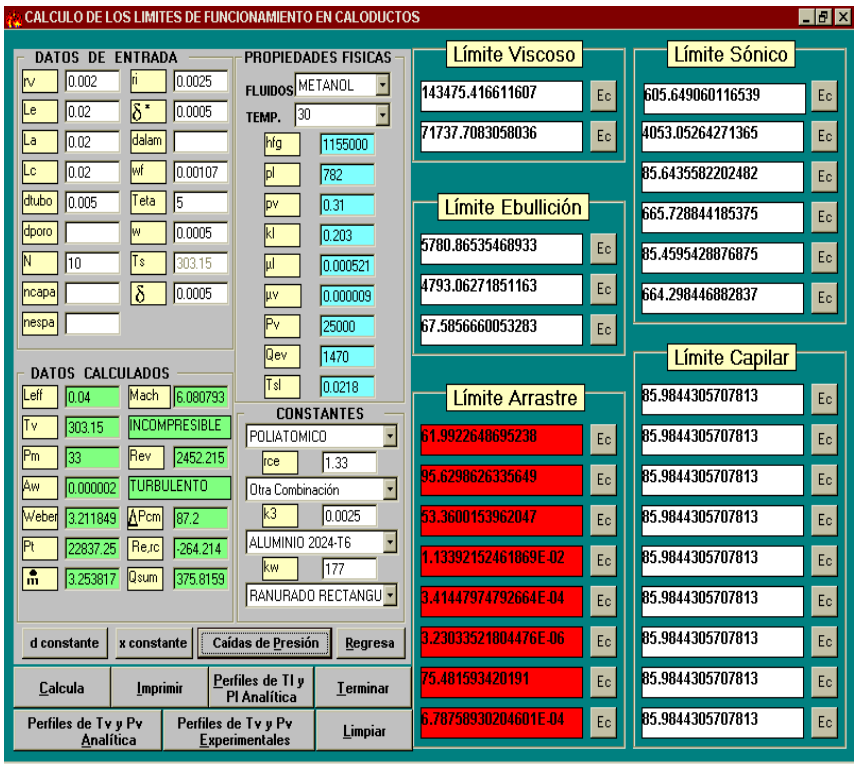


Figura 101. Ventana de valores de entrada para el Cálculo de los Límites de Funcionamiento del Caloducto y resultados adicionales despreciando los gradientes de presiones.



Según se aprecia el Weber resulta ser mayor que la unidad por lo que el límite de arrastre es el principal factor limitante de la capacidad de transporte de calor.

De considerarse los límites, capilar y de arrastre experimentales, dos de los factores limitantes de la capacidad de transporte, estos pueden mejorarse mediante el diseño de un caloducto con ancho de ranuras menores.

Siendo $\Delta P_{c,m}$ la máxima presión capilar que el caloducto puede presentar, operando en estado estacionario, es factible trabajar con este tipo de caloducto al disminuir el ancho de ranuras.

Aplicación 5.2.- Un caloducto para aplicaciones electrónicas utiliza etanol como fluido de trabajo. Su sección de evaporación mide 2 cm de longitud, la de condensación 3 cm y no cuenta con una sección adiabática. El diámetro de la sección transversal para el flujo del vapor es de 3 mm mientras que su estructura capilar consta de 3 capas de mallas de acero inoxidable 304 del No. 500 (diámetro de alambre = 2.159×10^{-5} m). El caloducto opera a 30 °C en posición horizontal y se requieren determinar sus límites, capilar, sónico, de arrastre, viscoso y de ebullición considerando que las caídas de presión hidrostática axial, los gradientes de presión inercial y a lo largo de las zonas de transición son despreciables.

Los datos de entrada tomados para las corridas son:

Radio ocupado por el valor	1.5	(mm)
Longitud de la zona de evaporación	0.02	(m)
Longitud de la zona de condensación	0.03	(m)
Diámetro del tubo	0.00651816	(m)
Número de la malla	500	
Número de mallas	3	
Número de espacios entre mallas	3	
Radio interior	0.00325908	(m)

Diámetro de alambre	0.00002159	(m)
Angulo de inclinación del caloducto	0	(grados)
Fluido de trabajo	Etanol	
Temperatura de operación	30 °C	
Relación de calores específicos del vapor	1.33	
Factor de corrección etanol-acero inoxidable	0.0025	
Conductividad térmica del acero inoxidable	14.9	(W/m°C)
Geometría interna de la estructura capilar	Capas de mallas	

Los resultados de las propiedades físicas arrojados por el programa se indican en la tabla 13, mientras que en la tabla 14, se dan los valores de los limites de funcionamiento que la literatura proporciona y el programa arroja.

Tabla 13. Valores de las propiedades físicas resultado del programa de cómputo CALCA.

h_{fg}	Calor latente	888,600 J/kg
ρ_l	Densidad del líquido	781 kg/m^3
ρ_v	Densidad del vapor	0.38 kg/m^3
k_l	Conductividad térmica del líquido	0.168 W/mK
μ_l	Viscosidad del líquido	0.00102 kg/ms
μ_v	Viscosidad del vapor	0.0000091 kg/ms
P_{sat}	Presión de vapor	10,000 Pa
C_P	Calor específico del vapor	1,440 J/kgK
σ_l	Tensión superficial del líquido	0.0244 N/m

De acuerdo al análisis experimental los límites de arrastre, de ebullición y sónico constituyen los primeros valores en ser alcanzados seguidos del límite capilar y viscoso; mientras que, de acuerdo al programa de cómputo, los límites de ebullición, de arrastre y sónico seguidos por el capilar y el viscoso se alcanzarían, en ese orden por igual.

Mientras que el valor del límite de ebullición presenta una variación de 86.7 % menor a lo reportado el valor del límite capilar que el programa nos proporciona es 3.3 veces mayor que el reportado en la literatura.

Se presenta una gran similitud de resultados en cuanto a los límites de arrastre y sónico se refiere.

Tabla 14. Límites de funcionamiento experimentales y resultado del programa de cómputo CALCA.

PARÁMETRO		EXPERIMENTAL	CALCA
$\Delta P_{c,m}$,	Pa	1,921	1,921.25
Límite viscoso,	W	12,575.3	14,753.78
Límite de ebullición,	W	89	11.86
Límite de arrastre,	W	53.2	53.14
Límite sónico,	W	184	183.53
Límite capilar,	W	432	1,844.92

Los valores de la tabla 14, se tomaron por ser los más representativos para el caloducto en cuestión por lo que los modelos matemáticos que calculan estos bien pudieran considerarse para el diseño y estudio de su comportamiento.

Los efectos dominantes que limitan la capacidad de transporte de este caloducto lo constituyen principalmente los límites de arrastre y de ebullición. Para que estos valores se

puedan incrementar se recomienda básicamente incrementar por igual, de forma muy ligera, el diámetro del espacio por donde fluye el vapor.

Algunos otros resultados que el programa arroja se pueden apreciar en la tabla 15:

Tabla 15. Cálculos adicionales realizados por el programa de cómputo CALCA.

L_{eff}	Longitud efectiva	0.025 m
Tv	Temperatura del vapor	303.15 K
Pm	Peso molecular	46 kg/kgmol
Aw	Área de sección transversal de la estructura capilar	0.0000012736 m^2
We	Número de Weber	5.7057 x 10^{-4}
Pt	Presión de trabajo	75,029.59 Pa
M	Número de Mach	2.9818
	Tipo de flujo	Incompresible
Rev	Número de Reynolds	100,838.7
	Tipo de flujo	Turbulento
Qsum	Calor suministrado	151.84 W

Las figuras 102 y 103, muestran la pantalla principal del CLFC donde se aprecian todos los valores anteriormente dados, así como algunos límites de funcionamiento más, correspondientes a modelos matemáticos que no obedecen al comportamiento del caloducto en cuestión.

Según se aprecia, bajo las condiciones de operación no se ha alcanzado ninguno de los limites de funcionamiento. El límite capilar vendría a ser el primero en alcanzarse de acuerdo al valor experimental mientras que de acuerdo al programa sería el de ebullición.

Figura 102. Ventana de valores de entrada para el Cálculo de los Límites de Funcionamiento del Caloducto y resultados adicionales.

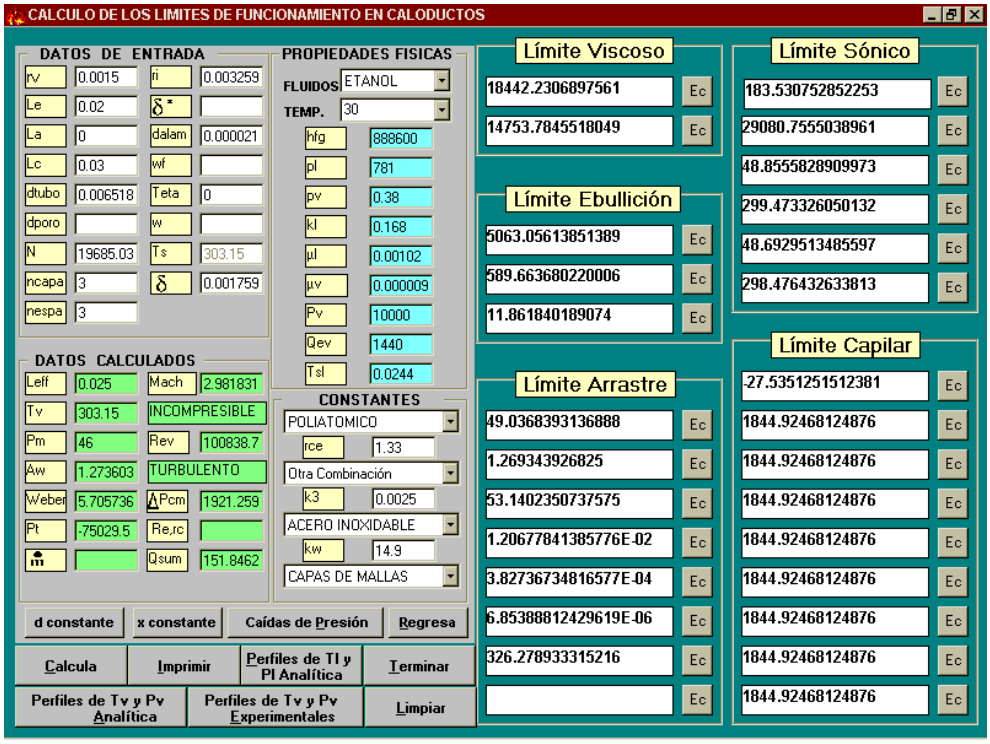
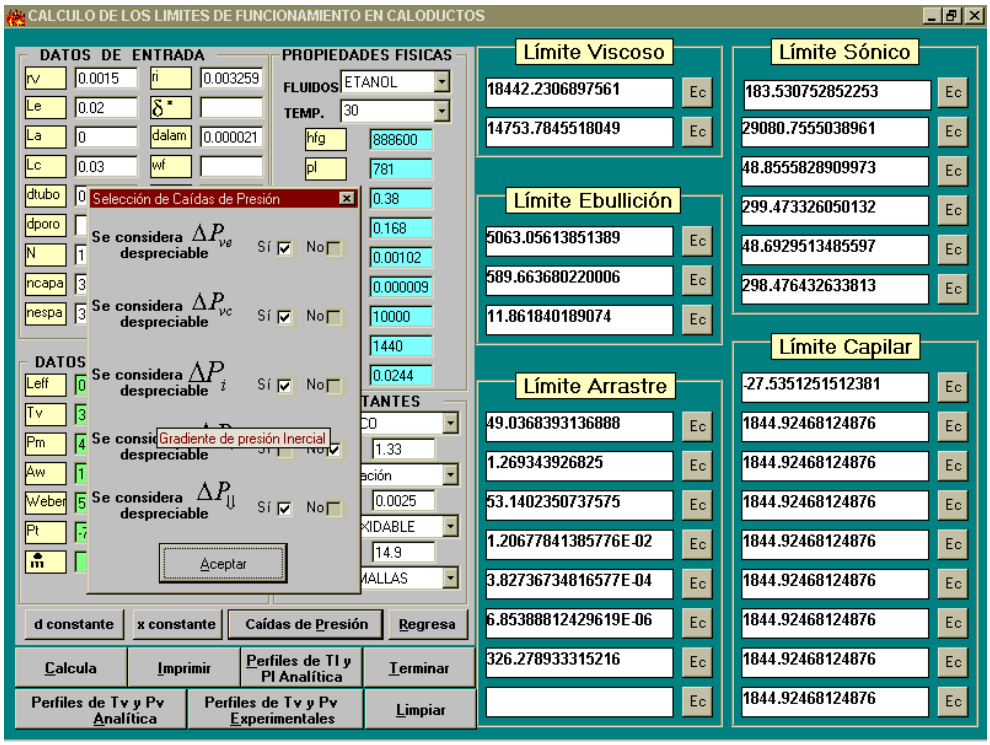


Figura 103. Ventana de valores de entrada para el Cálculo de los Límites de Funcionamiento del Caloducto y resultados adicionales mostrando el desprecio de gradientes de presiones.



De los resultados arrojados por el programa, se tomaron aquellos límites que mejor describen los valores experimentales. En la figura 104, se presentan los modelos matemáticos que rigen ambos casos experimentales; estos se pueden visualizar fácilmente oprimiendo el acceso “Ec” a un lado del resultado arrojado por el programa.

En la figura 105, se aprecia el cuadro desde donde se puede efectuar la selección de presiones que se consideran despreciables y que se visualiza oprimiendo el botón “Caídas de Presión” en la pantalla principal para el “Cálculo de los límites de funcionamiento en caloductos”.

Figura 104. Modelos matemáticos que rigen el comportamiento de los límites de funcionamiento de los ejemplos de aplicación.

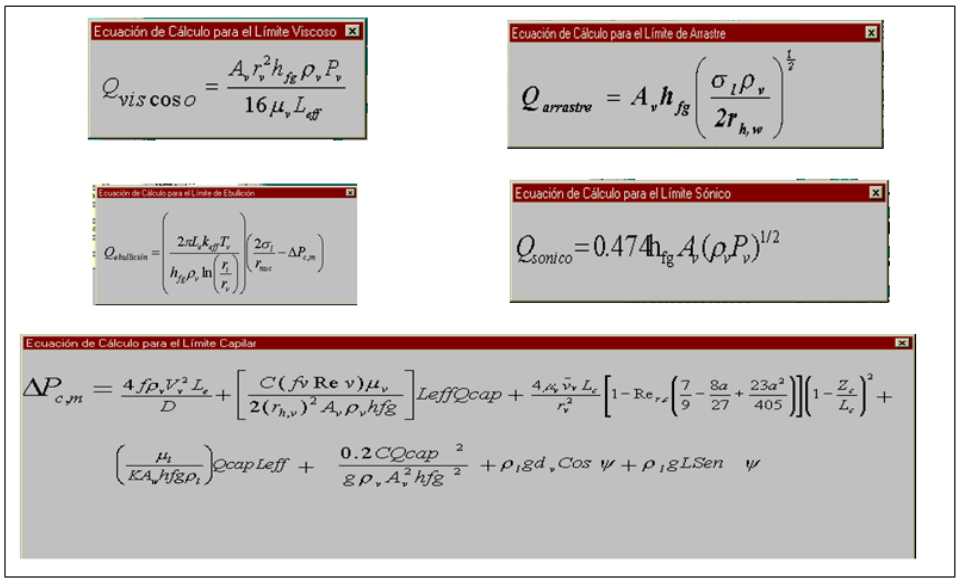
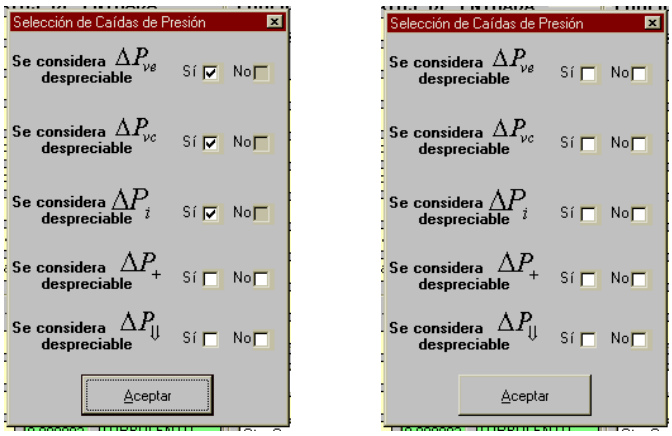


Figura 105. Cuadro para la selección de caídas de presión consideradas despreciables.



CONCLUSIONES

En base a los modelos existentes para el cálculo de los límites de funcionamiento se desarrolló el programa CALCA con el que se hace posible simular el comportamiento térmico de termosifones y de caloductos axiales y de mallas, en estado estacionario, cuando se trabaja con algunos de los principales fluidos orgánicos de trabajo.

De relevancia resulta el análisis del límite viscoso, es un límite que se tiene a bajas temperaturas de operación; sin embargo, con el programa CALCA a las distintas temperaturas de operación, sus curvas descienden conforme el r_v disminuye. Esto implica que la limitación se alcanza más rápidamente con el incremento del espesor de película. Los valores a los que se alcanza la limitación resultan demasiado grandes, del orden de los MWatts, por lo que se considera caso de irregularidad más que el ultimo límite en alcanzarse.

Si bien el espesor de película es lo bastante delgada como para imposibilitar la presencia de alguno de los límites de funcionamiento, el programa CALCA nos señala que no se alcanza la isotermicidad del caloducto desde los 20 °C y hasta los 60 °C bajo las condiciones dadas en 5.1.1. Sin embargo, conforme el r_v disminuye, y el espesor de película aumenta, el programa se vuelve más confiable al reducir este margen de temperaturas, por debajo de los 40 °C.

La proximidad de los resultados arrojados por CALCA en los ejemplos de aplicación del apartado 5 con los datos experimentales proporcionados en la literatura indican la confiabilidad del programa de manera tal que, salvo alguno de los límites, los demás pueden ser determinados con bastante confiabilidad.

Los resultados obtenidos en los límites de funcionamiento y los perfiles de temperatura y presión son bastantes aceptables dado la proximidad que se tienen con la información experimental documentada (apartado 5) por lo que, para ciertos modelos matemáticos y bajo las condiciones de operación proporcionados, el programa queda validado.

El programa resulta ser muy amigable por lo que se facilita su utilización y, dada la confiabilidad en los resultados que proporciona, permite su aplicación directa para la simulación de algún proceso experimental real en caloductos con lo que se minimizan los tiempos y costos de montajes de fabricación, de prueba y de operación.

El programa puede ser mejorado puesto que permite la incorporación de otros fluidos de trabajo y geometrías de la estructura capilar pues dentro del código fuente se han considerado la mayoría de los modelos matemáticos que se tienen documentados.

El programa CALCA nos permite proponer su uso para la simulación, caracterización y diseño de caloductos.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

[1] SILVESTEIN, Calvin C., "Design and Technology of Heat Pipes for Cooling and Heat for Cooling and Heat Exchange"., Hemisphere Publishing Corporation, U.S.A., 1992.

[2] DUNN, P.D. and REAY, D.A., "Heat Pipes", Pergamon Press Ltd., England, First Edition 1994.

[3] PETERSON, G.P., "An Introduction to Heat Pipes, Modeling, Testing and Application"., A Wiley- Interscience, U.S.A., 1994.

[4] HOLMAN, J.P., "Transferencia de Calor", McGraw Hill/Interamericana de España, S.A.U., 8ª Edición (1ª en español), 1998.

[5] MILLS, A.F., "Transferencia de Calor", McGraw Hill/Irwin, 1999.

[6] EZQUERRA, P. Pere., "Dispositivos y Sistemas para el ahorro de energía", Colección Productica, Marcombo, S.A., Barcelona España, 1988.

[7] CENGEL, Yunus A., "Heat Transfer: a practical approach"., WCB/McGraw Hill., U.S.A., 1998.

[8] FERNANDEZ, N. Fernando., "Caracterización Teórico-Experimental de un equipo de recuperación de calor en base a tubos termosifones bifásicos", I.P.N., ESIME, Tesis de Maestría, México, D.F. mayo 1999.

[9] K.A.R. Ismail and M.M. Abogderah., "Performance of Heat Pipe Solar Collector", ASME, Journal of Solar Energy Engineering Vol. 120, Number 1, February, New York, 1998.

[10] SANCHEZ, S. Florencio, “Diseño y construcción de una instalación experimental para el estudio de caloductos”, Informe técnico del proyecto DEPI-IPN 931583, México, 1995.

[11] WOLOSUN, Keith A., Merrigan, Michael A, Best, Elaine D., “HTPIPE: A Steady-State Heat Pipe, Analysis Program”, LA-11324-M Manual, UC-504, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos New Mexico, November 1988.

[12] BACKER, C.L., Bienert, W.B., Ducao, A.S. Dynatherm Corporation, 2000.

[13] FAGHRI, Amir and Khrustalev, Dmitry., “Advences in modeling of Enhanced flat miniature heat pipes with capillary grooves”., Department of Mechanical Engineering, University of Connecticut, Storrs, Connecticut06269, U.S.A., 1996.

[14] CASTLE, R. Michael, Thomas, Scott K., Yerkes, Kirk L., “The effect of working fluid inventory on the performance of revolving helically-grooved heat pipes”, 34th National Heat Transfer Conference, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, NTHC2000-12268, August 20-22, 2000.

[15] PRENGER, F.C. Jr., “Heat Pipe Computer Program (HTPIPE) User´s Manual”, LA-8101-M Manual, UC-32, Los Alamos Scientific Laboratory, University of California, November, 1979.

[16] GIRRENS, Steven P., “Design and development of a Titanium Heat Pipe Space Radiator”, LA-9251-MS, UC-38, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New México, Mach 1982.

[17] KLASING, Kevin.S., Thomas, Scott K., “Prediction of the Operating Limits o Revolving Helically Grooved Heat Pipes”, Wright State University, Dayton, OH 45435, Yerkes, Kirk L., Wright-Patterson AFB, 45433-7251.

[18] XIE, H., Aghazadeh, M., “The Use of Heat Pipes in the Cooling of Portable with High Power Packages”., Assembly Technology Development., Intel Corporation, Thermacore Inc., Lancaster, PA 17601

[19] CHI S. W.; Heat Pipe Theory and Practice. A Sourcebook, The George Washington University, Hemisphere publishing corporation, Mc Graw Hill Book Company, 1976

[21] MORENO, C. Ariel E., “Análisis termodinámico de un termosifón anular para su uso en termometría”, I.P.N., ESIME, Tesis de Maestría, México, D.F. mayo 2001.

[22] BELTRÁN, M. Ramón., “Diseño teórico experimental de un generador de vapor de baja presión empleando tubos termosifones bifásicos para aprovechar gases de combustión residuales”, I.P.N., ESIME, Tesis de Maestría, México., D.F., enero 1997.

[23] BENTLEY, JOHN P., “Sistemas de medición. Principios y aplicaciones”. 2ª. Edición, México, CECSA, 1999.

[24] SEVERNS, W.H., Degler, H.E., Miles, J.C., “Energía mediante vapor, aire o gas”, 5ª. Edición, México, Ed. Reverté, 1992.

[25] GEANKOPLIS, C.J., “Procesos de transporte y operaciones unitarias”, 3ª. Edición, México, Compañía Editorial Continental, 1998.

APÉNDICES

Apéndice A Propiedades de Fluidos de Trabajo.

Agua

Temperatura °C	Calor latente (kJ/kg)	Densidad del líquido (kg/m^3)	Densidad del Vapor (kg/m^3)	Conductividad Térmica del líquido ($W/m°C$)	Viscosidad del líquido (cP)	Viscosidad del Vapor ($cPx10^{-2}$)	Presión de Vapor (bar)	Calor específico del Vapor ($kJ/kg°C$)	Tensión superficial del líquido ($N/mX10^{-2}$)
20	2448	998.2	0.02	0.603	1.00	0.96	0.02	1.81	7.28
40	2402	992.3	0.05	0.630	0.65	1.04	0.07	1.89	6.96
60	2359	983.0	0.13	0.649	0.47	1.12	0.20	1.91	6.62
80	2309	972.0	0.29	0.668	0.36	1.19	0.47	1.95	6.26
100	2258	958.0	0.60	0.680	0.28	1.27	1.01	2.01	5.89
120	2200	945.0	1.12	0.682	0.23	1.34	2.02	2.09	5.50
140	2139	928.0	1.99	0.683	0.20	1.41	3.90	2.21	5.06
160	2074	909.0	3.27	0.679	0.17	1.49	6.44	2.38	4.66
180	2003	808.0	5.16	0.669	0.15	1.57	10.04	2.62	4.29
200	1967	865.0	7.87	0.659	0.14	1.65	16.19	2.91	3.89

Fuente de referencia: [2]

Heptano

Temperatura °C	Calor latente (kJ/kg)	Densidad del líquido (kg/m^3)	Densidad del Vapor (kg/m^3)	Conductividad Térmica del líquido (W/m°C)	Viscosidad del líquido (cP)	Viscosidad del Vapor ($cPx10^{-2}$)	Presión de Vapor (bar)	Calor específico del Vapor (kJ/kg°C)	Tensión superficial del líquido ($N/mX10^{-2}$)
-20	384.0	715.5	0.01	0.143	0.69	0.57	0.01	0.83	2.42
0	372.6	699.0	0.17	0.141	0.53	0.60	0.02	0.87	2.21
20	362.2	683.0	0.49	0.140	0.43	0.63	0.08	0.92	2.01
40	351.8	667.0	0.97	0.139	0.34	0.66	0.20	0.97	1.81
60	341.5	649.0	1.45	0.137	0.29	0.70	0.32	1.02	1.62
80	331.2	631.0	2.31	0.135	0.24	0.74	0.62	1.05	1.43
100	319.6	612.0	3.71	0.133	0.21	0.77	1.10	1.09	1.28
120	305.0	592.0	6.08	0.132	0.18	0.82	1.85	1.16	1.10

Fuente de referencia: [2]

Amoníaco

Temperatura °C	Calor latente (kJ/kg)	Densidad del líquido (kg/m^3)	Densidad del Vapor (kg/m^3)	Conductividad Térmica del líquido (W/m°C)	Viscosidad del líquido (cP)	Viscosidad del Vapor ($cPx10^{-2}$)	Presión de Vapor (bar)	Calor específico del Vapor (kJ/kg°C)	Tensión superficial del líquido ($N/mX10^{-2}$)
-60	1343	714.4	0.03	0.294	0.36	0.72	0.27	2.050	4.062
-40	1384	690.4	0.05	0.303	0.29	0.79	0.76	2.075	3.574
-20	1338	665.5	1.62	0.304	0.26	0.85	1.93	2.100	3.090
0	1263	638.6	3.48	0.298	0.25	0.92	4.24	2.125	2.480
20	1187	610.3	6.69	0.286	0.22	1.01	8.46	2.150	2.133
40	1101	579.5	12.00	0.272	0.20	1.16	15.34	2.160	1.833
60	1026	545.2	20.49	0.255	0.17	1.27	29.80	2.180	1.367
80	891	505.7	34.13	0.235	0.15	1.40	40.90	2.210	0.767
100	699	455.1	54.92	0.212	0.11	1.60	63.12	2.260	0.500
120	428	374.4	113.16	0.184	0.07	1.89	90.44	2.292	0.150

Fuente de referencia: [2]

Nitrógeno

Temperatura °C	Calor latente (kJ/kg)	Densidad del líquido (kg/m^3)	Densidad del Vapor (kg/m^3)	Conductividad Térmica del líquido (W/m°C)	Viscosidad del líquido (cP)	Viscosidad del Vapor ($cPx10^{-2}$)	Presión de Vapor (bar)	Calor específico del Vapor (kJ/kg°C)	Tensión superficial del líquido ($N/mX10^{-2}$)
-203	210.0	830.0	1.84	0.150	2.48	0.48	0.48	1.083	1.054
-200	205.5	818.0	3.81	0.146	1.94	0.51	0.74	1.082	0.985
-195	198.0	798.0	7.10	0.139	1.51	0.56	1.62	1.079	0.870
-190	190.5	778.0	10.39	0.132	1.26	0.60	3.31	1.077	0.766
-185	183.0	758.0	13.68	0.125	1.08	0.65	4.99	1.074	0.662
-180	173.7	732.0	22.05	0.117	0.95	0.71	6.69	1.072	0.561
-175	163.2	702.0	33.80	0.110	0.86	0.77	8.37	1.070	0.464
-170	152.7	672.0	45.55	0.103	0.80	0.83	1.07	1.068	0.367
-160	124.2	603.0	80.90	0.089	0.72	1.00	19.37	1.063	0.185
-150	66.8	474.0	194.00	0.075	0.65	1.50	28.80	1.059	0.110

Fuente de referencia: [2]

Sodio

Temperatura °C	Calor latente (kJ/kg)	Densidad del líquido (kg/m^3)	Densidad del Vapor (kg/m^3)	Conductividad Térmica del líquido (W/m°C)	Viscosidad del líquido (cP)	Viscosidad del Vapor ($cPx10^{-2}$)	Presión de Vapor (bar)	Calor específico del Vapor (kJ/kg°C)	Tensión superficial del líquido ($N/mX10^{-2}$)
500	4370	828.1	0.003	70.08	0.24	0.18	0.01	9.04	1.51
600	4243	805.4	0.013	64.62	0.21	0.19	0.04	9.04	1.42
700	4090	763.5	0.050	60.81	0.19	0.20	0.15	9.04	1.33
800	3977	757.3	0.134	57.81	0.18	0.22	0.47	9.04	1.23
900	3913	745.4	0.306	53.35	0.17	0.23	1.25	9.04	1.13
1000	3827	725.4	0.667	49.08	0.16	0.24	2.81	9.04	1.04
1100	3690	690.8	1.306	45.08	0.16	0.25	5.49	9.04	0.95
1200	3577	669.0	2.303	41.08	0.15	0.26	9.59	9.04	0.86
1300	3477	654.0	3.622	37.08	0.15	0.27	15.91	9.04	0.77

Fuente de referencia: [2]

Litio

Temperatura °C	Calor latente (kJ/kg)	Densidad del líquido (kg/m^3)	Densidad del Vapor (kg/m^3)	Conductividad Térmica del líquido (W/m°C)	Viscosidad del líquido (cP)	Viscosidad del Vapor ($cPx10^{-2}$)	Presión de Vapor (bar)	Calor específico del Vapor (kJ/kg°C)	Tensión superficial del líquido ($N/mX10^{-2}$)
1030	20500	450	0.005	67	0.24	1.67	0.07	0.532	2.90
1130	20100	440	0.013	69	0.24	1.74	0.17	0.532	2.85
1230	20000	430	0.028	70	0.23	1.83	0.45	0.532	2.75
1330	19700	420	0.057	69	0.23	1.91	0.96	0.532	2.60
1430	19200	410	0.108	68	0.23	2.00	1.85	0.532	2.40
1530	18900	405	0.193	65	0.23	2.10	3.30	0.532	2.25
1630	18500	400	0.340	62	0.23	2.17	5.30	0.532	2.10
1730	18200	498	0.490	59	0.23	2.26	8.90	0.532	2.05

Fuente de referencia: [2]

Metanol

Temperatura °C	Calor latente (kJ/kg)	Densidad del líquido (kg/m^3)	Densidad del Vapor (kg/m^3)	Conductividad Térmica del líquido (W/m°C)	Viscosidad del líquido (cP)	Viscosidad del Vapor ($cPx10^{-2}$)	Presión de Vapor (bar)	Calor específico del Vapor (kJ/kg°C)	Tensión superficial del líquido ($N/mX10^{-2}$)
-50	1194	843.5	0.01	0.210	1.700	0.72	0.01	1.20	3.26
-30	1187	833.5	0.01	0.208	1.300	0.78	0.02	1.27	2.95
-10	1182	818.7	0.04	0.206	0.945	0.85	0.04	1.34	2.63
10	1175	800.5	0.12	0.204	0.701	0.91	0.10	1.40	2.36
30	1155	782.0	0.31	0.203	0.521	0.98	0.25	1.47	2.18
50	1125	764.1	0.77	0.202	0.399	1.04	0.55	1.54	2.01
70	1085	746.2	1.47	0.201	0.314	1.11	1.31	1.61	1.85
90	1035	724.4	3.01	0.199	0.259	1.19	2.69	1.79	1.66
110	980	703.6	5.64	0.197	0.211	1.26	4.98	1.92	1.46
130	920	685.2	9.81	0.195	0.166	1.31	7.86	1.92	1.25
150	850	653.2	15.90	0.193	0.138	1.38	8.94	1.92	1.04

Fuente de referencia: [2]

Acetona

Temperatura °C	Calor latente (kJ/kg)	Densidad del líquido (kg/m^3)	Densidad del Vapor (kg/m^3)	Conductividad Térmica del líquido (W/m°C)	Viscosidad del líquido (cP)	Viscosidad del Vapor ($cPx10^{-2}$)	Presión de Vapor (bar)	Calor específico del Vapor (kJ/kg°C)	Tensión superficial del líquido ($N/mX10^{-2}$)
-40	660.0	860.0	0.03	0.200	0.800	0.68	0.01	2.00	3.10
-20	615.6	845.0	0.10	0.189	0.500	0.73	0.03	2.06	2.76
0	564.0	812.0	0.26	0.183	0.395	0.78	0.10	2.11	2.62
20	552.0	790.0	0.64	0.181	0.323	0.82	0.27	2.16	2.37
40	536.0	768.0	1.05	0.175	0.269	0.86	0.60	2.22	2.12
60	517.0	744.0	2.37	0.168	0.226	0.90	1.15	2.28	1.86
80	495.0	719.0	4.30	0.160	0.192	0.95	2.15	2.34	1.62
100	472.0	689.6	6.94	0.148	0.170	0.98	4.43	2.39	1.34
120	426.1	660.3	11.02	0.135	0.148	0.99	6.70	2.45	1.07
140	394.4	631.8	18.61	0.126	0.132	1.03	10.49	2.50	0.81

Fuente de referencia: [2]

Potasio

Temperatura °C	Calor latente (kJ/kg)	Densidad del líquido (kg/m^3)	Densidad del Vapor (kg/m^3)	Conductividad Térmica del líquido (W/m°C)	Viscosidad del líquido (cP)	Viscosidad del Vapor ($cPx10^{-2}$)	Presión de Vapor (bar)	Calor específico del Vapor (kJ/kg°C)	Tensión superficial del líquido ($N/mX10^{-2}$)
350	2093	763.1	0.002	51.08	0.21	0.15	0.01	5.32	9.50
400	2078	748.1	0.006	49.08	0.19	0.16	0.01	5.32	9.04
450	2060	735.4	0.015	47.08	0.18	0.16	0.02	5.32	8.69
500	2040	725.4	0.031	45.08	0.17	0.17	0.05	5.32	8.44
550	2020	715.4	0.062	43.31	0.15	0.17	0.10	5.32	8.16
600	2000	705.4	0.111	41.81	0.14	0.18	0.19	5.32	7.86
650	1980	695.4	0.193	40.08	0.13	0.19	0.35	5.32	7.51
700	1969	685.4	0.314	38.08	0.12	0.19	0.61	5.32	7.12
750	1938	675.4	0.486	36.31	0.12	0.20	0.99	5.32	6.72
800	1913	665.4	0.716	34.81	0.11	0.20	1.55	5.32	6.32
850	1883	653.1	1.054	33.31	0.10	0.21	2.34	5.32	5.92

Fuente de referencia: [2]

Etanol

Temperatura °C	Calor latente (kJ/kg)	Densidad del líquido (kg/m^3)	Densidad del Vapor (kg/m^3)	Conductividad Térmica del líquido (W/m°C)	Viscosidad del líquido (cP)	Viscosidad del Vapor ($cPx10^{-2}$)	Presión de Vapor (bar)	Calor específico del Vapor (kJ/kg°C)	Tensión superficial del líquido ($N/mX10^{-2}$)
-30	939.4	825.0	0.02	0.177	3.40	0.75	0.01	1.25	2.76
-10	928.7	813.0	0.03	0.173	2.20	0.80	0.02	1.31	2.66
10	904.8	798.0	0.05	0.170	1.50	0.85	0.03	1.37	2.57
30	888.6	781.0	0.38	0.168	1.02	0.91	0.10	1.44	2.44
50	872.3	762.2	0.72	0.166	0.72	0.97	0.29	1.51	2.31
70	858.3	743.1	1.32	0.165	0.51	1.02	0.76	1.58	2.17
90	832.1	752.3	2.59	0.163	0.37	1.07	1.43	1.65	2.04
110	786.6	704.1	5.17	0.160	0.28	1.13	2.66	1.72	1.89
130	734.4	678.7	9.25	0.159	0.21	1.18	4.30	1.78	1.75

Fuente de referencia: [2]

Apéndice B Tablas de Conductividades Térmicas para Materiales y Estructuras Capilares.

Conductividad térmica de los materiales utilizados en contenedores y en la estructura capilar de caloductos

MATERIAL	**Conductividad Térmica k_w (W/m°C)**
Aluminio	205
Latón	213
Cobre (0 – 100 °C)	394
Vidrio	0.75
Níquel (0 –100 °C)	88.0
Acero suave	45.0
Acero Inoxidable (Tipo 304)	17.3
Teflón	0.17
Aluminio 2024-T6	177

Fuente de referencia: [2]

Conductividad térmica efectiva para estructuras capilares saturadas con líquido.

Estructura capilar	**k_{eff} , (W/Mk)**
Malla y líquido en serie	$\frac{k_l k_2}{\varepsilon k_w + k_l(1-\varepsilon)}$
Malla y líquido en paralelo	$\varepsilon k_l + k_w(1-\varepsilon)$
Malla enrollada	$\frac{k_l\left[(k_l + k_w) - (1-\varepsilon)(k_l - k_w)\right]}{(k_l + k_w) + (1-\varepsilon)(k_l - k_w)}$
Esferas empacadas	$\frac{k_l(2k_l + k_w) - 2(1-\varepsilon)(k_l - k_w)}{(2k_l + k_w) - (1-\varepsilon)(k_l - k_w)}$
Ranuras rectangulares	$\frac{(w_f k_l k_w \delta) + w k_l(0.185 w_f k_w + \delta k_l)}{(w + w_f)(0.185 w_f k_w + \delta k_l)}$

Fuente: Chi, 1976 [3].

Apéndice C Propiedades de Materiales Sólidos.

Compuesto	Punto fusión (K)	Propiedades a 300 K				Propiedades a varias temperaturas k(W/mK) C_p(J/kgK)								
		ρ (kg/m^3)	C_p (J/kgK)	k (W/mK)	α x10^6 (m^2/s)	100 (K)	200 (K)	400 (K)	600 (K)	800 (K)	1000 (K)	1200 (K)	1500 (K)	2000 (K)
Aluminio														
Puro	933	2702	903	237	97.1	302	237	240	231	218				
2024-T6 (4.5% Cu, 1.5% Mg, 0.6% Mn)	755	2770	875	177	73.0	65	163	186	186					
						473	787	925	1042					
Aleación 195, (4.5% Cu)		2790	883	168	68.2			174	185					
Cobre														
Puro	1358	8933	385	401	117	482	413	393	379	366	352	339		
						252	356	397	417	433	451	480		
Bronce comercial (90% Cu, 10% Al)	1293	8800	420	52	14		42	52	59					
							785	460	545					
Constantan (55% Cu, 45% Ni)	1439	8920	384	23	6.71	17	19							
Acero Inoxidable														
AISI 304	1670	7900	477	14.9	3.95	9.2	12.6	16.6	19.8	22.6	25.4	28.0	31.7	
						272	402	515	557	582	611	640	682	
AISI 316		8238	468	13.4	3.48			15.2	18.3	21.3	24.2			
								504	550	576	602			
Níquel														
Puro	1728	8900	444	90.7	23.0	164	107	80.2	65.6	67.6	71.8	76.2	82.6	
						232	383	485	592	530	562	594	616	
Nicróm (80% Ni, 20% Cromo)	1672	8400	420	12	3.4			14	16	21				
								480	525	545				
Plata	1235	10500	235	429	174	444	430	425	412	396	379	361		
						187	225	239	250	262	277	292		

Apéndice C Continuación.... Propiedades de Materiales Sólidos.

Compuesto	Punto fusión (K)	Propiedades a 300 K				Propiedades a varias temperaturas k(W/mK) C_p(J/kgK)								
		ρ (kg/m^3)	C_p (J/kgK)	k (W/mK)	α x10^6 (m^2/s)	100 (K)	200 (K)	400 (K)	600 (K)	800 (K)	1000 (K)	1200 (K)	1500 (K)	2000 (K)
Titanio	1953	4500	522	21.9	9.32	30.5 300	24.5 465	20.4 551	19.4 591	19.7 633	20.7 675	22.0 620	24.5 686	
Estaño	505	7310	227	66.6	40.1	85.2 188	73.3 215	62.2 243						
Latón (70% Cu, 30% Zn)	1188	8530	380	110	33.9	75	95 360	137 395	149 425					
Molibdeno	2894	10240	251	138	53.7	179 141	143 224	134 261	126 275	118 285	112 295	105 308	98 330	90 380
Niobio	2741	8570	265	53.7	23.6	55.2 188	52.6 249	55.2 274	58.2 283	61.3 292	64.4 301	67.5 310	72.1 324	79.1 347
Aleación (60% Pt-40% Rh)	1800	16630	162	47	17.4			52	59	65	69	73	76	

Fuente de referencia: [3]

Apéndice D Tablas de Radios y Permeabilidad para Estructuras Capilares.

Radio capilar efectivo para varias estructuras capilares

Estructura	**$r_{c,e}$**	**Variables**
Cilindro circular (estructura de arteria o túnel)	r	r = radio del ducto de flujo del líquido
Ranura rectangular	ω	ω = ancho de ranura
Ranura triangular	ω /cos β	β = ángulo medio ω = ancho de ranura
Alambres paralelos	ω	ω = separación del alambre
Malla metálica	(ω +d_w)/2 = 1/2N	ω = separación del alambre d = diámetro del alambre N = Número de malla
Esferas empacadas	0.41r_s	r_s = Radio de la esfera

Fuente: Chi, 1976 [3].

Datos para algunas estructuras comúnmente utilizadas en los rellenos porosos.

Tipo de relleno	Radio efectivo de los poros mm	Permeabilidad m^2x10^{10}	Porosidad %
Tela de alambre 30	0.43	25	58.5
Tela de alambre 100	0.12	1.8	67.6
Tela de alambre 200	0.063	0.55	89.1
Fieltro de Níquel	0.17	5.2	94.4
Espuma de Níquel 210-5	0.23	36	80.8
Fibras de acero inoxidable de 33 μ m diám.	>0.034	2.0	80.8
Fibras de acero inoxidable de 75 μ m diám.	>0.041	11.6	82.8
Fibras/polvos aglomerados	0.01-0.1	0.1-1.0	
Surcos axiales	0.25-1.5	35-1250	
Anillo abierto	0.25-1.5	50-2000	
Arteria abierta	0.50-1.5	300-3000	

Fuente de referencia: [5]

Apéndice E Relación de Calores Específicos de Vapores

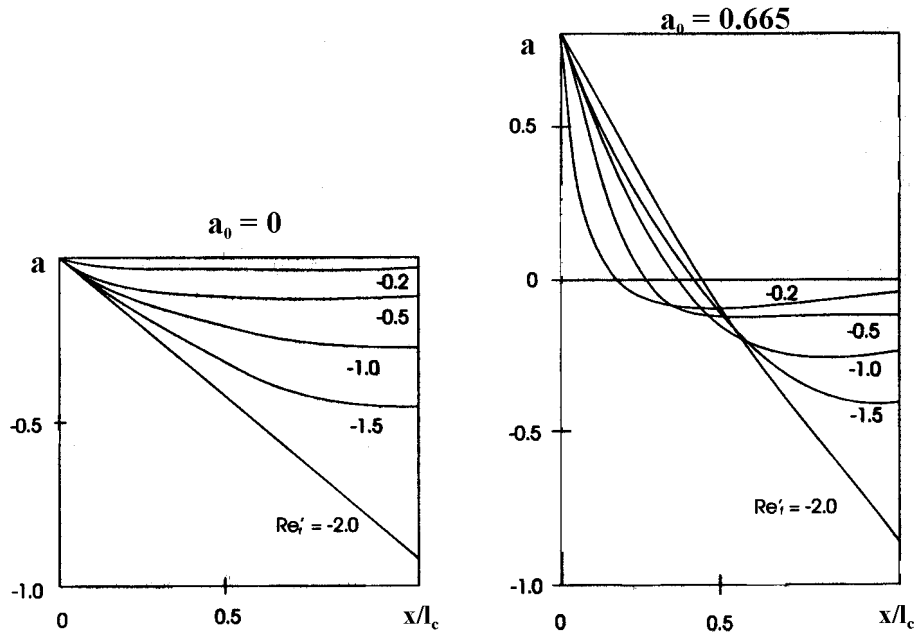
Relación de calores específicos, γ_V , para gases.

Vapor de Gas	γ_v
Monoatómico	1.67
Diatómico	1.4
Poliatómico	1.33

Fuente de referencia: [3]

Apéndice F Factor de Corrección, a_0.

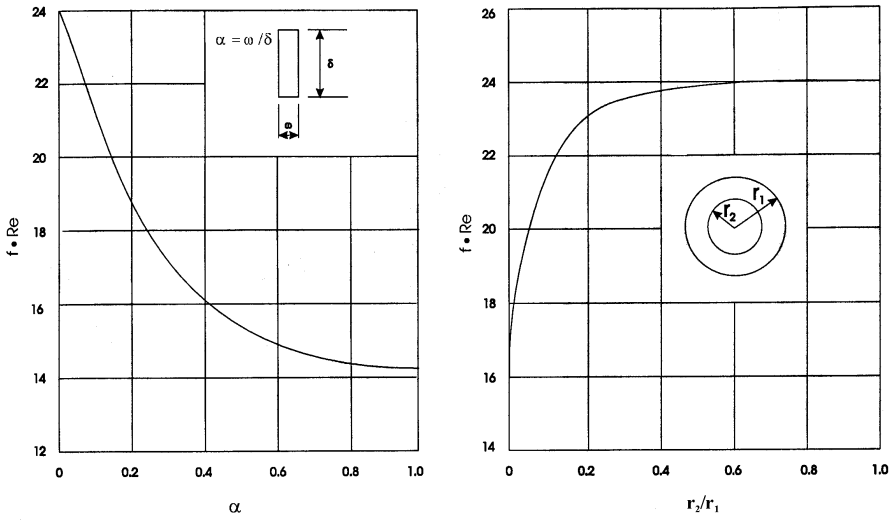
Corrección al perfil de velocidades a lo largo del condensador (Busse, 1967).



Fuente de referencia: [3]

Apéndice G Coficiente de Fricción, ($f_l Re_l$).

Coeficientes de fricción para flujo laminar en (a) canales rectangulares (Kays, 1966) y (b) sección anular circular (Kays, 1966)



Fuente de referencia: [3]

Apéndice H Permeabilidad de Algunas Estructuras Capilares.

Estructura	K	Variables
Cilindro circular (estructura de arteria o túnel)	$\frac{r^2}{8}$	r = radio del ducto de flujo del líquido
Ranura rectangular abierta	$2\varepsilon(r_{h,l})^2/(f_l \operatorname{Re}_l)$	ε = Porosidad de la estructura = 1 $(r_{h,l}) = 2\omega\delta/(\omega+2\delta)$ δ = Profundad de ranura ω = ancho de ranura
Sección anular circular	$2(r_{h,l})^2/(f_l \operatorname{Re}_l)$	$(r_{h,l}) = r_1 - r_2$
Malla enrollada	$\frac{d_w{}^2\varepsilon^3}{122(1-\varepsilon)^2}$	d_w = diámetro del alambre $\varepsilon = 1-(1.05\pi N d_w/4)$ N = Número de malla
Esferas empacadas	$\frac{r_s{}^2\varepsilon^3}{37.5(1-\varepsilon)^2}$	r_s = radio de la esfera ε = Porosidad dependiente del tipo de empaque

Fuente de referencia: [3]

Apéndice I Factor de Corrección, k_3.

Tabla de constantes al factor de corrección

Combinación fluido-superficie	**k_3**
Agua – níquel	0.006
Agua – platino	0.013
Agua – cobre	0.013
Agua – latón	0.0060
Agua - cobre pulido al esmeril	0.0128
Agua-acero inoxidable pulido	0.008
Agua - acero inoxidable con incrustaciones de teflón	0.0058
CCl_4 – cobre	0.013
Alcohol de n-butil – cobre	0.003
Alcohol Isopropílico - cobre	0.0025
Alcohol etílico – cobre	0.0027
n-pentano – cromo	0.015
Benceno – cromo	0.010

Fuente de referencia: [19],[2].

Apéndice J Radio Hidráulico de Estructuras Capilares.

Estructura	$r_{h,w}$	Variables
Ranura rectangular abierta	$w/2$	ω = ancho de ranura
Malla Simple	$(1/2N)-(d_v/2)$	N = Número de malla
Capa de mallas	$\frac{A_w}{\pi(d_v+d_i)}$	

Fuente de referencia: [3]

Apéndice K Propiedades Físicas del Agua.

Densidad del agua líquida.

Temperatura		Densidad		Temperatura		Densidad	
K	°C	g/cm^3	kg/cm^3	K	°C	g/cm^3	kg/cm^3
273.15	0	0.99987	999.87	323.15	50	0.98807	988.07
277.15	4	1.00000	1000.00	333.15	60	0.98324	983.24
283.15	10	0.99973	999.73	343.15	70	0.97781	977.81
293.15	20	0.99823	998.23	353.15	80	0.97183	971.83
298.15	25	0.99708	997.08	363.15	90	0.96534	965.34
303.15	30	0.99568	995.68	373.15	100	0.95838	958.38
313.15	40	0.99225	992.25				

Fuente de referencia: [25]

Capacidad calorífica del agua líquida a 101.325 (1 atm).

Temperatura		Capacidad calorífica, c_p.		Temperatura		Capacidad calorífica, c_p.	
K	°C	cal/g°C	kJ/kgK	K	°C	cal/g°C	kJ/kgK
273.15	0	1.0080	4.220	323.15	50	0.9992	4.183
283.15	10	1.0019	4.195	333.15	60	1.0001	4.187
293.15	20	0.9995	4.185	343.15	70	1.0013	4.192
298.15	25	0.9989	4.182	353.15	80	1.0029	4.199
303.15	30	0.9987	4.181	363.15	90	1.0050	4.208
313.15	40	0.9987	4.181	373.15	100	1.0076	4.219

Fuente de referencia: [25]

Apéndice L Modelos Matemáticos para el Cálculo de los Límites de Funcionamiento en la Rutina CLFC.

Limites Viscosos

(1) $$Q_{vis\cos o} = \frac{A_v r_v^2 h_{fg} \rho_v P_v}{16 \mu_v L_e}$$

(2) $$Q_{vis\cos o} = \frac{A_v r_v^2 h_{fg} \rho_v P_v}{16 \mu_v L_{eff}}$$

Límites Sónicos

(1) $$Q_{sónico} = 0.474 h_{fg} A_v \left(\rho_v P_v\right)^{\frac{1}{2}}$$

(2) $$Q_{sónico} = V h_{fg} \left(\frac{\rho_v P_v}{A_v}\right)^{\frac{1}{2}} \left[\frac{P_t}{P_v}\left(1 - \frac{P_t}{P_v}\right)\right]^{\frac{1}{2}}$$

(3) $$Q = \frac{A_v \rho_o h_{fg} \left(\gamma_v R_v T_0\right)^{1/2} M_v \left(1 + \frac{1}{2}\left(\bar{v}_v - 1\right) M_v^2\right)^{1/2}}{1 + \left(\bar{v}_v / 2\right) M_v^2}$$

(4) $$Q_{sónico} = A_v \rho_0 h_{fg} \left[\frac{\gamma_v R_v T_0}{2\left(\gamma_v + 1\right)}\right]^{1/2}$$

(5) $$Q = \frac{A_v \rho_v h_{fg} \left(\gamma_v R_v T_v\right)^{1/2} M_v \left(1 + \frac{1}{2}\left(\bar{v}_v - 1\right) M_v^2\right)^{1/2}}{1 + \left(\bar{v}_v / 2\right) M_v^2}$$

(6) $$Q_{sónico} = A_v \rho_v h_{fg} \left[\frac{\gamma_v R_v T_v}{2\left(\gamma_v + 1\right)}\right]^{1/2}$$

Límites de Arrastre

(1) $$Q_{arrastre} = A_v h_{fg}\left[\left(\frac{\rho_v}{A^*}\right)\left(\frac{2\pi\sigma_l}{\iota} + \rho_l g d_{tubo}\right)\right]^{0.5}$$

(2) $$Q_{arrastre} = 2A_v h_{fg}\frac{d_{ranura,alambre}}{d_{tubo}}\left(\frac{\rho_l\sigma_l}{\pi d_{tubo}}\right)^{0.5}$$

(3) $$Q_{arrastre} = A_v h_{fg}\left(\frac{\sigma_l\rho_v}{2r_{h,w}}\right)^{\frac{1}{2}} = A_v h_{fg}\left(\frac{\sigma_l\rho_v}{2w}\right)^{\frac{1}{2}}$$

(4) $$Q_{arrastre} = 2.99E_t^{0.545}$$

(5) $$Q_{arrastre} = 33.7\delta_1 E_t^{0.5}$$

(6) $$Q_{arrastre} = 6.59x10^{-7}\left(E_t\right)^{-0.284}$$

(7) $$Q_{arrastre} = \sqrt{\frac{2\pi\rho_v h_{fg}{}^2\sigma_l}{z}}A_v$$

(8) $$Q_{arrastre} = \sqrt{\frac{2\pi E_t}{\alpha}}\frac{\delta_1}{\delta^*}$$

Límites de Ebullición

(1) $$\left(\frac{Q_{ebull}}{A_{cr}}\right)_{máx} = k_3\rho_v h_{fg}\left[\frac{\sigma(\rho_l-\rho_v)g}{\rho_v^2}\right]^{\frac{1}{4}}$$

(2) $$Q_{ebull} = \frac{\left[\frac{2\sigma_l T_s}{\rho_v h_{fg} r_{nuc}}\right]}{\left[\frac{\delta_w}{\pi D_{tubo} L_e k_w} + \frac{\left(2\pi R_{tubo}T_s\right)^{0.5}R_{tubo}T_s^2}{A_{l-v}P_t h_{fg}^2}\right]}$$

(3) $$Q_{ebull} = \left(\frac{2\pi L_{eff}k_{eff}T_v}{h_{fg}\rho_v\ln\left(\frac{r_i}{r_v}\right)}\right)\left(\frac{2\sigma_l}{r_{nuc}} - \Delta P_{c,m}\right)$$

Límites Capilares

$$\Delta P_{c,m} = \Delta P_{ve} + \Delta P_{va} + \Delta P_{vc} + \Delta P_l + \Delta P_i + \Delta P_+ + \Delta P_{\Downarrow}$$

A] $$\Delta P_{ve} = 4 f \rho_v \bar{v}_v^{\,2} L_e / D$$

B] $$\Delta P_{ve} = \frac{-8\mu_v \bar{v}_v (1 + 0.667a)}{r_v^2} z^2$$

C] $$\Delta P_{ve} = -4\mu_v \frac{\overline{v_v} L_e}{r_v^2} \left[1 + 0.61 \mathrm{Re}_{r,e} + \frac{0.61 \mathrm{Re}_{r,e}}{3.6 + \mathrm{Re}_{r,e}} \right] \frac{z_e^{\,2}}{L_e^2}$$

D] $$\Delta P_{va} = \left(\frac{C(f_v \mathrm{Re}_v)\mu_v}{2(r_{h,v})^2 A_v \rho_v h_{fg}} \right) L_{eff} Q_{cap}$$

E] $$\Delta P_{vc} = \frac{4\mu_v \overline{v_v} L_c}{r_v^2} \left[1 - \mathrm{Re}_{r,c} \left(\frac{7}{9} - \frac{8a}{27} + \frac{23a^2}{405} \right) \right] \left(1 - \frac{z_c}{L_c} \right)^2$$

F] $$\Delta P_l = \left(\frac{\mu_l}{K A_w h_{fg} \rho_l} \right) Q_{cap} L_{eff}$$

G] $$\Delta P_i = \frac{1.41 Q_{cap}^2}{g \rho_v A_v^2 h_{fg}^{\,2}} \quad [\mathrm{Re}_v << 2300]$$

$$\Delta P_i = \frac{1.22 Q_{cap}^2}{g \rho_v A_v^2 h_{fg}^{\,2}} \quad [\mathrm{Re}_v << 2300]$$

H] $$\Delta P_i = -\left(\frac{4\mu_v \bar{v}_v L_c}{r_v^2} \right) \left[\mathrm{Re}_{r,c} (0.778 - 0.296a + 0.057a^2) \right] \left(1 - \frac{z_c}{L_c} \right)^2$$

I] $$\Delta P_i = (-\mathrm{Re}_{r,c} - 2.0) / \left[-1.23 \mathrm{Re}_{r,c} + (2L_e + 4L_a) / L_c \right] \rho_v \bar{v}_v^{\,2}$$

J] $$\Delta P_+ = \rho_l g d_v \cos \psi$$

K] $\Delta P_{\Downarrow} = \rho_l g L sen\psi$

Límite capilar	1	$\Delta P_{c,m}$ = [A + D + E + F + G + J + K]
Límite capilar	2	$\Delta P_{c,m}$ = [A + D + E + F + H + J + K]
Límite capilar	3	$\Delta P_{c,m}$ = [A + D + E + F + I + J + K]
Límite capilar	4	$\Delta P_{c,m}$ = [B + D + E + F + G + J + K]
Límite capilar	5	$\Delta P_{c,m}$ = [B + D + E + F + H + J + K]
Límite capilar	6	$\Delta P_{c,m}$ = [B + D + E + F + I + J + K]
Límite capilar	7	$\Delta P_{c,m}$ = [C + D + E + F + G + J + K]
Límite capilar	8	$\Delta P_{c,m}$ = [C + D + E + F + H + J + K]
Límite capilar	9	$\Delta P_{c,m}$ = [C + D + E + F + I + J + K]

Apéndice M Listado de Rutinas y Subrutinas del Programa de Cómputo Calca.

Código fuente para el acceso al programa calca (AP)

Código fuente para el cálculo de los limites de funcionamiento en caloductos (CLFC)

Código fuente para la selección de las caídas de presión (SCP)

Código fuente para la selección de geometría (SG)

Código fuente para la previa introducción de los datos de entrada (DE)

Código fuente para el cálculo del espesor promedio de película con diámetro de tubo constante (CEP-d)

Código fuente para el cálculo del espesor promedio de película con espesor adimensional de película constante (CEP-X)

Código fuente para el cálculo de los perfiles de presión y temperatura analíticos del líquido (PPTAL)

Código fuente para el cálculo de los perfiles de presión y temperatura analíticos del vapor (PPTAV)

Código fuente para el cálculo de los perfiles de temperatura y presión de vapor experimentales (PTPVE)

Segundo código fuente para el cálculo de los perfiles de temperatura y presión de vapor experimentales (PTPVE)

Código fuente para la obtención de las graficas analíticas de los perfiles de presión y temperatura del vapor (GAPPTV)

Código fuente para la obtención de las graficas analíticas de los perfiles de presión y temperatura del líquido (GAPPTL)

Código fuente para la obtención de las gráficas de los perfiles de temperatura y presión de vapor experimentales (GPTPVE)

Segundo código fuente para la obtención de las gráficas de los perfiles de temperatura y presión de vapor experimentales (GPTPVE)

Código fuente para guardar el cálculo de los perfiles de temperatura y presión de vapor experimentales (GDE)

Segundo código fuente para guardar el cálculo de los perfiles de temperatura y presión de vapor experimentales (GDE)

Código fuente de la utilería para el cálculo de los limites de funcionamiento en caloductos (UCLFC)

Código fuente de las condicionantes para el cálculo de los limites de funcionamiento en caloductos (CCLFC)

Apéndice N Instalación del Programa Calca.

El presente documento se ha elaborado con el fin de ayudar al usuario a iniciar el proceso de instalación del programa de cómputo CALCA por lo que se recomienda leer con detenimiento el presente.

Instalación

El proceso de instalación del programa CALCA se inicia de manera automática al introducir el CD-ROM en la unidad lectora, con ello se tiene acceso a una pantalla en la que se indica que se esta iniciando la instalación de CALCA; a continuación, solo hay que seguir los pasos que se indican durante el proceso de instalación para finalizar el mismo.

NOTA: En caso de que al introducir el CD-ROM del sistema CALCA en la unidad lectora y no se ejecutará de manera automática el sistema de instalación, puede llevar acabo la instalación del mismo, de la siguiente forma:

*Ejecute el archivo SETUP.EXE que se encuentra en la carpeta CALCA, con lo cual se iniciará el proceso de instalación antes mencionado.

Para realizar la instalación del Sistema CALCA, es necesario contar con las siguientes características en su equipo de cómputo:

Requerimientos Mínimos:

Microprocesador Pentium II

64 MB Memoria RAM

Unidad Lectora de CD 32x

Mouse

Monitor a una resolución de 800x600 píxeles

REQUERIMIENTOS RECOMENDADOS:

Microprocesador Pentium IV

256 MB Memoria RAM

Unidad Lectora de CD 32x

Mouse

Monitor a una resolución de 800x600 píxeles

Apéndice O Códigos Fuente del Programa de Cómputo Calca

Código Fuente para el Acceso al Programa Calca (Ap)

```
Private Sub Form_MouseMove(Button As Integer, Shift As Integer, X As Single, Y As Single)
  OPCION.FontBold = False
End Sub


Private Sub OPCION_Click()
    LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.Show
End Sub

Private Sub OPCION_MouseMove(Button As Integer, Shift As Integer, X As Single, Y As Single)
  OPCION.FontBold = True
End Sub
```

Código Fuente para el Cálculo de los Límites de Funcionamiento en Caloductos (CLFC)

```
Private Sub BOTON_CALCULO_Click()
flRel = 0
Qviscoso1.BackColor = &HFFFFFF
Qviscoso2.BackColor = &HFFFFFF
For INICIO = 1 To 8
  LabelQarrastre(INICIO).BackColor = &HFFFFFF
Next INICIO
For INICIO = 1 To 6
  LabelQsonico(INICIO).BackColor = &HFFFFFF
Next INICIO

PASO = 0
dtubo = Val(Text_dtubo.Text)
Select Case GEOMETRIAS.Text
  Case "CAPAS DE MALLAS":
                If (Val(dtubo) = 0 Or Val(dalambre) = 0) Then
                                M = MsgBox("FALTA: dtubo y/o dalambre", vbOKOnly, "AVISO")
                                Exit Sub
                End If
   Case "RANURADO RECTANGULAR":
                    If (Val(dtubo) = 0) Then
                                  M = MsgBox("FALTA: dtubo", vbOKOnly, "AVISO")
                                  Exit Sub
                    End If
   Case "ESTRUC CAPILAR HOMO":
                    If (dporo = 0) Then
                              M = MsgBox("FALTA: dporo", vbOKOnly, "AVISO")
                              Exit Sub
                    End If
 End Select
If (rv <> 0) Then
          If (FLUIDOS <> "") Then
                    If (TEMPERATURA.Text <> "") Then
                                        KLP = PROPIEDADES(FLUIDOS.Text, TEMPERATURA.Text)
                                        hfg = Text_hfg.Text
                                        rov = Text_rov.Text
                                        Pv = Text_Pv.Text
                                        Calcula_Vv (3)
                                        Pt = Pv - (rov * Vv ^ 2)
                                        Text_Pt.Text = Pt
                                        PASO = 1
                    End If
          End If
End If
```

```
If (PASO = 0) Then
        M = MsgBox("ERROR: Faltan Datos", vbOKOnly, "AVISO")
        Exit Sub
End If

Qviscoso1.Caption = ""
Qviscoso2.Caption = ""
For aa = 1 To 9
  If (aa < 4) Then LabelQebullicion(aa).Caption = ""
  If (aa < 7) Then LabelQsonico(aa).Caption = ""
  If (aa < 9) Then LabelQarrastre(aa).Caption = ""
  LabelQcapilar(aa).Caption = ""
Next aa

Tv = Val(Text_Tv.Text)
rv = Val(Text_rv.Text)
hfg = Val(Text_hfg.Text)
rol = Val(Text_rol.Text)
rov = Val(Text_rov.Text)
kl = Val(Text_kl.Text)
ml = Val(Text_ml.Text)
mv = Val(Text_mv.Text)
Pv = Val(Text_Pv.Text)
Le = Val(Text_Le.Text)
ze = Le
Qev = Val(Text_Qev.Text)
sigmal = Val(Text_sigmal.Text)
La = Val(Text_La.Text)
Lc = Val(Text_Lc.Text)
Leff = (0.5 * Le) + La + (0.5 * Lc)
Pt = Val(Text_Pt.Text)
Pm = Val(Text_Pm.Text)
If (Text_ri.Text <= Text_rv.Text) Then
                Mensaje = MsgBox("El valor de ri debe ser Mayor a rv (ri>rv)", vbOKOnly,
"AVISO")
                Exit Sub
End If
ri = Val(Text_ri.Text)
If (Text_dtubo.Text = "") Then
        dtubo = 2 * ri
        Text_dtubo.Text = dtubo
End If
dtubo = Val(Text_dtubo.Text)
If (dtubo = "") Then
        mes = MsgBox("Debe introducir un valor para el diametro del tubo", vbOKOnly,
"AVISO")
        Exit Sub
```

```
End If
dra = Val(Text_dra.Text)
If (dra = "") Then
        mes = MsgBox("Debe introducir un valor para el diametro de la ranura o alambre",
vbOKOnly, "AVISO")
        Exit Sub
End If
N = Val(Text_N.Text)
Teta = Val(Text_Teta.Text)
If (Teta = 0) Then Teta = Teta + 0.0000000001
k3 = Val(Text_k3.Text)
kl = Val(Text_kl.Text)
Kw = Val(Text_Kw.Text)
ncapas = Val(Text_ncapas.Text)
nespacios = Val(Text_nespacios.Text)
Aw = Val(Text_Aw.Text)
Deltaec = Val(Text_Deltaec.Text)
dalambre = Val(Text_dalambre.Text)
w = Val(Text_w.Text)
Ts = Val(Text_Ts.Text)
Epsilon = (1 - (0.25 * Pi * 1.05 * N * dalambre))

If (GEOMETRIAS <> "CAPAS DE MALLAS") Then
  wf = Val(Text_wf.Text)
  If (Text_wf.Text = "") Then
        mes = MsgBox("Debe introducir el espacio entre ranuras (wf)", vbOKOnly,
"AVISO")
        Exit Sub
  End If
End If

If (GEOMETRIAS.Text = "RANURADO RECTANGULAR") Then z = Val(Text_w.Text) +
Val(Text_wf.Text)
If (GEOMETRIAS.Text = "CAPAS DE MALLAS") Then z = Val(Text_dalambre.Text)
If (GEOMETRIAS.Text = "ESTRUC CAPILAR HOMO") Then z = Val(Text_dra.Text)

Calcula_Aw
Calcula_K (GEOMETRIAS.Text)
Qsum = (hfg * (rol ^ 2) * g * (Le + La + Lc) * K * Aw * Pi * rov * (rv ^ 4)) / (Leff * (ml * Pi * rov
* (rv ^ 4) + (8 * mv * rol * K * Aw)))
Text_Qmanual.Text = Qsum

Qcap = Val(Text_QCap.Text)

Qviscoso1.Caption = Qviscoso(1)
Qviscoso2.Caption = Qviscoso(2)
```

```
LabelQarrastre(1).Caption = Qarrastre(1): Qarrast(1) = LabelQarrastre(1).Caption
LabelQarrastre(2).Caption = Qarrastre(2): Qarrast(2) = LabelQarrastre(2).Caption
LabelQarrastre(3).Caption = Qarrastre(3): Qarrast(3) = LabelQarrastre(3).Caption
LabelQarrastre(4).Caption = Qarrastre(4): Qarrast(4) = LabelQarrastre(4).Caption
LabelQarrastre(5).Caption = Qarrastre(5): Qarrast(5) = LabelQarrastre(5).Caption
LabelQarrastre(7).Caption = Qarrastre(7): Qarrast(6) = LabelQarrastre(7).Caption
If (GEOMETRIAS <> "CAPAS DE MALLAS") Then LabelQarrastre(8).Caption = Qarrastre(8):
Qarrast(7) = LabelQarrastre(8).Caption
Calcula_We (1)
If (We > 1) Then
          For INICIO = 1 To 8
            LabelQarrastre(INICIO).BackColor = &HFF&
          Next INICIO
End If

LabelQsonico(1).Caption = Qsonico(1)
LabelQsonico(2).Caption = Qsonico(2)
LabelQsonico(3).Caption = Qsonico(3)
LabelQsonico(4).Caption = Qsonico(4)
LabelQsonico(5).Caption = Qsonico(5)
LabelQsonico(6).Caption = Qsonico(6)
If (Val(Text_Machv.Text) > 1) Then
                    For INICIO = 1 To 6
                      LabelQsonico(INICIO).BackColor = &HFF&
                    Next INICIO
End If

For J = 1 To 7
  Qarras = Qarrast(J)
  LabelQarrastre(6).Caption = Qarrastre(6)
  If (J > 1) Then
             ACTUAL = Abs(Val(Qarrast(J)) - Val(LabelQarrastre(6).Caption))
             If (ANTERIOR < ACTUAL) Then
                                Qarrast(0) = CONTENIDO
                           Else: Qarrast(0) = LabelQarrastre(6).Caption
                                 ANTERIOR = ACTUAL
                                 CONTENIDO = LabelQarrastre(6).Caption
            End If
          Else: ANTERIOR = Abs(Val(Qarrast(J)) - Val(LabelQarrastre(6).Caption))
              CONTENIDO = LabelQarrastre(6).Caption
  End If
Next J
LabelQarrastre(6).Caption = Qarrast(0)

LabelQebullicion(1).Caption = Qebullicion(1)
LabelQebullicion(2).Caption = Qebullicion(2)
LabelQebullicion(3).Caption = Qebullicion(3)
```

```
LabelQcapilar(1).Caption = Qcapilar(1)
LabelQcapilar(2).Caption = Qcapilar(2)
LabelQcapilar(3).Caption = Qcapilar(3)
LabelQcapilar(4).Caption = Qcapilar(4)
LabelQcapilar(5).Caption = Qcapilar(5)
LabelQcapilar(6).Caption = Qcapilar(6)
LabelQcapilar(7).Caption = Qcapilar(7)
LabelQcapilar(8).Caption = Qcapilar(8)
LabelQcapilar(9).Caption = Qcapilar(9)
PERFILES_LÍQUIDO.Enabled = True
PERFILES.Enabled = True
TextWeber.Text = We
End Sub

Private Sub BOTON_MENU_Click()
  M = MsgBox("¿REALMENTE DESEA TERMINAR EL PROGRAMA?", vbYesNo, "AVISO")
  If (M = 6) Then End
End Sub

Private Sub Command1_Click()
  FormaPresion.Show
End Sub

Private Sub Command2_Click()
Text_rv.Text = ""
Text_Le.Text = ""
Text_La.Text = ""
Text_Lc.Text = ""
Text_dtubo.Text = ""
Text_dra.Text = ""
Text_N.Text = ""
Text_ncapas.Text = ""
Text_nespacios.Text = ""
Text_ri.Text = ""
Text_Deltaec.Text = ""
Text_dalambre.Text = ""
Text_wf.Text = ""
Text_Teta.Text = ""
Text_w.Text = ""
Text_Ts.Text = ""
Text_QCap.Text = ""
Text_Qcap2.Text = ""
End Sub

Private Sub Comparar_Click()
  Comparativo.Show
```

```
End Sub

Private Sub FACTOR_CORRECCION_Click()
  Select Case FACTOR_CORRECCION.Text
    Case "Agua-Niquel": Text_k3.Text = 0.006
    Case "Agua-Platino": Text_k3.Text = 0.013
    Case "Agua-Cobre": Text_k3.Text = 0.013
    Case "Agua-Laton": Text_k3.Text = 0.006
    Case "Agua-Cobre-Pulido": Text_k3.Text = 0.0128
    Case "Agua-Acero-Inox": Text_k3.Text = 0.008
    Case "Agua-Acero-Inox-Teflon": Text_k3.Text = 0.0058
    Case "CCl4-Cobre": Text_k3.Text = 0.013
    Case "Alcohol-nbutil-Cobre": Text_k3.Text = 0.003
    Case "Alcohol isopropilico-cobre": Text_k3.Text = 0.0025
    Case "Alcohol etilico-cobre": Text_k3.Text = 0.027
    Case "n-pentano-cromo": Text_k3.Text = 0.015
    Case "Benceno-cromo": Text_k3.Text = 0.01
    Case "Otra Combinación": Text_k3.Text = ""
 End Select
End Sub

Private Sub FLUIDOS_Click()
For i = 0 To TEMPERATURA.ListCount - 1
  TEMPERATURA.RemoveItem 0
Next i
Call PROPIEDADES("", 0)
Select Case FLUIDOS.Text
  Case "AGUA": TEMPERATURA.AddItem (20)
               TEMPERATURA.AddItem (40)
               TEMPERATURA.AddItem (60)
               TEMPERATURA.AddItem (80)
               TEMPERATURA.AddItem (100)
               TEMPERATURA.AddItem (120)
               TEMPERATURA.AddItem (140)
               TEMPERATURA.AddItem (160)
               TEMPERATURA.AddItem (180)
               TEMPERATURA.AddItem (200)
               Text_Pm.Text = 18
  Case "HEPTANO": TEMPERATURA.AddItem (-20)
                  TEMPERATURA.AddItem (0)
                  TEMPERATURA.AddItem (20)
                  TEMPERATURA.AddItem (40)
                  TEMPERATURA.AddItem (60)
                  TEMPERATURA.AddItem (80)
                  TEMPERATURA.AddItem (100)
                  TEMPERATURA.AddItem (120)
                  Text_Pm.Text = 100
```

```
Case "AMONIACO": TEMPERATURA.AddItem (-60)
            TEMPERATURA.AddItem (-40)
            TEMPERATURA.AddItem (-20)
            TEMPERATURA.AddItem (0)
            TEMPERATURA.AddItem (20)
            TEMPERATURA.AddItem (40)
            TEMPERATURA.AddItem (60)
            TEMPERATURA.AddItem (80)
            TEMPERATURA.AddItem (100)
            TEMPERATURA.AddItem (120)
            Text_Pm.Text = 35
Case "NITROGENO": TEMPERATURA.AddItem (-203)
             TEMPERATURA.AddItem (-200)
             TEMPERATURA.AddItem (-195)
             TEMPERATURA.AddItem (-190)
             TEMPERATURA.AddItem (-185)
             TEMPERATURA.AddItem (-180)
             TEMPERATURA.AddItem (-170)
             TEMPERATURA.AddItem (-160)
             TEMPERATURA.AddItem (-150)
             Text_Pm.Text = 28
Case "SODIO": TEMPERATURA.AddItem (500)
          TEMPERATURA.AddItem (600)
          TEMPERATURA.AddItem (700)
          TEMPERATURA.AddItem (800)
          TEMPERATURA.AddItem (900)
          TEMPERATURA.AddItem (1000)
          TEMPERATURA.AddItem (1100)
          TEMPERATURA.AddItem (1200)
          TEMPERATURA.AddItem (1300)
          Text_Pm.Text = 23
Case "LITIO": TEMPERATURA.AddItem (1030)
          TEMPERATURA.AddItem (1130)
          TEMPERATURA.AddItem (1230)
          TEMPERATURA.AddItem (1330)
          TEMPERATURA.AddItem (1430)
          TEMPERATURA.AddItem (1530)
          TEMPERATURA.AddItem (1630)
          TEMPERATURA.AddItem (1730)
          Text_Pm.Text = 6.941
Case "METANOL": TEMPERATURA.AddItem (-50)
            TEMPERATURA.AddItem (-30)
            TEMPERATURA.AddItem (-10)
            TEMPERATURA.AddItem (10)
            TEMPERATURA.AddItem (30)
            TEMPERATURA.AddItem (50)
            TEMPERATURA.AddItem (70)
```

```
            TEMPERATURA.AddItem (90)
            TEMPERATURA.AddItem (110)
            TEMPERATURA.AddItem (130)
            TEMPERATURA.AddItem (150)
            Text_Pm.Text = 33
 Case "ACETONA": TEMPERATURA.AddItem (-40)
            TEMPERATURA.AddItem (-20)
            TEMPERATURA.AddItem (0)
            TEMPERATURA.AddItem (20)
            TEMPERATURA.AddItem (40)
            TEMPERATURA.AddItem (60)
            TEMPERATURA.AddItem (80)
            TEMPERATURA.AddItem (100)
            TEMPERATURA.AddItem (120)
            TEMPERATURA.AddItem (140)
            Text_Pm.Text = 58
 Case "POTASIO": TEMPERATURA.AddItem (350)
            TEMPERATURA.AddItem (400)
            TEMPERATURA.AddItem (450)
            TEMPERATURA.AddItem (500)
            TEMPERATURA.AddItem (550)
            TEMPERATURA.AddItem (600)
            TEMPERATURA.AddItem (650)
            TEMPERATURA.AddItem (700)
            TEMPERATURA.AddItem (750)
            TEMPERATURA.AddItem (800)
            TEMPERATURA.AddItem (850)
            Text_Pm.Text = 39.09
  Case "ETANOL": TEMPERATURA.AddItem (-30)
            TEMPERATURA.AddItem (-10)
            TEMPERATURA.AddItem (10)
            TEMPERATURA.AddItem (30)
            TEMPERATURA.AddItem (50)
            TEMPERATURA.AddItem (70)
            TEMPERATURA.AddItem (90)
            TEMPERATURA.AddItem (110)
            TEMPERATURA.AddItem (130)
            Text_Pm.Text = 46
End Select
End Sub

Private Sub Form_Activate()
  Unload PRINCIPAL
End Sub

Private Sub Form_Load()
  KeyPreview = True
```

```
End Sub

Private Sub GEOMETRIAS_Click()
  Calcula_rhw (GEOMETRIAS.Text)
End Sub

Private Sub Imprimir_Click()
  LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.BackColor = &HFFFFFF
  LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.PrintForm
  LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.BackColor = &H808000
End Sub

Private Sub LabelQarrastre_DblClick(Index As Integer)
If (LabelQarrastre(Index).BackColor = &HFF&) Then
                                Errores.TramaLimiteSonico.Visible = False
                                Errores.TramaLimiteViscoso.Visible = False
                                Errores.TramaLimiteArrastre.Visible = True
                                Errores.Show
End If
End Sub

Private Sub LabelQsonico_DblClick(Index As Integer)
If (LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.Qsonico(Index).BackColor = &HFF&) Then
                                        Errores.TramaLimiteArrastre.Visible = False
                                        Errores.TramaLimiteViscoso.Visible = False
                                        Errores.TramaLimiteSonico.Visible = True
                                        Errores.Show
End If
End Sub

Private Sub MATERIAL_Click()
  Select Case MATERIAL.Text
    Case "ALUMINIO": Text_Kw.Text = 205
    Case "LATON": Text_Kw.Text = 113
    Case "COBRE (0-100ºC)": Text_Kw.Text = 394
    Case "VIDRIO": Text_Kw.Text = 0.75
    Case "NIQUEL (0-100ºC)": Text_Kw.Text = 88
    Case "ACERO TEMPLADO": Text_Kw.Text = 45
    Case "ACERO INOXIDABLE": Text_Kw.Text = 17.3
    Case "TEFLON": Text_Kw.Text = 0.17
    Case "ALUMINIO 2024-T6": Text_Kw.Text = 177
  End Select
End Sub

Private Sub PERFILES_Click()
  PERFILES_DE_PRESION.Show
End Sub
```

```
Private Sub PERFILES_LÍQUIDO_Click()
  Perfiles_de_Presion_Líquido.Show
End Sub

Private Sub Qviscoso1_DblClick()
If (LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.Qviscoso1.BackColor = &HFF&) Then
                                    Errores.TramaLimiteArrastre.Visible = False
                                    Errores.TramaLimiteSonico.Visible = False
                                    Errores.TramaLimiteViscoso.Visible = True
                                    Errores.Show
End If
End Sub

Private Sub Qviscoso2_DblClick()
If (LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.Qviscoso1.BackColor = &HFF&) Then
                                    Errores.TramaLimiteArrastre.Visible = False
                                    Errores.TramaLimiteSonico.Visible = False
                                    Errores.TramaLimiteViscoso.Visible = True
                                    Errores.Show
End If
End Sub

Private Sub RELACION_CALORES_ESPECIFICOS_Click()
  CALORES_ESPECIFICOS (RELACION_CALORES_ESPECIFICOS.Text)
  Text_gamav.Text = gamav
End Sub

Private Sub TEMPERATURA_Click()
If (TEMPERATURA = "") Then Exit Sub
  Call PROPIEDADES(FLUIDOS.Text, TEMPERATURA.Text)
  Text_Tv.Text = Val(TEMPERATURA.Text) + 273.15
  Text_Ts.Text = Val(TEMPERATURA.Text) + 273.15
End Sub

Private Sub TEMPERATURA_KeyDown(KeyCode As Integer, Shift As Integer)
INTERVALO (FLUIDOS.Text)
If (KeyCode = 13) Then
  If (Val(TEMPERATURA.Text) >= IntInf And Val(TEMPERATURA.Text) <= IntSup) Then
    TEMPERATURA_T = TEMPERATURA.Text
    TEMPERATURA.Text = Fix(TEMPERATURA.Text)
    Call PROPIEDADES2(FLUIDOS.Text, TEMPERATURA.Text)
    Text_Ts.Text = Val(TEMPERATURA.Text) + 273.15
    If (INTERPOLA = 1) Then
                    V1 = TEMPERATURA.Text
                    While (INTERPOLA = 1)
                      V1 = V1 + 1
```

```
                Call PROPIEDADES2(FLUIDOS.Text, Val(V1))
                If (V1 > 2500) Then Exit Sub
              Wend
            Else: Exit Sub
  End If
  hfg_Sup = Text_hfg.Text
  rol_Sup = Text_rol.Text
  rov_Sup = Text_rov.Text
  kl_Sup = Text_kl.Text
  ml_Sup = Text_ml.Text
  mv_Sup = Text_mv.Text
  Pv_Sup = Text_Pv.Text
  Qev_Sup = Text_Qev.Text
  sigmal_Sup = Text_sigmal.Text
  Call PROPIEDADES2(FLUIDOS.Text, TEMPERATURA.Text)
  If (INTERPOLA = 1) Then
              V2 = Val(TEMPERATURA.Text)
              While (INTERPOLA = 1)
                V2 = V2 - 1
                Call PROPIEDADES2(FLUIDOS.Text, Val(V2))
                If (V2 < -2500) Then Exit Sub
              Wend
  End If
  hfg_Inf = Text_hfg.Text
  rol_Inf = Text_rol.Text
  rov_Inf = Text_rov.Text
  kl_Inf = Text_kl.Text
  ml_Inf = Text_ml.Text
  mv_Inf = Text_mv.Text
  Pv_Inf = Text_Pv.Text
  Qev_Inf = Text_Qev.Text
  sigmal_Inf = Text_sigmal.Text
  Tinf = V2 + 273.15
  Tsup = V1 + 273.15
  Text_hfg.Text = Interpolacion(TEMPERATURA_T + 273.15, Tinf, Tsup, Text_hfg.Text,
hfg_Inf, Val(hfg_Sup))
  Text_rol.Text = Interpolacion(TEMPERATURA_T + 273.15, Tinf, Tsup, Text_rol.Text, rol_Inf,
Val(rol_Sup))
  Text_rov.Text = Interpolacion(TEMPERATURA_T + 273.15, Tinf, Tsup, Text_rov.Text,
rov_Inf, Val(rov_Sup))
  Text_kl.Text = Interpolacion(TEMPERATURA_T + 273.15, Tinf, Tsup, Text_kl.Text, kl_Inf,
Val(kl_Sup))
  Text_ml.Text = Interpolacion(TEMPERATURA_T + 273.15, Tinf, Tsup, Text_ml.Text, ml_Inf,
Val(ml_Sup))
  Text_mv.Text = Interpolacion(TEMPERATURA_T + 273.15, Tinf, Tsup, Text_mv.Text,
mv_Inf, Val(mv_Sup))
```

```
   Text_Pv.Text = Interpolacion(TEMPERATURA_T + 273.15, Tinf, Tsup, Text_Pv.Text, Pv_Inf, Val(Pv_Sup))
   Text_Qev.Text = Interpolacion(TEMPERATURA_T + 273.15, Tinf, Tsup, Text_Qev.Text, Qev_Inf, Val(Qev_Sup))
   Text_sigmal.Text = Interpolacion(TEMPERATURA_T + 273.15, Tinf, Tsup, Text_sigmal.Text, sigmal_Inf, Val(sigmal_Sup))
  Else: M = MsgBox("EL VALOR DE LA TEMPERATURA ESTA FUERA DEL INTERVALO PERMITIDO", vbOKOnly, "AVISO")
  End If
TEMPERATURA.Text = TEMPERATURA_T
End If
End Sub

Private Sub Text_APcm_Click()
  LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.SetFocus
End Sub

Private Sub Text_Aw_Click()
  LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.SetFocus
End Sub

Private Sub Text_dalambre_Change()
  Text_dalambre.Text = REVISA(Text_dalambre.Text)
  dalambre = Val(Text_dalambre.Text)
End Sub

Private Sub Text_dw_Change()
  dw = Val(Text_dw.Text)
  Calcula_Aw
End Sub

Private Sub Text_Deltaec_Change()
  Text_Deltaec.Text = REVISA(Text_Deltaec.Text)
End Sub

Private Sub Text_dra_Change()
  Text_dra.Text = REVISA(Text_dra.Text)
End Sub

Private Sub Text_dtubo_Change()
  Text_dtubo.Text = REVISA(Text_dtubo.Text)
End Sub

Private Sub Text_gamav_Change()
  Text_gamav.Text = REVISA(Text_gamav.Text)
End Sub
```

```
Private Sub Text_hfg_Change()
  Text_hfg.Text = REVISA(Text_hfg.Text)
End Sub

Private Sub Text_k3_Change()
  Text_k3.Text = REVISA(Text_k3.Text)
End Sub

Private Sub Text_kl_Change()
  Text_kl.Text = REVISA(Text_kl.Text)
End Sub

Private Sub Text_Kw_Change()
  Text_Kw.Text = REVISA(Text_Kw.Text)
End Sub

Private Sub Text_La_Change()
  Text_La.Text = REVISA(Text_La.Text)
  Text_Leff.Text = 0.5 * Val(Text_Le.Text) + Val(Text_La.Text) + 0.5 * Val(Text_Lc.Text)
  X = Val(Text_Le.Text) + Val(Text_La.Text)
End Sub

Private Sub Text_Lc_Change()
  Text_Lc.Text = REVISA(Text_Lc.Text)
  Text_Leff.Text = 0.5 * Val(Text_Le.Text) + Val(Text_La.Text) + 0.5 * Val(Text_Lc.Text)
End Sub

Private Sub Text_Le_Change()
  Text_Le.Text = REVISA(Text_Le.Text)
  Text_Leff.Text = 0.5 * Val(Text_Le.Text) + Val(Text_La.Text) + 0.5 * Val(Text_Lc.Text)
  X = Val(Text_Le.Text) + Val(Text_La.Text)
End Sub

Private Sub Text_Leff_Click()
LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.SetFocus
End Sub

Private Sub Text_Machv_Click()
  LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.SetFocus
End Sub

Private Sub Text_ml_Change()
  Text_ml.Text = REVISA(Text_ml.Text)
End Sub

Private Sub Text_mv_Change()
  Text_mv.Text = REVISA(Text_mv.Text)
```

```
End Sub

Private Sub Text_N_Change()
  Text_N.Text = REVISA(Text_N.Text)
  N = Val(Text_N.Text)
  Calcula_Aw
End Sub

Private Sub Text_Pm_Click()
  LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.SetFocus
End Sub

Private Sub Text_Pt_Click()
  LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.SetFocus
End Sub

Private Sub Text_Pv_Change()
  Text_Pv.Text = REVISA(Text_Pv.Text)
End Sub

Private Sub Text_QCap_Change()
  Text_QCap.Text = REVISA(Text_QCap.Text)
End Sub

Private Sub Text_Qev_Change()
  Text_Qev.Text = REVISA(Text_Qev.Text)
End Sub

Private Sub Text_FlujoMasico_Click()
  LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.SetFocus
End Sub

Private Sub Text_Qmanual_Click()
  LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.SetFocus
End Sub

Private Sub Text_Rerc_Click()
  LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.SetFocus
End Sub

Private Sub Text_Rev_Click()
  LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.SetFocus
End Sub

Private Sub Text_ri_Change()
  Text_ri.Text = REVISA(Text_ri.Text)
End Sub
```

```
Private Sub Text_rol_Change()
  Text_rol.Text = REVISA(Text_rol.Text)
End Sub

Private Sub Text_rov_Change()
  Text_rov.Text = REVISA(Text_rov.Text)
End Sub

Private Sub Text_sigmal_Change()
  Text_sigmal.Text = REVISA(Text_sigmal.Text)
End Sub

Private Sub Text_Teta_Change()
  Text_Teta.Text = REVISA(Text_Teta.Text)
End Sub

Private Sub Text_Ts_Change()
  Text_Ts.Text = REVISA(Text_Ts.Text)
End Sub

Private Sub Text_Tv_Click()
  LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.SetFocus
End Sub

Private Sub Text_w_Change()
  Text_w.Text = REVISA(Text_w.Text)
  w = Val(Text_w.Text)
  Calcula_Aw
End Sub

Private Sub Text_ncapas_Change()
  Text_ncapas.Text = REVISA(Text_ncapas.Text)
  ncapas = Val(Text_ncapas.Text)
  Calcula_Aw
End Sub

Private Sub Text_nespacios_Change()
  Text_nespacios.Text = REVISA(Text_nespacios.Text)
  nespacios = Val(Text_nespacios.Text)
  Calcula_Aw
End Sub

Private Sub Text_rv_Change()
  Text_rv.Text = REVISA(Text_rv.Text)
  rv = (Text_rv.Text)
  If (rv <> "") Then Calcula_Aw
```

```
End Sub

Private Sub Text_X_Click()
  LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.SetFocus
End Sub

Private Sub Text_z_Click()
  LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.SetFocus
End Sub

Private Sub Text_wf_Change()
  Text_wf.Text = REVISA(Text_wf.Text)
End Sub

Private Sub TextWeber_Click()
  LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.SetFocus
End Sub

Private Sub VerEcArrastre_Click(Index As Integer)
For Y = 1 To 8
  LimiteArrastre.EcArrastre(Y).Visible = False
Next Y
LimiteArrastre.EcArrastre(Index).Visible = True
LimiteArrastre.Show
End Sub

Private Sub VerEcCapilar_Click(Index As Integer)
  For i = 1 To 9
    LimiteCapilar.Frame1(i).Visible = False
  Next i
  LimiteCapilar.Visible = True
  LimiteCapilar.Show
  LimiteCapilar.Frame1(Index).Visible = True
End Sub

Private Sub VerEcEbullicion_Click(Index As Integer)
For Y = 1 To 3
  LimiteEbullicion.EcEbullicion(Y).Visible = False
Next Y
LimiteEbullicion.EcEbullicion(Index).Visible = True
LimiteEbullicion.Show
End Sub

Private Sub VerEcSonica_Click(Index As Integer)
For Y = 1 To 6
  LimiteSonico.EcSonico(Y).Visible = False
Next Y
```

```
LimiteSonico.EcSonico(Index).Visible = True
LimiteSonico.Show
End Sub

Private Sub VerEcViscoso1_Click()
  LimiteViscoso.Image2.Visible = False
  LimiteViscoso.Image3.Visible = False
  LimiteViscoso.Image1.Visible = True
  LimiteViscoso.Show
End Sub

Private Sub VerEcViscoso2_Click()
  LimiteViscoso.Image1.Visible = False
  LimiteViscoso.Image3.Visible = False
  LimiteViscoso.Image2.Visible = True
  LimiteViscoso.Show
End Sub

Private Sub VerEcViscoso3_Click()
  LimiteViscoso.Image1.Visible = False
  LimiteViscoso.Image2.Visible = False
  LimiteViscoso.Image3.Visible = True
  LimiteViscoso.Show
End Sub

Private Sub Form_KeyPress(KeyAscii As Integer)
   Select Case KeyAscii
       Case vbKey0, vbKey1, vbKey2, vbKey3, vbKey4:
       Case vbKey5, vbKey6, vbKey7, vbKey8, vbKey9:
       Case 8:
       Case 46:

       Case Else:
              KeyAscii = 0
              Exit Sub
   End Select
End Sub

Function VERIFICA(VALOR As String) As Boolean
  Dim P As Byte
  P = 0
  For i = 1 To Len(VALOR)
    M = Mid(VALOR, i, 1)
    If (StrComp(M, ".") = 0) Then P = P + 1
  Next i
  If (P > 1) Then
           M = MsgBox("SOLO PUEDE INTRODUCIR UN PUNTO", vbOKOnly, "AVISO")
```

```
            VALOR = Mid(VALOR, 1, Len(VALOR) - 1)
            VERIFICA = False
          Else
            VERIFICA = True
  End If
End Function
```

Código Fuente para el Cálculo de los Perfiles de Presión y Temperatura Analíticos del Vapor (PPTAV)

```
Private Sub Calcula_Intervalos_Click()
If (Text_IntervaloLa.Text = "0") Then Text_IntervaloLa.Text = "1"
If (La = 0) Then Text_IntervaloLa.Text = "0"
If (Text_IntervaloLe.Text = "0" Or Text_IntervaloLc.Text = "0") Then
  M = MsgBox("Introduzca Intervalos", vbOKOnly, "AVISO")
  Exit Sub
End If

  If (Val(Text_Tse.Text) = 0) Then Exit Sub
  Trama_Espere.Visible = True

  For hy = 1 To 2
    DoEvents
  Next hy
  Tse = Val(Text_Tse.Text)
  Tsa = Val(Text_Tsa.Text)
  Tsc = Val(Text_Tsc.Text)
  For i = 0 To 27
    Text_LeX(i).Text = "": Text_LeAPv(i).Text = "": Text_LePx(i).Text = "": Text_LeTv(i).Text = ""
    Text_LaX(i).Text = "": Text_LaAPv(i).Text = "": Text_LaPx(i).Text = "": Text_LaTv(i).Text = ""
    Text_LcX(i).Text = "": Text_LcAPv(i).Text = "": Text_LcPx(i).Text = "": Text_LcTv(i).Text = ""
    Text_LeX(i).Visible = False: Text_LeAPv(i).Visible = False: Text_LePx(i).Visible = False:
Text_LeTv(i).Visible = False
    Text_LaX(i).Visible = False: Text_LaAPv(i).Visible = False: Text_LaPx(i).Visible = False:
Text_LaTv(i).Visible = False
    Text_LcX(i).Visible = False: Text_LcAPv(i).Visible = False: Text_LcPx(i).Visible = False:
Text_LcTv(i).Visible = False
  Next i

  INCREMENTO = Le / Val(Text_IntervaloLe.Text)
  ze = 0: r = 0: i = -1: Text_LePx(0) = Pv
  For J = 1 To Val(Text_IntervaloLe.Text) + 1
    i = i + 1
    Text_LeX(i).Visible = True
    Text_LeAPv(i).Visible = True
    Text_LePx(i).Visible = True
    Text_LeTv(i).Visible = True
    Calcula_APve (4)
    Text_LeAPv(i).Text = Redondea(Str(APve))
    If (i > 0) Then
                Text_LeX(i).Text = Val(Text_LeX(i - 1).Text) + INCREMENTO
                Text_LePx(i).Text = Redondea(Str(Text_LePx(0).Text + APve))
            Else: Text_LeX(0).Text = 0
```

```
   End If
   Call              TEMPERATURA_DEL_VAPOR(LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.FLUIDOS.Text,
Val(Text_LePx(i).Text))
   Text_LeTv(i).Text = Redondea(Str(Tv))
   ze = ze + INCREMENTO
  Next J
  Text_Tsa.Text = Text_LeTv(i).Text
'
If (La > 0) Then
  INCREMENTO = La / Val(Text_IntervaloLa.Text)
  za = Text_LeX(i)
  r = 0: Text_LaPx(0).Text = Text_LePx(i).Text: i = -1
  For J = 1 To Val(Text_IntervaloLa.Text) + 1
   i = i + 1
   Text_LaX(i).Visible = True
   Text_LaAPv(i).Visible = True
   Text_LaPx(i).Visible = True
   Text_LaTv(i).Visible = True
   Calcula_APva2
   Text_LaAPv(i).Text = Redondea(Str(APva))
   If (i > 0) Then
              Text_LaX(i).Text = Val(Text_LaX(i - 1).Text) + INCREMENTO
              Text_LaPx(i).Text = Redondea(Str(Text_LaPx(0).Text + APva))
          Else: Text_LaX(0).Text = za
   End If
   Call              TEMPERATURA_DEL_VAPOR(LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.FLUIDOS.Text,
Val(Text_LaPx(i).Text))
   Text_LaTv(i).Text = Redondea(Str(Tv))
   za = za + INCREMENTO
  Next J
  Else
   Text_LcPx(0).Text = Text_LePx(i).Text
End If

'
  INCREMENTO = Lc / Val(Text_IntervaloLc.Text)
  zc = Lc: r = 0: Text_LcX(0).Text = 0
   If (La > 0) Then
            zc = Text_LaX(i)
            Text_LcPx(0).Text = Redondea(Text_LaPx(i).Text)
            Text_LcAPv(0).Text = Redondea(Text_LaAPv(i).Text)
            Text_LcTv(0).Text = Redondea(Text_LaTv(i).Text)
            PTemp1 = Text_LaPx(i).Text
           Else
            zc = Text_LeX(i)
            Text_LcPx(0).Text = Redondea(Text_LePx(i).Text)
            Text_LcAPv(0).Text = Redondea(Text_LeAPv(i).Text)
```

```
            Text_LcTv(0).Text = Redondea(Text_LeTv(i).Text)
            PTemp1 = Text_LePx(i).Text
  End If
  Text_LcX(0).Visible = True
  Text_LcPx(0).Visible = True
  Text_LcAPv(0).Visible = True
  Text_LcTv(0).Visible = True
  TvTemp = Val(Text_Tsc.Text)
  Call PROPIEDADES(LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.FLUIDOS.Text, Str(TvTemp - 273.15))
    If (INTERPOLA = 1) Then
                V1 = Val(Str(Tv - 273.15))
                While (INTERPOLA = 1)
                  V1 = Fix(V1 + 1)
                  Call PROPIEDADES(LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.FLUIDOS.Text, Val(V1))
                  If (V1 > 2500) Then Exit Sub
                Wend
               Else: Exit Sub
    End If
    Pv_Sup = LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.Text_Pv.Text
    Call PROPIEDADES(LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.FLUIDOS.Text, Val(Str(Tv - 273.15)))
    If (INTERPOLA = 1) Then
                  V2 = Val(Str(Tv - 273.15))
                  While (INTERPOLA = 1)
                   V2 = Fix(V2 - 1)
                   Call PROPIEDADES(LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.FLUIDOS.Text, Val(V2))
                   If (V2 < -2500) Then Exit Sub
                  Wend
    End If
    Pv_Inf = LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.Text_Pv.Text
    Tinf = V2 + 273.15
    Tsup = V1 + 273.15
    PTemp = Interpolacion(TvTemp, Tinf, Tsup, LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.Text_Pv.Text,
Pv_Inf, Val(Pv_Sup))
   i = -1
   For J = 1 To Val(Text_IntervaloLc.Text) + 1
    i = i + 1
    Text_LcX(i).Visible = True
    Text_LcAPv(i).Visible = True
    Text_LcPx(i).Visible = True
    Text_LcTv(i).Visible = True
    Calcula_APvc
    Text_LcX(i).Text = zc
    Text_LcAPv(i).Text = Redondea(Str(APvc))
    Text_LcPx(i).Text = Redondea(Str(PTemp + APvc))
    If (J = 1) Then PTemp2 = Val(Text_LcPx(i).Text) - PTemp1
    Text_LcPx(i).Text = Redondea(Str(Val(Text_LcPx(i).Text)))
```

```
   Call                TEMPERATURA_DEL_VAPOR(LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.FLUIDOS.Text,
Val(Text_LcPx(i).Text))
   Text_LcTv(i).Text = Redondea(Str(Tv))
   zc = zc + INCREMENTO
  Next J
  For O = 0 To Val(Text_IntervaloLc.Text)
   Text_LcPx(O).Text = Val(Text_LcPx(O).Text) - PTemp2
   Call                TEMPERATURA_DEL_VAPOR(LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.FLUIDOS.Text,
Val(Text_LcPx(O).Text))
   Text_LcTv(O).Text = Redondea(Str(Tv))
  Next O
   Text_Tsc.Text = Text_LcTv(i).Text
  Graficar.Enabled = True
  Trama_Espere.Visible = False
End Sub

Private Sub Command1_Click()
  GUARDAR_VAPOR.Show
End Sub

Private Sub Form_Activate()
  Label_Le.Caption = Le
  Label_La.Caption = La
  Label_Lc.Caption = Lc
  Text_Tse.Text = Ts
End Sub

Private Sub Graficar_Click()
  GRAFICA_PERFILES.Visible = True
  GRAFICA_PERFILES.Show
End Sub

Private Sub Imprimir_Click()
  Printer.Zoom = 50
  PERFILES_DE_PRESION.AutoRedraw = True
  PERFILES_DE_PRESION.PrintForm
  PERFILES_DE_PRESION.BackColor = &HFFFFFF
  PERFILES_DE_PRESION.PrintForm
  PERFILES_DE_PRESION.BackColor = &H808000
End Sub

Private Sub LabelAPv_Click(Index As Integer)
  Ecuaciones.ImgEcuPlx.Visible = False
  Ecuaciones.ImgEcuFlujoMasico.Visible = False
  Ecuaciones.ImgEcuAPl.Visible = False
  Ecuaciones.ImgEcuQrech.Visible = False
  Ecuaciones.ImgEcuQsum.Visible = False
```

```
  For i = 0 To 2
    Ecuaciones.ImgEcuAPv(i).Visible = False
    Ecuaciones.ImgEcuPx(i).Visible = False
  Next i
  Ecuaciones.Show
  Ecuaciones.ImgEcuAPv(Index).Visible = True
End Sub

Private Sub LabelPx_Click(Index As Integer)
  Ecuaciones.ImgEcuPlx.Visible = False
  Ecuaciones.ImgEcuFlujoMasico.Visible = False
  Ecuaciones.ImgEcuAPl.Visible = False
  Ecuaciones.ImgEcuQrech.Visible = False
  Ecuaciones.ImgEcuQsum.Visible = False
  For i = 0 To 2
    Ecuaciones.ImgEcuAPv(i).Visible = False
    Ecuaciones.ImgEcuPx(i).Visible = False
  Next i
  Ecuaciones.Show
  Ecuaciones.ImgEcuPx(Index).Visible = True
End Sub

Private Sub REGRESA_Click()
  LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.Show
End Sub

Private Sub Terminar_Click()
  M = MsgBox("¿REALMENTE DESEA TERMINAR EL PROGRAMA?", vbYesNo, "AVISO")
  If (M = 6) Then End
End Sub

Private Sub Text_IntervaloLa_Change()
  Text_IntervaloLa.Text = REVISA(Text_IntervaloLa.Text)
End Sub

Private Sub Text_IntervaloLc_Change()
  Text_IntervaloLc.Text = REVISA(Text_IntervaloLc.Text)
End Sub

Private Sub Text_IntervaloLe_Change()
  Text_IntervaloLe.Text = REVISA(Text_IntervaloLe.Text)
End Sub

Private Sub Text_Tsa_Click()
 PERFILES_DE_PRESION.SetFocus
End Sub
```

```
Private Sub Text_Tsc_Click()
 PERFILES_DE_PRESION.SetFocus
End Sub

Private Sub Text_Tse_Click()
 PERFILES_DE_PRESION.SetFocus
End Sub
```

Código Fuente para el Cálculo de los Perfiles de Presión y Temperatura Analíticos del Líquido (PPTAL)

```
Private Sub Calcula_Intervalos_Click()
If (Text_IntervaloLa.Text = "0") Then Text_IntervaloLa.Text = "1"
If (La = 0) Then Text_IntervaloLa.Text = "0"
If ((Text_IntervaloLe.Text = "0") Or (Text_IntervaloLc.Text = "0")) Then
  M = MsgBox("Introduzca Intervalos", vbOKOnly, "AVISO")
  Exit Sub
End If

  If (Val(Text_Tse.Text) = 0) Then Exit Sub
  Trama_Espere.Visible = True

  For hy = 1 To 2
    DoEvents
  Next hy
  Tse = Val(Text_Tse.Text)
  Tsa = Val(Text_Tsa.Text)
  Tsc = Val(Text_Tsc.Text)
  For i = 0 To 27
    Text_LeX(i).Text = "": Text_LeAPv(i).Text = "": Text_LePx(i).Text = "": Text_LeTv(i).Text = ""
    Text_LaX(i).Text = "": Text_LaAPv(i).Text = "": Text_LaPx(i).Text = "": Text_LaTv(i).Text = ""
    Text_LcX(i).Text = "": Text_LcAPv(i).Text = "": Text_LcPx(i).Text = "": Text_LcTv(i).Text = ""
    Text_LeX(i).Visible = False: Text_LeAPv(i).Visible = False: Text_LePx(i).Visible = False:
Text_LeTv(i).Visible = False
    Text_LaX(i).Visible = False: Text_LaAPv(i).Visible = False: Text_LaPx(i).Visible = False:
Text_LaTv(i).Visible = False
    Text_LcX(i).Visible = False: Text_LcAPv(i).Visible = False: Text_LcPx(i).Visible = False:
Text_LcTv(i).Visible = False
  Next i

  INCREMENTO = Le / Val(Text_IntervaloLe.Text)
  ze = 0: r = 0: i = -1: Text_LePx(0) = Pv
  For J = 1 To Val(Text_IntervaloLe.Text) + 1
    i = i + 1
    Text_LeX(i).Visible = True
    Text_LeAPv(i).Visible = True
    Text_LePx(i).Visible = True
    Text_LeTv(i).Visible = True
    Calcula_APl2 (ze)
    Text_LeAPv(i).Text = Redondea(Str(APl2))
    If (i > 0) Then
                Text_LeX(i).Text = Val(Text_LeX(i - 1).Text) + INCREMENTO
                Text_LePx(i).Text = Redondea(Str(Text_LePx(0).Text + APl2))
           Else: Text_LeX(0).Text = 0
    End If
```

```
   Call                TEMPERATURA_DEL_VAPOR(LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.FLUIDOS.Text,
Val(Text_LePx(i).Text))
   Text_LeTv(i).Text = Redondea(Str(Tv))
   ze = ze + INCREMENTO
  Next J
  Text_Tsa.Text = Text_LeTv(i).Text
'
If (La > 0) Then
  INCREMENTO = La / Val(Text_IntervaloLa.Text)
  za = Text_LeX(i)
  r = 0: Text_LaPx(0).Text = Text_LePx(i).Text: Text_LaX(0) = za: i = -1

  For J = 1 To Val(Text_IntervaloLa.Text) + 1
   i = i + 1
   Text_LaX(i).Visible = True
   Text_LaAPv(i).Visible = True
   Text_LaPx(i).Visible = True
   Text_LaTv(i).Visible = True
   Calcula_APl2 (za)
   Text_LaAPv(i).Text = Redondea(Str(APl2))
   If (i > 0) Then
                Text_LaX(i).Text = Val(Text_LaX(i - 1).Text) + INCREMENTO

                Text_LaPx(i).Text = Redondea(Str(Text_LePx(0).Text + APl2))
           Else: Text_LaX(0).Text = za
   End If
   Call                TEMPERATURA_DEL_VAPOR(LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.FLUIDOS.Text,
Val(Text_LaPx(i).Text))
   Text_LaTv(i).Text = Redondea(Str(Tv))
   za = za + INCREMENTO
  Next J
  Else
   Text_LcPx(0).Text = Text_LePx(i).Text
End If

'
  INCREMENTO = Lc / Val(Text_IntervaloLc.Text)
  If (La > 0) Then
              zc = Text_LaX(i)
              Text_LcPx(0).Text = Redondea(Text_LaPx(i).Text)
           Else
              zc = Text_LeX(i)
              Text_LcPx(0).Text = Redondea(Text_LePx(i).Text)
  End If
  r = 0: i = -1
  For J = 1 To Val(Text_IntervaloLc.Text) + 1
   i = i + 1
```

```
   Text_LcX(i).Visible = True
   Text_LcAPv(i).Visible = True
   Text_LcPx(i).Visible = True
   Text_LcTv(i).Visible = True
   Calcula_APl2 (zc)
   Text_LcAPv(i).Text = Redondea(Str(APl2))
   If (i > 0) Then
              Text_LcX(i).Text = Val(Text_LcX(i - 1).Text) + INCREMENTO
              Text_LcPx(i).Text = Redondea(Str(Text_LePx(0).Text + APl2))
         Else: Text_LcX(0).Text = zc
   End If
   Call              TEMPERATURA_DEL_VAPOR(LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.FLUIDOS.Text,
Val(Text_LcPx(i).Text))
   Text_LcTv(i).Text = Redondea(Str(Tv))
   zc = zc + INCREMENTO
  Next J
  Text_Tsc.Text = Text_LcTv(i).Text
  Graficar.Enabled = True
  Trama_Espere.Visible = False
End Sub

Private Sub Form_Activate()
  Label_Le.Caption = Le
  Label_La.Caption = La
  Label_Lc.Caption = Lc
  Text_Tse.Text = Ts
End Sub

Private Sub Graficar_Click()
  GRAFICA_PERFILES_LÍQUIDO.Visible = True
  GRAFICA_PERFILES_LÍQUIDO.Show
End Sub

Private Sub Guardar_Click()
  GUARDAR_LÍQUIDO.Show
End Sub

Private Sub Imprimir_Click()
  Printer.Zoom = 50
  Perfiles_de_Presion_Líquido.AutoRedraw = True
  Perfiles_de_Presion_Líquido.PrintForm
  Perfiles_de_Presion_Líquido.BackColor = &HFFFFFF
  Perfiles_de_Presion_Líquido.PrintForm
  Perfiles_de_Presion_Líquido.BackColor = &H808000
End Sub

Private Sub LabelAPl_Click(Index As Integer)
```

```
  Ecuaciones.ImgEcuPlx.Visible = False
  Ecuaciones.ImgEcuFlujoMasico.Visible = False
  Ecuaciones.ImgEcuQrech.Visible = False
  Ecuaciones.ImgEcuQsum.Visible = False
  For i = 0 To 2
    Ecuaciones.ImgEcuAPv(i).Visible = False
    Ecuaciones.ImgEcuPx(i).Visible = False
  Next i
  Ecuaciones.Show
  Ecuaciones.ImgEcuAPl.Visible = True
End Sub

Private Sub LabelPlx_Click(Index As Integer)
  Ecuaciones.ImgEcuFlujoMasico.Visible = False
  Ecuaciones.ImgEcuAPl.Visible = False
  Ecuaciones.ImgEcuQrech.Visible = False
  Ecuaciones.ImgEcuQsum.Visible = False
  For i = 0 To 2
    Ecuaciones.ImgEcuAPv(i).Visible = False
    Ecuaciones.ImgEcuPx(i).Visible = False
  Next i
  Ecuaciones.Show
  Ecuaciones.ImgEcuPlx.Visible = True
End Sub

Private Sub REGRESA_Click()
  LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.Show
End Sub

Private Sub Terminar_Click()
  M = MsgBox("¿REALMENTE DESEA TERMINAR EL PROGRAMA?", vbYesNo, "AVISO")
  If (M = 6) Then End
End Sub

Private Sub Text_IntervaloLa_Change()
  Text_IntervaloLa.Text = REVISA(Text_IntervaloLa.Text)
End Sub

Private Sub Text_IntervaloLc_Change()
  Text_IntervaloLc.Text = REVISA(Text_IntervaloLc.Text)
End Sub

Private Sub Text_IntervaloLe_Change()
  Text_IntervaloLe.Text = REVISA(Text_IntervaloLe.Text)
End Sub

Private Sub Text_Tsa_Click()
```

```
 Perfiles_de_Presion_Líquido.SetFocus
End Sub

Private Sub Text_Tsc_Click()
 Perfiles_de_Presion_Líquido.SetFocus
End Sub

Private Sub Text_Tse_Click()
 Perfiles_de_Presion_Líquido.SetFocus
End Sub
```

Código Fuente para el Cálculo de los Perfiles de Temperatura y Presión de Vapor Experimentales (PTPVE)

```
Private Sub CalorEspecifico_Change(Index As Integer)
  CalorEspecifico(Index).Text = REVISA(CalorEspecifico(Index).Text)
End Sub

Private Sub Command1_Click()
If (TAmp.Text = "" Or Thfg.Text = "") Then
                              M = MsgBox("FALTA: R o hfg", vbOKOnly, "AVISO")
                              Exit Sub
End If
For i = 0 To 6
If (FlujoMasico(i).Text <> "" And CalorEspecifico(i).Text <> "" And TAmp.Text <> "") Then
  If (TTin(i).Text <> "" And TTout(i).Text <> "" And TVolt(i).Text <> "") Then SI = 1: Exit For
End If
Next i
 Call PROPIEDADES(LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.FLUIDOS.Text, 1)
  For i = 0 To 6
    TQsum(i).Text = (Val(TVolt(i).Text) ^ 2 / Val(TAmp.Text))
    TYTY = TQsum(i)
    TQrech(i).Text = Val(FlujoMasicoFluido(i).Text) * Val(CalorEspecifico(i).Text) *
(Val(TTout(i).Text) - Val(TTin(i).Text))
    FlujoMasico(i).Text = Val(TQsum(i).Text) / Val(Thfg.Text)
  Next i
End Sub

Private Sub Command3_Click()
  Guardar.Show
End Sub

Private Sub Command4_Click()
  Comparativo2.Show
End Sub

Private Sub FlujoMasico_Click(Index As Integer)
  Comparativo.SetFocus
End Sub

Private Sub FlujoMasicoFluido_Change(Index As Integer)
  FlujoMasicoFluido(Index).Text = REVISA(FlujoMasicoFluido(Index).Text)
End Sub

Private Sub Form_KeyPress(KeyAscii As Integer)
   Select Case KeyAscii
      Case vbKey0, vbKey1, vbKey2, vbKey3, vbKey4:
```

```
        Case vbKey5, vbKey6, vbKey7, vbKey8, vbKey9:
        Case 8:
        Case 13:
        Case 46:
        Case Else:
                KeyAscii = 0
                Exit Sub
    End Select
End Sub

Private Sub Form_Load()
  KeyPreview = True
End Sub

Private Sub Graficar_Click()
  GRAFICA_PERFILES2.Show
End Sub

Private Sub Imprimir_Click()
  Printer.Zoom = 50
  Comparativo.AutoRedraw = True
  Comparativo.BackColor = &HFFFFFF
  Comparativo.PrintForm
  Comparativo.BackColor = &H808000
End Sub

Private Sub Label1_Click()
  Ecuaciones.ImgEcuPlx.Visible = False
  Ecuaciones.ImgEcuAPl.Visible = False
  Ecuaciones.ImgEcuFlujoMasico.Visible = False
  For i = 0 To 2
    Ecuaciones.ImgEcuAPv(i).Visible = False
    Ecuaciones.ImgEcuPx(i).Visible = False
  Next i
  Ecuaciones.ImgEcuQsum.Visible = False
  Ecuaciones.Show
  Ecuaciones.ImgEcuQrech.Visible = True
End Sub

Private Sub Label26_Click()
  Ecuaciones.ImgEcuPlx.Visible = False
  Ecuaciones.ImgEcuAPl.Visible = False
  Ecuaciones.ImgEcuQsum.Visible = False
  For i = 0 To 2
    Ecuaciones.ImgEcuAPv(i).Visible = False
    Ecuaciones.ImgEcuPx(i).Visible = False
  Next i
```

```
  Ecuaciones.ImgEcuQrech.Visible = False
  Ecuaciones.Show
  Ecuaciones.ImgEcuFlujoMasico.Visible = True
End Sub

Private Sub Label4_Click()
  Ecuaciones.ImgEcuPlx.Visible = False
  Ecuaciones.ImgEcuFlujoMasico.Visible = False
  Ecuaciones.ImgEcuAPl.Visible = False
  For i = 0 To 2
    Ecuaciones.ImgEcuAPv(i).Visible = False
    Ecuaciones.ImgEcuPx(i).Visible = False
  Next i
  Ecuaciones.ImgEcuQrech.Visible = False
  Ecuaciones.Show
  Ecuaciones.ImgEcuQsum.Visible = True
End Sub

Private Sub Limpiar_Click()
For i = 0 To 6
  TVolt(i).Text = ""
  Tiempo(i).Text = ""
  Tiempo(6 + i).Text = ""
  Tiempo(10 + i).Text = ""
  X(i).Text = ""
  TQsum(i).Text = ""
  FlujoMasico(i).Text = ""
  CalorEspecifico(i).Text = ""
  TTin(i).Text = ""
  TTout(i).Text = ""
  TQrech(i).Text = ""
Next i
TAmp.Text = ""
For i = 0 To 16
  TTv1(0 + i).Text = ""
  TPv1(0 + i).Text = ""
  TTv1(18 + i).Text = ""
  TPv1(18 + i).Text = ""
  TTv1(36 + i).Text = ""
  TPv1(36 + i).Text = ""
  TTv1(54 + i).Text = ""
  TPv1(54 + i).Text = ""
  TTv1(72 + i).Text = ""
  TPv1(72 + i).Text = ""
  TTv1(90 + i).Text = ""
  TPv1(90 + i).Text = ""
  TTv1(108 + i).Text = ""
```

```
  TPv1(108 + i).Text = ""
Next i
End Sub

Private Sub Regresar_Click()
  LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.Show
End Sub

Private Sub TAmp_Change()
  TAmp.Text = REVISA(TAmp.Text)
End Sub

Private Sub Terminar_Click()
  M = MsgBox("¿REALMENTE DESEA TERMINAR EL PROGRAMA?", vbYesNo, "AVISO")
  If (M = 6) Then End
End Sub

Private Sub Tiempo_Change(Index As Integer)
  Tiempo(Index).Text = REVISA(Tiempo(Index).Text)
End Sub

Private Sub TPv1_Click(Index As Integer)
  Comparativo.SetFocus
End Sub

Private Sub TQrech_Click(Index As Integer)
  Comparativo.SetFocus
End Sub

Private Sub TQsum_Click(Index As Integer)
  Comparativo.SetFocus
End Sub

Private Sub TTin_Change(Index As Integer)
  TTin(Index).Text = REVISA(TTin(Index).Text)
End Sub

Private Sub TTout_Change(Index As Integer)
  TTout(Index).Text = REVISA(TTout(Index).Text)
End Sub

Private Sub TTv1_KeyPress(Index As Integer, KeyAscii As Integer)
INTERVALO (LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.FLUIDOS.Text)
If (KeyAscii = 13) Then
 If ((Val(TTv1(Index).Text) - 273.15) >= IntInf And (Val(TTv1(Index).Text) - 273.15 <= IntSup))
Then
  If (TTv1(Index).Text <> "") Then
```

```
   Call PROPIEDADES2(LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.FLUIDOS.Text, Val(TTv1(Index).Text) -
273.15)
   If (INTERPOLA = 1) Then
                V1 = Val(TTv1(Index).Text) - 273.15
                While (INTERPOLA = 1)
                  V1 = Abs(Int(-V1))
                  Call PROPIEDADES(LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.FLUIDOS.Text, Val(V1))
                  If (INTERPOLA = 1) Then V1 = V1 + 1
                  If (V1 > 2500) Then Exit Sub
                Wend
                Pv_Sup = LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.Text_Pv.Text
                Call                PROPIEDADES(LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.FLUIDOS.Text,
Val(TTv1(Index).Text) - 273.15)
                If (INTERPOLA = 1) Then
                              V2 = Val(TTv1(Index).Text) - 273.15
                              While (INTERPOLA = 1)
                                V2 = Abs(Fix(-V2)) '- 1)
                                Call  PROPIEDADES(LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.FLUIDOS.Text,
Val(V2))
                                If (INTERPOLA = 1) Then V2 = V2 - 1
                                If (V2 < -2500) Then Exit Sub
                              Wend
                End If
                Pv_Inf = LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.Text_Pv.Text
                Tinf = V2 + 273.15
                Tsup = V1 + 273.15
                PTemp        =        Interpolacion(Val(TTv1(Index).Text),        Tinf,        Tsup,
LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.Text_Pv.Text, Pv_Inf, Val(Pv_Sup))
                TPv1(Index).Text = PTemp
               Else
                TPv1(Index).Text = LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.Text_Pv.Text
    End If
  End If
  Else: M = MsgBox("EL VALOR DE LA TEMPERATURA ESTA FUERA DEL INTERVALO
PERMITIDO", vbOKOnly, "AVISO")
End If
End If
End Sub

Private Sub TTv1_KeyUp(Index As Integer, KeyCode As Integer, Shift As Integer)
  TTv1(Index).Text = REVISA(TTv1(Index).Text)
End Sub

Private Sub TVolt_Change(Index As Integer)
  TVolt(Index).Text = REVISA(TVolt(Index).Text)
End Sub
```

```
Private Sub X_Change(Index As Integer)
  X(Index).Text = REVISA(X(Index).Text)
End Sub
```

Segundo Código Fuente para el Cálculo de los Perfiles de Temperatura y Presión de Vapor Experimentales (PTPVE)

```
Private Sub CalorEspecifico_Change(Index As Integer)
  CalorEspecifico(Index).Text = REVISA(CalorEspecifico(Index).Text)
End Sub

Private Sub Command1_Click()
If (TAmp.Text = "" Or Thfg.Text = "") Then
                              M = MsgBox("FALTA: R o hfg", vbOKOnly, "AVISO")
                              Exit Sub
End If
For i = 0 To 6
If (FlujoMasico(i).Text <> "" And CalorEspecifico(i).Text <> "" And TAmp.Text <> "") Then
  If (TTin(i).Text <> "" And TTout(i).Text <> "" And TVolt(i).Text <> "") Then SI = 1: Exit For
End If
Next i
Call PROPIEDADES(LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.FLUIDOS.Text, 1)
For i = 0 To 6
  TQsum(i).Text = (Val(TVolt(i).Text) ^ 2 / Val(TAmp.Text))
  TYTY = TQsum(i)
  TQrech(i).Text = Val(FlujoMasicoFluido(i).Text) * Val(CalorEspecifico(i).Text) *
(Val(TTout(i).Text) - Val(TTin(i).Text))
  FlujoMasico(i).Text = Val(TQsum(i).Text) / Val(Thfg.Text)
Next i
End Sub

Private Sub Command3_Click()
  GUARDAR2.Show
End Sub

Private Sub FlujoMasico_Click(Index As Integer)
  Comparativo2.SetFocus
End Sub

Private Sub FlujoMasicoFluido_Change(Index As Integer)
  FlujoMasicoFluido(Index).Text = REVISA(FlujoMasicoFluido(Index).Text)
End Sub

Private Sub Graficar_Click()
  GRAFICA_PERFILES3.Show
End Sub

Private Sub Imprimir_Click()
  Printer.Zoom = 50
  Comparativo2.AutoRedraw = True
```

```
  Comparativo2.BackColor = &HFFFFFF
  Comparativo2.PrintForm
  Comparativo2.BackColor = &H808000
End Sub

Private Sub Label1_Click()
  Ecuaciones.ImgEcuPlx.Visible = False
  Ecuaciones.ImgEcuAPl.Visible = False
  Ecuaciones.ImgEcuFlujoMasico.Visible = False
  For i = 0 To 2
    Ecuaciones.ImgEcuAPv(i).Visible = False
    Ecuaciones.ImgEcuPx(i).Visible = False
  Next i
  Ecuaciones.ImgEcuQsum.Visible = False
  Ecuaciones.Show
  Ecuaciones.ImgEcuQrech.Visible = True
End Sub

Private Sub Label23_Click()
  Ecuaciones.ImgEcuPlx.Visible = False
  Ecuaciones.ImgEcuAPl.Visible = False
  Ecuaciones.ImgEcuQsum.Visible = False
  For i = 0 To 2
    Ecuaciones.ImgEcuAPv(i).Visible = False
    Ecuaciones.ImgEcuPx(i).Visible = False
  Next i
  Ecuaciones.ImgEcuQrech.Visible = False
  Ecuaciones.Show
  Ecuaciones.ImgEcuFlujoMasico.Visible = True
End Sub

Private Sub Label4_Click()
  Ecuaciones.ImgEcuPlx.Visible = False
  Ecuaciones.ImgEcuAPl.Visible = False
  Ecuaciones.ImgEcuFlujoMasico.Visible = False
  For i = 0 To 2
    Ecuaciones.ImgEcuAPv(i).Visible = False
    Ecuaciones.ImgEcuPx(i).Visible = False
  Next i
  Ecuaciones.ImgEcuQrech.Visible = False
  Ecuaciones.Show
  Ecuaciones.ImgEcuQsum.Visible = True
End Sub

Private Sub Limpiar_Click()
For i = 0 To 6
  TVolt(i).Text = ""
```

```
  Tiempo(i).Text = ""
  Tiempo(6 + i).Text = ""
  Tiempo(10 + i).Text = ""
  X(i).Text = ""
  TQsum(i).Text = ""
  FlujoMasico(i).Text = ""
  CalorEspecifico(i).Text = ""
  TTin(i).Text = ""
  TTout(i).Text = ""
  TQrech(i).Text = ""
Next i
TAmp.Text = ""
For i = 0 To 16
  TTv1(0 + i).Text = ""
  TPv1(0 + i).Text = ""
  TTv1(18 + i).Text = ""
  TPv1(18 + i).Text = ""
  TTv1(36 + i).Text = ""
  TPv1(36 + i).Text = ""
  TTv1(54 + i).Text = ""
  TPv1(54 + i).Text = ""
  TTv1(72 + i).Text = ""
  TPv1(72 + i).Text = ""
  TTv1(90 + i).Text = ""
  TPv1(90 + i).Text = ""
  TTv1(108 + i).Text = ""
  TPv1(108 + i).Text = ""
Next i
End Sub

Private Sub Regresar_Click()
  Comparativo.Show
End Sub

Private Sub TAmp_Change()
  TAmp.Text = REVISA(TAmp.Text)
End Sub

Private Sub Terminar_Click()
  M = MsgBox("¿REALMENTE DESEA TERMINAR EL PROGRAMA?", vbYesNo, "AVISO")
  If (M = 6) Then End
End Sub

Private Sub Tiempo_Change(Index As Integer)
  Tiempo(Index).Text = REVISA(Tiempo(Index).Text)
End Sub
```

```
Private Sub TPv1_Click(Index As Integer)
  Comparativo2.SetFocus
End Sub

Private Sub TQrech_Click(Index As Integer)
  Comparativo2.SetFocus
End Sub

Private Sub TQsum_Click(Index As Integer)
  Comparativo2.SetFocus
End Sub

Private Sub TTin_Change(Index As Integer)
  TTin(Index).Text = REVISA(TTin(Index).Text)
End Sub

Private Sub TTout_Change(Index As Integer)
  TTout(Index).Text = REVISA(TTout(Index).Text)
End Sub
Private Sub TTv1_KeyPress(Index As Integer, KeyAscii As Integer)
If (KeyAscii = 13) Then
  If (TTv1(Index).Text <> "") Then
    Call PROPIEDADES2(LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.FLUIDOS.Text, Val(TTv1(Index).Text) -
273.15)
    If (INTERPOLA = 1) Then
                V1 = Val(TTv1(Index).Text) - 273.15
                While (INTERPOLA = 1)
                  V1 = Abs(Int(-V1))
                  Call PROPIEDADES(LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.FLUIDOS.Text, Val(V1))
                  If (INTERPOLA = 1) Then V1 = V1 + 1
                  If (V1 > 2500) Then Exit Sub
                Wend
                Pv_Sup = LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.Text_Pv.Text
                Call                PROPIEDADES(LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.FLUIDOS.Text,
Val(TTv1(Index).Text) - 273.15)
                If (INTERPOLA = 1) Then
                            V2 = Val(TTv1(Index).Text) - 273.15
                            While (INTERPOLA = 1)
                              V2 = Abs(Fix(-V2)) '- 1)
                              Call  PROPIEDADES(LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.FLUIDOS.Text,
Val(V2))
                              If (INTERPOLA = 1) Then V2 = V2 - 1
                              If (V2 < -2500) Then Exit Sub
                            Wend
                End If
                Pv_Inf = LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.Text_Pv.Text
                Tinf = V2 + 273.15
```

```
                Tsup = V1 + 273.15
                PTemp = Interpolacion(Val(TTv1(Index).Text), Tinf, Tsup,
LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.Text_Pv.Text, Pv_Inf, Val(Pv_Sup))
                TPv1(Index).Text = PTemp
               Else
                TPv1(Index).Text = LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.Text_Pv.Text
   End If
  End If
End If
End Sub

Private Sub TTv1_KeyUp(Index As Integer, KeyCode As Integer, Shift As Integer)
  TTv1(Index).Text = REVISA(TTv1(Index).Text)
End Sub

Private Sub TVolt_Change(Index As Integer)
  TVolt(Index).Text = REVISA(TVolt(Index).Text)
End Sub

Private Sub X_Change(Index As Integer)
  X(Index).Text = REVISA(X(Index).Text)
End Sub
```

Código Fuente para la Obtención de las Gráficas Analíticas de los Perfiles de Presión y Temperatura del Vapor (GAPPTV)

```
Private Sub Apilar_Click()
  Grafica.Stacking = False
  Grafica2.Stacking = False
  If (Apilar.Value = 1) Then Grafica.Stacking = True: Grafica2.Stacking = True
End Sub

Private Sub Estilo_Click()
  Grafica.chartType = Estilo.ItemData(Estilo.ListIndex)
  Grafica2.chartType = Estilo.ItemData(Estilo.ListIndex)
End Sub

Private Sub Form_Load()
  Grafica.chartType = 3
  Grafica2.chartType = 3
  Frame1.Visible = True
  ILE = Val(PERFILES_DE_PRESION.Text_IntervaloLe.Text)
  ILA = Val(PERFILES_DE_PRESION.Text_IntervaloLa.Text)
  ILC = Val(PERFILES_DE_PRESION.Text_IntervaloLc.Text)
  Grafica.RowCount = ((ILE + ILA + ILC) + 3)
  Grafica2.RowCount = ((ILE + ILA + ILC) + 3)
End Sub

Private Sub Graficar_Click()
  ILE = Val(PERFILES_DE_PRESION.Text_IntervaloLe.Text)
  ILA = Val(PERFILES_DE_PRESION.Text_IntervaloLa.Text)
  ILC = Val(PERFILES_DE_PRESION.Text_IntervaloLc.Text)

  Grafica.Column = 1
  For i = 0 To ILE - 1
   Grafica.Row = i + 1
   Grafica.Data = Val(PERFILES_DE_PRESION.Text_LePx(i).Text)
  Next i

  Grafica.Column = 2
  J = -1
  For i = ILE To (ILE + ILA) '- 1)
   Grafica.Row = i + 1
   J = J + 1
   Grafica.Data = Val(PERFILES_DE_PRESION.Text_LaPx(J).Text)
  Next i
```

```
 Grafica.Column = 3
 J = -1
 For i = (ILE + ILA) To (ILE + ILA + ILC) ' - 1)
  Grafica.Row = i + 1
  J = J + 1
  Grafica.Data = Val(PERFILES_DE_PRESION.Text_LcPx(J).Text)
 Next i

 Grafica2.Column = 1
 For i = 0 To ILE
  Grafica2.Row = i + 1
  Grafica2.Data = Val(PERFILES_DE_PRESION.Text_LeTv(i).Text)
 Next i

 Grafica2.Column = 2
 J = -1
 For i = ILE To (ILE + ILA) ' - 1)
  Grafica2.Row = i + 1
  J = J + 1
  Grafica2.Data = Val(PERFILES_DE_PRESION.Text_LaTv(J).Text)
 Next i

 Grafica2.Column = 3
 J = -1
 For i = (ILE + ILA) To (ILE + ILA + ILC) ' - 1)
  Grafica2.Row = i + 1
  J = J + 1
  Grafica2.Data = Val(PERFILES_DE_PRESION.Text_LcTv(J).Text)
 Next i
End Sub

Private Sub Imprimir_Click()
 Printer.Zoom = 50
 GRAFICA_PERFILES.AutoRedraw = True
 GRAFICA_PERFILES.BackColor = &HFFFFFF
 GRAFICA_PERFILES.PrintForm
 GRAFICA_PERFILES.BackColor = &H808000
End Sub

Private Sub Regresar_Click()
 PERFILES_DE_PRESION.Visible = True
 PERFILES_DE_PRESION.Show
End Sub

Private Sub Terminar_Click()
 M = MsgBox("¿REALMENTE DESEA TERMINAR EL PROGRAMA?", vbYesNo, "AVISO")
 If (M = 6) Then End
```

```
End Sub

Private Sub VerGrafica_Click()
  If (VerGrafica.ItemData(VerGrafica.ListIndex) = 0) Then
                                        Frame1.Visible = True
                                        Label1.Caption = "Px"
                                        Grafica.Visible = True
                                        Frame2.Visible = False
                                        Grafica2.Visible = False
                                    Else
                                        Frame1.Visible = False
                                        Grafica.Visible = False
                                        Label1.Caption = "Tvx"
                                        Frame2.Visible = True
                                        Grafica2.Visible = True
  End If
End Sub
```

Código Fuente para la Obtención de las Gráficas Analíticas de los Perfiles de Presión y Temperatura del Líquido (GAPPTL)

```
Private Sub Apilar_Click()
  Grafica.Stacking = False
  Grafica2.Stacking = False
  If (Apilar.Value = 1) Then Grafica.Stacking = True: Grafica2.Stacking = True
End Sub

Private Sub Estilo_Click()
  Grafica.chartType = Estilo.ItemData(Estilo.ListIndex)
  Grafica2.chartType = Estilo.ItemData(Estilo.ListIndex)
End Sub

Private Sub Form_Load()
  Grafica.chartType = 3
  Grafica2.chartType = 3
  Frame1.Visible = True
  ILE = Val(Perfiles_de_Presion_Líquido.Text_IntervaloLe.Text)
  ILA = Val(Perfiles_de_Presion_Líquido.Text_IntervaloLa.Text)
  ILC = Val(Perfiles_de_Presion_Líquido.Text_IntervaloLc.Text)
  Grafica.RowCount = ((ILE + ILA + ILC) + 3)
  Grafica2.RowCount = ((ILE + ILA + ILC) + 3)
End Sub

Private Sub Graficar_Click()
  ILE = Val(Perfiles_de_Presion_Líquido.Text_IntervaloLe.Text)
  ILA = Val(Perfiles_de_Presion_Líquido.Text_IntervaloLa.Text)
  ILC = Val(Perfiles_de_Presion_Líquido.Text_IntervaloLc.Text)

  Grafica.Column = 1
  For i = 0 To ILE
   Grafica.Row = i + 1
   Grafica.Data = Val(Perfiles_de_Presion_Líquido.Text_LePx(i).Text)
  Next i

  Grafica.Column = 2
  J = -1
  For i = ILE To (ILE + ILA)
   Grafica.Row = i + 1
   J = J + 1
   Grafica.Data = Val(Perfiles_de_Presion_Líquido.Text_LaPx(J).Text)
  Next i

  Grafica.Column = 3
```

```
 J = -1
 For i = (ILE + ILA) To (ILE + ILA + ILC)
  Grafica.Row = i + 1
  J = J + 1
  Grafica.Data = Val(Perfiles_de_Presion_Líquido.Text_LcPx(J).Text)
 Next i

 Grafica2.Column = 1
 For i = 0 To ILE
  Grafica2.Row = i + 1
  Grafica2.Data = Val(Perfiles_de_Presion_Líquido.Text_LeTv(i).Text)
 Next i

 Grafica2.Column = 2
 J = -1
 For i = ILE To (ILE + ILA) ' - 1)
  Grafica2.Row = i + 1
  J = J + 1
  Grafica2.Data = Val(Perfiles_de_Presion_Líquido.Text_LaTv(J).Text)
 Next i

 Grafica2.Column = 3
 J = -1
 For i = (ILE + ILA) To (ILE + ILA + ILC) ' - 1)
  Grafica2.Row = i + 1
  J = J + 1
  Grafica2.Data = Val(Perfiles_de_Presion_Líquido.Text_LcTv(J).Text)
 Next i
End Sub

Private Sub Imprimir_Click()
 Printer.Zoom = 50
 GRAFICA_PERFILES_LÍQUIDO.AutoRedraw = True
 GRAFICA_PERFILES_LÍQUIDO.BackColor = &HFFFFFF
 GRAFICA_PERFILES_LÍQUIDO.PrintForm
 GRAFICA_PERFILES_LÍQUIDO.BackColor = &H808000
End Sub

Private Sub Regresar_Click()
 Perfiles_de_Presion_Líquido.Visible = True
 Perfiles_de_Presion_Líquido.Show
End Sub

Private Sub Terminar_Click()
 M = MsgBox("¿REALMENTE DESEA TERMINAR EL PROGRAMA?", vbYesNo, "AVISO")
 If (M = 6) Then End
End Sub
```

```
Private Sub VerGrafica_Click()
  If (VerGrafica.ItemData(VerGrafica.ListIndex) = 0) Then
                                        Frame1.Visible = True
                                        Label1.Caption = "Px"
                                        Grafica.Visible = True
                                        Frame2.Visible = False
                                        Grafica2.Visible = False
                                    Else
                                        Frame1.Visible = False
                                        Grafica.Visible = False
                                        Label1.Caption = "Tvx"
                                        Frame2.Visible = True
                                        Grafica2.Visible = True
  End If
End Sub
```

Código Fuente para la Obtención de las Gráficas de los Perfiles de Temperatura y Presión de Vapor Experimentales (GPTPVE)

```
Private Sub Apilar_Click()
  Grafica.Stacking = False
  Grafica2.Stacking = False
  If (Apilar.Value = 1) Then Grafica.Stacking = True: Grafica2.Stacking = True
End Sub

Private Sub Estilo_Click()
  Grafica.chartType = Estilo.ItemData(Estilo.ListIndex)
  Grafica2.chartType = Estilo.ItemData(Estilo.ListIndex)
End Sub

Private Sub Form_Load()
  Grafica.chartType = 3
  Frame1.Visible = True

  For i = 0 To 16
   If (i < 7) Then Grafica.Row = i + 1
   Grafica.Column = 1
   Grafica.Data = Val(Comparativo.TPv1(i).Text)
   Grafica2.Column = 1
   Grafica2.Data = Val(Comparativo.TTv1(i).Text)
  Next i

  J = 0
  For i = 17 To 33
   J = J + 1
   If (J < 7) Then Grafica.Row = J
   Grafica.Column = 2
   Grafica.Data = Val(Comparativo.TPv1(i).Text)
   Grafica2.Column = 2
   Grafica2.Data = Val(Comparativo.TTv1(i).Text)
  Next i

  J = 0
  For i = 34 To 50
   J = J + 1
   If (J < 7) Then Grafica.Row = J
   Grafica.Column = 3
   Grafica.Data = Val(Comparativo.TPv1(i).Text)
   Grafica2.Column = 3
   Grafica2.Data = Val(Comparativo.TTv1(i).Text)
  Next i

  J = 0
```

```
 For i = 51 To 67
  J = J + 1
  If (J < 7) Then Grafica.Row = J
  Grafica.Column = 4
  Grafica.Data = Val(Comparativo.TPv1(i).Text)
  Grafica2.Column = 4
  Grafica2.Data = Val(Comparativo.TTv1(i).Text)
 Next i

 J = 0
 For i = 68 To 84
  J = J + 1
  If (J < 7) Then Grafica.Row = J
  Grafica.Column = 5
  Grafica.Data = Val(Comparativo.TPv1(i).Text)
  Grafica2.Column = 5
  Grafica2.Data = Val(Comparativo.TTv1(i).Text)
 Next i

 J = 0
 For i = 85 To 101
  J = J + 1
  If (J < 7) Then Grafica.Row = J
  Grafica.Column = 6
  Grafica.Data = Val(Comparativo.TPv1(i).Text)
  Grafica2.Column = 6
  Grafica2.Data = Val(Comparativo.TTv1(i).Text)
 Next i

 J = 0
 For i = 102 To 118
  J = J + 1
  If (J < 7) Then Grafica.Row = J
  Grafica.Column = 7
  Grafica.Data = Val(Comparativo.TPv1(i).Text)
  Grafica2.Column = 7
  Grafica2.Data = Val(Comparativo.TTv1(i).Text)
 Next i
End Sub

Private Sub Graficar_Click()
 NNN = 0
 For i = 1 To 17
 MM = 0
   Grafica.Column = i
   Grafica2.Column = i
   For J = 1 To 7
```

```
      Grafica.Row = J
      Grafica.Data = Val(Comparativo.TPv1(NNN + MM).Text)
      Grafica2.Row = J
      Grafica2.Data = Val(Comparativo.TTv1(NNN + MM).Text)
      MM = MM + 17
    Next J
   NNN = NNN + 1
  Next i
End Sub

Private Sub Imprimir_Click()
  Printer.Zoom = 50
  GRAFICA_PERFILES2.AutoRedraw = True
  GRAFICA_PERFILES2.BackColor = &HFFFFFF
  GRAFICA_PERFILES2.PrintForm
  GRAFICA_PERFILES2.BackColor = &H808000
End Sub

Private Sub Regresar_Click()
  Comparativo.Visible = True
  Comparativo.Show
End Sub

Private Sub Terminar_Click()
  M = MsgBox("¿REALMENTE DESEA TERMINAR EL PROGRAMA?", vbYesNo, "AVISO")
  If (M = 6) Then End
End Sub

Private Sub VerGrafica_Click()
  If (VerGrafica.ItemData(VerGrafica.ListIndex) = 0) Then
                                      Frame1.Visible = True
                                      Grafica.Visible = True
                                      Label9.Caption = "Px"
                                      Frame2.Visible = False
                                      Grafica2.Visible = False
                                    Else
                                      Frame1.Visible = False
                                      Grafica.Visible = False
                                      Label9.Caption = "Tvx"
                                      Frame2.Visible = True
                                      Grafica2.Visible = True
  End If
End Sub
```

Segundo Código Fuente para la Obtención de las Gráficas de los Perfiles de Temperatura y Presión de Vapor Experimentales (GPTPVE)

```
Private Sub Apilar_Click()
  Grafica.Stacking = False
  Grafica2.Stacking = False
  If (Apilar.Value = 1) Then Grafica.Stacking = True: Grafica2.Stacking = True
End Sub

Private Sub Estilo_Click()
  Grafica.chartType = Estilo.ItemData(Estilo.ListIndex)
  Grafica2.chartType = Estilo.ItemData(Estilo.ListIndex)
End Sub

Private Sub Form_Load()
  Grafica.chartType = 3
  Frame1.Visible = True

  For i = 0 To 16
   If (i < 7) Then Grafica.Row = i + 1
   Grafica.Column = 1
   Grafica.Data = Val(Comparativo.TPv1(i).Text)
   Grafica2.Column = 1
   Grafica2.Data = Val(Comparativo.TTv1(i).Text)
  Next i

  J = 0
  For i = 17 To 33
   J = J + 1
   If (J < 7) Then Grafica.Row = J
   Grafica.Column = 2
   Grafica.Data = Val(Comparativo.TPv1(i).Text)
   Grafica2.Column = 2
   Grafica2.Data = Val(Comparativo.TTv1(i).Text)
  Next i

  J = 0
  For i = 34 To 50
   J = J + 1
   If (J < 7) Then Grafica.Row = J
   Grafica.Column = 3
   Grafica.Data = Val(Comparativo.TPv1(i).Text)
   Grafica2.Column = 3
   Grafica2.Data = Val(Comparativo.TTv1(i).Text)
  Next i
```

```
 J = 0
 For i = 51 To 67
  J = J + 1
  If (J < 7) Then Grafica.Row = J
  Grafica.Column = 4
  Grafica.Data = Val(Comparativo.TPv1(i).Text)
  Grafica2.Column = 4
  Grafica2.Data = Val(Comparativo.TTv1(i).Text)
 Next i

 J = 0
 For i = 68 To 84
  J = J + 1
  If (J < 7) Then Grafica.Row = J
  Grafica.Column = 5
  Grafica.Data = Val(Comparativo.TPv1(i).Text)
  Grafica2.Column = 5
  Grafica2.Data = Val(Comparativo.TTv1(i).Text)
 Next i

 J = 0
 For i = 85 To 101
  J = J + 1
  If (J < 7) Then Grafica.Row = J
  Grafica.Column = 6
  Grafica.Data = Val(Comparativo.TPv1(i).Text)
  Grafica2.Column = 6
  Grafica2.Data = Val(Comparativo.TTv1(i).Text)
 Next i

 J = 0
 For i = 102 To 118
  J = J + 1
  If (J < 7) Then Grafica.Row = J
  Grafica.Column = 7
  Grafica.Data = Val(Comparativo.TPv1(i).Text)
  Grafica2.Column = 7
  Grafica2.Data = Val(Comparativo.TTv1(i).Text)
 Next i
End Sub

Private Sub Graficar_Click()
 KK = -1
 For i = 1 To 17
   Grafica.Column = i
   Grafica2.Column = i
   KK = KK + 1
```

```
   For J = 0 To 6
    Grafica.Row = J + 1
    Grafica.Data = Val(Comparativo.TPv1((J * 17) + KK).Text)
    Grafica2.Row = J + 1
    Grafica2.Data = Val(Comparativo.TTv1((J * 17) + KK).Text)
   Next J
  Next i

  KK = -1
  For i = 1 To 17
   Grafica.Column = i + 17
   Grafica2.Column = i + 17
   KK = KK + 1
   For J = 0 To 6
    Grafica.Row = J + 1
    Grafica.Data = Val(Comparativo2.TPv1((J * 17) + KK).Text)
    Grafica2.Row = J + 1
    Grafica2.Data = Val(Comparativo2.TTv1((J * 17) + KK).Text)
   Next J
  Next i
End Sub

Private Sub Imprimir_Click()
  Printer.Zoom = 50
  GRAFICA_PERFILES3.AutoRedraw = True
  GRAFICA_PERFILES3.BackColor = &HFFFFFF
  GRAFICA_PERFILES3.PrintForm
  GRAFICA_PERFILES3.BackColor = &H808000
End Sub

Private Sub Regresar_Click()
  Comparativo2.Visible = True
  Comparativo2.Show
End Sub

Private Sub Terminar_Click()
  M = MsgBox("¿REALMENTE DESEA TERMINAR EL PROGRAMA?", vbYesNo, "AVISO")
  If (M = 6) Then End
End Sub

Private Sub VerGrafica_Click()
  If (VerGrafica.ItemData(VerGrafica.ListIndex) = 0) Then
                                    Frame1.Visible = True
                                    Grafica.Visible = True
                                    Label9.Caption = "Px"
                                    Frame2.Visible = False
                                    Grafica2.Visible = False
```

```
                Else
                    Frame1.Visible = False
                    Grafica.Visible = False
                    Label9.Caption = "Tvx"
                    Frame2.Visible = True
                    Grafica2.Visible = True
  End If
End Sub
```

Código Fuente para Guardar el Cálculo de los Perfiles de Temperatura y Presión de Vapor Experimentales (GDE)

```
Private Sub Drive_Change()
  On Error Resume Next
  Dir.Path = Drive.Drive
  If (Err.Number <> 0) Then
    M = MsgBox("ERROR: LA UNIDAD QUE SELECCIONO NO ESTA LISTA.", vbOKOnly, "ERROR DE DISPOSITIVO")
    Err.Clear
  End If
End Sub

Private Sub Dir_Change()
  File.Path = Dir.Path
End Sub

Private Sub SALVA_Click()
  If (ARCHIVO.Text = "") Then
                    M = MsgBox("Debe introducir un nombre de archivo.", vbOKOnly, "AVISO")
                    Exit Sub
  End If
  RUTA = Dir.Path & "\" & ARCHIVO.Text
  Open RUTA For Output As #1
  Tempe = Chr(9): Voltaje = Chr(9): Termopar = Chr(9)
  For i = 0 To 6
    Tempe = Tempe & "Temperatura" & Chr(9) & "Presión" & Chr(9)
    Voltaje = Voltaje & Comparativo.TVolt(i) & Chr(9) & Chr(9)
    Termopar = Termopar & Comparativo.X(i) & Chr(9) & Chr(9)
  Next i
  Tempe = "Tiempos" & Mid$(Tempe, 1, Len(Tempe) - 1)
  Voltaje = "Voltaje" & Mid$(Voltaje, 1, Len(Voltaje) - 1)
  Termopar = "Termopar" & Mid$(Termopar, 1, Len(Termopar) - 1)
  Print #1, Termopar
  Print #1, Voltaje
  Print #1, Tempe
  For i = 0 To 16
    If (Comparativo.Tiempo(i).Text = "") Then Exit For
    cadena = Comparativo.Tiempo(i) & Chr(9) & Comparativo.TTv1(i).Text & Chr(9) & Comparativo.TPv1(i).Text & Chr(9) & Comparativo.TTv1(i + 17).Text & Chr(9) & Comparativo.TPv1(i + 17).Text & Chr(9) & Comparativo.TTv1(i + 34).Text & Chr(9) & Comparativo.TPv1(i + 34).Text & Chr(9) & Comparativo.TTv1(i + 51).Text & Chr(9) & Comparativo.TPv1(i + 51).Text & Chr(9) & Comparativo.TTv1(i + 68).Text & Chr(9) & Comparativo.TPv1(i + 68).Text & Chr(9) & Comparativo.TTv1(i + 85).Text & Chr(9) & Comparativo.TPv1(i + 85).Text & Chr(9) & Comparativo.TTv1(i + 102) & Chr(9) & Comparativo.TPv1(i + 102).Text
```

```
    Print #1, cadena
  Next i
  Close #1
  M = MsgBox("Los datos han sido guardados.", vbOKOnly, "AVISO")
  Unload Guardar
End Sub
```

Segundo Código Fuente para Guardar el Cálculo de los Perfiles de Temperatura y Presión de Vapor Experimentales (GDE)

```
Private Sub Drive_Change()
  On Error Resume Next
  Directorio.Path = Drive.Drive
  If (Err.Number <> 0) Then
    M = MsgBox("ERROR: LA UNIDAD QUE SELECCIONO NO ESTA LISTA.", vbOKOnly, "ERROR DE DISPOSITIVO")
    Err.Clear
  End If
End Sub

Private Sub Directorio_Change()
  File.Path = Directorio.Path
End Sub

Private Sub SALVA_Click()
  If (ARCHIVO.Text = "") Then
                    M = MsgBox("Debe introducir un nombre de archivo.", vbOKOnly, "AVISO")
                    Exit Sub
  End If
  RUTA = Directorio.Path & "\" & ARCHIVO.Text  '& ".txt"
  Open RUTA For Output As #1
  Tempe = Chr(9): Voltaje = Chr(9): Termopar = Chr(9)
  For i = 0 To 6
    Tempe = Tempe & "Temperatura" & Chr(9) & "Presión" & Chr(9)
    Voltaje = Voltaje & Comparativo.TVolt(i) & Chr(9) & Chr(9)
    Termopar = Termopar & Comparativo.X(i) & Chr(9) & Chr(9)
  Next i
  Tempe = "Tiempos" & Mid$(Tempe, 1, Len(Tempe) - 1)
  Voltaje = "Voltaje" & Mid$(Voltaje, 1, Len(Voltaje) - 1)
  Termopar = "Termopar" & Mid$(Termopar, 1, Len(Termopar) - 1)
  Print #1, Termopar
  Print #1, Voltaje
  Print #1, Tempe
  For i = 0 To 16
    If (Comparativo.Tiempo(i).Text = "") Then Exit For
    cadena = Comparativo.Tiempo(i) & Chr(9) & Comparativo.TTv1(i).Text & Chr(9) & Comparativo.TPv1(i).Text & Chr(9) & Comparativo.TTv1(i + 17).Text & Chr(9) & Comparativo.TPv1(i + 17).Text & Chr(9) & Comparativo.TTv1(i + 34).Text & Chr(9) & Comparativo.TPv1(i + 34).Text & Chr(9) & Comparativo.TTv1(i + 51).Text & Chr(9) & Comparativo.TPv1(i + 51).Text & Chr(9) & Comparativo.TTv1(i + 68).Text & Chr(9) & Comparativo.TPv1(i + 68).Text & Chr(9) & Comparativo.TTv1(i + 85).Text & Chr(9) & Comparativo.TPv1(i + 85).Text & Chr(9) & Comparativo.TTv1(i + 102) & Chr(9) & Comparativo.TPv1(i + 102).Text
```

```
    Print #1, cadena
  Next i
  For i = 0 To 16
    If (Comparativo2.Tiempo(i).Text = "") Then Exit For
    cadena = Comparativo2.Tiempo(i) & Chr(9) & Comparativo2.TTv1(i).Text & Chr(9) &
Comparativo2.TPv1(i).Text & Chr(9) & Comparativo2.TTv1(i + 17).Text & Chr(9) &
Comparativo2.TPv1(i + 17).Text & Chr(9) & Comparativo2.TTv1(i + 34).Text & Chr(9) &
Comparativo2.TPv1(i + 34).Text & Chr(9) & Comparativo2.TTv1(i + 51).Text & Chr(9) &
Comparativo2.TPv1(i + 51).Text & Chr(9) & Comparativo2.TTv1(i + 68).Text & Chr(9) &
Comparativo2.TPv1(i + 68).Text & Chr(9) & Comparativo2.TTv1(i + 85).Text & Chr(9) &
Comparativo2.TPv1(i + 85).Text & Chr(9) & Comparativo2.TTv1(i + 102) & Chr(9) &
Comparativo2.TPv1(i + 102).Text
    Print #1, cadena
  Next i
  Close #1
  M = MsgBox("Los datos han sido guardados.", vbOKOnly, "AVISO")
  Unload GUARDAR2
End Sub
```

Código Fuente de la Utilería para el Cálculo de los Límites de Funcionamiento en Caloductos (UCLFC)

```
Public Av, hfg, rov, rol, roo, T0, Pv, mv, Le, La, Lc, gamav, Pt, Leff As Double
Public dtubo, dalambre, dporo, ml, Teta, Pm, Sw, Tv, ri, rv, rn, wf As Double
Public z, k3, Kw, kl, rhw, N, di, Aw, ncapas, nespacios As Double
Public APcm, rce, Red, We, alfa, vcr, Epsilon As Double
Public Delta1, Delta2, Deltaec, Et1, Et2, Et3 As Double
Public X, Keff, Ts, Rev, Re, C, Vv, w, dw, sigmal, Machv, K As Double
Public APve, APva, APvc, APi, APl, APl2, APmas, APflecha As Double
Public a, a_grafica, flRel, fvRev, Ctabla, VFM, ze, za, zc As Double
Public CUV As Double 'Constante Universal del Vapor (Rv)
Public Qev As Double
Public FLUJO As String
Public Qcap As Double
Public Qarras, Qarrast(7) As Double
Public INTERPOLA As Byte
Public Tse, Tsa, Tsc As Double
Public Qsum As Double
Public Qcapil As Boolean
Public PUNTO As Byte
Public VALOR As String
Public IntInf, IntSup As Integer

Public Const Alv = 0.000001
Public Const g = 9.81
Public Const Pi = 3.1415927
Public Const Ae = (Pi ^ 2) / 8
Public Const CUG = 8314# 'Constante Universal  de los Gases
Public Const rnuc = 0.000000254 ' 2.54x10-5 a 2.54x10-7

Private Sub Inicializa()
'  Ro , Le, Leff, dtubo, dra, N, o, D, r, P, Sw, Tv, ri, rv, rn, wf = 0#
End Sub

Function Qviscoso(Index As Byte)
Calcula_Av
Calcula_APva
Select Case Index
  Case 1: Qviscoso = (Av * (rv ^ 2) * hfg * rov * Pv) / (16 * mv * Le)
  Case 2: Qviscoso = (((rv ^ 2) * hfg * rov * Pv) / (16 * mv * Leff)) * Av
  Case 3:
End Select
If (APva / Pv) > 0.1 Then
                LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.Qviscoso1.BackColor = &HFF&
```

```
            LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.Qviscoso2.BackColor = &HFF&
        Else
            LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.Qviscoso1.BackColor = &HFFFFFF
            LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.Qviscoso2.BackColor = &HFFFFFF
End If
End Function

Function Qsonico(Index As Byte)
Calcula_Av
Calcula_roo
Calcula_T0
Calcula_Machv
Calcula_Vv (1)
Calcula_CUV
Select Case Index
  Case 1: Qsonico = 0.474 * hfg * Av * ((rov * Pv) ^ (0.5))
  Case 2: Qsonico = hfg * (((rov * Pv) / Av) ^ 0.5) * (Abs((Pt / Pv) * (1 - (Pt / Pv))) ^ 0.5) * (Pi *
(rv ^ 2) * Leff)
  Case 3: Qsonico = (Av * roo * hfg * ((gamav * CUV * T0) ^ 0.5) * Machv * ((1 + 0.5 * (Vv - 1)
* (Machv ^ 2)) ^ 0.5)) / (1 + (Vv / 2) * (Machv ^ 2))
  Case 4: Qsonico = Av * roo * hfg * (((gamav * CUV * T0) / (2 * (gamav + 1))) ^ 0.5)
  Case 5: Qsonico = (Av * rov * hfg * ((gamav * CUV * Tv) ^ 0.5) * Machv * ((1 + 0.5 * (Vv - 1)
* (Machv ^ 2)) ^ 0.5)) / (1 + (Vv / 2) * (Machv ^ 2))
  Case 6: Qsonico = Av * rov * hfg * (((gamav * CUV * Tv) / (2 * (gamav + 1))) ^ 0.5)
End Select
End Function

Function Qarrastre(Index As Byte)
Calcula_Av
Calcula_alfa
Calcula_rhw (LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.GEOMETRIAS.Text)
On Error Resume Next
Select Case Index
  Case 1: Qarrastre = Av * hfg * (((rov / Ae) * (((2 * Pi * sigmal) / (16 * rhw)) + (rol * g *
dtubo))) ^ 0.5)
  Case 2:
      If (LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.GEOMETRIAS.Text = "RANURADO RECTANGULAR")
Then
          Qarrastre = 2 * Av * hfg * (w / dtubo) * (((rol * sigmal) / (Pi * dtubo)) ^ 0.5)
      End If
      If (LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.GEOMETRIAS.Text = "CAPAS DE MALLAS") Then
          If (dlambre = 0 And dtubo = 0) Then M = MsgBox("FALTA EL VALOR DE dalambre y/o
dtubo", vbOKOnly, "AVISO")
          Qarrastre = 2 * Av * hfg * (dalambre / dtubo) * (((rol * sigmal) / (Pi * dtubo)) ^ 0.5)
      End If
      If  (LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.GEOMETRIAS.Text  =  "ESTRUC  CAPILAR  HOMO")
Then
```

```
            M = MsgBox("FALTA EL VALOR DE dporo", vbOKOnly, "AVISO")
            Qarrastre = 2 * Av * hfg * (dporo / dtubo) * (((rol * sigmal) / (Pi * dtubo)) ^ 0.5)
        End If
  Case 3:
        Qarrastre = Av * hfg * (((sigmal * rov) / (2 * rhw)) ^ 0.5)
  Case 4: Calcula_Et (1): Qarrastre = 2.99 * (Et1 ^ 0.545)
  Case 5: Calcula_Et (1): Qarrastre = 33.7 * Delta1 * (Et1 ^ 0.5)
  Case 6: Calcula_Et (2):
        Et2 = sigmal / (rol * hfg):
        D2 = ((32 * ml) / (Pi * (sigmal ^ 2) * hfg * g * N * Sin(Teta * Pi / 180))) ^ 0.25:
        Qarrastre = 0.0000000659 * ((Et2 * (1 / D2)) ^ (-0.18513))
  Case 7:
        Qarrastre = (((2 * Pi * rov * (hfg ^ 2) * sigmal) / z) ^ 0.5) * Av
  Case 8: Calcula_Et (3): Qarrastre = (((2 * Pi * Et3) / alfa) ^ 0.5) * (Delta1 / Deltaec)
End Select
End Function

Function Qebullicion(Index As Byte)
Select Case Index
  Case 1: Qebullicion = k3 * rov * hfg * (((sigmal * (rol - rov) * g) / (rov ^ 2)) ^ (0.25))
  Case 2: Qebullicion = ((2 * sigmal * Ts) / (rov * hfg * rnuc)) / ((Delta1 / (Pi * dtubo * Le *
Kw)) + ((((Pi * dtubo * Ts) ^ 0.5) * (dtubo / 2) * (Ts ^ 2)) / (Alv * Pt * (hfg ^ 2))))
  Case 3: Calcula_Keff (LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.GEOMETRIAS.Text)
        Calcula_APcm
        Qebullicion = ((2 * Pi * Leff * Keff * Tv) / (hfg * rov * (Log(ri / rv)))) * (((2 * sigmal) /
rnuc) - APcm)
End Select
End Function

Function Qcapilar(Index As Byte)
  Qcapil = True
  Select Case Index
    Case 1:
          If (FormaPresion.CheckAPve(1).Value = 0) Then Calcula_APve (1) Else APve = 0
          If (FormaPresion.CheckAPi(1).Value = 0) Then Calcula_APi (1) Else APi = 0
    Case 2:
          If (FormaPresion.CheckAPve(1).Value = 0) Then Calcula_APve (1) Else APve = 0
          If (FormaPresion.CheckAPi(1).Value = 0) Then Calcula_APi (2) Else APi = 0
    Case 3:
          If (FormaPresion.CheckAPve(1).Value = 0) Then Calcula_APve (1) Else APve = 0
          If (FormaPresion.CheckAPi(1).Value = 0) Then Calcula_APi (3) Else APi = 0
    Case 4:
          If (FormaPresion.CheckAPve(1).Value = 0) Then Calcula_APve (2) Else APve = 0
          If (FormaPresion.CheckAPi(1).Value = 0) Then Calcula_APi (1) Else APi = 0
    Case 5:
          If (FormaPresion.CheckAPve(1).Value = 0) Then Calcula_APve (2) Else APve = 0
          If (FormaPresion.CheckAPi(1).Value = 0) Then Calcula_APi (2) Else APi = 0
```

```
    Case 6:
        If (FormaPresion.CheckAPve(1).Value = 0) Then Calcula_APve (2) Else APve = 0
        If (FormaPresion.CheckAPi(1).Value = 0) Then Calcula_APi (3) Else APi = 0
    Case 7:
        If (FormaPresion.CheckAPve(1).Value = 0) Then Calcula_APve (3) Else APve = 0
        If (FormaPresion.CheckAPi(1).Value = 0) Then Calcula_APi (1) Else APi = 0
    Case 8:
        If (FormaPresion.CheckAPve(1).Value = 0) Then Calcula_APve (3) Else APve = 0
        If (FormaPresion.CheckAPi(1).Value = 0) Then Calcula_APi (2) Else APi = 0
    Case 9:
        If (FormaPresion.CheckAPve(1).Value = 0) Then Calcula_APve (3) Else APve = 0
        If (FormaPresion.CheckAPi(1).Value = 0) Then Calcula_APi (3) Else APi = 0
  End Select
  If (FormaPresion.CheckAPvc(1).Value = 0) Then Calcula_APvc Else APvc = 0
  If (FormaPresion.CheckAPmas(1).Value = 0) Then Calcula_APmas Else APmas = 0
  If (FormaPresion.CheckAPflecha(1).Value = 0) Then Calcula_APflecha Else APflecha = 0
  Calcula_APva
  Calcula_APl

  QQ = APcm / ((APva + APl + APi) + APflecha + APve + APvc + APmas)
    LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.Text_Qcap2.Text = QQ
    LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.Text_APcm.Text = APcm
   Qcapilar = QQ
   Qcapil = False
End Function

Function Calcula_Vv(Index As Byte)
  Calcula_Av
  Select Case Index
    Case 1: Vv = Qarrast(2) / (rov * Av * hfg)
    Case 2: Vv = APcm / (rov * Av * hfg)
    Case 3: Vv = Qsum / (rov * Av * hfg)
  End Select
End Function

Function Calcula_APve(Index As Byte)
  Calcula_Vv (2)
  Select Case Index
    Case 1: Calcula_Red
        f = 16 / Red
        APve = (4 * f * rov * (Vv ^ 2) * Le) / dtubo
    Case 2: Calcula_a
        APve = (-8 * mv * Vv * (1 + 0.667 * a) * (ze ^ 2)) / (rv ^ 2)
    Case 3: Calcula_Re ("e")
        APve = (-4 * mv * ((Vv * Le) / (rv ^ 2))) * ((1 + (0.61 * Re) + ((0.61 * Re) / (3.6 + Re))) *
((ze ^ 2) / (Le ^ 2)))
    Case 4: Calcula_Vv (3)
```

```
        Calcula_Re ("e")
        APve = (-4 * mv * ((Vv * Le) / (rv ^ 2))) * ((1 + (0.61 * Re) + ((0.61 * Re) / (3.6 + Re))) *
((ze ^ 2) / (Le ^ 2)))
  End Select
End Function

Function Calcula_APva()
  Calcula_Ctabla
  Calcula_Av
  APva = ((Ctabla * fvRev) / (2 * (rv ^ 2) * Av * rov * hfg)) * (mv * Leff)
End Function

Function Calcula_APva2()
  Calcula_Re ("e")
  Ree = Re
  Calcula_Re ("a")
  Rea = Re
  Calcula_Vv (3)
  RR = CDbl((za - Le))
  If (RR = 0) Then Exit Function
  APva = ((-8 * mv * Vv * RR) / (rv ^ 2)) * (1 + ((0.106 * Ree) / (18 + 5 * Ree)) * ((1 - Exp((-30 *
RR) / (Rea * rv))) / (RR / (Rea * rv))))
End Function

Function Calcula_APvc()
  Calcula_Re ("c")
  Calcula_Vv (3)
  X = Le + La
  Calcula_a_grafica
  RC = CDbl(zc - (Le + La))
  APvc = ((4 * mv * Vv * Lc) / (rv ^ 2)) * (1 - (Re * ((7 / 9) - ((8 * a_grafica) / 27) + ((23 *
(a_grafica ^ 2)) / 405)))) * ((1 - (RC / Lc)) ^ 2)
End Function

Function Calcula_APi(Index As Byte)
  Calcula_Vv (2)
  Calcula_Rev
  Calcula_Re ("c")
  LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.Text_Rerc.Text = Re
  zc = Lc - 0.00001
  Select Case Index
    Case 1:
        If (Rev < 2300) Then DPi = 1.41 / (g * rov * Av ^ 2 * hfg ^ 2)
        If (Rev > 2300) Then DPi = 1.22 / (g * rov * Av ^ 2 * hfg ^ 2)
        APi = 0.2 * DPi
    Case 2: Calcula_a_grafica
```

```
        APi = ((-4 * mv * Vv * Lc) / (rv ^ 2)) * (Re * (0.778 - (0.296 * a) + (0.057 * (a ^ 2)))) * ((1
- (zc / Lc)) ^ 2)
        APi = APi / (APcm / ((APva + APl + APi) + APflecha + APve + APvc + APmas))
    Case 3: Porcentaje = (-Re - 2#) / ((-1.23 * Re) + (((2 * Le) + (4 * La)) / Lc))
        APi = Porcentaje * rov * (Vv ^ 2)
        APi = APi / (APcm / ((APva + APl + APi) + APflecha + APve + APvc + APmas))
  End Select
End Function

Function Calcula_APl()
  Calcula_Aw
  Calcula_K (LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.GEOMETRIAS.Text)
  APl = ((ml * Leff) / (K * Aw * hfg * rol))
End Function

Function Calcula_APl2(X)
  Calcula_Aw
  Calcula_K (LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.GEOMETRIAS.Text)
  pl0 = 10000
  Qsum = Val(LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.Text_Qmanual.Text)
  pl = pl0 + (ml / (K * Aw * hfg * rol)) * Qsum * X
  APl2 = pl - pl0
End Function

Function Calcula_APmas()
  APmas = rol * g * 2 * rv * Cos(Teta * Pi / 180)
End Function

Function Calcula_APflecha()
  APflecha = rol * g * (Val(Le) + Val(La) + Val(Lc)) * Sin(Teta * Pi / 180)
End Function

Function Calcula_APcm()
  Calcula_rce (LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.GEOMETRIAS.Text)
  APcm = (2 * sigmal) / rce
End Function

Function Calcula_a()
  Calcula_Re ("e")
  a = (15 / 22) * (5 + (18 / Re) - ((((5 + (18 / Re)) ^ 2) - (44 / 5)) ^ 0.5))
End Function

Function Calcula_a_grafica()
Calcula_a
If (Re >= 0 And Re <= 0.665) Then
  Arreglo1 = Array(0#, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)
```

```
  Arreglo2 = Array(0#, 0, -0.02, -0.035, -0.045, -0.065, -0.07, -0.071, -0.0711, -0.0712, -0.075, -0.072, -0.072, -0.0725, -0.077, -0.08, -0.081, -0.082, -0.083, -0.086, -0.088)
  Arreglo3 = Array(0#, 0, -0.025, -0.05, -0.075, -0.09, -0.09, -0.1, -0.105, -0.11, -0.12, -0.125, -0.13, -0.133, -0.14, -0.145, -0.15, -0.16, -0.162, -0.17, -0.176)
  Arreglo4 = Array(0#, 0, -0.035, -0.06, -0.08, -0.105, -0.115, -0.12, -0.13, -0.14, -0.15, -0.165, -0.17, -0.19, -0.195, -0.21, -0.22, -0.23, -0.235, -0.242, -0.264)
  Arreglo5 = Array(0#, 0, -0.035, -0.065, -0.085, -0.11, -0.13, -0.135, -0.165, -0.173, -0.175, -0.2, -0.215, -0.236, -0.25, -0.26, -0.27, -0.285, -0.3, -0.32, -0.34)
  Arreglo6 = Array(0#, 0, -0.035, -0.065, -0.09, -0.12, -0.145, -0.15, -0.175, -0.19, -0.205, -0.225, -0.24, -0.265, -0.29, -0.31, -0.34, -0.355, -0.37, -0.39, -0.42)
  Arreglo7 = Array(0#, 0, -0.035, -0.065, -0.09, -0.125, -0.15, -0.165, -0.195, -0.215, -0.25, -0.25, -0.28, -0.3, -0.33, -0.375, -0.41, -0.437, -0.46, -0.485, -0.528)
  Arreglo8 = Array(0#, 0, -0.035, -0.065, -0.09, -0.125, -0.15, -0.175, -0.2, -0.225, -0.26, -0.28, -0.3, -0.325, -0.36, -0.415, -0.455, -0.5, -0.545, -0.57, -0.616)
  Arreglo9 = Array(0#, 0, -0.035, -0.065, -0.09, -0.12, -0.15, -0.175, -0.21, -0.233, -0.265, -0.282, -0.315, -0.345, -0.39, -0.44, -0.495, -0.55, -0.615, -0.65, -0.704)
  Arreglo10 = Array(0#, 0, -0.035, -0.065, -0.09, -0.12, -0.15, -0.175, -0.21, -0.233, -0.27, -0.285, -0.32, -0.355, -0.405, -0.45, -0.52, -0.59, -0.665, -0.73, -0.81)
  Arreglo11 = Array(0#, 0, -0.035, -0.065, -0.09, -0.11, -0.15, -0.175, -0.21, -0.233, -0.27, -0.29, -0.32, -0.36, -0.41, -0.45, -0.535, -0.62, -0.705, -0.8, -0.91)
  Calcula_Re ("c")
  If (Re < -2#) Then Re = -2#
  If (Re > -0.1) Then Re = -0.1
  Select Case Re
    Case -0.1: i = 1
    Case -0.2: i = 2
    Case -0.3: i = 3
    Case -0.4: i = 4
    Case -0.5: i = 5
    Case -0.6: i = 6
    Case -0.7: i = 7
    Case -0.8: i = 8
    Case -0.9: i = 9
    Case -1#: i = 10
    Case -1.1: i = 11
    Case -1.2: i = 12
    Case -1.3: i = 13
    Case -1.4: i = 14
    Case -1.5: i = 15
    Case -1.6: i = 16
    Case -1.7: i = 17
    Case -1.8: i = 18
    Case -1.9: i = 19
    Case -2#: i = 20
  End Select
  XX = Redondea(Str(zc)) - Redondea(Str((La + Le)))
  Select Case (XX / Lc)
```

```
    Case 0#:  a_grafica = Arreglo1(i)
    Case 0.1: a_grafica = Arreglo2(i)
    Case 0.2: a_grafica = Arreglo3(i)
    Case 0.3:  a_grafica = Arreglo4(i)
    Case 0.4:  a_grafica = Arreglo5(i)
    Case 0.5:  a_grafica = Arreglo6(i)
    Case 0.6:  a_grafica = Arreglo7(i)
    Case 0.7:  a_grafica = Arreglo8(i)
    Case 0.8:  a_grafica = Arreglo9(i)
    Case 0.9:  a_grafica = Arreglo10(i)
    Case 1#:  a_grafica = Arreglo11(i)
  End Select
Else
'  Case "TURBULENTO":
  Arreglo1 = Array(0#, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8,
0.8, 0.8, 0.8, 0.8)
  Arreglo2 = Array(0#, 0.025, 0.14375, 0.275, 0.3525, 0.45, 0.4875, 0.5, 0.51875, 0.5375,
0.5625, 0.5675, 0.5725, 0.5775, 0.5825, 0.5875, 0.6025, 0.6175, 0.6325, 0.6475, 0.6625)
  Arreglo3 = Array(0#, -0.05625, -0.025, 0.01875, 0.075, 0.1375, 0.1875, 0.225, 0.2625,
0.2875, 0.3125, 0.325, 0.3375, 0.35, 0.3625, 0.375, 0.3925, 0.41, 0.4275, 0.445, 0.4625)
  Arreglo4 = Array(0#, -0.06875, -0.075, -0.0625, -0.0525, -0.03125, -0.0025, 0.02125, 0.05,
0.075, 0.105, 0.12125, 0.1375, 0.15375, 0.17, 0.1875, 0.2025, 0.2175, 0.2325, 0.2475,
0.2625)
  Arreglo5 = Array(0#, -0.0625, -0.0625, -0.1, -0.01375, -0.10625, -0.08125, -0.0775, -0.075, -
0.05, -0.0375, -0.02125, -0.005, 0.0125, 0.025, 0.0375, 0.0175, 0.0575, 0.0675, 0.0775,
0.0875)
  Arreglo6 = Array(0#, -0.05937, -0.09375, -0.10625, -0.1125, -0.125, -0.12625, -0.01375, -
0.14375, -0.14375, -0.15, -0.1525, -0.02125, -0.005, 0.0125, 0.0025, 0.0375, 0.0475, 0.0575,
0.0675, 0.0775, 0.0875)
  Arreglo7 = Array(0#, -0.05625, -0.09125, -0.1, -0.11375, -0.124, -0.14, -0.15, -0.1125, -0.2,
0.225, -0.142, -0.1315, -0.121, -0.1105, -0.1, -0.09875, -0.0975, -0.09625, -0.095, -0.09375)
  Arreglo8 = Array(0#, -0.04375, -0.07625, -0.0975, -0.11, -0.12, -0.14375, -0.165, -0.18875, -
0.22375, -0.2525, -0.2682, -0.284, -0.2997, -0.3155, -0.33125, -0.35125, -0.37125, -0.39125, -
0.41125, -0.43125)
  Arreglo9 = Array(0#, -0.0375, -0.06375, -0.0875, -0.10125, -0.1175, -0.1437, -0.1625, -0.195,
-0.225, -0.2625, -0.28875, -0.315, -0.34125, -0.3675, -0.3937, -0.4325, -0.47125, -0.51, -
0.54875, -0.5875)
  Arreglo10 = Array(0#, -0.025, -0.055, -0.07375, -0.095, -0.11625, -0.1375, -0.162, -0.19375, -
0.225, -0.25375, -0.2855, -0.31725, -0.349, -0.38075, -0.4125, -0.4775, -0.5425, -0.6075, -
0.6725, -0.7375)
  Arreglo11 = Array(0#, -0.015, -0.04375, -0.05, -0.0875, -0.115, -0.13125, -0.15, -0.1875, -
0.2125, -0.2425, -0.2775, -0.3125, -0.3475, -0.3825, -0.4175, -0.5115, 0.6055, -0.6995, -
0.7935, -0.8875)
  Calcula_Re ("c")
  If (Re < -2#) Then Re = -2#
  If (Re > -0.1) Then Re = -0.1
  Select Case Re
```

```
   Case -0.1: i = 1
   Case -0.2: i = 2
   Case -0.3: i = 3
   Case -0.4: i = 4
   Case -0.5: i = 5
   Case -0.6: i = 6
   Case -0.7: i = 7
   Case -0.8: i = 8
   Case -0.9: i = 9
   Case -1#: i = 10
   Case -1.1: i = 11
   Case -1.2: i = 12
   Case -1.3: i = 13
   Case -1.4: i = 14
   Case -1.5: i = 15
   Case -1.6: i = 16
   Case -1.7: i = 17
   Case -1.8: i = 18
   Case -1.9: i = 19
   Case -2#: i = 20
  End Select
  XX = Redondea(Str(zc)) - Redondea(Str((La + Le)))
  Select Case (XX / Lc)
   Case 0#:  a_grafica = Arreglo1(i)
   Case 0.1: a_grafica = Arreglo2(i)
   Case 0.2: a_grafica = Arreglo3(i)
   Case 0.3:  a_grafica = Arreglo4(i)
   Case 0.4:  a_grafica = Arreglo5(i)
   Case 0.5:  a_grafica = Arreglo6(i)
   Case 0.6:  a_grafica = Arreglo7(i)
   Case 0.7:  a_grafica = Arreglo8(i)
   Case 0.8:  a_grafica = Arreglo9(i)
   Case 0.9:  a_grafica = Arreglo10(i)
   Case 1#:  a_grafica = Arreglo11(i)
  End Select
End If
End Function

Function Calcula_a_grafica2()
  Arreglo1 = Array(0#, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8)
  Arreglo2 = Array(0#, 0.025, 0.14375, 0.275, 0.3525, 0.45, 0.4875, 0.5, 0.51875, 0.5375, 0.5625, 0.5675, 0.5725, 0.5775, 0.5825, 0.5875, 0.6025, 0.6175, 0.6325, 0.6475, 0.6625)
  Arreglo3 = Array(0#, -0.05625, -0.025, 0.01875, 0.075, 0.1375, 0.1875, 0.225, 0.2625, 0.2875, 0.3125, 0.325, 0.3375, 0.35, 0.3625, 0.375, 0.3925, 0.41, 0.4275, 0.445, 0.4625)
```

```
 Arreglo4 = Array(0#, -0.06875, -0.075, -0.0625, -0.0525, -0.03125, -0.0025, 0.02125, 0.05, 0.075, 0.105, 0.12125, 0.1375, 0.15375, 0.17, 0.1875, 0.2025, 0.2175, 0.2325, 0.2475, 0.2625)
 Arreglo5 = Array(0#, -0.0625, -0.0625, -0.1, -0.01375, -0.10625, -0.08125, -0.0775, -0.075, -0.05, -0.0375, -0.02125, -0.005, 0.0125, 0.025, 0.0375, 0.0175, 0.0575, 0.0675, 0.0775, 0.0875)
 Arreglo6 = Array(0#, -0.05937, -0.09375, -0.10625, -0.1125, -0.125, -0.12625, -0.01375, -0.14375, -0.14375, -0.15, -0.1525, -0.02125, -0.005, 0.0125, 0.0025, 0.0375, 0.0475, 0.0575, 0.0675, 0.0775, 0.0875)
 Arreglo7 = Array(0#, -0.05625, -0.09125, -0.1, -0.11375, -0.124, -0.14, -0.15, -0.1125, -0.2, 0.225, -0.142, -0.1315, -0.121, -0.1105, -0.1, -0.09875, -0.0975, -0.09625, -0.095, -0.09375)
 Arreglo8 = Array(0#, -0.04375, -0.07625, -0.0975, -0.11, -0.12, -0.14375, -0.165, -0.18875, -0.22375, -0.2525, -0.2682, -0.284, -0.2997, -0.3155, -0.33125, -0.35125, -0.37125, -0.39125, -0.41125, -0.43125)
 Arreglo9 = Array(0#, -0.0375, -0.06375, -0.0875, -0.10125, -0.1175, -0.1437, -0.1625, -0.195, -0.225, -0.2625, -0.28875, -0.315, -0.34125, -0.3675, -0.3937, -0.4325, -0.47125, -0.51, -0.54875, -0.5875)
 Arreglo10 = Array(0#, -0.025, -0.055, -0.07375, -0.095, -0.11625, -0.1375, -0.162, -0.19375, -0.225, -0.25375, -0.2855, -0.31725, -0.349, -0.38075, -0.4125, -0.4775, -0.5425, -0.6075, -0.6725, -0.7375)
 Arreglo11 = Array(0#, -0.015, -0.04375, -0.05, -0.0875, -0.115, -0.13125, -0.15, -0.1875, -0.2125, -0.2425, -0.2775, -0.3125, -0.3475, -0.3825, -0.4175, -0.5115, 0.6055, -0.6995, -0.7935, -0.8875)
 Calcula_Re ("c")
 Select Case Re
   Case -0.1: i = 1
   Case -0.2: i = 2
   Case -0.3: i = 3
   Case -0.4: i = 4
   Case -0.5: i = 5
   Case -0.6: i = 6
   Case -0.7: i = 7
   Case -0.8: i = 8
   Case -0.9: i = 9
   Case -1#: i = 10
   Case -1.1: i = 11
   Case -1.2: i = 12
   Case -1.3: i = 13
   Case -1.4: i = 14
   Case -1.5: i = 15
   Case -1.6: i = 16
   Case -1.7: i = 17
   Case -1.8: i = 18
   Case -1.9: i = 19
   Case -2#: i = 20
 End Select
 Select Case (X / Lc)
```

```
    Case 0#:  a_grafica = Arreglo1(i)
    Case 0.1: a_grafica = Arreglo2(i)
    Case 0.2: a_grafica = Arreglo3(i)
    Case 0.3:  a_grafica = Arreglo4(i)
    Case 0.4:  a_grafica = Arreglo5(i)
    Case 0.5:  a_grafica = Arreglo6(i)
    Case 0.6:  a_grafica = Arreglo7(i)
    Case 0.7:  a_grafica = Arreglo8(i)
    Case 0.8:  a_grafica = Arreglo9(i)
    Case 0.9:  a_grafica = Arreglo10(i)
    Case 1#:  a_grafica = Arreglo11(i)
  End Select
End Function

Function Calcula_flRel()
  Select Case (w / Deltaec)
    Case 0: flRel = 24
    Case 0.1: flRel = 20.114
    Case 0.2: flRel = 18.8
    Case 0.3: flRel = 17.051
    Case 0.4: flRel = 14.114
    Case 0.5: flRel = 15.37
    Case 0.6: flRel = 14.914
    Case 0.7: flRel = 14.57
    Case 0.8: flRel = 14.342
    Case 0.9: flRel = 14.28
    Case 1#: flRel = 14.228
  End Select
  If ((w / Deltaec) > 1#) Then flRel = 14.228
End Function

Function Calcula_K(ESTRUCTURA As String)
  Select Case ESTRUCTURA
    Case "CAPAS DE MALLAS": K = (((dalambre / 0.0254) ^ 2) * (Epsilon ^ 3)) / (122 * ((1 -
Epsilon) ^ 2))
    Case "RANURADO RECTANGULAR": Epsilon = 1: Calcula_flRel: K = (2 * Epsilon * ((w / 2) ^
2)) / (flRel)
    Case "ESTRUC CAPILAR HOMO": K = (((dalambre / 0.0254) ^ 2) * (Epsilon ^ 3)) / (122 * ((1 -
Epsilon) ^ 2))
  End Select
End Function

Function Calcula_Ctabla()
  Calcula_Rev
  Calcula_Av
  Calcula_Machv
  If (Rev < 2300 And Machv < 0.2) Then
```

```
                        fvRev = 16
                        Ctabla = 1
                        FLUJO = "LAMINAR"
                        LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.LabelRev.Caption = "LAMINAR"
                        LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.LabelMachv.Caption                    =
"INCOMPRESIBLE"
  End If
  If (Rev < 2300 And Machv > 0.2) Then
                        fvRev = 16
                        FLUJO = "LAMINAR"
                        Ctabla = (1 + ((gamav - 1) / 2) * (Machv ^ 2)) ^ (-0.5)
                        LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.LabelRev.Caption = "LAMINAR"
                        LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.LabelMachv.Caption                    =
"COMPRESIBLE"
  End If
  If (Rev > 2300 And Machv <> 0.2) Then
                        fvRev = 0.038 * (((2 * rv) * Qcap / (Av * mv * hfg)) ^ (3 / 4))
                        FLUJO = "TURBULENTO"
                        Ctabla = 1
                        LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.LabelRev.Caption = "TURBULENTO"
                        LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.LabelMachv.Caption                    =
"INCOMPRESIBLE"
  End If
End Function

Function Calcula_Re(SECCION As String)
  Calcula_VFM
  Select Case SECCION
    Case "e": Re = VFM / (2 * Pi * Le * mv)
    Case "a": Re = (2 * rv * Qsum) / (Av * mv * hfg)
    Case "c": Re = -VFM / (2 * Pi * Lc * mv)
  End Select
End Function

Function Calcula_VFM()
  VFM = Qsum / hfg
  LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.Text_FlujoMasico.Text = VFM
End Function

Function Calcula_Red()
  Calcula_Vv (2)
  Red = (rol * Vv * dtubo) / ml
End Function

Function Calcula_Aw()
  If (N <> 0 And w <> 0) Then
```

```
                If (LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.GEOMETRIAS.Text = "RANURADO
RECTANGULAR") Then Aw = N * (w ^ 2)
            Else: Calcula_di
                If (di <> "") Then
                        Aw = (Pi * ((di ^ 2) - ((2 * rv) ^ 2))) / 4
                    Else: Aw = ""
                End If
 End If
 LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.Text_Aw.Text = Aw
End Function

Function Calcula_di()
 If (rv <> "" And dalambre <> "" And ncapas <> "" And nespacios <> 0) Then di = 2 * (rv +
dalambre * (ncapas + nespacios))
End Function

Function Calcula_rhw(GEOMETRIA As String)
 Select Case GEOMETRIA
  Case "RANURADO RECTANGULAR": If (w = "") Then Mensaje = MsgBox("w debe tener
valor", vbOKOnly, "AVISO")
                If (w <> "") Then rhw = w / 2
  Case "ESTRUC CAPILAR HOMO": If (N = "" Or rv = "") Then Mensaje = MsgBox("N y rv
deben tener valores", vbOKOnly, "AVISO")
                If (N <> "" Or rv <> "") Then rhw = (1 / (2 * N)) - rv

  Case "CAPAS DE MALLAS":
            Calcula_Aw
            If (N = "" Or rv = "" Or Aw = "") Then
                        Mensaje = MsgBox("Aw, N y rv deben tener valores",
vbOKOnly, "AVISO")
                        Exit Function
            End If
            If (N <> "" Or rv <> "" Or Aw <> "") Then Calcula_di:  rhw = Aw / (Pi * ((2 * rv)
+ di))
 End Select
End Function

Function Calcula_We(Index As Byte)
 Select Case Index
  Case 1: Calcula_Vv (1)
      We = (2 * rhw * rov * (Vv ^ 2)) / sigmal
      If (We > 1) Then
            LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.LabelQarrastre(1).BackColor = &HFF&
          Else: LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.LabelQarrastre(1).BackColor = &HFFFFFF
      End If
  Case 2: vcr = ((2 * Pi * sigmal) / (rov * z)) ^ 0.5
      We = (rov * (vcr ^ 2) * z) / sigmal
```

```
        If (We <> 1) Then
                LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.LabelQarrastre(7).BackColor = &HFF&
               Else: LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.LabelQarrastre(1).BackColor = &HFFFFFF
        End If
  End Select
End Function

Function Interpolacion(X, X1, X2, Y, Y1, Y2 As Double)

  Y = (((X - X1) * (Y2 - Y1)) / (X2 - X1)) + Y1
  Interpolacion = Y
End Function

Function Calcula_Et(Index As Byte)
  Select Case Index
    Case 1: Calcula_Delta (1): Et1 = sigmal / (rov * hfg * Delta1)
    Case 3: Calcula_Delta (1): Et3 = sigmal / (rol * hfg * Delta1)
  End Select
End Function

Function Calcula_rce(ESTRUCTURA As String)
  Select Case ESTRUCTURA
    Case "CAPAS DE MALLAS": rce = 1 / (N * 2)
    Case "RANURADO RECTANGULAR": rce = w
    Case "ESTRUC CAPILAR HOMO": rce = 1 / (N * 2)
  End Select
End Function

Function Calcula_Delta(Index As Byte)
  Select Case Index
    Case 1: Delta1 = (sigmal / ((rol - rov) * g)) ^ 0.5
  End Select
End Function

Function Calcula_alfa()
  Calcula_Ctabla
  Select Case FLUJO
    Case "LAMINAR": alfa = 1.234
    Case "TURBULENTO": alfa = 2.22
  End Select
End Function

Function Calcula_CUV()
  CUV = CUG / Pm
End Function

Function Calcula_Av()
```

```
  Av = Pi * (LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.Text_rv ^ 2)
End Function

Function Calcula_C()
Calcula_CUV
C = (gamav * Tv * CUV) ^ 0.5
End Function

Function Calcula_Machv()
  Calcula_Vv (2)
  Calcula_C
  Machv = Vv / C
  LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.Text_Machv.Text = Machv
End Function

Function Calcula_Rev()
  Calcula_Vv (2)
  Rev = (rov * Vv * 2 * rv) / mv
  LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.Text_Rev.Text = Rev
End Function

Function Calcula_roo()
  Calcula_Machv
  roo = ((1 + (gamav / 2) * (Machv ^ 2)) / (1 + (((gamav - 1) / 2) * (Machv ^ 2)))) * rov
End Function

Function Calcula_T0()
  Calcula_Machv
  T0 = (1 + (((gamav - 1) / 2) * (Machv ^ 2))) * Tv
End Function

Function Calcula_Keff(ESTRUCTURA As String)
  Calcula_Delta (3)
  Select Case ESTRUCTURA
    Case "CAPAS DE MALLAS": Keff = (kl * ((kl + Kw) - (1 - Epsilon) * (kl - Kw))) / ((kl + Kw) + (1 -
Epsilon) * (kl - Kw))
    Case "RANURADO RECTANGULAR": Keff = ((wf * kl * Kw * Deltaec) + w * kl * (0.185 * wf *
Kw + Deltaec * kl)) / ((w + wf) * (0.185 * wf * Kw + Deltaec * kl))
    Case "ESTRUC CAPILAR HOMO": Keff = (kl * ((2 * kl + Kw) - (2 * (1 - Epsilon)) * (kl - Kw))) /
((2 * kl + Kw) + (1 - Epsilon) * (kl * Kw))
  End Select
End Function

Function INTERVALO(ELEMENTO As String)
Select Case ELEMENTO
  Case "AGUA": IntInf = 20: IntSup = 200
  Case "HEPTANO": IntInf = -20: IntSup = 120
```

```
  Case "AMONIACO": IntInf = -60: IntSup = 120
  Case "NITROGENO": IntInf = -203: IntSup = -150
  Case "SODIO": IntInf = 500: IntSup = 1300
  Case "LITIO": IntInf = 1030: IntSup = 1730
  Case "METANOL": IntInf = -50: IntSup = 150
  Case "ACETONA": IntInf = -40: IntSup = 140
  Case "POTASIO": IntInf = 350: IntSup = 850
  Case "ETANOL": IntInf = -30: IntSup = 130
End Select
End Function

Function PROPIEDADES(ELEMENTO As String, TEMPERATURA As Integer)
Dim V(9) As Double
 INTERPOLA = 0
 Select Case ELEMENTO
   Case "AGUA": Select Case TEMPERATURA
                Case 20: V(1) = 2448: V(2) = 998.2: V(3) = 0.02: V(4) = 0.603: V(5) = 1#: V(6) = 0.96:
V(7) = 0.02: V(8) = 1.81: V(9) = 7.28
                Case 40: V(1) = 2402: V(2) = 992.3: V(3) = 0.05: V(4) = 0.63: V(5) = 0.65: V(6) =
1.04: V(7) = 0.07: V(8) = 1.89: V(9) = 6.96
                Case 60: V(1) = 2359: V(2) = 983#: V(3) = 0.13: V(4) = 0.649: V(5) = 0.47: V(6) =
1.12: V(7) = 0.2: V(8) = 1.91: V(9) = 6.62
                Case 80: V(1) = 2309: V(2) = 972#: V(3) = 0.29: V(4) = 0.668: V(5) = 0.36: V(6) =
1.19: V(7) = 0.47: V(8) = 1.95: V(9) = 6.26
               Case 100: V(1) = 2258: V(2) = 958#: V(3) = 0.6: V(4) = 0.68: V(5) = 0.28: V(6) = 1.27:
V(7) = 1.01: V(8) = 2.01: V(9) = 5.89
               Case 120: V(1) = 2200: V(2) = 945#: V(3) = 1.12: V(4) = 0.682: V(5) = 0.23: V(6) =
1.34: V(7) = 2.02: V(8) = 2.09: V(9) = 5.5
               Case 140: V(1) = 2139: V(2) = 928#: V(3) = 1.99: V(4) = 0.683: V(5) = 0.2: V(6) =
1.41: V(7) = 3.9: V(8) = 2.21: V(9) = 5.06
               Case 160: V(1) = 2074: V(2) = 909#: V(3) = 3.27: V(4) = 0.679: V(5) = 0.17: V(6) =
1.49: V(7) = 6.44: V(8) = 2.38: V(9) = 4.66
               Case 180: V(1) = 2003: V(2) = 888#: V(3) = 5.16: V(4) = 0.669: V(5) = 0.15: V(6) =
1.57: V(7) = 10.04: V(8) = 2.62: V(9) = 4.29
               Case 200: V(1) = 1967: V(2) = 865#: V(3) = 7.87: V(4) = 0.659: V(5) = 0.14: V(6) =
1.65: V(7) = 16.19: V(8) = 2.91: V(9) = 3.89
              Case Else: INTERPOLA = 1
             End Select
    Case "HEPTANO": Select Case TEMPERATURA
                  Case -20: V(1) = 384#: V(2) = 715.5: V(3) = 0.01: V(4) = 0.143: V(5) = 0.69: V(6) =
0.57: V(7) = 0.01: V(8) = 0.83: V(9) = 2.42
                   Case 0: V(1) = 372.6: V(2) = 699#: V(3) = 0.17: V(4) = 0.141: V(5) = 0.53: V(6) =
0.6: V(7) = 0.02: V(8) = 0.87: V(9) = 2.21
                  Case 20: V(1) = 362.2: V(2) = 683#: V(3) = 0.49: V(4) = 0.14: V(5) = 0.43: V(6) =
0.63: V(7) = 0.08: V(8) = 0.92: V(9) = 2.01
                  Case 40: V(1) = 351.8: V(2) = 667#: V(3) = 0.97: V(4) = 0.139: V(5) = 0.34: V(6) =
0.66: V(7) = 0.2: V(8) = 0.97: V(9) = 1.81
```

```
                Case 60: V(1) = 341.5: V(2) = 649#: V(3) = 1.45: V(4) = 0.137: V(5) = 0.29: V(6) =
0.7: V(7) = 0.32: V(8) = 1.02: V(9) = 1.62
                Case 80: V(1) = 331.2: V(2) = 631#: V(3) = 2.31: V(4) = 0.135: V(5) = 0.24: V(6) =
0.74: V(7) = 0.62: V(8) = 1.05: V(9) = 1.43
                Case 100: V(1) = 319.6: V(2) = 612#: V(3) = 3.71: V(4) = 0.133: V(5) = 0.21: V(6) =
0.77: V(7) = 1.1: V(8) = 1.09: V(9) = 1.28
                Case 120: V(1) = 305#: V(2) = 592#: V(3) = 6.08: V(4) = 0.132: V(5) = 0.18: V(6) =
0.82: V(7) = 1.85: V(8) = 1.16: V(9) = 1.1
                Case Else: INTERPOLA = 1
               End Select
   Case "AMONIACO": Select Case TEMPERATURA
                Case -60: V(1) = 1343: V(2) = 714.4: V(3) = 0.03: V(4) = 0.294: V(5) = 0.36: V(6) =
0.72: V(7) = 0.27: V(8) = 2.05: V(9) = 4.062
                Case -40: V(1) = 1384: V(2) = 690.4: V(3) = 0.05: V(4) = 0.303: V(5) = 0.29: V(6) =
0.79: V(7) = 0.76: V(8) = 2.075: V(9) = 3.574
                Case -20: V(1) = 1338: V(2) = 665.5: V(3) = 1.62: V(4) = 0.304: V(5) = 0.26: V(6) =
0.85: V(7) = 1.93: V(8) = 2.1: V(9) = 3.09
                 Case 0: V(1) = 1262: V(2) = 638.6: V(3) = 3.48: V(4) = 0.298: V(5) = 0.25: V(6) =
0.92: V(7) = 4.24: V(8) = 2.125: V(9) = 2.48
                Case 20: V(1) = 1187: V(2) = 610.3: V(3) = 6.69: V(4) = 0.286: V(5) = 0.22: V(6) =
1.01: V(7) = 8.46: V(8) = 2.15: V(9) = 2.133
                Case 40: V(1) = 1101: V(2) = 579.5: V(3) = 12#: V(4) = 0.272: V(5) = 0.2: V(6) =
1.16: V(7) = 15.34: V(8) = 2.16: V(9) = 1.833
                Case 60: V(1) = 1026: V(2) = 545.2: V(3) = 20.49: V(4) = 0.255: V(5) = 0.17: V(6) =
1.27: V(7) = 29.8: V(8) = 2.18: V(9) = 1.367
                Case 80: V(1) = 819: V(2) = 505.7: V(3) = 34.13: V(4) = 0.235: V(5) = 0.15: V(6) =
1.4: V(7) = 40.9: V(8) = 2.21: V(9) = 0.767
                Case 100: V(1) = 699: V(2) = 455.1: V(3) = 54.92: V(4) = 0.212: V(5) = 0.11: V(6) =
1.6: V(7) = 63.12: V(8) = 2.26: V(9) = 0.5
                Case 120: V(1) = 428: V(2) = 374.4: V(3) = 113.16: V(4) = 0.184: V(5) = 0.07: V(6)
= 1.89: V(7) = 90.44: V(8) = 2.292: V(9) = 0.15
                Case Else: INTERPOLA = 1
               End Select
   Case "NITROGENO": Select Case TEMPERATURA
                Case -203: V(1) = 210#: V(2) = 830#: V(3) = 1.84: V(4) = 0.15: V(5) = 2.48: V(6) =
0.48: V(7) = 0.48: V(8) = 1.083: V(9) = 1.054
                Case -200: V(1) = 205.5: V(2) = 818#: V(3) = 3.81: V(4) = 0.146: V(5) = 1.94: V(6)
= 0.51: V(7) = 0.74: V(8) = 1.082: V(9) = 0.985
                Case -195: V(1) = 198#: V(2) = 798#: V(3) = 7.1: V(4) = 0.139: V(5) = 1.51: V(6) =
0.56: V(7) = 1.62: V(8) = 1.079: V(9) = 0.87
                Case -190: V(1) = 190.5: V(2) = 778#: V(3) = 10.39: V(4) = 0.132: V(5) = 1.26:
V(6) = 0.6: V(7) = 3.31: V(8) = 1.0775: V(9) = 0.766
                Case -185: V(1) = 183#: V(2) = 758#: V(3) = 13.68: V(4) = 0.125: V(5) = 1.08: V(6)
= 0.65: V(7) = 4.99: V(8) = 1.074: V(9) = 0.662
                Case -180: V(1) = 173.7: V(2) = 732#: V(3) = 22.05: V(4) = 0.117: V(5) = 0.95:
V(6) = 0.71: V(7) = 6.69: V(8) = 1.072: V(9) = 0.561
```

```
                Case -175: V(1) = 163.2: V(2) = 702#: V(3) = 33.8: V(4) = 0.11: V(5) = 0.86: V(6) =
0.77: V(7) = 8.37: V(8) = 1.07: V(9) = 0.464
                Case -170: V(1) = 152.7: V(2) = 672#: V(3) = 45.55: V(4) = 0.103: V(5) = 0.8: V(6)
= 0.83: V(7) = 1.07: V(8) = 1.068: V(9) = 0.367
                Case -160: V(1) = 124.2: V(2) = 603#: V(3) = 80.9: V(4) = 0.089: V(5) = 0.72: V(6)
= 1#: V(7) = 19.37: V(8) = 1.063: V(9) = 0.185
                Case -150: V(1) = 66.8: V(2) = 474#: V(3) = 194#: V(4) = 0.075: V(5) = 0.65: V(6) =
1.5: V(7) = 28.8: V(8) = 1.059: V(9) = 0.11
                Case Else: INTERPOLA = 1
            End Select
  Case "SODIO": Select Case TEMPERATURA
                Case 500: V(1) = 4370: V(2) = 828.1: V(3) = 0.003: V(4) = 70.08: V(5) = 0.24: V(6) =
0.18: V(7) = 0.01: V(8) = 9.04: V(9) = 1.51
                Case 600: V(1) = 4243: V(2) = 805.4: V(3) = 0.013: V(4) = 64.62: V(5) = 0.21: V(6) =
0.19: V(7) = 0.04: V(8) = 9.04: V(9) = 1.42
                Case 700: V(1) = 4090: V(2) = 763.5: V(3) = 0.05: V(4) = 60.81: V(5) = 0.19: V(6) =
0.2: V(7) = 0.15: V(8) = 9.04: V(9) = 1.33
                Case 800: V(1) = 3977: V(2) = 757.3: V(3) = 0.134: V(4) = 57.81: V(5) = 0.18: V(6) =
0.22: V(7) = 0.47: V(8) = 9.04: V(9) = 1.23
                Case 900: V(1) = 3913: V(2) = 745.4: V(3) = 0.306: V(4) = 53.35: V(5) = 0.17: V(6) =
0.23: V(7) = 1.25: V(8) = 9.04: V(9) = 1.13
                Case 1000: V(1) = 3827: V(2) = 725.4: V(3) = 0.667: V(4) = 49.08: V(5) = 0.16: V(6)
= 0.24: V(7) = 2.81: V(8) = 9.04: V(9) = 1.04
                Case 1100: V(1) = 3690: V(2) = 690.8: V(3) = 1.306: V(4) = 45.08: V(5) = 0.16: V(6)
= 0.25: V(7) = 5.49: V(8) = 9.04: V(9) = 0.95
                Case 1200: V(1) = 3577: V(2) = 669#: V(3) = 2.303: V(4) = 41.08: V(5) = 0.15: V(6)
= 0.26: V(7) = 9.59: V(8) = 9.04: V(9) = 0.86
                Case 1300: V(1) = 3477: V(2) = 654#: V(3) = 3.622: V(4) = 37.08: V(5) = 1.15: V(6)
= 0.27: V(7) = 15.91: V(8) = 9.04: V(9) = 0.77
                Case Else: INTERPOLA = 1
            End Select
  Case "LITIO": Select Case TEMPERATURA
                Case 1030: V(1) = 20500: V(2) = 450: V(3) = 0.005: V(4) = 67: V(5) = 0.24: V(6) =
1.67: V(7) = 0.07: V(8) = 0.532: V(9) = 2.9
                Case 1130: V(1) = 20100: V(2) = 440: V(3) = 0.013: V(4) = 69: V(5) = 0.24: V(6) =
1.74: V(7) = 0.17: V(8) = 0.532: V(9) = 2.85
                Case 1230: V(1) = 20000: V(2) = 430: V(3) = 0.028: V(4) = 70: V(5) = 0.23: V(6) =
1.83: V(7) = 0.45: V(8) = 0.532: V(9) = 2.75
                Case 1330: V(1) = 19700: V(2) = 420: V(3) = 0.057: V(4) = 69: V(5) = 0.23: V(6) =
1.91: V(7) = 0.96: V(8) = 0.532: V(9) = 2.6
                Case 1430: V(1) = 19200: V(2) = 410: V(3) = 0.108: V(4) = 68: V(5) = 0.23: V(6) =
2#: V(7) = 1.85: V(8) = 0.532: V(9) = 2.4
                Case 1530: V(1) = 18900: V(2) = 405: V(3) = 0.193: V(4) = 65: V(5) = 0.23: V(6) =
2.1: V(7) = 3.3: V(8) = 0.532: V(9) = 2.25
                Case 1630: V(1) = 18500: V(2) = 400: V(3) = 0.34: V(4) = 62: V(5) = 0.23: V(6) =
2.17: V(7) = 5.3: V(8) = 0.532: V(9) = 2.1
```

```
            Case 1730: V(1) = 18200: V(2) = 398: V(3) = 0.49: V(4) = 59: V(5) = 0.23: V(6) =
2.26: V(7) = 8.9: V(8) = 0.532: V(9) = 2.05
            Case Else: INTERPOLA = 1
          End Select
  Case "METANOL": Select Case TEMPERATURA
            Case -50: V(1) = 1194: V(2) = 843.5: V(3) = 0.01: V(4) = 0.21: V(5) = 1.7: V(6) =
0.72: V(7) = 0.01: V(8) = 1.2: V(9) = 3.26
            Case -30: V(1) = 1187: V(2) = 833.5: V(3) = 0.01: V(4) = 0.208: V(5) = 1.3: V(6) =
0.78: V(7) = 0.02: V(8) = 1.27: V(9) = 2.95
            Case -10: V(1) = 1182: V(2) = 818.7: V(3) = 0.04: V(4) = 0.206: V(5) = 0.945: V(6) =
0.85: V(7) = 0.04: V(8) = 1.34: V(9) = 2.63
            Case 10: V(1) = 1175: V(2) = 800.5: V(3) = 0.12: V(4) = 0.204: V(5) = 0.701: V(6) =
0.91: V(7) = 0.1: V(8) = 1.4: V(9) = 2.36
            Case 30: V(1) = 1155: V(2) = 782#: V(3) = 0.31: V(4) = 0.203: V(5) = 0.521: V(6) =
0.98: V(7) = 0.25: V(8) = 1.47: V(9) = 2.18
            Case 50: V(1) = 1125: V(2) = 764.1: V(3) = 0.77: V(4) = 0.202: V(5) = 0.399: V(6) =
1.04: V(7) = 0.55: V(8) = 1.54: V(9) = 2.01
            Case 70: V(1) = 1085: V(2) = 746.2: V(3) = 1.47: V(4) = 0.201: V(5) = 0.314: V(6) =
1.11: V(7) = 1.31: V(8) = 1.61: V(9) = 1.85
            Case 90: V(1) = 1035: V(2) = 724.4: V(3) = 3.01: V(4) = 0.199: V(5) = 0.259: V(6) =
1.19: V(7) = 2.69: V(8) = 1.79: V(9) = 1.66
            Case 110: V(1) = 980: V(2) = 703.6: V(3) = 5.64: V(4) = 0.197: V(5) = 0.211: V(6) =
1.26: V(7) = 4.98: V(8) = 1.92: V(9) = 1.46
            Case 130: V(1) = 920: V(2) = 685.2: V(3) = 9.81: V(4) = 0.195: V(5) = 0.166: V(6) =
1.31: V(7) = 7.86: V(8) = 1.92: V(9) = 1.25
            Case 150: V(1) = 850: V(2) = 653.2: V(3) = 15.9: V(4) = 0.193: V(5) = 0.138: V(6) =
1.38: V(7) = 8.94: V(8) = 1.92: V(9) = 1.04
            Case Else: INTERPOLA = 1
          End Select
  Case "ACETONA": Select Case TEMPERATURA
            Case -40: V(1) = 660#: V(2) = 860#: V(3) = 0.03: V(4) = 0.2: V(5) = 0.8: V(6) = 0.68:
V(7) = 0.01: V(8) = 2#: V(9) = 3.1
            Case -20: V(1) = 615.6: V(2) = 845#: V(3) = 0.1: V(4) = 0.189: V(5) = 0.5: V(6) =
0.73: V(7) = 0.03: V(8) = 2.06: V(9) = 2.76
             Case 0: V(1) = 564#: V(2) = 812#: V(3) = 0.26: V(4) = 0.183: V(5) = 0.395: V(6) =
0.78: V(7) = 0.1: V(8) = 2.11: V(9) = 2.62
            Case 20: V(1) = 552#: V(2) = 790#: V(3) = 0.64: V(4) = 0.181: V(5) = 0.323: V(6) =
0.82: V(7) = 0.27: V(8) = 2.16: V(9) = 2.37
            Case 40: V(1) = 536#: V(2) = 768#: V(3) = 1.05: V(4) = 0.175: V(5) = 0.269: V(6) =
0.86: V(7) = 0.6: V(8) = 2.22: V(9) = 2.12
            Case 60: V(1) = 517#: V(2) = 744#: V(3) = 2.37: V(4) = 0.168: V(5) = 0.226: V(6) =
0.9: V(7) = 1.15: V(8) = 2.28: V(9) = 1.86
            Case 80: V(1) = 495#: V(2) = 719#: V(3) = 4.3: V(4) = 0.16: V(5) = 0.192: V(6) =
0.95: V(7) = 2.15: V(8) = 2.34: V(9) = 1.62
            Case 100: V(1) = 472#: V(2) = 689.6: V(3) = 6.94: V(4) = 0.148: V(5) = 0.17: V(6) =
0.98: V(7) = 4.43: V(8) = 2.39: V(9) = 1.34
```

```
            Case 120: V(1) = 426.1: V(2) = 660.3: V(3) = 11.02: V(4) = 0.135: V(5) = 0.148:
V(6) = 0.99: V(7) = 6.7: V(8) = 2.45: V(9) = 1.07
            Case 140: V(1) = 394.4: V(2) = 631.8: V(3) = 18.61: V(4) = 0.126: V(5) = 0.132:
V(6) = 1.03: V(7) = 10.49: V(8) = 2.5: V(9) = 0.81
            Case Else: INTERPOLA = 1
           End Select
  Case "POTASIO": Select Case TEMPERATURA
            Case 350: V(1) = 2093: V(2) = 763.1: V(3) = 0.002: V(4) = 51.08: V(5) = 0.21: V(6) =
0.15: V(7) = 0.01: V(8) = 5.32: V(9) = 9.5
            Case 400: V(1) = 2078: V(2) = 748.1: V(3) = 0.006: V(4) = 49.08: V(5) = 0.19: V(6) =
0.16: V(7) = 0.01: V(8) = 5.32: V(9) = 9.04
            Case 450: V(1) = 2060: V(2) = 735.4: V(3) = 0.015: V(4) = 47.08: V(5) = 0.18: V(6) =
0.16: V(7) = 0.02: V(8) = 5.32: V(9) = 8.69
            Case 500: V(1) = 2040: V(2) = 725.4: V(3) = 0.031: V(4) = 45.08: V(5) = 0.17: V(6) =
0.17: V(7) = 0.05: V(8) = 5.32: V(9) = 8.44
            Case 550: V(1) = 2020: V(2) = 715.4: V(3) = 0.062: V(4) = 43.31: V(5) = 0.15: V(6) =
0.17: V(7) = 0.1: V(8) = 5.32: V(9) = 8.16
            Case 600: V(1) = 2000: V(2) = 705.4: V(3) = 0.111: V(4) = 41.81: V(5) = 0.14: V(6) =
0.18: V(7) = 0.19: V(8) = 5.32: V(9) = 7.86
            Case 650: V(1) = 1980: V(2) = 695.4: V(3) = 0.193: V(4) = 40.08: V(5) = 0.13: V(6) =
0.19: V(7) = 0.35: V(8) = 5.32: V(9) = 7.51
            Case 700: V(1) = 1969: V(2) = 685.4: V(3) = 0.314: V(4) = 38.08: V(5) = 0.12: V(6) =
0.19: V(7) = 0.61: V(8) = 5.32: V(9) = 7.12
            Case 750: V(1) = 1938: V(2) = 675.4: V(3) = 0.486: V(4) = 36.31: V(5) = 0.12: V(6) =
0.2: V(7) = 0.99: V(8) = 5.32: V(9) = 6.72
            Case 800: V(1) = 1913: V(2) = 665.4: V(3) = 0.716: V(4) = 34.81: V(5) = 0.11: V(6) =
0.2: V(7) = 1.55: V(8) = 5.32: V(9) = 6.32
            Case 850: V(1) = 1883: V(2) = 653.1: V(3) = 1.054: V(4) = 33.31: V(5) = 0.1: V(6) =
0.21: V(7) = 2.34: V(8) = 5.32: V(9) = 5.92
            Case Else: INTERPOLA = 1
           End Select
  Case "ETANOL": Select Case TEMPERATURA
            Case -30: V(1) = 939.4: V(2) = 825:  V(3) = 0.02: V(4) = 0.177: V(5) = 3.4: V(6) =
0.75: V(7) = 0.01: V(8) = 1.25: V(9) = 2.76
            Case -10: V(1) = 928.7: V(2) = 813:  V(3) = 0.03: V(4) = 0.173: V(5) = 2.2: V(6) =
0.8: V(7) = 0.02: V(8) = 1.31: V(9) = 2.66
            Case 10: V(1) = 904.8: V(2) = 798:  V(3) = 0.05: V(4) = 0.17: V(5) = 1.5: V(6) =
0.85: V(7) = 0.03: V(8) = 1.37: V(9) = 2.57
            Case 30: V(1) = 888.6: V(2) = 781:  V(3) = 0.38: V(4) = 0.168: V(5) = 1.02: V(6) =
0.91: V(7) = 0.1: V(8) = 1.44: V(9) = 2.44
            Case 50: V(1) = 872.3: V(2) = 762.2: V(3) = 0.72: V(4) = 0.166: V(5) = 0.72: V(6) =
0.97: V(7) = 0.29: V(8) = 1.51: V(9) = 2.31
            Case 70: V(1) = 858.3: V(2) = 743.1: V(3) = 1.32: V(4) = 0.165: V(5) = 0.51: V(6) =
1.02: V(7) = 0.76: V(8) = 1.58: V(9) = 2.17
            Case 90: V(1) = 832.1: V(2) = 725.3: V(3) = 2.59: V(4) = 0.163: V(5) = 0.37: V(6) =
1.07: V(7) = 1.43: V(8) = 1.65: V(9) = 2.04
```

```
            Case 110: V(1) = 786.6: V(2) = 704.1: V(3) = 5.17: V(4) = 0.16: V(5) = 0.28: V(6) =
1.13: V(7) = 2.66: V(8) = 1.72: V(9) = 1.89
            Case 130: V(1) = 734.4: V(2) = 678.7: V(3) = 9.25: V(4) = 0.159: V(5) = 0.21: V(6) =
1.18: V(7) = 4.3: V(8) = 1.78: V(9) = 1.75
            Case Else: INTERPOLA = 1
           End Select
 End Select
 'Calor Latente de Vaporización
 LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.Text_hfg.Text = V(1) * 1000
 'Densidad del líquido
 LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.Text_rol.Text = V(2)
 'Densidad del Vapor
 LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.Text_rov.Text = V(3)
 'Conductividad Termica del líquido
 LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.Text_kl.Text = V(4)
 'Viscosidad del líquido
 LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.Text_ml.Text = V(5) * 0.001
 'Viscosidad del vapor
 LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.Text_mv.Text = V(6) * 0.00001
 'Presión del vapor
 LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.Text_Pv.Text = V(7) * 100000
 'Calor específico del vapor
 LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.Text_Qev.Text = V(8) * 1000
 'Tensión superficial del líquido
 LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.Text_sigmal.Text = V(9) / 100
 End Function

Function PROPIEDADES2(ELEMENTO As String, TEMPERATURA As Double)
Dim V(9) As Double
 INTERPOLA = 0
 Select Case ELEMENTO
   Case "AGUA": Select Case TEMPERATURA
            Case 20: V(1) = 2448: V(2) = 998.2: V(3) = 0.02: V(4) = 0.603: V(5) = 1#: V(6) = 0.96:
V(7) = 0.02: V(8) = 1.81: V(9) = 7.28
            Case 40: V(1) = 2402: V(2) = 992.3: V(3) = 0.05: V(4) = 0.63: V(5) = 0.65: V(6) =
1.04: V(7) = 0.07: V(8) = 1.89: V(9) = 6.96
            Case 60: V(1) = 2359: V(2) = 983#: V(3) = 0.13: V(4) = 0.649: V(5) = 0.47: V(6) =
1.12: V(7) = 0.2: V(8) = 1.91: V(9) = 6.62
            Case 80: V(1) = 2309: V(2) = 972#: V(3) = 0.29: V(4) = 0.668: V(5) = 0.36: V(6) =
1.19: V(7) = 0.47: V(8) = 1.95: V(9) = 6.26
           Case 100: V(1) = 2258: V(2) = 958#: V(3) = 0.6: V(4) = 0.68: V(5) = 0.28: V(6) = 1.27:
V(7) = 1.01: V(8) = 2.01: V(9) = 5.89
           Case 120: V(1) = 2200: V(2) = 945#: V(3) = 1.12: V(4) = 0.682: V(5) = 0.23: V(6) =
1.34: V(7) = 2.02: V(8) = 2.09: V(9) = 5.5
           Case 140: V(1) = 2139: V(2) = 928#: V(3) = 1.99: V(4) = 0.683: V(5) = 0.2: V(6) =
1.41: V(7) = 3.9: V(8) = 2.21: V(9) = 5.06
```

```
            Case 160: V(1) = 2074: V(2) = 909#: V(3) = 3.27: V(4) = 0.679: V(5) = 0.17: V(6) =
1.49: V(7) = 6.44: V(8) = 2.38: V(9) = 4.66
            Case 180: V(1) = 2003: V(2) = 888#: V(3) = 5.16: V(4) = 0.669: V(5) = 0.15: V(6) =
1.57: V(7) = 10.04: V(8) = 2.62: V(9) = 4.29
            Case 200: V(1) = 1967: V(2) = 865#: V(3) = 7.87: V(4) = 0.659: V(5) = 0.14: V(6) =
1.65: V(7) = 16.19: V(8) = 2.91: V(9) = 3.89
          Case Else: INTERPOLA = 1
          End Select
  Case "HEPTANO": Select Case TEMPERATURA
              Case -20: V(1) = 384#: V(2) = 715.5: V(3) = 0.01: V(4) = 0.143: V(5) = 0.69: V(6) =
0.57: V(7) = 0.01: V(8) = 0.83: V(9) = 2.42
               Case 0: V(1) = 372.6: V(2) = 699#: V(3) = 0.17: V(4) = 0.141: V(5) = 0.53: V(6) =
0.6: V(7) = 0.02: V(8) = 0.87: V(9) = 2.21
              Case 20: V(1) = 362.2: V(2) = 683#: V(3) = 0.49: V(4) = 0.14: V(5) = 0.43: V(6) =
0.63: V(7) = 0.08: V(8) = 0.92: V(9) = 2.01
              Case 40: V(1) = 351.8: V(2) = 667#: V(3) = 0.97: V(4) = 0.139: V(5) = 0.34: V(6) =
0.66: V(7) = 0.2: V(8) = 0.97: V(9) = 1.81
              Case 60: V(1) = 341.5: V(2) = 649#: V(3) = 1.45: V(4) = 0.137: V(5) = 0.29: V(6) =
0.7: V(7) = 0.32: V(8) = 1.02: V(9) = 1.62
              Case 80: V(1) = 331.2: V(2) = 631#: V(3) = 2.31: V(4) = 0.135: V(5) = 0.24: V(6) =
0.74: V(7) = 0.62: V(8) = 1.05: V(9) = 1.43
             Case 100: V(1) = 319.6: V(2) = 612#: V(3) = 3.71: V(4) = 0.133: V(5) = 0.21: V(6) =
0.77: V(7) = 1.1: V(8) = 1.09: V(9) = 1.28
             Case 120: V(1) = 305#: V(2) = 592#: V(3) = 6.08: V(4) = 0.132: V(5) = 0.18: V(6) =
0.82: V(7) = 1.85: V(8) = 1.16: V(9) = 1.1
           Case Else: INTERPOLA = 1
           End Select
  Case "AMONIACO": Select Case TEMPERATURA
              Case -60: V(1) = 1343: V(2) = 714.4: V(3) = 0.03: V(4) = 0.294: V(5) = 0.36: V(6) =
0.72: V(7) = 0.27: V(8) = 2.05: V(9) = 4.062
              Case -40: V(1) = 1384: V(2) = 690.4: V(3) = 0.05: V(4) = 0.303: V(5) = 0.29: V(6) =
0.79: V(7) = 0.76: V(8) = 2.075: V(9) = 3.574
              Case -20: V(1) = 1338: V(2) = 665.5: V(3) = 1.62: V(4) = 0.304: V(5) = 0.26: V(6) =
0.85: V(7) = 1.93: V(8) = 2.1: V(9) = 3.09
               Case 0: V(1) = 1262: V(2) = 638.6: V(3) = 3.48: V(4) = 0.298: V(5) = 0.25: V(6) =
0.92: V(7) = 4.24: V(8) = 2.125: V(9) = 2.48
              Case 20: V(1) = 1187: V(2) = 610.3: V(3) = 6.69: V(4) = 0.286: V(5) = 0.22: V(6) =
1.01: V(7) = 8.46: V(8) = 2.15: V(9) = 2.133
              Case 40: V(1) = 1101: V(2) = 579.5: V(3) = 12#: V(4) = 0.272: V(5) = 0.2: V(6) =
1.16: V(7) = 15.34: V(8) = 2.16: V(9) = 1.833
              Case 60: V(1) = 1026: V(2) = 545.2: V(3) = 20.49: V(4) = 0.255: V(5) = 0.17: V(6) =
1.27: V(7) = 29.8: V(8) = 2.18: V(9) = 1.367
              Case 80: V(1) = 819: V(2) = 505.7: V(3) = 34.13: V(4) = 0.235: V(5) = 0.15: V(6) =
1.4: V(7) = 40.9: V(8) = 2.21: V(9) = 0.767
             Case 100: V(1) = 699: V(2) = 455.1: V(3) = 54.92: V(4) = 0.212: V(5) = 0.11: V(6) =
1.6: V(7) = 63.12: V(8) = 2.26: V(9) = 0.5
```

```
                Case 120: V(1) = 428: V(2) = 374.4: V(3) = 113.16: V(4) = 0.184: V(5) = 0.07: V(6)
= 1.89: V(7) = 90.44: V(8) = 2.292: V(9) = 0.15
                Case Else: INTERPOLA = 1
               End Select
   Case "NITROGENO": Select Case TEMPERATURA
                Case -203: V(1) = 210#: V(2) = 830#: V(3) = 1.84: V(4) = 0.15: V(5) = 2.48: V(6) =
0.48: V(7) = 0.48: V(8) = 1.083: V(9) = 1.054
                Case -200: V(1) = 205.5: V(2) = 818#: V(3) = 3.81: V(4) = 0.146: V(5) = 1.94: V(6)
= 0.51: V(7) = 0.74: V(8) = 1.082: V(9) = 0.985
                Case -195: V(1) = 198#: V(2) = 798#: V(3) = 7.1: V(4) = 0.139: V(5) = 1.51: V(6) =
0.56: V(7) = 1.62: V(8) = 1.079: V(9) = 0.87
                Case -190: V(1) = 190.5: V(2) = 778#: V(3) = 10.39: V(4) = 0.132: V(5) = 1.26:
V(6) = 0.6: V(7) = 3.31: V(8) = 1.0775: V(9) = 0.766
                Case -185: V(1) = 183#: V(2) = 758#: V(3) = 13.68: V(4) = 0.125: V(5) = 1.08: V(6)
= 0.65: V(7) = 4.99: V(8) = 1.074: V(9) = 0.662
                Case -180: V(1) = 173.7: V(2) = 732#: V(3) = 22.05: V(4) = 0.117: V(5) = 0.95:
V(6) = 0.71: V(7) = 6.69: V(8) = 1.072: V(9) = 0.561
                Case -175: V(1) = 163.2: V(2) = 702#: V(3) = 33.8: V(4) = 0.11: V(5) = 0.86: V(6) =
0.77: V(7) = 8.37: V(8) = 1.07: V(9) = 0.464
                Case -170: V(1) = 152.7: V(2) = 672#: V(3) = 45.55: V(4) = 0.103: V(5) = 0.8: V(6)
= 0.83: V(7) = 1.07: V(8) = 1.068: V(9) = 0.367
                Case -160: V(1) = 124.2: V(2) = 603#: V(3) = 80.9: V(4) = 0.089: V(5) = 0.72: V(6)
= 1#: V(7) = 19.37: V(8) = 1.063: V(9) = 0.185
                Case -150: V(1) = 66.8: V(2) = 474#: V(3) = 194#: V(4) = 0.075: V(5) = 0.65: V(6) =
1.5: V(7) = 28.8: V(8) = 1.059: V(9) = 0.11
                Case Else: INTERPOLA = 1
               End Select
   Case "SODIO": Select Case TEMPERATURA
                Case 500: V(1) = 4370: V(2) = 828.1: V(3) = 0.003: V(4) = 70.08: V(5) = 0.24: V(6) =
0.18: V(7) = 0.01: V(8) = 9.04: V(9) = 1.51
                Case 600: V(1) = 4243: V(2) = 805.4: V(3) = 0.013: V(4) = 64.62: V(5) = 0.21: V(6) =
0.19: V(7) = 0.04: V(8) = 9.04: V(9) = 1.42
                Case 700: V(1) = 4090: V(2) = 763.5: V(3) = 0.05: V(4) = 60.81: V(5) = 0.19: V(6) =
0.2: V(7) = 0.15: V(8) = 9.04: V(9) = 1.33
                Case 800: V(1) = 3977: V(2) = 757.3: V(3) = 0.134: V(4) = 57.81: V(5) = 0.18: V(6) =
0.22: V(7) = 0.47: V(8) = 9.04: V(9) = 1.23
                Case 900: V(1) = 3913: V(2) = 745.4: V(3) = 0.306: V(4) = 53.35: V(5) = 0.17: V(6) =
0.23: V(7) = 1.25: V(8) = 9.04: V(9) = 1.13
               Case 1000: V(1) = 3827: V(2) = 725.4: V(3) = 0.667: V(4) = 49.08: V(5) = 0.16: V(6)
= 0.24: V(7) = 2.81: V(8) = 9.04: V(9) = 1.04
               Case 1100: V(1) = 3690: V(2) = 690.8: V(3) = 1.306: V(4) = 45.08: V(5) = 0.16: V(6)
= 0.25: V(7) = 5.49: V(8) = 9.04: V(9) = 0.95
               Case 1200: V(1) = 3577: V(2) = 669#: V(3) = 2.303: V(4) = 41.08: V(5) = 0.15: V(6)
= 0.26: V(7) = 9.59: V(8) = 9.04: V(9) = 0.86
               Case 1300: V(1) = 3477: V(2) = 654#: V(3) = 3.622: V(4) = 37.08: V(5) = 1.15: V(6)
= 0.27: V(7) = 15.91: V(8) = 9.04: V(9) = 0.77
               Case Else: INTERPOLA = 1
```

```
            End Select
   Case "LITIO": Select Case TEMPERATURA
                Case 1030: V(1) = 20500: V(2) = 450: V(3) = 0.005: V(4) = 67: V(5) = 0.24: V(6) =
1.67: V(7) = 0.07: V(8) = 0.532: V(9) = 2.9
                Case 1130: V(1) = 20100: V(2) = 440: V(3) = 0.013: V(4) = 69: V(5) = 0.24: V(6) =
1.74: V(7) = 0.17: V(8) = 0.532: V(9) = 2.85
                Case 1230: V(1) = 20000: V(2) = 430: V(3) = 0.028: V(4) = 70: V(5) = 0.23: V(6) =
1.83: V(7) = 0.45: V(8) = 0.532: V(9) = 2.75
                Case 1330: V(1) = 19700: V(2) = 420: V(3) = 0.057: V(4) = 69: V(5) = 0.23: V(6) =
1.91: V(7) = 0.96: V(8) = 0.532: V(9) = 2.6
                Case 1430: V(1) = 19200: V(2) = 410: V(3) = 0.108: V(4) = 68: V(5) = 0.23: V(6) =
2#: V(7) = 1.85: V(8) = 0.532: V(9) = 2.4
                Case 1530: V(1) = 18900: V(2) = 405: V(3) = 0.193: V(4) = 65: V(5) = 0.23: V(6) =
2.1: V(7) = 3.3: V(8) = 0.532: V(9) = 2.25
                Case 1630: V(1) = 18500: V(2) = 400: V(3) = 0.34: V(4) = 62: V(5) = 0.23: V(6) =
2.17: V(7) = 5.3: V(8) = 0.532: V(9) = 2.1
                Case 1730: V(1) = 18200: V(2) = 398: V(3) = 0.49: V(4) = 59: V(5) = 0.23: V(6) =
2.26: V(7) = 8.9: V(8) = 0.532: V(9) = 2.05
                Case Else: INTERPOLA = 1
            End Select
   Case "METANOL": Select Case TEMPERATURA
                Case -50: V(1) = 1194: V(2) = 843.5: V(3) = 0.01: V(4) = 0.21: V(5) = 1.7: V(6) =
0.72: V(7) = 0.01: V(8) = 1.2: V(9) = 3.26
                Case -30: V(1) = 1187: V(2) = 833.5: V(3) = 0.01: V(4) = 0.208: V(5) = 1.3: V(6) =
0.78: V(7) = 0.02: V(8) = 1.27: V(9) = 2.95
                Case -10: V(1) = 1182: V(2) = 818.7: V(3) = 0.04: V(4) = 0.206: V(5) = 0.945: V(6) =
0.85: V(7) = 0.04: V(8) = 1.34: V(9) = 2.63
                 Case 10: V(1) = 1175: V(2) = 800.5: V(3) = 0.12: V(4) = 0.204: V(5) = 0.701: V(6) =
0.91: V(7) = 0.1: V(8) = 1.4: V(9) = 2.36
                 Case 30: V(1) = 1155: V(2) = 782#: V(3) = 0.31: V(4) = 0.203: V(5) = 0.521: V(6) =
0.98: V(7) = 0.25: V(8) = 1.47: V(9) = 2.18
                 Case 50: V(1) = 1125: V(2) = 764.1: V(3) = 0.77: V(4) = 0.202: V(5) = 0.399: V(6) =
1.04: V(7) = 0.55: V(8) = 1.54: V(9) = 2.01
                 Case 70: V(1) = 1085: V(2) = 746.2: V(3) = 1.47: V(4) = 0.201: V(5) = 0.314: V(6) =
1.11: V(7) = 1.31: V(8) = 1.61: V(9) = 1.85
                 Case 90: V(1) = 1035: V(2) = 724.4: V(3) = 3.01: V(4) = 0.199: V(5) = 0.259: V(6) =
1.19: V(7) = 2.69: V(8) = 1.79: V(9) = 1.66
                Case 110: V(1) = 980: V(2) = 703.6: V(3) = 5.64: V(4) = 0.197: V(5) = 0.211: V(6) =
1.26: V(7) = 4.98: V(8) = 1.92: V(9) = 1.46
                Case 130: V(1) = 920: V(2) = 685.2: V(3) = 9.81: V(4) = 0.195: V(5) = 0.166: V(6) =
1.31: V(7) = 7.86: V(8) = 1.92: V(9) = 1.25
                Case 150: V(1) = 850: V(2) = 653.2: V(3) = 15.9: V(4) = 0.193: V(5) = 0.138: V(6) =
1.38: V(7) = 8.94: V(8) = 1.92: V(9) = 1.04
                Case Else: INTERPOLA = 1
               End Select
   Case "ACETONA": Select Case TEMPERATURA
```

```
            Case -40: V(1) = 660#: V(2) = 860#: V(3) = 0.03: V(4) = 0.2: V(5) = 0.8: V(6) = 0.68:
V(7) = 0.01: V(8) = 2#: V(9) = 3.1
            Case -20: V(1) = 615.6: V(2) = 845#: V(3) = 0.1: V(4) = 0.189: V(5) = 0.5: V(6) =
0.73: V(7) = 0.03: V(8) = 2.06: V(9) = 2.76
             Case 0: V(1) = 564#: V(2) = 812#: V(3) = 0.26: V(4) = 0.183: V(5) = 0.395: V(6) =
0.78: V(7) = 0.1: V(8) = 2.11: V(9) = 2.62
            Case 20: V(1) = 552#: V(2) = 790#: V(3) = 0.64: V(4) = 0.181: V(5) = 0.323: V(6) =
0.82: V(7) = 0.27: V(8) = 2.16: V(9) = 2.37
            Case 40: V(1) = 536#: V(2) = 768#: V(3) = 1.05: V(4) = 0.175: V(5) = 0.269: V(6) =
0.86: V(7) = 0.6: V(8) = 2.22: V(9) = 2.12
            Case 60: V(1) = 517#: V(2) = 744#: V(3) = 2.37: V(4) = 0.168: V(5) = 0.226: V(6) =
0.9: V(7) = 1.15: V(8) = 2.28: V(9) = 1.86
            Case 80: V(1) = 495#: V(2) = 719#: V(3) = 4.3: V(4) = 0.16: V(5) = 0.192: V(6) =
0.95: V(7) = 2.15: V(8) = 2.34: V(9) = 1.62
            Case 100: V(1) = 472#: V(2) = 689.6: V(3) = 6.94: V(4) = 0.148: V(5) = 0.17: V(6) =
0.98: V(7) = 4.43: V(8) = 2.39: V(9) = 1.34
            Case 120: V(1) = 426.1: V(2) = 660.3: V(3) = 11.02: V(4) = 0.135: V(5) = 0.148:
V(6) = 0.99: V(7) = 6.7: V(8) = 2.45: V(9) = 1.07
            Case 140: V(1) = 394.4: V(2) = 631.8: V(3) = 18.61: V(4) = 0.126: V(5) = 0.132:
V(6) = 1.03: V(7) = 10.49: V(8) = 2.5: V(9) = 0.81
            Case Else: INTERPOLA = 1
           End Select
  Case "POTASIO": Select Case TEMPERATURA
            Case 350: V(1) = 2093: V(2) = 763.1: V(3) = 0.002: V(4) = 51.08: V(5) = 0.21: V(6) =
0.15: V(7) = 0.01: V(8) = 5.32: V(9) = 9.5
            Case 400: V(1) = 2078: V(2) = 748.1: V(3) = 0.006: V(4) = 49.08: V(5) = 0.19: V(6) =
0.16: V(7) = 0.01: V(8) = 5.32: V(9) = 9.04
            Case 450: V(1) = 2060: V(2) = 735.4: V(3) = 0.015: V(4) = 47.08: V(5) = 0.18: V(6) =
0.16: V(7) = 0.02: V(8) = 5.32: V(9) = 8.69
            Case 500: V(1) = 2040: V(2) = 725.4: V(3) = 0.031: V(4) = 45.08: V(5) = 0.17: V(6) =
0.17: V(7) = 0.05: V(8) = 5.32: V(9) = 8.44
            Case 550: V(1) = 2020: V(2) = 715.4: V(3) = 0.062: V(4) = 43.31: V(5) = 0.15: V(6) =
0.17: V(7) = 0.1: V(8) = 5.32: V(9) = 8.16
            Case 600: V(1) = 2000: V(2) = 705.4: V(3) = 0.111: V(4) = 41.81: V(5) = 0.14: V(6) =
0.18: V(7) = 0.19: V(8) = 5.32: V(9) = 7.86
            Case 650: V(1) = 1980: V(2) = 695.4: V(3) = 0.193: V(4) = 40.08: V(5) = 0.13: V(6) =
0.19: V(7) = 0.35: V(8) = 5.32: V(9) = 7.51
            Case 700: V(1) = 1969: V(2) = 685.4: V(3) = 0.314: V(4) = 38.08: V(5) = 0.12: V(6) =
0.19: V(7) = 0.61: V(8) = 5.32: V(9) = 7.12
            Case 750: V(1) = 1938: V(2) = 675.4: V(3) = 0.486: V(4) = 36.31: V(5) = 0.12: V(6) =
0.2: V(7) = 0.99: V(8) = 5.32: V(9) = 6.72
            Case 800: V(1) = 1913: V(2) = 665.4: V(3) = 0.716: V(4) = 34.81: V(5) = 0.11: V(6) =
0.2: V(7) = 1.55: V(8) = 5.32: V(9) = 6.32
            Case 850: V(1) = 1883: V(2) = 653.1: V(3) = 1.054: V(4) = 33.31: V(5) = 0.1: V(6) =
0.21: V(7) = 2.34: V(8) = 5.32: V(9) = 5.92
            Case Else: INTERPOLA = 1
           End Select
```

```
   Case "ETANOL": Select Case TEMPERATURA
                Case -30: V(1) = 939.4: V(2) = 825:  V(3) = 0.02: V(4) = 0.177: V(5) = 3.4: V(6) =
0.75: V(7) = 0.01: V(8) = 1.25: V(9) = 2.76
                Case -10: V(1) = 928.7: V(2) = 813:  V(3) = 0.03: V(4) = 0.173: V(5) = 2.2: V(6) =
0.8: V(7) = 0.02: V(8) = 1.31: V(9) = 2.66
                 Case 10: V(1) = 904.8: V(2) = 798:  V(3) = 0.05: V(4) = 0.17: V(5) = 1.5: V(6) =
0.85: V(7) = 0.03: V(8) = 1.37: V(9) = 2.57
                 Case 30: V(1) = 888.6: V(2) = 781:  V(3) = 0.38: V(4) = 0.168: V(5) = 1.02: V(6) =
0.91: V(7) = 0.1: V(8) = 1.44: V(9) = 2.44
                 Case 50: V(1) = 872.3: V(2) = 762.2: V(3) = 0.72: V(4) = 0.166: V(5) = 0.72: V(6) =
0.97: V(7) = 0.29: V(8) = 1.51: V(9) = 2.31
                 Case 70: V(1) = 858.3: V(2) = 743.1: V(3) = 1.32: V(4) = 0.165: V(5) = 0.51: V(6) =
1.02: V(7) = 0.76: V(8) = 1.58: V(9) = 2.17
                 Case 90: V(1) = 832.1: V(2) = 725.3: V(3) = 2.59: V(4) = 0.163: V(5) = 0.37: V(6) =
1.07: V(7) = 1.43: V(8) = 1.65: V(9) = 2.04
                Case 110: V(1) = 786.6: V(2) = 704.1: V(3) = 5.17: V(4) = 0.16: V(5) = 0.28: V(6) =
1.13: V(7) = 2.66: V(8) = 1.72: V(9) = 1.89
                Case 130: V(1) = 734.4: V(2) = 678.7: V(3) = 9.25: V(4) = 0.159: V(5) = 0.21: V(6) =
1.18: V(7) = 4.3: V(8) = 1.78: V(9) = 1.75
               Case Else: INTERPOLA = 1
              End Select
 End Select
 'Calor Latente de Vaporización
 LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.Text_hfg.Text = V(1) * 1000
 'Densidad del líquido
 LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.Text_rol.Text = V(2)
 'Densidad del Vapor
 LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.Text_rov.Text = V(3)
 'Conductividad Termica del líquido
 LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.Text_kl.Text = V(4)
 'Viscosidad del líquido
 LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.Text_ml.Text = V(5) * 0.001
 'Viscosidad del vapor
 LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.Text_mv.Text = V(6) * 0.00001
 'Presión del vapor
 LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.Text_Pv.Text = V(7) * 100000
 'Calor específico del vapor
 LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.Text_Qev.Text = V(8) * 1000
 'Tensión superficial del líquido
 LIMITES_DE_FUNCIONAMIENTO.Text_sigmal.Text = V(9) / 100
 End Function

Function TEMPERATURA_DEL_VAPOR(FLUIDO As String, PRESION As Double)
Dim P(10), T(10) As Double
 Select Case FLUIDO
   Case "AGUA": Select Case PRESION
              Case 2000: Tv = 20
```

```
            Case 7000: Tv = 40
            Case 20000: Tv = 60
            Case 47000: Tv = 80
            Case 101000: Tv = 100
            Case 202000: Tv = 120
            Case 390000: Tv = 140
            Case 644000: Tv = 160
            Case 1004000: Tv = 180
            Case 1601900: Tv = 200
            Case Else:  P(1) = 2000: T(1) = 20
                    P(2) = 7000: T(2) = 40
                    P(3) = 20000: T(3) = 60
                    P(4) = 47000: T(4) = 80
                    P(5) = 101000: T(5) = 100
                    P(6) = 202000: T(6) = 120
                    P(7) = 390000: T(7) = 140
                    P(8) = 644000: T(8) = 160
                    P(9) = 1004000: T(9) = 180
                    P(10) = 1601900: T(10) = 200
                    For ij = 1 To 9
                    If (PRESION > P(ij) And (PRESION < P(ij + 1))) Then
                                                Tv = Interpolacion(PRESION, P(ij), P(ij + 1), zx,
T(ij), T(ij + 1))
                                                Exit For
                    End If
                    Next ij
          End Select
  Case "HEPTANO": Select Case PRESION
              Case 1000: Tv = -20
              Case 2000: Tv = 0
              Case 8000: Tv = 20
              Case 20000: Tv = 40
              Case 32000: Tv = 60
              Case 62000: Tv = 80
              Case 110000: Tv = 100
              Case 185000: Tv = 120
              Case Else:  P(1) = 1000: T(1) = -20
                      P(2) = 2000: T(2) = 0
                      P(3) = 8000: T(3) = 20
                      P(4) = 20000: T(4) = 40
                      P(5) = 32000: T(5) = 60
                      P(6) = 62000: T(6) = 80
                      P(7) = 110000: T(7) = 100
                      P(8) = 1850000: T(8) = 120
                      For ij = 1 To 7
                      If (PRESION > P(ij) And (PRESION < P(ij + 1))) Then
```

```
                                        Tv = Interpolacion(PRESION, P(ij), P(ij + 1), zx,
T(ij), T(ij + 1))
                                        Exit For
                    End If
                    Next ij
            End Select
  Case "AMONIACO": Select Case PRESION
                Case 27000: Tv = -60
                Case 76000: Tv = -40
                Case 193000: Tv = -20
                Case 424000: Tv = 0
                Case 846000: Tv = 20
                Case 1534000: Tv = 40
                Case 2980000: Tv = 60
                Case 4090000: Tv = 80
                Case 6312000: Tv = 100
                Case 9044000: Tv = 120
                Case Else: P(1) = 27000: T(1) = -60
                    P(2) = 76000: T(2) = -40
                    P(3) = 193000: T(3) = -20
                    P(4) = 424000: T(4) = 0
                    P(5) = 846000: T(5) = 20
                    P(6) = 1534000: T(6) = 40
                    P(7) = 2980000: T(7) = 60
                    P(8) = 4090000: T(8) = 80
                    P(9) = 6312000: T(9) = 100
                    P(10) = 9044000: T(10) = 120
                    For ij = 1 To 9
                    If (PRESION > P(ij) And (PRESION < P(ij + 1))) Then
                                        Tv = Interpolacion(PRESION, P(ij), P(ij + 1), zx,
T(ij), T(ij + 1))
                                        Exit For
                    End If
                    Next ij
            End Select
  Case "NITROGENO": Select Case PRESION
                Case 48000: Tv = -203
                Case 74000: Tv = -200
                Case 162000: Tv = -195
                Case 331000: Tv = -190
                Case 499000: Tv = -185
                Case 669000: Tv = -180
                Case 837000: Tv = -175
                Case 107000: Tv = -170
                Case 1937000: Tv = -160
                Case 2880000: Tv = -150
                Case Else: P(1) = 48000: T(1) = -203
```

```
                P(2) = 74000: T(2) = -200
                P(3) = 162000: T(3) = -195
                P(4) = 331000: T(4) = -190
                P(5) = 499000: T(5) = -185
                P(6) = 669000: T(6) = -180
                P(7) = 837000: T(7) = -175
                P(8) = 107000: T(8) = -170 'OjO checar este valor
                P(9) = 1937000: T(9) = -160
                P(10) = 2880000: T(10) = -150
                For ij = 1 To 9
                If (PRESION > P(ij) And (PRESION < P(ij + 1))) Then
                                        Tv = Interpolacion(PRESION, P(ij), P(ij + 1), zx,
T(ij), T(ij + 1))
                                        Exit For
                End If
                Next ij
            End Select
  Case "SODIO": Select Case PRESION
            Case 1000: Tv = 500
            Case 4000: Tv = 600
            Case 15000: Tv = 700
            Case 47000: Tv = 800
            Case 125000: Tv = 900
            Case 281000: Tv = 1000
            Case 549000: Tv = 1100
            Case 959000: Tv = 1200
            Case 1591000: Tv = 1300
            Case Else: P(1) = 1000: T(1) = 500
                P(2) = 4000: T(2) = 600
                P(3) = 15000: T(3) = 700
                P(4) = 47000: T(4) = 800
                P(5) = 125000: T(5) = 900
                P(6) = 281000: T(6) = 1000
                P(7) = 549000: T(7) = 1100
                P(8) = 959000: T(8) = 1200
                P(9) = 1591000: T(9) = 1300
                For ij = 1 To 8
                If (PRESION > P(ij) And (PRESION < P(ij + 1))) Then
                                        Tv = Interpolacion(PRESION, P(ij), P(ij + 1), zx,
T(ij), T(ij + 1))
                                        Exit For
                End If
                Next ij
            End Select
  Case "LITIO": Select Case PRESION
            Case 7000: Tv = 1030
            Case 17000: Tv = 1130
```

```
            Case 45000: Tv = 1230
            Case 96000: Tv = 1330
            Case 185000: Tv = 1430
            Case 330000: Tv = 1530
            Case 530000: Tv = 1630
            Case 890000: Tv = 1730
            Case Else: P(1) = 7000: T(1) = 1030
                  P(2) = 17000: T(2) = 1130
                  P(3) = 45000: T(3) = 1230
                  P(4) = 96000: T(4) = 1330
                  P(5) = 185000: T(5) = 1430
                  P(6) = 330000: T(6) = 15030
                  P(7) = 530000: T(7) = 1630
                  P(8) = 890000: T(8) = 1730
                  For ij = 1 To 7
                  If (PRESION > P(ij) And (PRESION < P(ij + 1))) Then
                                          Tv = Interpolacion(PRESION, P(ij), P(ij + 1), zx,
T(ij), T(ij + 1))
                                          Exit For
                  End If
                  Next ij
            End Select
  Case "METANOL": Select Case PRESION
            Case 1000: Tv = -50
            Case 2000: Tv = -30
            Case 4000: Tv = -10
            Case 10000: Tv = 10
            Case 25000: Tv = 30
            Case 55000: Tv = 50
            Case 131000: Tv = 70
            Case 269000: Tv = 90
            Case 498000: Tv = 110
            Case 786000: Tv = 130
            Case 894000: Tv = 150
            Case Else: P(1) = 1000: T(1) = -50
                  P(2) = 2000: T(2) = -30
                  P(3) = 4000: T(3) = -10
                  P(4) = 10000: T(4) = 10
                  P(5) = 25000: T(5) = 30
                  P(6) = 55000: T(6) = 50
                  P(7) = 131000: T(7) = 70
                  P(8) = 269000: T(8) = 90
                  P(9) = 498000: T(9) = 110
                  P(10) = 786000: T(10) = 130
                  P(11) = 894000: T(11) = 150
                  For ij = 1 To 10
                  If (PRESION > P(ij) And (PRESION < P(ij + 1))) Then
```

```
                                        Tv = Interpolacion(PRESION, P(ij), P(ij + 1), zx,
T(ij), T(ij + 1))
                                        Exit For
                End If
                Next ij
            End Select
  Case "ACETONA": Select Case PRESION
            Case 1000: Tv = -40
            Case 3000: Tv = -20
            Case 10000: Tv = 0
            Case 27000: Tv = 20
            Case 60000: Tv = 40
            Case 115000: Tv = 60
            Case 215000: Tv = 80
            Case 443000: Tv = 100
            Case 670000: Tv = 120
            Case 1049000: Tv = 140
            Case Else: P(1) = 1000: T(1) = -40
                P(2) = 3000: T(2) = -20
                P(3) = 10000: T(3) = 0
                P(4) = 27000: T(4) = 20
                P(5) = 60000: T(5) = 40
                P(6) = 115000: T(6) = 60
                P(7) = 215000: T(7) = 80
                P(8) = 443000: T(8) = 100
                P(9) = 670000: T(9) = 120
                P(10) = 1049000: T(10) = 140
                For ij = 1 To 9
                If (PRESION > P(ij) And (PRESION < P(ij + 1))) Then
                                        Tv = Interpolacion(PRESION, P(ij), P(ij + 1), zx,
T(ij), T(ij + 1))
                                        Exit For
                End If
                Next ij
            End Select
  Case "POTASIO": Select Case PRESION
            Case 1000: Tv = 350
            Case 1500: Tv = 400
            Case 2000: Tv = 450
            Case 5000: Tv = 500
            Case 10000: Tv = 550
            Case 19000: Tv = 600
            Case 35000: Tv = 650
            Case 61000: Tv = 700
            Case 99000: Tv = 750
            Case 155000: Tv = 800
            Case 234000: Tv = 850
```

```
            Case Else: P(1) = 1000: T(1) = 350

                    P(2) = 1500: T(2) = 400

                    P(3) = 2000: T(3) = 450
                    P(4) = 50000: T(4) = 500
                    P(5) = 10000: T(5) = 550
                    P(6) = 19000: T(6) = 600
                    P(7) = 35000: T(7) = 650
                    P(8) = 61000: T(8) = 700
                    P(9) = 99000: T(9) = 750
                    P(10) = 155000: T(10) = 800
                    P(11) = 234000: T(11) = 850
                    For ij = 1 To 10
                    If (PRESION > P(ij) And (PRESION < P(ij + 1))) Then
                                                Tv = Interpolacion(PRESION, P(ij), P(ij + 1), zx,
T(ij), T(ij + 1))
                                                Exit For
                    End If
                    Next ij
                End Select
      Case "ETANOL": Select Case PRESION
                    Case 1000: Tv = -30
                    Case 2000: Tv = -10
                    Case 3000: Tv = 10
                    Case 10000: Tv = 30
                    Case 29000: Tv = 50
                    Case 76000: Tv = 70
                    Case 143000: Tv = 90
                    Case 266000: Tv = 110
                    Case 430000: Tv = 130
                    Case Else: P(1) = 1000: T(1) = -30
                            P(2) = 2000: T(2) = -10
                            P(3) = 3000: T(3) = 10
                            P(4) = 10000: T(4) = 30
                            P(5) = 29000: T(5) = 50
                            P(6) = 76000: T(6) = 70
                            P(7) = 143000: T(7) = 90
                            P(8) = 266000: T(8) = 110
                            P(9) = 430000: T(9) = 130
                            For ij = 1 To 8
                            If (PRESION > P(ij) And (PRESION < P(ij + 1))) Then
                                                Tv = Interpolacion(PRESION, P(ij), P(ij + 1), zx,
T(ij), T(ij + 1))
                                                Exit For
                            End If
                            Next ij
```

```
            End Select

 End Select
 Tv = Tv + 273.15
End Function

Function CALORES_ESPECIFICOS(VAPOR_GAS As String)
Select Case VAPOR_GAS
  Case "MONOATOMICO": gamav = 1.67
  Case "DIATOMICO": gamav = 1.4
  Case "POLIATOMICO": gamav = 1.33
End Select
End Function
Function Redondea(cadena As String)
  For u = 1 To Len(cadena)
    C = Mid(cadena, u, 1)
    If (C = ".") Then Exit For
  Next u
  For uu = 1 To Len(cadena)
    C = Mid(cadena, uu, 1)
    If (C = "E") Then Exit For
  Next uu
  num1 = Mid(cadena, 1, u + 2)
  num2 = Mid(cadena, uu, 4)
  numfinal = num1 + num2
  Redondea = numfinal
End Function

Function REVISA(VALOR As String)
  For i = 1 To Len(VALOR)
    If (Mid(VALOR, i, 1) = ".") Then P = P + 1
    If (P > 1) Then
            M = MsgBox("SOLO PUEDE INTRODUCIR UN PUNTO", vbOKOnly, "AVISO")
            VALOR = Mid(VALOR, 1, Len(VALOR) - 1)
    End If
  Next i
  REVISA = VALOR
End Function
```

Código Fuente de las Condicionantes para el Cálculo de los Límites de Funcionamiento en Caloductos (CCLFC)

```
Private Sub Form_Activate()
LabelPv.Caption = Pv
LabelAPva.Caption = APva
LabelResultado.Caption = APva / Pv
LimiteSonicoResultado.Caption = Machv
LimiteArrastreResultado.Caption = We
End Sub
```

BIOGRAFIA DE LOS AUTORES

Gerardo Galindo Ramos es ingeniero bioquímico egresado del Instituto Tecnológico de Acapulco, hoy Tecnológico Nacional de México campus Acapulco, maestro en ingeniería mecánica por la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del Instituto Politécnico Nacional y doctor en ciencias de la educación por el Centro Universitario México. Cuenta con 10 años de experiencia profesional en la industria de alimentos y 30 años de experiencia en la docencia a nivel superior desde sus inicios y hasta la actualidad en el Tecnológico Nacional de México campus Acapulco.

Beatriz Gabriel Salmerón es ingeniera bioquímica egresada del Instituto Tecnológico de Acapulco, hoy Tecnológico Nacional de México campus Acapulco, maestra en Ciencias de la Educación por el Centro Universitario México y doctora en Ciencias de la Educación por el Instituto de Estudios Universitarios. Cuenta con 10 años de experiencia profesional y 20 años de experiencia en la docencia a nivel superior desde sus inicios y hasta la actualidad en el Tecnológico Nacional de México campus Acapulco.

Mayo 2024 - CID - Centro de Investigación y Desarrollo
Copyright © - CID - Centro de Investigación y Desarrollo
Copyright del texto © 2024 de Autores
Formato: PDF
Tamaño: A4 210 x 297 mm
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader
Modo de acceso: World Wide Web
biblioteca.ciencialatina.org
editorial@ciencialatina.org
Atención por WhatsApp al +52 22 2690 3834