

**Rogelio González Pérez**

**CRIOGENIA**  
**Cálculo de equipos**  
**Recipientes a presión**



# P

## Prólogo

El libro que se presenta, denominado *Criogenia. Cálculo de equipos. Recipientes a presión*, es fruto del trabajo desarrollado por D. Rogelio González Pérez, escrito en su etapa de jubilación, recogiendo su experiencia en el trabajo durante más de cuarenta años, dedicado a la actividad industrial en el campo criogénico y ocupando puestos de trabajo de Dirección de Ingeniería y Construcción, de Dirección General y de Explotación en una firma internacional de nombre reconocido.

En la actividad de trabajo en este campo, la colaboración con empresas y técnicos del sector ha sido muy directa, tanto a nivel nacional como internacional, y particularmente europeo, compartiendo asimismo, experiencias y participando en comisiones técnicas de BEQUINOR y comités de normalización AENOR-AFNOR, además de haber sido miembro titular de la Société Française des Ingénieurs Scientifiques et Techniciens en Soudage – SIS.

Este libro, denominado abreviadamente CERAP, es ampliación y actualización del libro de D. Rogelio González Pérez publicado en el año 1989 por el Ministerio de Industria, Energía y Comercio, con el título de RAP (*Recipientes y Aparatos a Presión*).

Está estructurado en diez partes, denominadas de I a X, con un total de 78 Capítulos, desarrollando fundamentalmente el alcance a los fluidos de bajas temperaturas, criogénicas, recogiendo los datos y características de los fluidos implicados, así como su aplicación al diseño mecánico y estructural, utilización y manipulación, comprendiendo el desarrollo apropiado para el cálculo y diseño de aparatos a presión para el almacenamiento, producción y transporte, cambiadores de calor y gasificación.

CERAP comporta aproximadamente un total de 1.000 páginas en las que se ilustran unas 1.200 figuras, unos 450 gráficos, unas 280 tablas y más de 1.000 ecuaciones.

En CERAP se ha tratado de facilitar la localización de datos de diseño y cálculo y su aplicación a la parte implicada, recogiendo lo fundamental de códigos y normas europeas, en lo que afecta a presión interior, exterior, seguridades, normalización y reglamentación, etc.

CERAP comprende ampliamente detalles para la construcción, soldadura y diseño definidos, incluyendo un amplio resumen general de normas y la actualización de la reglamentación existente aplicable a los diferentes equipos y aparatos a presión.

CERAP tiene como objetivo que su alcance no solo sea para la aplicación y desarrollo industrial, sino también hacia los estudiosos que pretendan una formación profesional, ingenieros y técnicos, profesionales en general, estudiantes, pequeña y mediana empresa, universidad y para aquellos otros que consideren su utilidad. El libro se ha escrito pensando en todos estos campos.

En el campo profesional doy mi agradecimiento a las entidades, empresas (particularmente a Air Liquide, S.A.), asociaciones de normalización-reglamentación, como BEQUINOR-AENOR, y en el ámbito personal a D. José M<sup>a</sup> Storch de Gracia.

CERAP queda abierto para su mejor uso, adaptación y evolución tecnológica, sin olvidar la responsabilidad y el buen hacer, y sobre todo en lo que afecta a la CALIDAD y SEGURIDAD en el hechurado, construcción y diseño de los equipos y afines, así como en su uso, utilización y manipulación de los equipos y fluidos.

# I

## Índice

### ÍNDICE GENERAL CERAP

<b>Parte I.</b>	Gases criogénicos y gases líquidos presurizados.....	1
<b>Parte II.</b>	Cambiadores de calor.....	185
<b>Parte III.</b>	Recipientes criogénicos .....	259
<b>Parte IV.</b>	Viento y seísmo.....	315
<b>Parte V.</b>	Materiales.....	341
<b>Parte VI.</b>	Reglas de cálculo .....	383
<b>Parte VII.</b>	Seguridades.....	575
<b>Parte VIII.</b>	Soldadura .....	607
<b>Parte IX.</b>	Fabricación.....	705
<b>Parte X.</b>	Apéndices.....	719
	<b>Bibliografía recomendada</b> .....	865

### PARTE I. GASES CRIOGÉNICOS Y GASES LÍQUIDOS PRESURIZADOS

<b>1. GENERALIDADES GASES</b> .....	<b>5</b>
LA CRIOGENIA .....	5
HISTORIA Y ANTECEDENTES .....	7
ACETILENO Y PETROLEOQUÍMICA .....	9
REFORMADO DE HIDRÓGENO AL VAPOR.....	9
PROCEDIMIENTO DE OXIDACIÓN PARCIAL.....	10
PROCEDIMIENTO DE PIRÓLISIS TÉRMICA.....	10
PIRÓLISIS ARCO ELÉCTRICO.....	10
GENERALIDADES FISICOQUÍMICAS .....	10
Masa volumétrica .....	10
Densidad relativa.....	10
Consecuencias prácticas.....	11
Constitución de la materia. El átomo .....	11
Cuerpo simple y compuesto .....	13
Acción del CO <sub>2</sub> en cuerpos simples .....	13
El mol.....	13
ENLACES. DISOCIACIÓN .....	14
CATALIZADORES.....	14
CAMBIOS DE ESTADO .....	14

COMBUSTIÓN.....	15
PROPAGACIÓN.....	15
DEFLAGRACIÓN.....	15
DETONACIÓN.....	16
LÍMITES DE INFLAMABILIDAD.....	16
Límite inferior inflamabilidad.....	16
Límite superior inflamabilidad.....	16
TEMPERATURA DE INFLAMACIÓN.....	16
TEMPERATURA MÍNIMA DE AUTOINFLAMACIÓN.....	16
LA BURETA CLAUDE.....	17
CRITERIO REFERENCIAS NORMAL Y ESTÁNDAR.....	17
<b>2. ACETILENO.....</b>	<b>19</b>
PROPIEDADES GENERALES DEL ACETILENO.....	19
ESTABILIDAD DEL ACETILENO.....	20
EL SOPLETE OXIACETILÉNICO.....	20
INFLAMABILIDAD DEL ACETILENO.....	21
En el aire.....	21
En el oxígeno.....	21
COMPATIBILIDAD.....	21
Reacciona de modo explosivo con los halógenos.....	21
El acetileno reacciona fácilmente con el cobre, la plata, el mercurio, para formar acetiluros.....	21
Consecuencias.....	21
Compatibilidad con las materias plásticas.....	22
SOLUBILIDAD - SIGNIFICADOS.....	22
REACCIÓN CARBURO DE CALCIO Y AGUA.....	22
COMPOSICIÓN DEL CARBURO DE CALCIO.....	22
PROPIEDADES FÍSICAS DEL ACETILENO.....	23
APLICACIONES DEL ACETILENO.....	23
TABLAS DE CARACTERÍSTICAS.....	23
<b>3. ANHÍDRIDO CARBÓNICO.....</b>	<b>29</b>
DESCUBRIMIENTO DEL GAS CARBÓNICO.....	29
FENÓMENOS NATURALES.....	29
ACTIVIDAD INDUSTRIAL.....	30
PROPIEDADES DEL GAS CARBÓNICO.....	30
MASA VOLUMÉTRICA.....	30
CONSECUENCIAS PRÁCTICAS.....	30
PROCESO Y DISTRIBUCIÓN DEL CO <sub>2</sub> .....	30
Descripción etapas proceso.....	30
EQUILIBRIO LÍQUIDO - GAS - SÓLIDO.....	32
TABLAS DE CARACTERÍSTICAS.....	33
ILUSTRACIONES.....	41
<b>4. PROTÓXIDO DE NITRÓGENO.....</b>	<b>43</b>
GENERALIDADES.....	43
CALOR ESPECÍFICO.....	43
MASA VOLUMÉTRICA.....	43
VISCOSIDAD.....	43
CONDUCTIBILIDAD TÉRMICA.....	44

UTILIZACIÓN.....	44
<b>5. AIRE .....</b>	<b>45</b>
GENERALIDADES.....	45
TABLAS DE CARACTERÍSTICAS .....	46
<b>6. NITRÓGENO .....</b>	<b>55</b>
GENERALIDADES.....	55
TABLAS DE CARACTERÍSTICAS .....	57
ILUSTRACIONES.....	65
<b>7. OXÍGENO.....</b>	<b>67</b>
GENERALIDADES.....	67
ATMÓSFERAS SOBROXIGENADAS.....	68
RIESGO DE INCENDIO CON OXÍGENO .....	69
ATMÓSFERAS SUBOXIGENADAS.....	69
EL ESPACIO CONFINADO .....	70
COMBUSTIBLES O INFLAMABLES.....	70
Deflagración .....	70
Detonación .....	70
COMBURENTES .....	70
COMPRESIÓN ADIABÁTICA.....	70
INFLAMABILIDAD DE LOS GASES.....	71
INFLAMACIÓN POR FUENTE DE IGNICIÓN .....	71
VARIACIÓN DE LÍMITES DE INFLAMACIÓN.....	72
EFECTO DE LOS GASES INERTES .....	72
ENERGÍA MÍNIMA DE INFLAMACIÓN.....	73
TEMPERATURA MÍNIMA DE AUTOINFLAMACIÓN.....	74
TABLAS DE CARACTERÍSTICAS .....	75
ILUSTRACIONES.....	83
<b>8. ARGÓN .....</b>	<b>85</b>
GENERALIDADES.....	85
ILUSTRACIONES.....	86
TABLAS DE CARACTERÍSTICAS .....	87
<b>9. HIDRÓGENO.....</b>	<b>95</b>
INTRODUCCIÓN.....	95
CARACTERÍSTICAS.....	95
LOS NÚMEROS DEL HIDRÓGENO.....	96
ENERGÍA.....	96
HIDRÓGENO INDUSTRIAL .....	96
APLICACIONES INDUSTRIALES DEL HIDRÓGENO .....	96
INFLAMACIÓN HIDRÓGENO EN EL AIRE .....	97
BOTELLAS DE HIDRÓGENO GAS.....	97
TABLAS DE CARACTERÍSTICAS .....	98
CHIMENEAS DE VENTILACIÓN .....	106
REFORMADO AL VAPOR.....	107
PROCESO DE REFORMADO AL VAPOR.....	107
Generalidades proceso SMR .....	107
Procesos pirolíticos. Descomposición directa de metano .....	109
Proceso de producción H <sub>2</sub> .....	110

INSTALACIÓN REFORMADO AL VAPOR .....	112
PROCESO DEL HIDRÓGENO INDUSTRIAL.....	114
Costes de producción .....	116
APLICACIÓN DE TECNOLOGÍA DEL HIDRÓGENO.....	116
LA PROPULSIÓN DEL HIDRÓGENO. TIPOS DE VEHÍCULOS .....	118
LA ESTACIÓN DE CARGA Y DISTRIBUCIÓN DE HIDRÓGENO .....	120
VEHÍCULOS Y LA PILA DE COMBUSTIBLE .....	121
EQUIVALENCIAS Y EMISIONES .....	122
Fuel fósil.....	122
Electricidad y baterías .....	122
<b>10. METANO Y GAS NATURAL .....</b>	<b>123</b>
GENERALIDADES.....	123
GAS NATURAL.....	124
COMPOSICIÓN GAS NATURAL - GNL.....	124
Condiciones estado líquido .....	124
Energía. Poder calorífico .....	124
Volumen líquido gas.....	124
TABLAS DE CARACTERÍSTICAS .....	125
TABLAS DATOS DEL GAS NATURAL - GNL .....	133
Características del GNL y metano.....	133
Energía de autoinflamación .....	134
Equilibrio líquido-gas.....	134
Esquema simplificado depósito GNL.....	134
Esquema planta de GNL.....	135
Planta satélite GNL de un recipiente .....	135
Planta satélite GNL de dos o más recipientes .....	136
Protección contra derrames .....	136
Dimensiones de los cubetos contra derrames.....	137
Composición de los cubetos contra derrames .....	138
Dimensiones de los cubetos múltiples contra derrames.....	139
Límites con la propiedad colindante .....	139
Alivios de válvulas de seguridad.....	139
Distancias de seguridad en plantas de GNL.....	140
ILUSTRACIONES.....	140
<b>11. ETILENO.....</b>	<b>143</b>
PROPIEDADES GENERALES DEL ETILENO .....	143
TABLAS DE CARACTERÍSTICAS .....	144
<b>12. HELIO .....</b>	<b>153</b>
CARACTERÍSTICAS.....	153
CALOR ESPECÍFICO .....	153
MASA VOLUMÉTRICA.....	153
VISCOSIDAD.....	153
CONDUCTIBILIDAD .....	153
APLICACIONES .....	154
EL CERO ABSOLUTO.....	154
<b>13. BUTANO .....</b>	<b>159</b>
GENERALIDADES.....	159

CALOR ESPECÍFICO .....	159
INFLAMABILIDAD EN EL AIRE .....	159
INFLAMABILIDAD EN EL OXÍGENO .....	159
APLICACIONES .....	160
TABLAS DE CARACTERÍSTICAS .....	160
<b>14. PROPANO.....</b>	<b>163</b>
GENERALIDADES .....	163
TABLAS DE CARACTERÍSTICAS .....	163
<b>15. PROPILENO .....</b>	<b>167</b>
GENERALIDADES .....	167
CALOR ESPECÍFICO .....	167
INFLAMABILIDAD EN EL AIRE .....	167
INFLAMABILIDAD EN EL OXÍGENO .....	167
APLICACIONES .....	168
TABLAS DE CARACTERÍSTICAS .....	168
<b>16. AMONIACO .....</b>	<b>169</b>
GENERALIDADES .....	169
INFLAMABILIDAD EN EL AIRE .....	169
INFLAMABILIDAD EN EL OXÍGENO .....	169
APLICACIONES .....	170
TABLAS DE CARACTERÍSTICAS .....	170
<b>17. TABLAS DE CARACTERÍSTICAS DE GASES.....</b>	<b>177</b>
DATOS CARACTERÍSTICOS DE LOS GASES .....	177
CALOR LATENTE DE VAPORIZACIÓN LÍQUIDO-GAS .....	181
TABLAS DE FACTORES DE CONVERSIÓN LÍQUIDO-GAS .....	183

## PARTE II. CAMBIADORES DE CALOR

<b>18. GENERALIDADES .....</b>	<b>187</b>
INTRODUCCIÓN .....	187
ENERGÍA DE INTERCAMBIO .....	187
FASES .....	188
TIPOS DE CONVECCIÓN .....	188
Convección régimen estacionario .....	189
Convección régimen transitorio .....	189
Convección régimen turbulento .....	189
FLUJOS .....	189
Flujo en contracorriente .....	190
Flujo en paralelo .....	190
TEMPERATURA MEDIA LOGARÍTMICA .....	190
CALOR SENSIBLE TOTAL DE INTERCAMBIO .....	191
Para el fluido “1” .....	191
Para el fluido “2” .....	191
BALANCE TÉRMICO .....	191
CALOR LATENTE DE VAPORIZACIÓN .....	192
CALOR TOTAL GASIFICACIÓN CRIOGÉNICOS .....	192
En el caso de la fase líquida “l” .....	192
En el caso de la fase de vaporización “v” .....	192

En el caso de la fase de gasificación “g” .....	192
TRANSFERENCIA TÉRMICA DE CALOR .....	193
TABLA DE TEMPERATURA MEDIA LOGARÍTMICA $\Delta t_m$ .....	194
GRÁFICOS DE FLUJO .....	194
SIMBOLOGÍA, TERMINOLOGÍA Y UNIDADES .....	195
<b>19. CONVECCIÓN FORZADA Y NATURAL .....</b>	<b>197</b>
CONVECCIÓN FORZADA FLUIDO “1” .....	197
Coeficiente de intercambio de fluido .....	198
Número de Reynolds fluido “1” .....	198
Número de Prandtl fluido “1” .....	198
Coeficiente viscosidad del fluido “1” .....	198
CONVECCIÓN NATURAL LIBRE FLUIDO “2” .....	198
Número de Grashof fluido “2” .....	199
Número de Prandtl fluido “2” .....	199
Número de Nusselt fluido “2” .....	199
Coeficientes suciedad fluido “2” .....	199
COEFICIENTE FINAL DE INTERCAMBIO .....	200
SIMBOLOGÍA, TERMINOLOGÍA Y UNIDADES .....	200
<b>20. CAMBIADOR TUBULAR SIMPLE CONCÉNTRICO .....</b>	<b>203</b>
CARACTERÍSTICAS .....	203
CONVECCIÓN FORZADA EN FLUIDO “2” .....	203
Número de Reynolds fluido “2” .....	204
Número de Prandtl fluido “2” .....	204
Coeficiente viscosidad fluido “2” .....	204
COEFICIENTES SUCIEDAD FLUIDO “2” .....	204
COEFICIENTE TRANSFERENCIA CALOR K .....	204
SUPERFICIE TOTAL DE INTERCAMBIO FINAL .....	204
LONGITUD TOTAL DEL CAMBIADOR .....	204
SIMBOLOGÍA, TERMINOLOGÍA Y UNIDADES .....	205
<b>21. CAMBIADOR DE PLACAS TUBULARES .....</b>	<b>207</b>
GENERALIDADES .....	207
CONVECCIÓN FORZADA en tipos BEM .....	208
CONVECCIÓN FORZADA FLUIDO “1” .....	209
Número de Reynolds fluido “1” .....	209
Número de Prandtl fluido “1” .....	209
Coeficiente viscosidad fluido “1” .....	209
Coeficiente de intercambio fluido “1” .....	210
CONVECCIÓN FORZADA FLUIDO “2” .....	210
Número de Reynolds fluido “2” .....	210
Número de Prandtl fluido “2” .....	211
Coeficiente de viscosidad fluido “2” .....	211
COEFICIENTE DE INTERCAMBIO FLUIDO “2” .....	211
Coeficiente suciedad fluido “2” .....	211
COEFICIENTE FINAL .....	211
CALOR TOTAL .....	211
TEMPERATURA MEDIA LOGARÍTMICA $\Delta t_m$ .....	211
Flujo contracorriente .....	211



Flujo paralelo.....	211
SUPERFICIE TOTAL DE INTERCAMBIO.....	212
LONGITUD TOTAL DEL CAMBIADOR.....	212
LONGITUD TUBOS DEL HAZ.....	212
PLACAS TUBULARES.....	212
DEFLECTORES.....	213
COEFICIENTES DE CORRECCIÓN TÉRMICOS SEGÚN KERN.....	214
COEFICIENTES DE CORRECCIÓN TÉRMICOS SIEDER Y TATE.....	215
FACTOR CORRECCIÓN $\Delta t_m$ .....	215
SIMBOLOGÍA, TERMINOLOGÍA Y UNIDADES.....	216
<b>22. CAMBIADORES SUMERGIDOS.....</b>	<b>219</b>
INTRODUCCIÓN.....	219
SERPENTINES SUMERGIDOS.....	219
TIPOS DE CAMBIADORES SUMERGIDOS.....	220
Con cuba cilíndrica.....	221
Sumergido con cuba rectangular o prismática.....	222
COMENTARIOS FUNCIONAMIENTO.....	224
CONVECCIÓN FORZADA FLUIDO “1”.....	225
Número de Reynolds fluido “1”.....	225
Número de Prandtl fluido “1”.....	225
Coeficiente de viscosidad fluido “1”.....	225
Coeficiente de intercambio fluido “1”.....	226
CONVECCIÓN NATURAL EN CUBA FLUIDO “2”.....	226
Número de Grashof en cuba, fluido “2”.....	226
Número de Prandtl fluido “2”.....	226
Número de Nusselt fluido “2”.....	226
Coeficientes de suciedad fluido “2”.....	227
CALOR TOTAL.....	227
COEFICIENTE FINAL DE INTERCAMBIO.....	227
TEMPERATURA MEDIA LOGARÍTMICA $\Delta t_m$ .....	227
Flujo equicorriente o paralelo.....	228
SUPERFICIE TOTAL DE INTERCAMBIO.....	228
LONGITUD TOTAL DEL SERPENTÍN FLUIDO “1”.....	228
ORIFICIOS DE DESAGÜE AGUA DE CUBAS.....	228
Tipos de orificios.....	228
SIMBOLOGÍA, TERMINOLOGÍA Y UNIDADES.....	229
<b>23. GASIFICADORES ATMOSFÉRICOS.....</b>	<b>233</b>
GASIFICADORES ATMOSFÉRICOS.....	233
CONVECCIÓN FORZADA EN FLUIDO “1”.....	234
Número de Reynolds fluido “1”.....	235
Número de Prandtl fluido “1”.....	235
Coeficiente de viscosidad fluido “1”.....	235
Coeficiente de intercambio fluido “1”.....	235
CONVECCIÓN NATURAL AIRE ATMOSFÉRICO.....	235
Número de Grashof fluido “2”.....	235
Número de Prandtl fluido “2”.....	236
Número de Nusselt fluido “2”.....	236

Coeficiente de suciedad aire. Fluido "2"	236
TUBOS DE ALETAS	236
Aleta longitudinal	236
Aleta transversal	237
TABLAS DE RENDIMIENTOS. GASIFICADORES ATMOSFÉRICOS	238
TABLAS DE RENDIMIENTOS. GASIFICADORES ATMOSFÉRICOS CON VENTILADOR	239
SIMBOLOGÍA, TERMINOLOGÍA Y UNIDADES	240
<b>24. GASIFICADORES DE PRESURIZACIÓN</b>	<b>243</b>
PRESURIZACIÓN RECIPIENTE CRIOGÉNICO	243
CAUDAL DE PASO POR EL SERPENTÍN	244
CONVECCIÓN FORZADA FLUIDO "1"	244
Número de Prandtl fluido "1"	244
Coeficiente de viscosidad fluido "1"	244
Coeficiente de intercambio fluido "1"	244
Número de Reynolds fluido "1"	245
CONVECCIÓN NATURAL AIRE ATMOSFÉRICO	245
Número de Grashof fluido "2"	245
Número de Prandtl fluido "2"	245
Número de Nusselt fluido "2"	245
Coeficientes suciedad aire fluido "2"	246
SIMBOLOGÍA, TERMINOLOGÍA Y UNIDADES	246
<b>25. TABLAS DE EQUIVALENCIAS</b>	<b>249</b>
COEFICIENTES DE AGUA SATURADA LIMPIA	249
COEFICIENTES DEL AIRE SECO ATMOSFÉRICO	252
TEMPERATURA DE EQUILIBRIO LÍQUIDO-GAS	254
CALOR DE VAPORIZACIÓN GASES	255
COEFICIENTES FÍSICOS PARA CÁLCULO DE CAMBIADORES ATMOSFÉRICOS	257

### PARTE III. RECIPIENTES CRIOGÉNICOS

<b>26. EQUIPOS CRIOGÉNICOS</b>	<b>261</b>
EL RECIPIENTE CRIOGÉNICO	261
ESQUEMA DE PRINCIPIO	263
CIRCUITOS DE MANIPULACIÓN Y SEGURIDAD	264
Llenados por fase gas y líquido	264
DISPOSITIVOS DE SEGURIDAD ENVOLVENTE	269
DISPOSITIVOS DE TOMA DE VACÍO	269
DISPOSITIVOS DE BOMBA DE VACÍO	270
VÁLVULAS DE RETENCIÓN	270
GRIFERÍA CALIENTE Y REPUESTOS	270
EL CONJUNTO RECIPIENTE CRIOGÉNICO	270
FLUIDOS CRIOGÉNICOS Y REFRIGERADOS. TEMPERATURAS EN EL	
PUNTO DE EBULLICIÓN A 1 $\Delta$ tm.	271
EQUIPOS E INSTALACIONES CRIOGÉNICAS	272
SIMBOLOGÍA, TERMINOLOGÍA Y UNIDADES	273
<b>27. NIVELES DE RECIPIENTES</b>	<b>275</b>
REBOSADERO	275
En recipientes verticales	276

En recipientes horizontales.....	276
VOLUMEN TOTAL RECIPIENTES .....	276
NIVEL EN RECIPIENTES VERTICALES.....	276
Curvas de nivel en recipiente vertical .....	277
NIVELES RECIPIENTES HORIZONTALES .....	278
Curva de nivel virola cilíndrica .....	278
Curva de nivel fondos elíptico $k = 1,9$ .....	278
Curva de nivel fondos elíptico $k = 2$ .....	278
Curva de nivel fondo decimal .....	279
Nivel total virola y fondos.....	279
CURVAS DE NIVEL RECIPIENTE HORIZONTAL .....	280
SIMBOLOGÍA, TERMINOLOGÍA Y UNIDADES.....	281
<b>28. CONDUCTIVIDAD TÉRMICA.....</b>	<b>283</b>
INTRODUCCIÓN.....	283
TIPOS DE AISLAMIENTO.....	283
Aislamiento con cámara de vacío.....	285
Aislamiento sin vacío .....	285
CONDUCTIVIDAD. PÉRDIDAS TÉRMICAS.....	285
TASA DE PÉRDIDAS DIARIAS DE CALOR .....	286
TASA DE VAPORIZACIÓN LÍQUIDO.....	286
AISLAMIENTO POR MULTICAPAS .....	286
Características .....	286
ADSORBENTE.....	288
TABLAS DE COEFICIENTES DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA.....	288
SIMBOLOGÍA, TERMINOLOGÍA Y UNIDADES.....	289
<b>29. PÉRDIDAS DE CARGA.....</b>	<b>291</b>
INTRODUCCIÓN.....	291
VELOCIDAD EN LAS TUBERÍAS .....	291
NÚMERO DE REYNOLDS .....	291
COEFICIENTE FRICCIÓN TUBERÍA O TUBO.....	292
PÉRDIDAS DE CARGA .....	292
Pérdida de carga en líquidos.....	292
Pérdida de carga en gases.....	292
VELOCIDADES EN TUBOS Y TUBERÍAS.....	292
APLICACIONES A TUBOS LISOS.....	293
Pérdidas de carga con agua .....	294
Pérdidas de carga con aire .....	296
Pérdidas de carga con nitrógeno .....	303
SIMBOLOGÍA, TERMINOLOGÍA Y UNIDADES.....	313

#### **PARTE IV. VIENTO Y SEÍSMO**

<b>30. VIENTO .....</b>	<b>317</b>
INTRODUCCIÓN. ACCIONES.....	317
ACCIONES DEL VIENTO. DIRECCIÓN DEL VIENTO.....	320
PRESIÓN DINÁMICA DEL VIENTO.....	320
SOBRECARGA DEL VIENTO.....	321
APLICACIÓN AL CÁLCULO EN RECIPIENTES.....	322

Presión de cálculo viento.....	322
Cargas del viento.....	323
MOMENTOS FLECTORES.....	323
TENSIONES DE FLEXIÓN.....	323
ESPEORES MÍNIMOS.....	323
SIMBOLOGÍA, TERMINOLOGÍA Y UNIDADES.....	324
<b>31. SEÍSMO.....</b>	<b>324</b>
INTRODUCCIÓN.....	325
ESCALA INTENSIDAD MACROSÍSMICA EMS.....	325
GRADOS DE CONSTRUCCIÓN.....	327
MAPA SÍSMICO TERRESTRE DE ESPAÑA.....	327
CÁLCULO DEL PERIODO DE VIBRACIÓN.....	328
TIPOS DE CONSTRUCCIÓN.....	328
COEFICIENTE SÍSMICO BÁSICO.....	328
COEFICIENTE SÍSMICO BÁSICO CORREGIDO.....	328
FACTOR DE INTENSIDAD.....	329
FACTOR DE RESPUESTA.....	329
FACTOR DE DISTRIBUCIÓN.....	329
FACTOR DE CIMENTACIÓN.....	329
EVALUACIÓN COEFICIENTE SÍSMICO.....	329
ACCIÓN SÍSMICA HORIZONTAL.....	329
ACCIÓN SÍSMICA VERTICAL.....	329
MOMENTOS, TENSIONES Y ESPEORES.....	330
SIMBOLOGÍA, TERMINOLOGÍA Y UNIDADES.....	330
<b>32. OTRAS ACCIONES.....</b>	<b>333</b>
INTRODUCCIÓN.....	333
CARGAS EXCÉNTRICAS.....	333
ESTABILIDAD ELÁSTICA.....	334
DESVIACIÓN DE LA FLECHA.....	334
ACCIÓN NIEVE.....	335
SIMBOLOGÍA, TERMINOLOGÍA Y UNIDADES.....	335
<b>33. ANÁLISIS DE TENSIONES.....</b>	<b>337</b>
INTRODUCCIÓN.....	337
SIGNOS DE LAS TENSIONES COMBINADAS.....	337
RESUMEN GENERAL DE TENSIONES.....	338
RESUMEN GENERAL DE ESPEORES.....	339
SIMBOLOGÍA, TERMINOLOGÍA Y UNIDADES.....	340

**PARTE V. MATERIALES**

<b>34. MATERIALES - RECEPCIÓN.....</b>	<b>343</b>
GENERALIDADES.....	343
MATERIALES.....	344
Aceros no aleados o de baja aleación.....	344
Aceros aleados de grano fino.....	344
Aceros al níquel.....	344
Aceros austeníticos al cromo-níquel.....	344
Aluminio o aleaciones de aluminio.....	344

Cobre desoxidado .....	344
Titanio y sus aleaciones .....	344
Otros materiales .....	344
LIMITACIONES MECÁNICAS MATERIALES .....	344
Materiales ferríticos .....	344
Aceros efervescentes .....	345
Aceros semicalmados al carbono y carbono manganeso .....	345
Aluminios .....	345
COMPOSICIÓN QUÍMICA MATERIALES .....	345
Contenido en carbono .....	345
Contenido en fósforo y azufre .....	345
Contenido en otros elementos .....	345
RECEPCIÓN DE MATERIALES .....	345
Características mecánicas .....	345
Tratamientos térmicos .....	346
Condiciones de suministro .....	346
Ensayos complementarios y controles .....	349
Documentos .....	349
Marcado .....	349
SIMBOLOGÍA, TERMINOLOGÍA Y UNIDADES .....	349
<b>35. DIAGRAMA FE-C .....</b>	<b>351</b>
MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN .....	351
Aceros martensíticos al cromo .....	351
Aceros martensíticos al cromo-níquel .....	351
Aceros ferríticos .....	351
Aceros austeníticos (amagnéticos)-níquel .....	351
Aceros austeno-ferríticos .....	352
Ferrita .....	352
DIAGRAMA HIERRO-CARBONO .....	352
Perlita .....	353
Cementita .....	353
Austenita .....	353
Martensita .....	353
INFLUENCIA DE LOS COMPONENTES .....	352
Níquel .....	353
Manganeso .....	353
Siliceo .....	353
Molibdeno .....	353
Azufre, selenio y fósforo .....	354
Wolframio .....	354
Aluminio .....	354
Nitrógeno .....	354
Cobre .....	354
Titanio y niobio .....	354
Boro .....	354
Cobalto .....	354
<b>36. ACEROS AL CARBONO .....</b>	<b>355</b>

TABLAS DE ACEROS AL CARBONO MANGANESO .....	355
Acero al carbono manganeso A37 FP .....	355
Acero al carbono manganeso A42 FP .....	358
Acero al carbono manganeso A48 FP .....	359
Acero al carbono manganeso A52 FP .....	361
ACEROS AL CARBONO MANGANESO UNE 36087 .....	362
Características químicas .....	363
ACEROS LAMINADOS AL CARBONO - UNE 36084 .....	363
Características mecánicas .....	363
Características químicas .....	364
ACEROS ALEADOS 15CD2-05 - NF 36.206. ASME II A + SA 20 SA 387 grado 2 .....	364
Características químicas .....	364
Características mecánicas a temperatura ambiente .....	364
Características mecánicas a temperaturas elevadas .....	364
ACEROS ALEADOS 15MDV4-05 - NF 36.206. UNE 36.087 14 Mn-Mo 5.5. ASME II A SA 20 ...	365
Características químicas .....	365
Características mecánicas a temperatura ambiente .....	365
Características mecánicas a temperaturas elevadas .....	365
ACEROS ALEADOS 18MD4-05 - NF 36.206. ASME II A + SA 20 SA 302 g A .....	366
Características químicas .....	366
Características mecánicas a temperatura ambiente .....	366
Características mecánicas a temperaturas elevadas .....	366
ACEROS AL NÍQUEL - UNE 36087 (Parte III) .....	367
Características mecánicas .....	367
ACEROS ALEADOS - UNE 36087 (Parte II) .....	367
SIMBOLOGIA, TERMINOLOGIA Y UNIDADES .....	367
<b>37. ACEROS INOXIDABLES .....</b>	<b>369</b>
EQUIVALENCIAS ACEROS INOXIDABLES .....	369
APLICACIONES .....	370
CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS .....	371
CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS .....	372
OTRAS EQUIVALENCIAS .....	373
<b>38. ALUMINIOS Y OTROS MATERIALES .....</b>	<b>377</b>
ALUMINIOS (EN 13445-8) .....	377
TABLA GENERAL DE CARACTERÍSTICAS Y EQUIVALENCIAS ALUMINIOS .....	378
OTROS MATERIALES .....	382
SIMBOLOGÍA, TERMINOLOGÍA Y UNIDADES .....	382

## **PARTE VI. REGLAS DE CÁLCULO**

---

<b>39. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN .....</b>	<b>385</b>
GENERALIDADES .....	385
APLICACIÓN. FINALIDAD Y OBJETO .....	385
SOBRESPEJOR DE CORROSIÓN .....	386
SOLICITACIONES .....	386
PRESIÓN Y TEMPERATURA DE DISEÑO .....	387
Presión de diseño o de cálculo .....	387
Temperatura de diseño .....	387

ROTURA FRÁGIL.....	387
Causa de la rotura por fatiga .....	387
Medidas recomendadas .....	387
Condiciones corrosivas .....	388
Caso de análisis de tensiones cíclicas .....	388
Fluencia a largo plazo.....	388
EVALUACIÓN DE LA FATIGA .....	388
Diseño sin análisis de fatigas .....	388
Diseño con análisis de fatigas .....	389
ANÁLISIS PARA FUNCIONAMIENTO CÍCLICO.....	389
Amplitud admisible. Tensiones alternas.....	389
Cargas a considerar .....	390
Diseño para cargas cíclicas.....	390
Curvas de fatiga de diseño (véase apartado Gráficos).....	390
Uso de la curva de fatiga de diseño.....	391
Daños acumulados.....	391
APLICACIÓN A UN ANÁLISIS FATIGA DE PERNOS .....	391
Factor acumulado de utilización .....	392
Factor de reducción de resistencia.....	392
ENSAYO FATIGA FUNCIONAMIENTO CÍCLICO .....	392
Hipótesis básica.....	392
Condiciones de ensayo .....	392
Construcción curva fatiga de ensayo.....	393
DETERMINACIÓN DE COEFICIENTES DE REDUCCIÓN DE RESISTENCIA	
A LA FATIGA .....	394
Reducción de la resistencia .....	394
Ensayos de probetas .....	394
Condiciones de ensayo .....	394
Nivel de tensiones .....	394
Similitud.....	394
Nivel de ciclos.....	394
TENSIONES TÉRMICAS CÍCLICAS.....	394
Técnicas.....	394
Dilataciones y contracciones.....	394
Condiciones por cambios de temperatura .....	394
Temperaturas superiores a 300 °C.....	394
VIBRACIONES FORZADAS.....	394
GRÁFICOS .....	395
OTRAS EXIGENCIAS DE DISEÑO.....	396
Generalidades .....	396
Condición de no fluencia lenta .....	396
TÉRMINOS UTILIZADOS, CON SU DEFINICIÓN .....	398
Intensidad de tensión.....	398
Discontinuidades .....	398
SIMBOLOGÍA, TERMINOLOGÍA Y UNIDADES.....	404
<b>40. CÁLCULOS A PRESIÓN INTERIOR.....</b>	<b>407</b>
APLICACIÓN.....	407

FINALIDAD Y OBJETO .....	407
SOBRESPELOR DE CORROSIÓN .....	408
SOLICITACIONES .....	408
CATEGORÍA DE CONSTRUCCIÓN .....	408
TENSIONES NOMINALES DE DISEÑO .....	408
COEFICIENTES DE SEGURIDAD .....	409
TENSIONES DEBIDAS A LAS PRUEBAS .....	410
TENSIONES DE CÁLCULO FLUENCIA .....	410
REGLAS GENERALES DE ACUERDOS .....	411
Designación del aparato. Partes interesadas .....	411
Lista de acuerdos relativos a las partes en que se permiten diversas alternativas .....	411
Ejemplo de especificación complementaria .....	412
SIMBOLOGÍA, TERMINOLOGÍA Y UNIDADES .....	414
<b>41. CÁLCULO DE ENVOLVENTES A PRESIÓN INTERIOR .....</b>	<b>415</b>
ENVOLVENTES DE SECCIÓN RECTA CIRCULAR .....	415
Envoltente cilíndrica de espesor uniforme .....	416
Envoltentes esféricas .....	416
ENVOLVENTES CÓNICAS DE SECCIÓN RECTA CIRCULAR .....	417
Espesor de la envoltente cónica .....	417
Unión cónica con envoltente cilíndrica .....	417
UNIÓN A LA BASE MENOR CÓNICA .....	422
OTRAS SOLICITACIONES A PRESIÓN INTERIOR .....	424
Acciones .....	424
Campo de aplicación .....	424
Condiciones de aplicación .....	424
Definiciones .....	425
Cálculos de tensiones de membrana .....	426
Tensiones principales de cálculo .....	427
Tensiones de membrana equivalente .....	427
Tensiones máximas admisibles .....	428
Envoltentes cilíndricas y cónicas sin torsión .....	428
SIMBOLOGÍA, TERMINOLOGÍA Y UNIDADES .....	428
<b>41A. CÁLCULO DE ENVOLVENTES A PRESIÓN INTERIOR. APLICACIÓN NORMA EN 13445-3 .....</b>	<b>431</b>
DEFINICIÓN DEL ESPESOR .....	431
COEFICIENTE DE UNIÓN SOLDADA .....	432
VALORES MÁXIMOS ADMISIBLES DE TENSIONES .....	432
ENVOLVENTES A PRESIÓN INTERIOR .....	433
Envoltentes cilíndricas .....	433
Envoltentes esféricas .....	433
Envoltentes cónicas .....	433
SIMBOLOGÍA, TERMINOLOGÍA Y UNIDADES .....	433
<b>42. FONDOS .....</b>	<b>437</b>
INTRODUCCIÓN .....	437
FONDOS DE USO FRECUENTE .....	437
Fondos bombeados toriesféricos .....	437
Fondos bombeados decimales .....	438



Fondos bombeados elípticos .....	439
Fondos semiesféricos o hemisféricos .....	439
Tipos de unión a virola .....	440
Fondos casquete esférico. Tapas .....	441
Fondos baja presión .....	441
Fondos planos .....	442
Fondos difusores o inversos .....	442
Fondos ovales .....	442
Fondos troncocónicos y cónicos .....	443
DETALLES DE SOLDADURA EN FONDOS .....	446
DETALLES CHAFLÁN BORDES SOLDADURA .....	447
SIMBOLOGÍA, TERMINOLOGÍA Y UNIDADES .....	448
<b>43. FONDOS A PRESIÓN INTERIOR CODAP .....</b>	<b>451</b>
FONDOS BOMBEADOS TORIESFÉRICOS .....	451
Campo aplicación .....	451
Cálculo espesor .....	451
Fondo mixto toriesférico-esférico .....	452
Tablas fondos toriesféricos .....	453
Gráfico fondos toriesféricos .....	454
FONDOS ELÍPTICOS O SEMIELÍPTICOS .....	454
Campo de aplicación .....	455
Cálculo espesor .....	455
Gráfico fondos elípticos o semielípticos .....	457
FONDOS HEMISFÉRICOS O SEMIESFÉRICOS .....	458
Campo de aplicación .....	458
Cálculo espesor .....	458
UNIÓN DE UN FONDO BOMBEADO CON UNA ENVOLVENTE CILÍNDRICA .....	458
FONDOS PLANOS SOLDADOS .....	459
Fondos planos unidos por soldadura de ángulo .....	459
Fondos planos de borde curvado .....	460
Fondos planos con ranura de descarga .....	461
Gráficos $C_1$ y $C_2$ .....	461
FONDOS PLANOS ATORNILLADOS O BULONADOS .....	462
Dimensionado de los tornillos o bulones .....	463
Cálculo de los espesores .....	464
TIPOS DE JUNTAS, COEFICIENTES DE APRIETE Y PRESIÓN ASIENTO .....	464
Juntas planas no metálicas .....	464
Juntas planas con envolvente metálica .....	465
Juntas planas metaloplásticas .....	465
Determinación de los coeficientes $j_o$ , $j_e$ y $d_j$ .....	466
FONDOS CON CASQUETE ESFÉRICO ATORNILLADO .....	468
SIMBOLOGÍA, TERMINOLOGÍA Y UNIDADES .....	469
<b>43A. FONDOS A PRESIÓN INTERIOR. APLICACIÓN NORMA EN 13445-3 .....</b>	<b>471</b>
FONDOS A PRESIÓN INTERIOR .....	471
Fondos toriesféricos .....	471
Fondos elípticos .....	472
Fondos cónicos .....	472

Fondos hemisféricos.....	473
SIMBOLOGÍA, TERMINOLOGÍA Y UNIDADES.....	473
<b>44. ENVOLVENTE CILÍNDRICA A PRESIÓN EXTERIOR - CODAP .....</b>	<b>475</b>
ENVOLVENTES A PRESIÓN EXTERIOR CODAP .....	475
ENVOLVENTES CON $De \geq 10$ .....	476
Cálculo coeficientes $A_1, A_2, B_A$ .....	476
Longitud a reforzar.....	477
Separación máxima entre refuerzos .....	477
Momento de inercia mínimo del refuerzo .....	477
ENVOLVENTES CON $De < 10$ .....	478
DETERMINACIÓN DEL ÁREA NETA PARA CALCULAR EL MOMENTO DE INERCIA .....	479
CÁLCULO FONDOS SEGÚN CODAP .....	480
Cálculo espesor fondos bombeados .....	480
Cálculo presión equivalente esfera.....	481
ENVOLVENTES CÓNICAS DE SECCIÓN RECTA CIRCULAR.....	481
Condiciones de aplicación.....	481
Longitud y diámetro equivalentes .....	483
Unión en base mayor.....	484
Valor del coeficiente $B_1$ .....	485
Cálculo coeficientes $A_1, A_2, B_A, A_3$ .....	485
Unión en base menor.....	486
Valor del coeficiente $B_2$ .....	488
Valor del coeficiente $B_3$ .....	488
REFUERZOS EN ENVOLVENTES CÓNICAS.....	488
SIMBOLOGÍA, TERMINOLOGÍA Y UNIDADES.....	489
<b>44A. ENVOLVENTE CILÍNDRICA A PRESIÓN EXTERIOR - AD-MERKBLATTER</b>	
<b>“ADM”.....</b>	<b>491</b>
ENVOLVENTES A PRESIÓN EXTERIOR ADM.....	491
Deformación plástica.....	492
Cálculo de los anillos rigidizadores .....	492
CÁLCULO DE FONDOS ADM.....	492
Espesor $e_1$ a presión equivalente interior $Pe$ .....	493
Espesor $e_2$ . Espesor cálculo a pandeo elástico.....	493
Presión calculada admisible $Pc$ .....	493
Presión admitida.....	493
SIMBOLOGÍA, TERMINOLOGÍA Y UNIDADES.....	494
<b>44B. ENVOLVENTE A PRESIÓN EXTERIOR. APLICACIÓN NORMA EN 13445-3.....</b>	<b>495</b>
ENVOLVENTES A PRESIÓN EXTERIOR.....	495
Cálculo a presión exterior .....	495
Cálculo de los anillos rigidizadores .....	497
FONDOS A PRESIÓN EXTERIOR .....	498
SIMBOLOGÍA, TERMINOLOGÍA Y UNIDADES.....	498
<b>45. FLEXIÓN LONGITUDINAL .....</b>	<b>501</b>
VIOLA SOBRE SOPORTES TRANSVERSALES .....	501
CARGAS, PESOS Y REACCIONES .....	502
Determinación de las cargas en fondos .....	503
Determinación de la carga en virola.....	504

Recapitulación de cargas .....	504
Reacciones en soportes.....	504
Centro de gravedad.....	504
CÁLCULO DE MOMENTOS FLECTORES.....	505
ESFUERZOS DE CORTADURA EN SOPORTES .....	505
TENSIONES DE FLEXIÓN EN EL c.d.g. VIROLA .....	505
TENSIONES DE FLEXIÓN EN LADO SOPORTES.....	506
En el lado soporte izquierdo.....	506
En el lado soporte derecho .....	506
VALORES ADMISIBLES DE TENSIONES EN LA ENVOLVENTE CILÍNDRICA.....	507
ESFUERZOS CORTANTES.....	507
Con un anillo rigidizador en el plano del eje soporte.....	507
Con anillos rigidizadores a uno y otro lado del eje soporte .....	508
Envolvente cilíndrica sin anillos refuerzo, rigidizada por un fondo o placa .....	508
Tensiones de membrana en los fondos bombeados cuando hacen de refuerzo .....	509
Valores admisibles de las tensiones.....	510
TIPOS DE SOPORTES. REFUERZOS .....	510
Con pies o patas soporte.....	510
Con cunas soporte .....	510
Con cunas soporte reforzado interior o exteriormente .....	510
VIROLA SOBRE SOPORTES HORIZONTALES .....	510
Sobre largueros paralelos .....	510
Sobre macizos continuos .....	510
SIMBOLOGÍA, TERMINOLOGÍA Y UNIDADES.....	515
<b>46. FLEXIÓN TRANSVERSAL .....</b>	<b>519</b>
FLEXIÓN TRANSVERSAL DE LA VIROLA .....	519
VIROLA SIN ANILLOS REFUERZOS .....	519
Tensiones de compresión.....	520
Tensiones de compresión.....	521
VIROLA CON ANILLOS REFUERZOS .....	522
Tensiones circunferenciales en la envolvente cilíndrica .....	523
VIROLA CON DOS O MÁS ANILLOS REFUERZO.....	525
Tensiones máximas admisibles .....	526
CÁLCULOS TÍPICOS DE MOMENTOS FLECTORES .....	527
Con carga o reacción horizontal H.....	527
Con carga o reacción vertical W .....	528
Con carga axial vertical Q.....	529
Gráficos suma de momentos .....	531
SIMBOLOGÍA, TERMINOLOGÍA Y UNIDADES.....	532
<b>47. MOMENTOS DE INERCIA .....</b>	<b>535</b>
SECCIONES DE PERFILES .....	535
TEOREMA DE STEINER .....	538
CENTRO DE GRAVEDAD.....	538
MÓDULO RESISTENTE .....	538
APLICACIÓN A UN PERFIL OMEGA.....	538
APLICACIÓN A UN PERFIL EN T.....	539
LARGO ASOCIADO VIROLA A REFUERZOS.....	540

LIMITACIONES A VIROLAS CON REFUERZOS .....	540
TIPOS DE PERFILES .....	541
SIMBOLOGÍA, TERMINOLOGÍA Y UNIDADES .....	542
<b>48. ABERTURAS.....</b>	<b>543</b>
APLICACIÓN CÁLCULO ABERTURAS .....	543
LÍMITES DE DISTANCIA DE ABERTURAS .....	543
Aberturas en fondos bombeados o esféricos .....	544
Aberturas en envolventes cilíndricas .....	544
Aberturas en envolventes cónicas .....	546
Tubuladuras. Aberturas en envolventes .....	548
Distancia Xo (véanse Figuras 31 a 34).....	550
Longitud de tubuladura que participa a la resistencia .....	550
Longitud asociada a la pared tubuladuras .....	552
ÁREAS PARTICIPANTES EN LAS ABERTURAS .....	552
VERIFICACIÓN RESISTENCIA EN ABERTURAS .....	559
ABERTURAS PRÓXIMAS ENTRE SÍ .....	560
Aplicación y verificación .....	560
Verificación resistencia en aberturas .....	560
Distancia entre aberturas próximas .....	561
Condiciones de resistencia .....	563
SIMBOLOGÍA, TERMINOLOGÍA Y UNIDADES .....	568
<b>49. BOCAS DE PASO Y HOMBRE.....</b>	<b>571</b>
APLICACIÓN CÁLCULO ABERTURAS .....	571
SITUACIÓN.....	571
TIPOS Y DIMENSIONES MÍNIMAS DE ABERTURAS .....	572
ABERTURAS DE EXAMEN Y ACCESOS .....	572
Diámetro interior 450 mm y menor.....	572
Diámetro interior más de 450 mm.....	572
Diámetro interior más de 800 mm.....	573
Diámetro interior más de 1.500 mm.....	573
ACCESOS DE HOMBRE. BOCA DE HOMBRE .....	573
Anchura mínima de asiento .....	573
DISEÑO DE ABERTURAS DE ACCESO. INSPECCIÓN .....	573
ABERTURAS ROSCADAS .....	573
Materiales para tapones o tapas roscadas .....	573
Tipos de roscas admisibles .....	573
APLICACIONES .....	574

**PARTE VII. SEGURIDADES**

<b>50. ELEMENTOS PROTECTORES DE ALIVIO Y PRESIÓN .....</b>	<b>577</b>
APLICACIÓN .....	577
Generalidades .....	577
Protección contra vacío .....	577
Válvula de escape de líquidos .....	577
Sistemas de recipientes.....	577
Presiones de origen externo.....	578

Presiones de origen secundario .....	578
Válvulas de escape y discos de rotura .....	578
MATERIALES .....	578
VÁLVULAS DE ESCAPE .....	578
Válvulas de acción directa .....	578
Válvulas de carga suplementaria .....	578
Válvulas de acción indirecta .....	578
Otros elementos de control .....	578
Válvulas con mecanismo de elevación .....	579
Diseño .....	579
DISCOS DE ROTURA .....	579
Empleo de discos de rotura .....	579
Montaje de discos y válvulas de escape .....	579
Presión de rotura de los discos .....	579
MARCADO DE VÁLVULAS DE ESCAPE .....	580
MARCADO DE LOS DISCOS DE ROTURA .....	580
CAPACIDAD DE LOS ELEMENTOS DE ESCAPE .....	580
REGULACIÓN DE PRESIÓN DE LOS ELEMENTOS DE ALIVIO DE PRESIONES .....	580
Tarado de grupos de válvulas .....	580
Cambio de especificaciones de la válvula .....	580
Tarado de discos y válvulas en paralelo .....	580
INSTALACIÓN DE ELEMENTOS DE ALIVIO DE PRESIONES .....	580
Punto de conexión .....	580
Características de la conexión .....	580
Válvulas de cierre .....	581
LÍNEAS DE DESCARGA .....	581
<b>51. VÁLVULAS DE SEGURIDAD .....</b>	<b>583</b>
INTRODUCCIÓN .....	583
FUENTES DE PRESIÓN .....	583
CAUDAL A ALIVIAR POR LAS VÁLVULAS DE SEGURIDAD .....	584
Para gases y vapores sin aporte exterior de energía .....	584
Para gases y vapores con aporte de energía .....	584
Recipientes con aislamiento .....	585
VÁLVULAS DE SEGURIDAD DE GASES Y VAPORES .....	586
Coeficiente para gases y vapores .....	586
Dimensionado caudal y sección neta .....	587
Presión crítica .....	587
OTRAS FÓRMULAS APROXIMADAS .....	588
Con contrapresión máximo del 55% .....	588
Con contrapresión superior al 55% .....	588
Con contrapresión variable .....	589
VAPORES Y GASES CON CONTRAPRESIÓN .....	589
Con contrapresión máxima del 55% .....	589
Con contrapresión superior al 55% .....	590
Con contrapresión variable .....	590
VAPOR DE AGUA SATURADA CON CONTRAPRESIÓN .....	590
Con contrapresión máxima del 55% .....	590

Con contrapresión superior al 55% .....	591
Con contrapresión variable.....	591
VAPOR DE AGUA SOBREALENTADA CON CONTRAPRESIÓN .....	591
Con contrapresión máxima del 55% .....	591
Con contrapresión superior al 55% .....	591
Con contrapresión variable.....	591
GRÁFICOS COEFICIENTE CORRECCIÓN PARA VAPOR DE AGUA SATURADO.	
PRESIÓN DE APERTURA.....	592
LÍQUIDOS .....	593
Con contrapresión. Acumulación 25%.....	593
Con contrapresión. Acumulación inferior al 25%.....	593
Válvulas de alivio-venteo. Acumulación, con contrapresión variable igual al 25%.....	593
FLUIDOS VISCOSOS .....	594
NÚMERO DE REYNOLDS .....	594
SIMBOLOGÍA, TERMINOLOGÍA Y UNIDADES.....	594
<b>52. DISCOS DE ROTURA.....</b>	<b>597</b>
DISCOS DE ROTURA .....	597
FÓRMULAS DIMENSIONADO DISCOS DE ROTURA .....	598
Área necesaria líquidos .....	598
Área necesaria gases.....	598
Área necesaria aire .....	599
Área necesaria otros gases.....	599
Área necesaria vapor .....	600
SIMBOLOGÍA, TERMINOLOGÍA Y UNIDADES.....	601
<b>53. RESORTE VÁLVULAS DE SEGURIDAD .....</b>	<b>603</b>
CÁLCULO DE RESORTES .....	603
SIMBOLOGÍA, TERMINOLOGÍA Y UNIDADES.....	606

**PARTE VIII. SOLDADURA**

<b>54. REALIZACIÓN Y CONSTRUCCIÓN SOLDADA.....</b>	<b>609</b>
GENERALIDADES.....	609
MATERIALES .....	610
DISEÑO .....	610
Juntas soldadas .....	610
Juntas en cruz .....	611
Piezas no sometidas a presión .....	611
Conexiones varias .....	611
Tipos admisibles.....	611
Bordes de soldadura .....	611
Juntas soldadas sometidas a tensiones de flexión.....	613
Aberturas en las soldaduras o adyacentes a las mismas.....	613
Soldaduras en ángulo .....	613
Soldaduras por ambas caras .....	613
Detección de la soldadura .....	613
Soldaduras por una sola cara.....	613
PREPARACIÓN DE LAS SUPERFICIES ANTES DE SOLDAR.....	613
CORTE, AJUSTE Y ALINEACIÓN .....	613

Corte .....	613
Ajuste y alineación .....	614
RECTITUD, IRREGULARIDADES DE PERFIL Y OVALIZACIÓN .....	614
Rectitud .....	614
Irregularidades de perfil .....	614
Ovalización.....	614
CONFORMACIÓN EN CALIENTE Y EN FRÍO.....	615
Control.....	615
Redondez .....	615
Soportes .....	615
Realización de soldadura en caso de tratamientos térmicos.....	615
Accesorios .....	616
REPARACIÓN DE DEFECTOS DE SOLDADURA.....	616
REGISTRO PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA.....	616
SIMBOLOGÍA, TERMINOLOGÍA Y UNIDADES.....	618
<b>55. DETALLES TÍPICOS DE SOLDADURA .....</b>	<b>619</b>
GENERALIDADES.....	619
SELECCIÓN DEL DETALLE.....	619
PERFILES Y TAMAÑOS DE LAS SOLDADURAS .....	619
Perfiles de soldadura.....	619
Uniones a tope.....	620
Tamaños de soldadura .....	620
Modificaciones .....	620
APLICACIÓN A UNIONES DE LAS FIGURAS.....	620
TIPOS DE UNIONES TÍPICAS ACEPTABLES .....	620
Detalles normales de soldadura.....	620
Derivaciones sin refuerzo de aberturas .....	622
Otras derivaciones con penetración. Figuras tipo: 11 a 16.....	627
Uniones forjadas.....	631
NOTAS APLICABLES A LAS DERIVACIONES SIN ANILLOS DE COMPENSACIÓN.....	632
Derivaciones directas .....	632
Derivaciones con entrante .....	632
NOTAS APLICABLES A LAS DERIVACIONES CON ADICIÓN DE ANILLO DE COMPENSACIÓN .....	633
NOTAS APLICABLES A LAS UNIONES DE TUBOS A PLACAS TUBULARES.....	633
DERIVACIONES CON REFUERZO DE ABERTURA.....	633
Derivaciones directas .....	633
Derivaciones con entrante .....	634
UNIÓN Y ACOPLAMIENTOS PARA ATORNILLAR .....	635
Soldadas a tope.....	635
Soldaduras con resalte y roscadas .....	635
UNIONES A BRIDAS .....	637
UNIONES A ENVOLVENTES.....	638
UNIONES DE TUBOS A PLACAS TUBULARES.....	639
UNIONES DE PLACA TUBULAR A ENVOLVENTES.....	640
<b>56. PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA .....</b>	<b>643</b>
GENERALIDADES.....	643

HOMOLOGACIÓN PROCEDIMIENTO SOLDADURA.....	643
POSICIONES DE LAS SOLDADURAS DE ENSAYO.....	644
Inclinación.....	646
Rotación.....	646
SOLDADURA PARA LOS ENSAYOS DE HOMOLOGACIÓN.....	647
Tipo del metal base.....	648
Criterio de validez en función del metal base.....	648
Electrodos, metal de aporte, fundentes y gas inerte.....	648
Tipo de preparación de bordes.....	649
Técnicas de soldadura.....	649
Proceso de soldadura.....	649
Precalentamiento y enfriamiento retardado.....	649
Tratamiento térmico.....	649
CAMPO DE VALIDEZ EN FUNCIÓN DEL ESPESOR.....	649
TAMAÑO DE LAS PROBETAS.....	649
NÚMERO DE PROBETAS Y ENSAYOS MÍNIMOS A REALIZAR.....	651
Exigencias para tuberías y tubos.....	651
INSPECCIÓN NO DESTRUCTIVA DE LAS PROBETAS SOLDADAS.....	651
VALORACIÓN DE LOS ENSAYOS OBTENIDOS AL ENSAYAR LAS PROBETAS.....	652
Repetición de ensayos.....	652
Aceptación de los ensayos de producción.....	653
NUEVA HOMOLOGACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA.....	653
FORMULARIOS DE LOS ENSAYOS.....	653
ACEPTACIÓN DE LA HOMOLOGACIÓN POR LOS INSPECTORES.....	653
CUALIFICACIÓN DEL SOLDADOR.....	653
Condiciones de realización o no de la prueba.....	653
Aceptación mutua por los inspectores.....	653
Soldaduras a tope en chapas y tubos.....	654
Soldaduras en ángulo.....	654
Condiciones de calificación.....	654
Variables esenciales para la cualificación del soldador.....	654
CONDICIONES DE LAS SOLDADURAS DE ENSAYO.....	656
EXPEDIENTES DE LOS ENSAYOS.....	656
VALIDEZ DE LOS ENSAYOS DE HOMOLOGACIÓN. PROCEDIMIENTO COMO	
ENSAYO DE CUALIFICACIÓN DE COMPETENCIA SOLDADOR.....	656
REPETICIÓN DE ENSAYOS.....	656
TEMPERATURAS MÍNIMAS ADMISIBLES PARA LA SOLDADURA.....	657
<b>57. ENSAYOS DESTRUCTIVOS.....</b>	<b>659</b>
CHAPAS DE ENSAYO DE SOLDADURA DE PRODUCCIÓN. PROBETAS.....	659
Referencias a normas.....	659
Ensayos de dureza.....	659
Chapas de ensayo de cordones longitudinales.....	659
Chapas de ensayo para los recipientes en serie.....	660
Chapa de ensayo para cordones circulares.....	660
Material y dimensiones de las chapas de ensayo.....	660
Deformaciones de la chapa de ensayo.....	660
PROBETAS Y DIMENSIONES.....	661



Probeta para el ensayo a tracción .....	661
Ensayo a tracción con probeta de metal de aportación .....	661
Probetas para ensayo de doblado .....	662
Probeta entallada para el ensayo de resiliencia .....	663
Temperatura de los ensayos .....	633
Probeta para macroensayo de ataque químico (ensayo metalográfico).....	664
<b>CARACTERÍSTICAS EXIGIDAS A LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE</b>	
<b>CHAPAS. MUESTRA DE SOLDADURA DE PRODUCCIÓN .....</b>	<b>664</b>
Ensayo a tracción con sección reducida .....	664
Ensayo con probeta íntegramente metal de aportación .....	664
Ensayos de resiliencia .....	664
Ensayo de macroataque químico (metalográfico) .....	665
Ensayos destructivos .....	665
Repetición de ensayos .....	665
<b>58. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS .....</b>	<b>667</b>
GENERALIDADES .....	667
Ensayo de la soldadura original .....	667
Ensayo no destructivo en reparaciones .....	667
EXAMEN ULTRASÓNICO .....	667
FABRICACIÓN EN SERIE .....	668
ENSAYO NO DESTRUCTIVO AL 100% .....	668
Soldaduras a tope .....	668
Otras soldaduras .....	668
INSPECCIÓN NO DESTRUCTIVA POR PUNTOS .....	668
Soldaduras a tope .....	668
Magnitud del ensayo .....	669
Soldaduras que no sean a tope.....	669
INSPECCIÓN NO DESTRUCTIVA POR PUNTOS CON REPERCUSIÓN EN	
EL NIVEL DE TENSIONES .....	669
Soldaduras a tope .....	669
Soldaduras que no sean a tope.....	670
ENSAYO NO DESTRUCTIVO DE JUNTAS SOLDADAS. TÉCNICAS Y	
ACEPTABILIDAD DEFECTOS .....	670
Inspección de soldaduras en recipientes probados neumáticamente.....	670
DEFECTOS INACEPTABLES EN LAS SOLDADURAS.....	670
INSPECCIÓN POR PARTÍCULA MAGNÉTICA Y POR LÍQUIDOS PENETRANTES .....	671
Técnicas.....	671
Defectos inaceptables en las soldaduras.....	671
MÉTODOS PARA EL ENSAYO NO DESTRUCTIVO DE RAMALES, CONEXIONES	
ATORNILLADAS Y ACOPLAMIENTOS, RECIPIENTES ENCAMISADOS, CONEXIONES	
DE TUBO A PLACA TUBULAR Y DE PLACA TUBULAR A LA ENVOLVENTE.....	671
INSPECCIÓN POR ULTRASONIDOS .....	671
Técnicas de métodos posibles .....	671
<b>59. INSPECCIÓN POR RADIOGRAFIADO.....</b>	<b>673</b>
TÉCNICAS.....	673
DEFECTOS INACEPTABLES EN LA SOLDADURA.....	674
<b>60. INSPECCIÓN POR ULTRASONIDOS .....</b>	<b>675</b>

INTRODUCCIÓN, OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN.....	675
PRINCIPIO DEL MÉTODO.....	676
CONDICIONES DE LA SUPERFICIE.....	676
Superficie de contacto del metal base.....	676
Superficies de soldadura.....	676
EXAMEN DEL METAL BASE.....	676
Inspección.....	676
Procedimiento.....	676
SELECCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL APARATO Y SU CALIBRADO.....	677
Informaciones preliminares.....	677
Aparato ultrasónico.....	677
Frecuencia.....	677
Palpador.....	677
Ángulo de refracción (o ángulo del haz).....	678
Medio de acoplamiento.....	678
Calibración del equipo.....	678
PROCEDIMIENTO DE INSPECCIÓN DE LAS SOLDADURAS.....	682
Detección de los defectos longitudinales.....	682
Detección de los defectos transversales.....	683
Detección de los defectos en la zona de la raíz.....	684
EVALUACIÓN DE LAS INDICACIONES.....	684
INFORME DEL EXAMEN.....	684
<b>61. INSPECCIONADO POR PARTÍCULAS MAGNÉTICAS.....</b>	<b>685</b>
INTRODUCCIÓN, OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN.....	685
PRINCIPIOS DEL MÉTODO.....	685
PROCEDIMIENTOS DE MAGNETIZACIÓN.....	686
MEDIOS DE EXAMEN.....	686
Polvo seco.....	686
Tintas magnéticas negras o de color.....	686
Tintas magnéticas fluorescentes.....	686
ESTADO.....	686
PROCEDIMIENTO DE MAGNETIZACIÓN POR CLAVIJA.....	687
Procedimiento de magnetización.....	687
Separación entre clavijas.....	687
Dirección magnetización por clavija.....	687
PROCEDIMIENTO DE MAGNETIZACIÓN POR BOBINA.....	688
Procedimiento de magnetización.....	688
Distancia de la bobina a la zona que se inspecciona.....	688
Dirección magnetización por bobina.....	688
Corriente de magnetización por bobina.....	688
APLICACIÓN DE LAS PARTÍCULAS MAGNÉTICAS.....	689
OBSERVACIÓN DE LAS INDICACIONES.....	689
Tiempo de inspección.....	689
Polvos o tintas negras o coloreadas.....	689
Polvos o tintas fluorescentes magnéticas.....	689
Interpretación de los resultados.....	689
LIMPIEZA Y DESMAGNETIZACIÓN DESPUÉS DE LA INSPECCIÓN.....	690

INFORME DEL EXAMEN .....	690
<b>62. INSPECCIONADO POR LÍQUIDOS PENETRANTES .....</b>	<b>691</b>
INTRODUCCIÓN.....	691
OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN .....	691
PRINCIPIOS DEL MÉTODO.....	691
CARACTERÍSTICAS DE LÍQUIDOS PENETRANTES Y ACCESORIOS .....	692
Penetrantes .....	692
Reveladores .....	692
Notas sobre el empleo de penetrantes y revelados, y precauciones de seguridad correspondientes.....	692
PROCEDIMIENTO .....	692
Limpieza.....	692
Secado después de una limpieza .....	693
Aplicación de líquidos penetrantes .....	694
Aplicación del emulsionador.....	694
Eliminación del exceso de penetrante .....	694
Secado .....	695
Aplicación del revelador .....	695
OBSERVACIÓN DE LAS INDICACIONES .....	696
Penetrantes de tintura .....	696
Penetrantes fluorescentes.....	696
Interpretación de resultados .....	696
REPETICIÓN DE ENSAYOS .....	696
LIMPIEZA POSTERIOR A LA INSPECCIÓN.....	696
INFORME DEL EXAMEN .....	697
<b>63. TRATAMIENTOS TÉRMICOS .....</b>	<b>699</b>
TRATAMIENTOS TÉRMICOS.....	699
AGRUPACIÓN DE LOS MATERIALES PARA EL TRATAMIENTO TÉRMICO	
POSTSOLDADURA.....	699
GRUPOS DE CLASIFICACIÓN PARA EL TRATAMIENTO TÉRMICO	
POSTSOLDADURA.....	699
PIEZAS DE DIFERENTE ESPESOR .....	701
CHAPA CURVADA EN FRÍO .....	701
PIEZAS CONFORMADAS EN CALIENTE.....	701
TRATAMIENTO TÉRMICO POSTSOLDADURA.....	701
Aceros al carbono.....	701
Aceros aleados.....	701
Otros tratamientos térmicos .....	702
Forma del tratamiento térmico .....	703
Tratamiento simultaneo de varios recipientes .....	703
Tratamiento de las chapas de ensayo.....	704
COMPROBACIÓN DEL TRATAMIENTO TÉRMICO POSTSOLDADURA.....	704

## PARTE IX. FABRICACIÓN

<b>64. TOLERANCIAS DE FABRICACIÓN .....</b>	<b>707</b>
TABLA DE TOLERANCIAS .....	707
DIBUJO GENERAL DE IDENTIFICACIÓN TOLERANCIAS .....	709

TOLERANCIAS DE JUNTAS SOLDADAS .....	710
<b>65. CERTIFICACIÓN Y SELLADO.....</b>	<b>711</b>
ESPECIFICACIÓN DE DISEÑO, DIBUJOS Y HOJA DE DATOS.....	711
SELLADO.....	711
<b>66. MARCADO Y CONFORMADO .....</b>	<b>713</b>
MARCADO PARA IDENTIFICACIÓN DE CHAPAS.....	713
CONFORMADO DE LAS CHAPAS .....	713
Examen de las chapas conformadas y sin conformar.....	713
CORTE DE PIEZAS FORJADAS .....	713
CHAPAS DE LOS EXTREMOS Y DE FONDOS .....	713
<b>67. PRUEBAS E INSPECCIÓN.....</b>	<b>715</b>
INSPECCIÓN DURANTE LA FABRICACIÓN .....	715
PRUEBAS DE PRESIÓN .....	715
Prueba normal .....	715
Prueba neumática como variante.....	716
Prueba combinada hidráulica y neumática.....	718
Recipientes sometidos a vacío.....	718
PRUEBAS DE ESTANQUIDAD .....	718
PROCEDIMIENTO .....	718
SIMBOLOGÍA, TERMINOLOGÍA Y UNIDADES.....	718

**PARTE X. APÉNDICES**

<b>68. TABLAS DE UNIDADES.....</b>	<b>721</b>
<b>69. DEFINICIONES.....</b>	<b>731</b>
<b>70. REAL DECRETO 769/1999, DE 7 DE MAYO. DIRECTIVA 97/23/ce RELATIVA A LOS EQUIPOS DE PRESIÓN.....</b>	<b>743</b>
<b>71. LISTADO GENERAL DE NORMAS .....</b>	<b>757</b>
<b>72. REGLAMENTO DE EQUIPOS A PRESIÓN. REAL DECRETO 2060/2008 .....</b>	<b>777</b>
<b>73. ITC-EP-1. CALDERAS .....</b>	<b>799</b>
<b>74. ITC-EP-2. CENTRALES GENERADORAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA.....</b>	<b>815</b>
<b>75. ITC-EP-3. REFINERÍAS DE PETRÓLEOS Y PLANTAS QUÍMICAS .....</b>	<b>827</b>
<b>76. ITC-EP-4. DEPÓSITOS CRIOGÉNICOS.....</b>	<b>835</b>
<b>77. ITC-EP-5. EQUIPOS RESPIRATORIOS AUTÓNOMOS .....</b>	<b>841</b>
<b>78. ITC-EP-6. RECIPIENTES A PRESIÓN TRANSPORTABLES.....</b>	<b>851</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>865</b>
<b>ÍNDICE ANALÍTICO .....</b>	<b>867</b>

# Parte I

## Gases criogénicos y gases líquidos presurizados

1. Generalidades gases
2. Acetileno
3. Anhídrido carbónico
4. Protóxido de nitrógeno
5. Aire
6. Nitrógeno
7. Oxígeno
8. Argón
9. Hidrógeno
10. Metano y gas natural
11. Etileno
12. Helio
13. Butano
14. Propano
15. Propileno
16. Amoniaco
17. Tablas de características de gases



# Gases que recoge la Parte I

En esta Parte I se recogen los datos físicos fundamentales de los fluidos siguientes:

## **CRIOGÉNICOS**

---

- **Licuidos del aire atmosférico, obtenidos por la destilación del aire**

- Aire líquido.
- Nitrógeno líquido.
- Oxígeno líquido.
- Argón líquido.
- Hidrógeno líquido.
- Helio líquido.

Que se tratan en estado líquido y están entre los rangos de temperaturas de  $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$  y hasta próximas al cero absoluto ( $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

- **Gases licuados, procedentes de la petroquímica y procesos químicos**

- Metano líquido.
- Gas natural líquido.
- Etileno líquido.
- Anhídrido carbónico líquido.
- Protóxido de nitrógeno líquido.

Que se tratan en estado líquido y están entre los rangos de temperaturas de  $-104\text{ }^{\circ}\text{C}$  y hasta  $-79\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Se incluyen:

## **GASES LICUADOS PRESURIZADOS**

---

- **Gases licuados presurizados procedentes de la petroquímica y procesos químicos**

- Propileno líquido.
- Propano líquido.
- Amoníaco líquido.
- Butano líquido.

Que se tratan en estado líquido y están entre los rangos de temperaturas de  $-48\text{ }^{\circ}\text{C}$  y hasta  $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .





# 1

## Generalidades gases

La criogenia • Historia y antecedentes • Acetileno y petroleoquímica • Reformado de hidrógeno al vapor • Procedimiento de oxidación parcial • Procedimiento de pirólisis térmica • Pirólisis arco eléctrico • Generalidades fisicoquímicas • Enlaces. Disociación • Catalizadores • Cambios de estado • Combustión • Propagación • Deflagración • Detonación • Límites de inflamabilidad • Temperatura de inflamación • Temperatura mínima de autoinflamación • La bureta Claude • Criterio referencias normal y estándar.

### LA CRIOGENIA

La criogenia está relacionada con el mundo de las bajas temperaturas.

El prefijo “crío” proviene del griego *kryos* que significa extremadamente frío y *genea* significa “nacimiento”.

En la práctica, la criogenia es la ciencia dedicada a la producción de gases, con temperaturas entre  $-100^1$  y  $-273$  grados centígrados (la más baja de ambas equivale al cero absoluto de la escala Kelvin).

Actualmente se ha conseguido llegar hasta la temperatura alrededor de  $-270$  °C.

Cuando se habla de criogenia, se entiende que nos referimos a la utilización con gases licuados a bajas temperaturas.

El comportamiento de los gases criogénicos en distintos medios y en contacto con diferentes materias implica un desarrollo industrial muy potente en todos los campos, como por ejemplo cuando los metales se encuentran sumergidos en estos gases licuados, los metales que son muy tenaces se vuelven

frágiles y quebradizos como el vidrio; por el contrario, otros se hacen más tenaces y dúctiles.

Además, ciertos metales que en su estado normal no se distinguen por su conductividad eléctrica, se convierten en superconductores.

Aunque existen once gases básicos que pueden licuarse a temperaturas inferiores a  $-100$  °C solo de cuatro se dispone en abundancia, y son: el nitrógeno, el oxígeno, el helio y el hidrógeno.

La elección del gas licuado se hace en función de la técnica a emplear, de la temperatura requerida y del comportamiento fisicoquímico de aquel.

El oxígeno, por ejemplo, promueve la combustión, el cual constituye un factor muy importante a tener en cuenta en su aplicación.

El hidrógeno es combustible.

El nitrógeno y el helio no son combustibles.

El punto de licuación del helio es el más bajo de todos los gases,  $-269$  °C (a solo  $4$  °K del cero absoluto).

El helio existe en el aire en proporciones minúsculas.

Comercialmente se produce por licuación y fraccionamiento de gases naturales que lo contienen.

<sup>1</sup> Excepcionalmente el  $\text{CO}_2$  y  $\text{N}_2\text{O}$  presurizados entre  $-20$  °C y  $-40$  °C.

El hidrógeno se suele obtener por descomposición catalítica de hidrocarburos además de la electrolisis del agua.

El oxígeno, nitrógeno y argón se obtienen por licuación del aire y destilación fraccionada de este.

Por su abundancia, disponibilidad y por tratarse de un gas inerte, el nitrógeno licuado es el fluido criogénico por excelencia.

El nitrógeno licuado es un líquido incoloro.

El nitrógeno líquido tiene diversas aplicaciones en la industria: congelación de productos perecederos, criobiología, termorregulación de reacciones químicas, marcado de reses, zunchado por contracción, congelación de suelos, criomulturación, criodurecimiento, desbarbado del caucho, además de muchas más aplicaciones.

La congelación de productos perecederos se remonta a 1930 en donde se desarrollaron los primeros experimentos sobre su utilización.

En aquel entonces eran muy limitadas las cantidades disponibles de nitrógeno líquido, resultando el precio de este demasiado alto para considerar su utilización industrial en la congelación de alimentos.

Sin embargo, en los últimos cuarenta años han aparecido numerosas aplicaciones del nitrógeno líquido como fluido frigorígeno.

Asimismo, se ha acometido su producción en instalaciones de gran porte, con la consiguiente reducción de los costes de fabricación.

Los actuales precios del nitrógeno líquido en el mercado internacional sitúan este producto en condiciones de franca competencia frente a cualquier otro sistema convencional de refrigeración.

El principio de congelación se basa en utilizar el nitrógeno líquido como fluido frigorígeno que se inyecta directamente en el interior de un túnel, a través de un conjunto de pulverizadores, con caudal proporcional a las cantidades de productos que lo atraviesan.

El líquido se pulveriza directamente sobre los productos, vaporizándose al contacto con ellos.

De esta forma se produce un intercambio térmico entre el gas que se calienta y el producto que se enfría.

El producto se congela entonces y, seguidamente, equilibra las temperaturas.

La gran diferencia de temperatura entre productos y agente frigorígeno permite lograr, además, grandes velocidades de congelación y con ello un producto congelado que retiene inalteradas sus propiedades, siendo, por tanto, de la más alta calidad.

También se puede realizar la congelación en armarios.

Este sistema resulta particularmente idóneo para factorías de producción de tamaño medio que tratan productos muy diversos en el mismo día, la puesta a punto industrial de las nuevas preparaciones para realizar pruebas de mercado de forma eventual y, muy especialmente, para refrigeración y congelación de platos cocinados para hospitales, colegios, restaurantes de empresa y toda clase de colectividades donde las costumbres de alimentación evolucionan, día a día, y los platos cocinados industriales están alcanzando una importancia preponderante.

La congelación criogénica presenta una serie de ventajas, como son:

- **Gran velocidad del producto final**

Utilizando el nitrógeno líquido como agente congelador, la deshidratación del producto es prácticamente nula.

Con otros procesos de congelación mecánicos las pérdidas de peso por deshidratación raramente son inferiores al 4%.

La velocidad de congelación consigue que el producto mantenga una estructura celular muy próxima a la de su estado fresco, conservando todas sus propiedades organolépticas.

Por el contrario, la congelación por medios mecánicos, dada su lentitud, conduce a importantes degradaciones del producto rompiendo su estructura celular y eliminando proteínas.

- **Menor mano de obra**

La congelación con nitrógeno líquido no obliga a colocar el producto en bandejas, de donde resultan manipulaciones excesivas, costosas y que afectan la calidad del producto.

- **Otros factores**

La reducida inversión inicial del equipo frigorífico, sus dimensiones pequeñas, el bajo consumo de energía eléctrica, el reducido gasto de mantenimiento de la instalación, la versatilidad, la simplicidad de manejo y la seguridad de su funcionamiento ya que el nitrógeno líquido no es tóxico por lo que no ejerce ninguna acción nociva sobre el personal que lo maneja.

La criobiología se emplea en la congelación y conservación posterior de células vivas, cultivos de tejidos, fermentos lácticos, sangre, semen, etc.

La termorregulación de reacciones químicas es la síntesis de antibióticos.

Las últimas técnicas en la fabricación de nuevas penicilinas aconsejan trabajar a temperaturas inferiores a  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

El marcado de reses es el procedimiento operativo consistente en introducir las marcas de nitrógeno líquido, enfriándolas hasta la temperatura de  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

A continuación se aplican apoyando fuertemente durante un período de 30 a 35 segundos, sobre una zona oscura de la res esquilada con anterioridad.

La marca aparece seca y recubierta de película provocando que el pelo que crece en dicha zona sea blanco.

El zunchado por contracción es el acoplamiento de dos piezas metálicas logrado al introducir, mediante un medio apropiado, todo o parte de una de las piezas en un alojamiento de la misma forma, pero de dimensiones ligeramente inferiores.

La congelación de suelos sirve para la apertura de un pozo o de una galería en terrenos pantanosos donde la estabilidad para perforar es pequeña.

La criomulturación es el empleo del polvo del plástico para varios fines industriales, bien como recubrimiento o como polvos para el moldeo de piezas.

La temperatura a la que se realiza este proceso está por debajo de los  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

El proceso de crioendurecimiento tiene por finalidad aumentar transitoriamente las características mecánicas de las piezas de caucho, en particular su dureza.

El desbarbado del caucho se realiza a temperaturas de  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  y consiste en eliminar sus impurezas en forma de pelos.

En general la criogenia, en comparación con los métodos tradicionales, reduce tiempo en el proceso de congelación, abarata coste, requiere de menos mano de obra, reduce las dimensiones del equipo, consume menos energía eléctrica, es de simple manejo, su mantenimiento requiere poco gasto y la seguridad de funcionamiento es grande.

Este desarrollo tecnológico ha creado una revolución industrial y científica incidiendo notablemente sobre la economía y la sociedad, aplicándose en todo el espectro productivo y tecnológico actual como la soldadura, la iluminación, la medicina, los aceros, la industria aeroespacial, el transporte, la conservación de alimentos, el medio ambiente, etc.

Hoy en día, mediante la aceleración de las moléculas a baja temperatura realizada en laboratorios,

se siguen investigando las aplicaciones criogénicas próximas al cero absoluto, llegándose a alcanzar en la investigación actual valores cercanos a  $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$  en los aceleradores de partículas.

Y otras aplicaciones con otros fluidos criogénicos procedentes del petróleo como son el caso del gas natural líquido ( $>90\%$  de metano -  $\text{CH}_4$ ) a  $-164\text{ }^{\circ}\text{C}$  aplicado al consumo industrial y doméstico, en sustitución de otras energías alternativas, así como a la producción de energía eléctrica-co-generación.

El etileno líquido  $\text{C}_2\text{H}_2$  a  $-104\text{ }^{\circ}\text{C}$  empleado para la maduración de frutas, vegetales y otras aplicaciones afines.

## HISTORIA Y ANTECEDENTES

Desde la antigüedad filósofos griegos habían tenido ciertos indicios sobre el comportamiento del aire.

A partir de los siglos XVII y XVIII personajes como Galileo, Torricelli, Pascal o Puy-de-Dôme comienzan a definir su comportamiento.

Años más tarde, Boyle (Inglaterra) y Mariotte (Francia) demuestran experimentalmente que la relación es inversamente proporcional entre el volumen y la temperatura del aire.

Guy Lussac comienza a definir el límite más bajo que puede alcanzar la temperatura de  $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Se trata del *cero absoluto* en la escala termodinámica de la temperatura y que quedará definido más adelante por Lord Kelvin.

En Francia, Monge y Clouet realizan a finales del siglo XVIII las primeras experiencias de la licuefacción (hacer líquida las formas gaseosas) de los compuestos gaseosos por simple enfriamiento y con la ayuda de mezclas refrigerantes químicas.

Faraday, el gran físico inglés, desarrolla nuevas novedades a los principios anteriores basándose en un número determinado de gases fácilmente licuables. Sus métodos utilizados eran muy rudimentarios y conllevaban gran riesgo en su manipulación. Así se consiguen alcanzar temperaturas inferiores a los  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

El alemán Linde es el primero en desarrollar todos estos fenómenos a escala industrial junto con el francés Claude, a principios del siglo XX, desarrollando el ciclo de la licuefacción para aplicaciones industriales.

El francés Claude separa los elementos del aire mediante destilación a baja temperatura y permite

que nuevas materias primas sean extraídas de la variedad de mezclas de gases con las que trabaja, como la obtención de etileno ( $-104\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), de gran importancia para la industria del plástico.

#### 1564-1642

Galileo estudia experimentalmente el aire diciendo que es pesado y que es materia.

#### 1577-1644

Van Helmont (Bélgica). Médico y químico, es descubridor del *jugo gástrico*, empieza utilizar la palabra *gas*.

#### 1743-1794

Lavoisier. Descomposición química del aire.

#### 1800

En este siglo se fueron desarrollando las reacciones del *carburo de calcio* con *agua*, para hacer *acetileno* y con ello se quemaba en el aire, produciendo una luz brillante blanca.

Se empezó utilizando el carburo disuelto en agua en unos candiles que fueron usados por los mineros y se extendió al principio, incluso a la iluminación de calles.

#### 1801

Robert Hare (EE UU). Inventa el soplete oxhídrico ( $+ 2.830\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

En una de sus reacciones químicas produjo un gas inflamable, denominado *acetileno*.

#### 1824

Carnot. El sistema de funcionamiento de la bomba de calor se basa en su principio termodinámico.

#### 1859

Marcel Morren (Francia). Obtuvo acetileno, cuando desarrolló el uso de electrodos de carbón para producir un arco eléctrico en una atmósfera de hidrógeno.

El desprendimiento de átomos de carbono e hidrógeno motivaron moléculas de acetileno.

Lo llamó hidrógeno carbonizado.

#### 1860

Berthelot (Francia) es el primero que estudia las propiedades de este gas y es el que propone el nombre de acetileno.

#### 1879

Werner Von Siemens. Presentó en Berlín el primer coche eléctrico.

#### 1890

Moissan (Francia) y Wilson (Canadá), producen carburo de calcio, tomando a partir de aquí la importancia industrial del acetileno.

#### 1847

Renault. Fabricación del neumático.

Proceso de vulcanización del azufre.

#### 1891

Michélin. Uso industrial del neumático en automóviles.

#### 1892

El acetileno se utiliza ya industrialmente para la fabricación de linternas para automóviles, iluminación de faros y balizas.

#### 1896

Claude, físico e industrial francés, y Hess<sup>2</sup> (Austria), idearon emplear el acetileno disuelto en acetona, solución sometida a una presión de una decena de bar.

#### 1897

Le Chatelier (Francia). Se le ocurrió alojar esta solución de acetileno disuelto en recipientes guarnecidos de una materia porosa, teniendo la ventaja de hacer regular la emisión del gas.

#### 1898

En Malakoff, un pequeño municipio de Francia, cerca de París, se producían  $15\text{ m}^3$  de acetileno al día, para alojar el gas en botellas que contenían acetona y una materia porosa, y que servían para la iluminación de los tranvías.

Muy pronto percibieron que la materia porosa tenía también la ventaja de proporcionar un complemento de seguridad evitando la propagación de una descomposición del acetileno y permitiendo así asegurar la utilización de botellas y su transporte.

En efecto, vieron la buena calidad de la materia que daba seguridad al transporte y al empleo de las botellas de acetileno.

<sup>2</sup> Físico. Premio Nobel de Física en 1936.

### 1903

Charles Picard (Francia) es el inventor del *soplete oxiacetilénico* (alcanza la temperatura de 3.100 °C) en aplicaciones para soldadura y corte del acero.

### 1930

En esta época se empiezan a conocer los procesos de pirólisis de diversos hidrocarburos.

### 1905/1906

Nils Dalen usó el método de Claude y Hess para desarrollar aplicaciones relacionado con las señales luminosas del mar y ferrocarril.

### 1906

Desarrollo de la antorcha de acetileno para soldadura y corte.

### 1920

La firma alemana BASF desarrolló un proceso para el acetileno de la fabricación del gas natural e hidrocarburos, base del petróleo.

### 1940

La primera fábrica de producción de acetileno a través del gas natural e hidrocarburos a base del petróleo se instaló en Alemania.

### 1950

Esta tecnología empezó a desarrollarse en los Estados Unidos y rápidamente se comenzó a producir acetileno industrialmente, extendiéndose mundialmente.

### 1965/1970

Alrededor del acetileno aparecieron nuevos procesos dirigidos a la fabricación de plásticos y sustancias químicas.

En Estados Unidos su producción alcanzó su punto máximo.

### 1970/1980

En esta década cayó bruscamente la producción de acetileno a causa de los costes de las materias primas.

### 1980

Sube la demanda de acetileno y un ratio anual que va del 2 al 4%.

### 1991

En Estados Unidos funcionan unas ocho plantas de producción de acetileno, que equivalen a una producción total de 0,16 millones de ton/año.

Esta producción fue sacada tratando un 66% del gas natural y un 15% del tratamiento del petróleo.

El resto, 19% fue sacado a través del carburo de calcio.

Las aplicaciones fueron fundamentalmente usadas para llenar cilindros (botellas) a presión para soldadura y corte, además de otras aplicaciones en menor escala, entre ellas para la obtención de sustancias químicas orgánicas.

## ACETILENO Y PETROLEOQUÍMICA

Durante numerosos años la única fuente industrial del acetileno fue el carburo de calcio.

La petroquímica se desarrolló en el curso de estas últimas décadas, cediendo un sitio creciente al gas natural y al petróleo en la producción de energía y la química y consecuentemente se reflejó sobre la química del acetileno.

Numerosos procedimientos de síntesis del acetileno fueron estudiados y puestos en ejecución, sobre el empleo del carburo de calcio, por tener la ventaja de producir un acetileno más barato a partir de primera materia, más barata y disponible en cantidades importantes.

## REFORMADO DE HIDRÓGENO AL VAPOR

*Cracking*<sup>3</sup>. Fractura, desintegración molecular, denominado también craqueo.

Partiendo de la alta temperatura del metano, etano o de los hidrocarburos<sup>4</sup> más pesados, se obtiene también acetileno, carbono negro, hidrógeno, carburos acetilénicos, etilénicos pesados y otros.

La proporción de estos diferentes constituyentes depende de los cuerpos tratados y condiciones de operación, particularmente de la temperatura y la duración de reacción y en particular de la proporción de acetileno.

Los procedimientos son numerosos y pueden ser clasificados en tres categorías:

<sup>3</sup> Se usará este término en general cuando responde a un proceso de fractura (demolición) del petróleo en productos más finos (por ejemplo: la gasolina), empleando calor, en general presión, catálisis, o alguna combinación de estos.

<sup>4</sup> Hidrocarburo: es un compuesto binario de carbono C e hidrógeno H; ejemplos: el petróleo y el gas natural.

- Oxidación parcial (combustión de hidrocarburos).
- Pirólisis térmica.
- Pirólisis en un arco eléctrico.

### PROCEDIMIENTO DE OXIDACIÓN PARCIAL

La energía necesaria para el *cracking* (craqueo-fractura).

Es el origen de la combustión de una parte de los gases combustibles.

Se necesitan aportes de cantidades importantes de oxígeno, equivalente en peso al valor de acetileno formado.

Hay que asegurar un enfriamiento mediante la pulverización con agua.

El disolvente utilizado para la extracción del acetileno puede ser acetona, dimetilformamida, metanol o amoniaco.

### PROCEDIMIENTO DE PIRÓLISIS TÉRMICA

La energía necesaria para el *cracking* es aportada previamente mediante hornos y por contacto con una pared previamente calentada.

El procedimiento Wulff trata el propano y el butano, utilizando alternativamente dos hornos entre los que uno es calentado por la combustión en el aire de hidrocarburos “baratos”, mientras que el otro, el precalentado del mismo modo, es sometido a un vacío (250 Torr) y el gas es atravesado mediante el añadido de agua, provocando la fractura.

Los gases son enfriados precipitadamente y el Acetileno es absorbido por la dimetilformamida,  $\text{HCON}(\text{CH}_3)_2$ .

### PIRÓLISIS ARCO ELÉCTRICO

El flujo de hidrocarburos es llevado a temperatura muy alta atravesando un arco eléctrico.

El procedimiento Hüls, que trata hidrocarburos líquidos, utiliza la corriente alterna.

El arco es muy largo, necesario para la disociación, está formado por numerosos pequeños arcos de duraciones cortas.

En la cuba de *cracking*, donde se encuentra el petróleo crudo o alquitrán, contiene además los electrodos de grafito, pequeñas bolas de coque o carbón, entre las cuales se producirán descargas eléctricas mientras la corriente pasa.

Para la obtención del acetileno, las mejores condiciones son cuando las reacciones son cortas y seguidas de un enfriamiento inmediato.

### GENERALIDADES FISICOQUÍMICAS

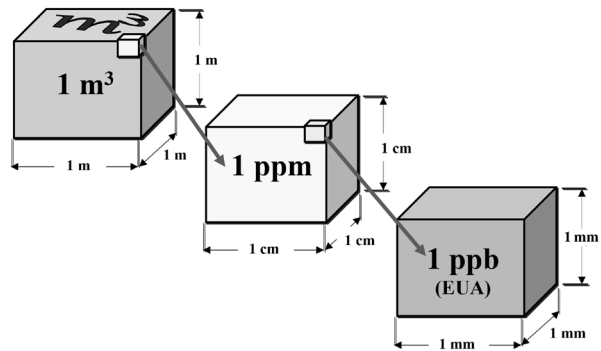
#### Masa volumétrica

La masa volumétrica indica que la unidad de volumen  $1 \text{ m}^3$ ,  $1 \text{ litro}$ , o  $1 \text{ cm}^3$ , representa una masa cierta, expresada por ejemplo en kilogramos, en ciertas condiciones de temperatura y de presión, por ejemplo a  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $1,013 \text{ bar}$ .

Entre estas unidades a las condiciones normales se encuentran el ppm y ppb. (Véase Figura 1.1).

$1 \text{ ppm}$  Una parte de millón respecto a  $1 \text{ m}^3$ .

$1 \text{ ppb}$  Una parte de billón respecto a  $1 \text{ m}^3$ .



**Figura 1.1.** Relación entre el  $\text{m}^3$ , ppm y ppb (EUA).  
EUA = Estados Unidos de América ( $1\text{ppb}=10^{-9}$ ). Métrico:  $1 \text{ ppb}=10^{-12}$

#### Densidad relativa

Parámetro relativo, situando un cuerpo con relación a otro tomado como referencia.

Las densidades de los gases son expresadas con relación al aire.

Las densidades de los líquidos y de los sólidos son expresadas con relación al agua.

La densidad “d” de un cuerpo es pues la relación entre su masa volumétrica y a la masa volumétrica del cuerpo de referencia tomado en las mismas condiciones de temperatura y de presión.

Si el cuerpo tiene la misma masa volumétrica que el cuerpo de referencia, entonces  $d = 1$ .

Si el cuerpo es más ligero que el cuerpo de referencia:  $d < 1$ .

Si el cuerpo es más pesado que el cuerpo de referencia:  $d > 1$ .

## Consecuencias prácticas

Un gas de densidad  $d < 1$  se eleva en el aire.

Un gas de densidad  $d > 1$  se acumula en los puntos bajos.

El volumen varía con arreglo a la presión y temperatura, ocupando la masa un volumen diferente con arreglo a estos mismos parámetros.

La masa volumétrica, masa para  $1 \text{ m}^3$  de gas, también varía con arreglo a la presión y con arreglo a la temperatura.

Suponiendo un globo hinchado y que contiene una cantidad definida de gas, este ocupa un cierto volumen a la presión atmosférica y a la temperatura ambiente.

Supongamos que está sumergido en una profundidad de agua a la misma temperatura, después lo desplazamos hacia otro medio inmerso a una presión más elevada, entonces, el volumen del globo disminuye.

Siempre a la misma temperatura, pero colocado en un recinto bajo un vacío parcial, su volumen es más importante que a la presión atmosférica.

En cambio, colocado en un medio a la presión atmosférica pero a la temperatura más elevada, el volumen aumenta.

En un congelador, siempre a presión atmosférica, el volumen de la cantidad de gas existente disminuye.

Resulta que para la misma masa de gas:

- Cuanto más aumenta su volumen, más disminuye su masa volumétrica.
- Cuanto más disminuye su volumen, más aumenta su masa volumétrica.

## Constitución de la materia. El átomo

La materia está constituida de átomos libres o asociados.

Un átomo, o elemento, es la parte más pequeña de un cuerpo que puede entrar en una combinación química (véase Figura 1.2).

Se compone de un núcleo donde se concentra más o menos toda su masa de una nube de electrones que gravita alrededor del núcleo sobre una o varias órbitas o capas situadas en planos diferentes.

El núcleo es electropositivo y cada electrón es electronegativo.

Al ser eléctricamente neutro el átomo, hay tantas cargas positivas como negativas.

Cada núcleo está constituido por dos tipos de partículas:

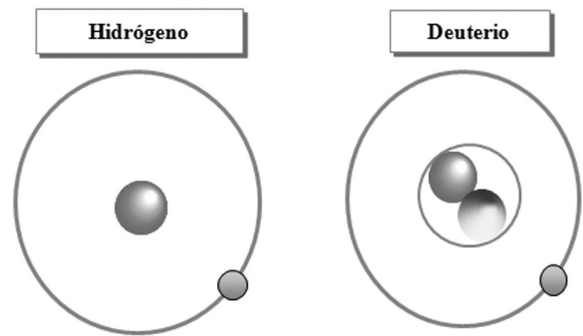


Figura 1.2. El átomo: hidrógeno y deuterio.

Las partículas electropositivas o protones, las partículas neutras o neutrones.

Hay pues tantos protones en el núcleo como electrones en órbitas (véase Figura 1.3).

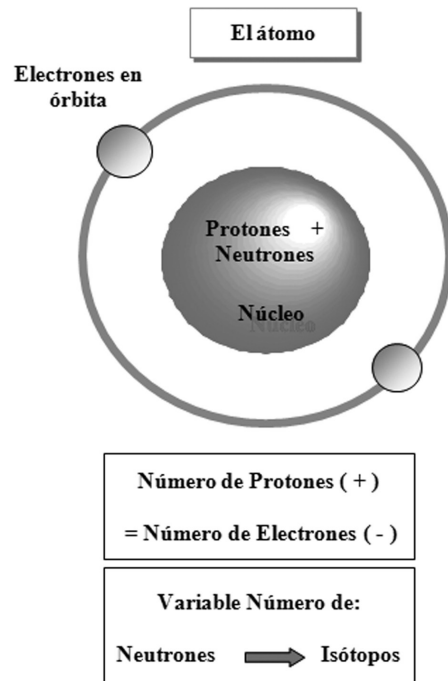


Figura 1.3. El átomo: núcleo y electrones.

Para el mismo cuerpo, puede haber un número variable de neutrones en el núcleo.

Estos átomos diferentes son llamados isótopos de este cuerpo.

Un ión es un átomo que perdió o ganó uno o varios electrones, respectivamente se distingue:

- El ión positivo o el catión es el que perdió uno o varios electrones, y el ión negativo o anión es el que ganó uno o varios electrones.
- La ionización de un gas es posible por una aportación de energía como puede ser un campo eléctrico intenso, llama, colisión con

partículas de alta energía, radiación luminosa, frotamientos, etc.

El átomo de hidrógeno es el elemento más simple del universo.

Consta de un núcleo que contiene solo 1 protón, y 1 electrón en órbita.

Existen varios isótopos del hidrógeno, entre los que están:

- El deuterio o hidrógeno pesado cuyo núcleo contiene 1 protón y 1 neutrón.
- El tritio (radiactivo), cuyo núcleo contiene un protón y 2 neutrones.

Igualmente, hay dos variedades de helio. Véase Figura 1.4:

- El helio 4 o  ${}^4\text{He}$  con 2 protones, 2 neutrones y 2 electrones. Es el más abundante.
- El isótopo helio 3 o  ${}^3\text{He}$  con 1 neutrón, 2 protones y por 2 electrones.

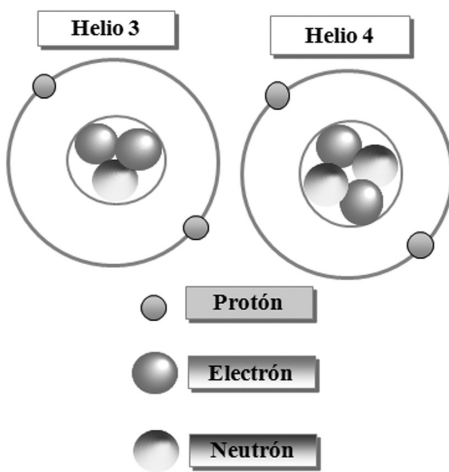


Figura 1.4. El átomo: helio 3 y helio 4.

Los átomos de carbono y de oxígeno u otros átomos que poseen varias capas de electrones, cada una puede contener un número máximo (por ejemplo, la primera capa más próxima al núcleo es saturada con 2 electrones y la segunda es saturada con 8 electrones).

La capa más periférica puede perder electrones (o ganarlos según el sitio disponible), y desempeña un papel esencial en las propiedades químicas del átomo. (Véase Figura 1.5).

Se puede ver que:

- El átomo de carbono tiene una capa periférica que comprende 4 electrones y puede acoger los otros.

- El átomo de oxígeno posee 6 electrones en su periferia, dejando sitio para 2 electrones.

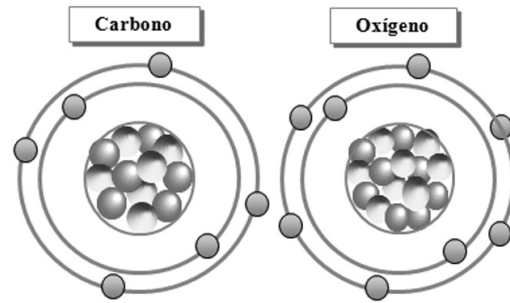


Figura 1.5. El átomo: carbono y oxígeno.

La molécula representa la cantidad más pequeña de materia que puede existir en el estado libre, o la parte más pequeña de un cuerpo que posee todas las propiedades.

Una molécula es un edificio estable compuesto de una asociación de átomos de naturalezas idénticas, se trata de un cuerpo simple, o de diferentes, se trata entonces de un cuerpo compuesto.

La fórmula química bruta de un cuerpo define la naturaleza y el número de átomos contenidos en la molécula.

Su naturaleza es definida por la inicial en mayúsculas C para el carbono, H para el hidrógeno, O para el oxígeno, etc.

El número de sus átomos siempre es recogido en el subíndice indicado después de la inicial (ejemplo:  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_2$ , etc.).

Las asociaciones de átomos se efectúa gracias a los enlaces químicos, hecho posible por:

- Transferencia de electrones-enlaces iónicos.
- Electrones comunes entre átomos (si la capa periférica de átomos no está saturada) y enlaces covalentes.

La fórmula química desarrollada define el número de enlaces químicos entre átomos, por ejemplo:

El hidrógeno,  $\text{H}_2$ , tiene por fórmula desarrollada:



que significa que el enlace entre átomos de hidrógeno es simple.

En común por 1 electrón: cada uno “acoge” 1 electrón del otro.

El dióxido de carbono,  $\text{CO}_2$ , tiene por fórmula desarrollada:





significando que el enlace entre átomos de carbono y de oxígeno es doble.

En común 2 electrones: cada uno “acoge” 2 electrones del otro, y los 3 átomos quedan alineados.

### Cuerpo simple y compuesto

Se define como cuerpo simple un cuerpo cuya molécula está constituida por átomos idénticos.

Son “gases raros” cuando los átomos, todos los idénticos, no se asocian. Solo hay 1 átomo en la “molécula”.

Su fórmula química es la inicial mayúscula de la palabra, seguida por la segunda letra minúscula de la palabra, por ejemplo:

Ar para el argón, He para el helio, Kr criptón, Ne neón, Ra radón, Xn xenón, respectivamente.

Por otra parte, ciertos átomos se asocian 2 a 2 para formar los cuerpos simples diatómicos; estos son, el nitrógeno  $N_2$ , el Cloro  $Cl_2$ , el deuterio  $D_2$ , el flúor  $F_2$ , el hidrógeno  $H_2$  y el oxígeno  $O_2$ .

Existe un cuerpo simple triatómico, el Ozono,  $O_3$ .

Se define como cuerpo compuesto, un cuerpo cuya molécula está constituida por átomos de naturalezas diferentes.

Por ejemplo:

La molécula de agua  $H_2O$  resulta de la asociación de dos átomos, dos de hidrógeno y un átomo de oxígeno.

La molécula de dióxido de carbono,  $CO_2$ , está formada por un átomo de carbono y dos átomos de oxígeno.

Los hidrocarburos son combinaciones de átomos de hidrógeno y de carbono, tales como el metano  $CH_4$ , el butano  $C_4H_{10}$ , etc., y las representamos globalmente bajo la forma  $C_nH_m$ .

### Acción del $CO_2$ en cuerpos simples

Ciertos cuerpos no reaccionan con el  $CO_2$ , Es el caso del oxígeno y halógenos (flúor F, cloro Cl, bromo Br, yodo Y).

Con otros cuerpos simples, y según las condiciones de operación, es posible obtenerlos, como por ejemplo:

- Con carbón hacia unos 1.000 °C en el monóxido de carbono (esta reacción se encuentra en la fundición).
- Con el zinc hacia unos 400 °C óxido de zinc ZnO.

- Con el hierro Fe (caliente), óxido de hierro FeO.

La reacción del  $CO_2$  con el amoníaco  $NH_3$  permite sintetizar la urea.

### El mol

El mol es la unidad de cantidad de materia, es decir una cantidad definida de átomos, de moléculas o de iones.

Esta cantidad es definida por el número de:

$$N = 6,022 \times 10^{23}$$

Un mol de helio o de carbono contiene este número N de átomos.

Un mol de hidrógeno, de agua, de  $CO_2$  o de hidrocarburo contiene el mismo número N de moléculas. Así ocurre en todos los casos referidos al mol.

Cada mol tiene una masa cierta dada, por ejemplo, la masa molar del  $CO_2$  es:

$$M = 44 \text{ g}$$

Y una masa atómica de cada elemento, es decir, la masa de los átomos de cada uno de ellos.

Resulta que la masa molar de un cuerpo simple monoatómico es su masa atómica.

En cambio, las masas molares de otros cuerpos pueden ser calculadas a partir de las masas atómicas de los elementos que entran en la composición de sus moléculas, por ejemplo:

Masa molar del hidrógeno = suma de las masas atómicas:

$$H + H = 1 + 1 = 2 \text{ g}$$

Masa molar del agua = suma de las dos masas atómicas:

$$H + H + O$$

$$M = 1 + 1 + 16 = 18 \text{ g}$$

Masa molar del  $CO_2$  = suma de las dos masas atómicas:

$$M = 12 + 16 + 16 = 44 \text{ g}$$

Cada mol ocupa el mismo volumen en las mismas condiciones de presión y de temperatura; así, en las condiciones normales (0° Celsius y 1,013 bar), el volumen molar es:

$$V = 22,414 \text{ litros}$$

Su uso debe expresar las cantidades de gas en volúmenes.

Esto implica que estos volúmenes deben ser definidos con arreglo a los parámetros “presión” y “temperatura”, en condiciones de referencia.

En el ámbito internacional se acordó científicamente usar las condiciones definidas como TPN o Temperatura y Presión Normal, es decir:

- Temperatura a: 0° Celsius = 0° Centígrado = 0 °C.
- Presión atmosférica “normal” de 1,013 bar.

Nm<sup>3</sup> se define como “normales metro cúbico”.

En el entorno industrial se dan otras condiciones definidas como “estándar”:

Temperatura a: 15° Celsius.  
Presión atmosférica “normal” de 1,013 bar.  
Se define como estándar normal metro cúbico, Nm<sup>3</sup>.

Los caudales volumétricos se definen en condiciones normales y medidos en normales metros cúbicos por hora Nm<sup>3</sup>/h.

En los aparatos de medida, como caudalímetros y otros, quedará escrito sobre los mismos los valores y condiciones presión y temperatura.

## ENLACES. DISOCIACIÓN

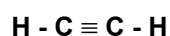
De manera general, una molécula puede ser disociada o rota, si recibe bastante energía.

El nivel de energía necesaria depende del número de enlaces entre átomos.

Los enlaces dichos “simples” son los más sólidos.

Hay que aportar mucha energía para que sean rotos, y separar así los elementos constitutivos de la molécula.

Los enlaces, cuanto más numerosos, más frágiles y peligrosos explosivos son, como por ejemplo en el caso del acetileno, que triplica el enlace entre átomos del carbono de acuerdo con la fórmula desarrollada:



y que da una descomposición explosiva.

Los enlaces dobles:



de la molécula de CO<sub>2</sub>, no son muy frágiles.

Sin embargo, comienza a disociarse en elementos carbono y oxígeno a partir de 1.700 °C.

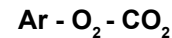
A 3.000 °C, cerca del 75% de las moléculas son disociados, y este fenómeno alcanza el 100% a 4.000 °C.

Esta particularidad debe ser tenida en cuenta en las aplicaciones a temperatura muy alta como en los casos siguientes:

- Soldadura MAG (*Metal Active Gas*): protección de los cordones de soldadura por CO<sub>2</sub> o mezclas que contienen:



o



Inertizado de coladas de acero con nieve carbónica.

## CATALIZADORES

Aplicado en algunas reacciones químicas o en la reducción del CO<sub>2</sub> por el hidrógeno (hidrogenación).

Según las condiciones de operación, elección del catalizador, alcance de la temperatura, es posible obtener:

- Monóxido de carbono, CO<sub>2</sub>, bajo catalizador de platino a 1.000 °C.
- Metano, CH<sub>4</sub>, sobre diferentes metales y mezclas, hacia 200 °C y 1 bar.
- Metanol, CH<sub>3</sub>OH, sobre catalizadores<sup>5</sup> que pueden contener: zinc, cobre, cromo, manganeso o alúmina, entre temperaturas de 240 °C y 400 °C, y presiones de 450 a 750 bar.

## CAMBIOS DE ESTADO

Durante la transformación, tres situaciones y dos estados pueden permanecer:

- 1.- Sólido + líquido
- 2.- Líquido + vapor (gas)
- 3.- Sólido + vapor (gas)

Véase Figura 1.6.

<sup>5</sup> Catalizador = cuerpo que favorece una reacción química sin formar parte.