INDICE

I.- SISTEMAS TERMODINAMICOS

Introducción a la Termodinámica.- Sistemas macroscópicos	*1*
Ecuaciones de estado	*3*
Superficies de estado	*4*
Coeficientes de dilatación, piezotérmico y compresibilidad	*7*
Ecuación de estado de un gas perfecto	*8*
Expresiones matemáticas que definen un gas perfecto	*10*
Relación entre la unidad de masa y el mol.- Leyes de Dalton y Amagat	*11*

II.- GASES REALES

Concepto de gas real	*13*
Potencial de Lennard-Jones	*13*
Ecuaciones de estado de los gases reales	*14*
Ecuación de Van der Waals	*15*
Fluidos condensables	*16*
Proyecciones de la superficie (p,v,T).- Diagramas de fases	*17*
Diagrama de fases (p,T)	*17*
Concepto de línea trible. Punto triple	*17*
Superficie (p,v,T) de una sustancia que se expande al congelarse. Diagrama de fases y (p,v)	*17*
Superficie (p,v,T) de una sustancia que se comprime al congelarse. Diagrama de fases y (p,v)	*18*
Diagrama (p,v)	*18*
Isotermas	*18*
Ley de estados correspondientes	*19*
Factor de compresibilidad	*19*
Diagramas del factor de compresibilidad generalizado de Nelson-Obert (presiones altas y medias)	*20*
Curva y temperatura de Boyle	*21*
Otras ecuaciones del comportamiento de los gases reales	*21*
Aplicación de la ecuación del virial	*22*
Ecuaciones de estado de segundo grado, $p < 15$ atm	*22*
Ecuaciones de estado de tercer grado, $30 < p < 50$ atm	*23*
Correlaciones generalizadas para gases	*24*
Técnicas de iteración	*24*
Volúmenes de vapor	*24*
Volúmenes líquidos	*25*
Factor de compresibilidad	*25*
Ecuación de Redlich / Kwong	*25*
Ecuación de Benedict / Webb / Rubin	*26*
Factor acéntrico	*26*
Método gráfico	*29*
Correlaciones para Z desarrolladas por Pitzer	*30*
Método analítico	*31*
Correlaciones generalizadas para líquidos. Ecuación de Rackett	*32*

III.- CALOR Y TRABAJO

Naturaleza física del calor	*33*
Capacidad calorífica	*33*
Calor específico	*34*
Calores específicos de los gases	*35*
Calores específicos para algunos gases comunes en condiciones de gas ideal	*36*
Calor específico de algunos gases en el intervalo, 0°C- 1500°C	*37*
Trabajo de expansión de un gas	*38*

Equivalencia entre calor y trabajo	*38*
Trabajo de expansión en sistemas gaseosos	*38*
Transformaciones reversibles	*39*
Transformaciones irreversibles	*39*
El calor de reacción estándar	*40*
Tabla de calores específicos a presión constante de algunos gases en el estado de gas ideal	*41*
Calor de formación standar	*42*
Tabla de calores específicos de algunos sólidos	*43*
Tabla de calores específicos de algunos líquidos	*43*
El calor de combustión estándar	*45*
Tabla de calores estándar de formación de la sustancia formada a 25°C en, J/mol	*46*

IV.- PRIMER PRINCIPIO DE LA TERMODINAMICA

Introducción al Primer Principio	*47*
El Primer Principio y los sistemas cerrados	*49*
Energía de un sistema cerrado	*49*
Balance de energía de un sistema estacionario	*50*
Ecuaciones energéticas de un sistema	*51*
Procesos a: v = Cte , p = Cte , T = Cte y Q = Cte	*51*
Coeficientes calorimétricos de un sistema homogéneo	*52*
Transformaciones adiabáticas	*53*
Teorema de Reech	*54*
Transformaciones politrópicas; índice de politropía	*55*
Transformaciones a volumen constante	*56*
Transformaciones a presión constante; concepto de entalpía	*56*
Transformaciones isotérmicas	*57*
Trabajo de rozamiento	*58*
Transformación real o politrópica irreversible	*58*
Politrópica reversible	*58*

V.- APLICACIONES DEL PRIMER PRINCIPIO A SISTEMAS ABIERTOS

Energía de una corriente fluida	*59*
Energía almacenada en un sistema abierto	*60*
Balance energético de un sistema aislado	*60*
Ecuación energética de un fluido en régimen estacionario	*62*
Consideraciones termodinámicas	*62*
Consideraciones mecánicas	*63*
Procesos de calentamiento y enfriamiento	*64*
Procesos en tubos aislados, toberas y difusores	*64*
Turbinas y compresores	*64*
Efecto Joule Kelvin	*65*
Líneas isoentálpicas y curva de inversión	*66*
Tabla del efecto Joule-Kelvin para el aire	*67*
Ecuación de Bernoulli	*68*
Formulación de Saint.-Venant	*69*
Formulación de Torricelli	*70*
Formulación de Navier para expansión isoterma	*70*
Formulación de Weisbach y Grashoff	*70*
Formulación de Zeuner	*70*
Flujo no estacionario	*71*

VI.- SEGUNDO PRINCIPIO DE LA TERMODINAMICA

Introducción y definiciones del Segundo Principio de la Termodinámica	*73*

Transformaciones cíclicas monotermas	*74*
Transformaciones cíclicas con dos fuentes térmicas	*75*
Ciclo de Carnot	*77*
Función entropía	*80*
Teorema de Clausius	*81*
Variación de la entropía en procesos reversibles	*82*
Entropía de una mezcla de gases ideales	*83*
Diagrama entrópico	*84*
Representación entrópica de algunas transformaciones	*85*
Ciclo de Carnot en el diagrama entrópico	*87*
Aprovechamiento de un salto térmico	*88*
Ciclo de Carnot con irreversibilidad térmica externa	*88*
Energía utilizable en las transformaciones cíclicas	*89*
Ciclos con irreversibilidades internas	*90*

VII.- LEYES DEL EQUILIBRIO DE LAS TRANSFORMACIONES REALES

Sistemas termodinámicos	*93*
Sistemas térmicamente aislados	*93*
Sistemas a temperatura y volumen constantes. Potencial de Helmholtz	*93*
Sistemas a presión y temperatura constantes. Función de Gibbs	*94*
Relaciones de Thomson	*95*
Trabajo técnico	*96*
Ecuaciones de Maxwell	*98*
Función termodinámica U. Primera ecuación de Maxwell	*98*
Función termodinámica F. Segunda ecuación de Maxwell	*98*
Función termodinámica I. Tercera ecuación de Maxwell	*99*
Función termodinámica G. Cuarta ecuación de Maxwell	*99*
Potencial químico	*99*
Ecuaciones de Gibbs-Helmholtz	*101*
Ecuación de Clausius.-Clapeyron	*101*
Cambios de fase de Primer Orden	*102*
Ecuación de Riedel	*103*
Ecuación de Watson	*104*
Cambios de fase de Segundo Orden; ecuaciones de Ehrenfest	*104*
Aplicaciones conjuntas de los dos Primeros Principios Termodinámicos	*105*

VIII.-RENDIMIENTO Y EXERGÍA

Rendimiento	*109*
Coeficiente de calidad, rendimiento mecánico y total	*111*
Determinación del coeficiente de calidad mediante el diagrama entrópico	*110*
Potencia indicada, potencia útil, consumo de combustible y coste de la energía producida	*112*
Concepto de exergía	*113*
Concepto de medio ambiente	*113*
Concepto de estado muerto	*114*
Cálculo de la exergía	*115*
Balance de exergía para sistemas cerrados	*117*
Transferencia de exergía	*119*
Exergía de flujo	*120*
Balance de exergía en un volumen de control	*122*
Eficiencia exergética en turbinas	*123*
Eficiencia exergética en bombas y compresores	*124*
Eficiencia exergética en intercambiadores de calor de superficie	*124*
Eficiencia exergética en intercambiadores de calor de mezcla	*125*
Aplicación a ciclo Brayton normal	*128*
Aplicación a ciclo Brayton con regeneración ideal	*130*

Aplicación a ciclo Brayton con 80% de regeneración	*131*

IX.- FLUJO COMPRESIBLE

Relaciones entre el coeficiente adiabático y la velocidad del sonido en un fluido compresible	*133*
Formulación de Hugoniot	*135*
Derrame por toberas	*137*
Condiciones críticas	*139*
Estudio de una corriente fluida en una tobera Laval	*140*
La presión de salida es ligeramente superior a la presión crítica	*141*
La presión de salida es igual a la presión crítica	*141*
La presión de salida es menor que la presión crítica	*141*
La presión del fluido a la salida de la tobera es mayor que la presión exterior	*142*
Perfil de una tobera por el método gráfico de Kolb	*143*
Flujo isentrópico de un gas perfecto	*144*
Gasto máxico	*145*
Onda de choque normal	*146*
Onda de choque normal en conductos	*148*
Líneas de Rayleigh y Fanno	*148*
Línea de Rayleigh	*150*
Línea de Fanno	*151*
Otras expresiones de las líneas de Rayleigh y Fanno, en coordenadas (i-s)	*152*
Línea de Fanno	*152*
Línea de Rayleigh	*155*
Flujo adiabático en conductos de sección constante, con rozamiento	*156*
Bloqueo debido a la fricción	*160*
Flujo sin rozamiento por el interior de conductos con transferencia de calor	*161*
Flujo isotermo permanente en tuberías largas	*163*
ANEXO.- Aerodinámica compresible subsónica y transónica	*166*
Ecuación de Laplace	*167*
Aerodinámica superdónica	*169*
Aerodinámica hipersónica	*173*
Tablas de líneas de Rayleigh y Fanno	*176*

X.- CICLOS DE MAQUINAS TERMICAS QUE FUNCIONAN CON GAS

Ciclo de Carnot	*195*
Ciclos de igual rendimiento al de Carnot	*195*
Ciclo Stirling	*195*
Principio mecánico	*196*
Funcionamiento del motor	*196*
Rendimiento térmico	*198*
Ciclo Ericsson	*199*
Transformaciones termodinámicas del motor	*199*
Realización mecánica	*200*
Funcionamiento del motor	*201*
Ciclos de turbinas de gas	*203*
Ciclo de Atkinson	*203*
Ciclo de Brayton	*204*
Esquemas diversos, turbohélice, turbosoplante, turborreactor, máquina de chorro, etc	*204*
Ciclo Otto.-Beau de Rochas de aire estándar	*207*
Funcionamiento de un motor de 4 tiempos	*208*
Funcionamiento de un motor de 2 tiempos	*209*
Rendimiento térmico	*210*
Trabajo de compresión	*211*
Trabajo de expansión	*211*
Trabajo útil del ciclo	*212*
Par motor	*212*

Temperatura y presión alcanzados por la combustión en un ciclo Otto	*212*
Ciclo Diesel de aire estándar	*213*
Ciclo Semidiesel.-Sabathe	*215*
ANEXO.- Gasolinas	*218*

XI.- PROPIEDADES TERMODINAMICAS DE LOS FLUIDOS CONDENSABLES

Estudio de los fluidos condensables	*223*
Isoterma crítica	*224*
Presión de saturación	*225*
Título de un vapor	*225*
Estudio calorimétrico del vapor de agua	*226*
Diagrama de Izart	*227*
Diagrama de Mollier	*228*
Tablas y diagramas	*231*

XII.- CICLOS DE MAQUINAS TERMICAS

Introducción y clasificación de las máquinas térmicas	*245*
Ciclo de Carnot	*246*
Ciclo Rankine	*247*
Irreversibilidades internas de un ciclo Rankine	*248*
Irreversibilidades externas	*249*
Ciclo Rankine con sobrecalentamiento y recalentamiento	*250*
Ciclos de regeneración	*254*
Extracciones y sangrías de vapor	*254*
Esquema de ciclo Rankine con una extracción de vapor y precalentador de mezcla	*256*
Esquema de ciclo Rankine con una extracción de vapor y precalentador de superficie	*256*
Esquema de un ciclo de vapor con dos extracciones y precalentadores de flujos paralelos	*257*
Esquema de un ciclo de vapor con dos extracciones y precalentadores de mezcla	*258*
Temperatura óptima de la primera extracción de vapor	*260*
Temperaturas de extracción para dos sangrías de vapor	*260*
Temperaturas de extracción para tres sangrías de vapor	*260*
Ciclos binarios	*261*
Expansión en cilindros de trabajo	*264*
Ciclos Compound	*266*
Cogeneración	*267*

XIII.- CICLOS DE REFRIGERACION

Técnicas y sistemas de producción de frío	*269*
Clasificación de las máquinas frigoríficas	*270*
Sistemas basados en la expansión adiabática de un fluido gaseoso	*271*
Sistemas basados en la elevación de la temperatura de un fluido frigorígeno	*271*
Métodos especiales, efecto Peltier, efecto Haas-Keenson, efecto Ettingshausen, efecto Ranke-Hilsh, etc	*271*
Coeficientes de efecto frigorífico	*272*
Máquinas frigoríficas de aire	*274*
Ciclo teórico y real	*271*
Ciclo de gas con regeneración	*274*
Ciclo de Carnot de un fluido condensable	*275*
Máquinas frigoríficas de fluidos condensables con ciclos con expansión isentálpica	*279*
Compresión en régimen húmedo	*279*
Compresión en régimen seco	*280*
Sistemas de multicompresión con refrigeración intermedia	*281*
Compresión múltiple directa	*282*
Formas de obtener el enfriamiento intermedio en el compresor	*282*
Refrigeración intermedia exterior	*282*
Inyección parcial de fluido frigorígeno	*283*

Inyección directa de fluido frigorígeno	*284*
Sistema de enfriamiento intermedio por inyección directa de fluido frigorígeno	*284*
Sistemas de doble compresión y expansión con enfriador intermedio y separador de líquido	*284*
Enfriador intermedio de tipo cerrado con inyección parcial, (intercambiador de superficie)	*284*
Enfriador intermedio de tipo abierto con inyección total, (intercambiador de mezcla)	*286*
Compresores	*287*
Relación de compresión	*287*
Sistemas de compresión múltiple indirecta; refrigeración en cascada	*288*
Expansión múltiple	*290*
Instalaciones con suministro de fluido frigorígeno a distintas temperaturas	*290*
Compresión simple y expansión múltiple	*290*
Compresión doble directa	*291*
Ciclos con doble laminación; separador de líquido y refrigeración exterior	*293*
Ciclo con doble laminación y barboteo y refrigeración exterior	*294*
Esquema de ciclo con doble laminación y barboteo	*295*
Esquemas de ciclo con compresor rotativo de tornillo de dos rotores con sobrealimentación	*295*
Circuito con depósito separador flash tank	*295*
Circuito con depósito separador-subenfriador de líquido flash tank subcooler	*296*
Circuito con intercambiador de calor de carcasa-haz tubular, shell-tube subcooler	*296*
Circuito con un segundo evaporador	*296*
Principio de funcionamiento de la bomba de calor	*296*
Objetivo de la bomba de calor	*297*
Producción simultánea de frío y de calor	*297*
Bomba de calor asistida por colectores solares	*300*
Máquinas frigoríficas de eyector	*302*
Frigoríficos de absorción	*303*
Esquema de sistema de absorción (amoníaco-agua), para refrigeración	*304*
Esquema modificado del frigorífico de absorción (amoníaco-agua)	*305*
Frigorífico Servel.-Electrolux	*308*
Esquema del funcionamiento del frigorífico Servel-Electrolux	*309*
Refrigeración solar por absorción	*310*
Esquema de un sistema de acondicionamiento de aire por absorción, accionado por energía solar	*312*
Enfriamiento por absorción de forma intermitente	*312*
Esquema de refrigerador de absorción con fuente de alimentación geotérmica	*312*
Bomba de calor por absorción	*313*
ANEXO.- Fluidos frigorígenos	*315*
Clasificación de los fluidos frigorígenos	*317*
Fluidos frigorígenos	*317*
Fluidos frigoríferos	*317*
Freones. Nomenclatura	*317*
Características de calidad de los freones	*318*
Mezclas azeotrópicas; nomenclatura	*319*
Mezclas zeotrópicas y cuasiazeotrópicas; nomenclatura	*319*
Hidrocarburos saturados	*319*
Compuestos orgánicos	*319*
Regla de las fases de Gibbs	*320*
Sustancia pura (componente único)	*320*
Mezcla binaria, componentes, A + B	*321*
Mezcla zeotrópica	*322*
Diagrama de fases	*322*
Diagrama termodinámico	*323*
Representación del ciclo frigorífico en el diagrama de fases	*323*
Mezcla azeotrópica	*324*
Propiedades del refrigerante ideal	*324*
Características termodinámicas	*328*
Temperatura de congelación a la presión atmosférica	*328*
Temperatura de ebullición a la presión atmosférica	*328*
Presión de condensación	*329*

Presión y temperatura críticas	*330*
Peso molecular, constante R y exponente de compresión isentrópica del gas	*330*
Relación de presiones entre -15ºC a 30ºC	*330*
Relación de compresión	*330*
Temperatura de escape	*331*
Eficiencia COP	*331*
Volumen específico en la aspiración	*331*
Desplazamiento específico	*331*
Características físicas y químicas	*331*
Toxicidad	*331*
Inflamabilidad	*332*
Reglamentación	*332*
Grado de seguridad de los refrigerantes	*332*
Compatibilidad con materiales	*332*
Compatibilidad y solubilidad con lubricantes	*333*
Viscosidad y conductividad térmica	*333*
Características económicas	*333*
Características medioambientales	*334*
Antecedentes	*335*
Efecto invernadero	*336*
Emisiones y fugas de los fluidos frigorígenos, GWP	*336*
Consumo eléctrico del equipo refrigerador durante su vida técnica, TEWI	*337*
Potencial de destrucción del ozono, ODP	*337*
Sustituyentes	*337*
Refrigerantes sintéticos	*337*
Refrigerantes naturales	*338*
El aceite en los equipos frigoríficos	*339*
Propiedades de los aceites lubricantes	*339*
Lubricación de cilindros en los compresores frigoríficos alternativos	*340*
Ley de Raoult	*341*
Solubilidad en aceite de los diferentes fluidos frigorígenos en fase liquida	*341*
Solubilidad en aceite de los diferentes fluidos frigorígenos en fase de vapor	*342*
Esquema.- Circulación del aceite en sistemas de NH_3	*343*
Esquema.- Circulación del aceite en sistemas de R-12	*344*
Refrigerante R-134 a	*344*
Formulación	*345*
Entalpía específica	*346*
Entropía específica	*347*
Vapor húmedo	*347*
Exergía específica	*347*
Tablas de propiedades termodinámicas del R134a y diagrama (ln p, i)	*347*
Tablas de propiedades termodinámicas del Freón 142b	*359*
Tablas de propiedades termodinámicas del Freón 124	*359*
Tablas de propiedades termodinámicas del Freón FX10 (R408A) Mezcla azeotrópica	*362*
Tablas de propiedades termodinámicas del Freón FX56 (R409A) Mezcla azeotrópica	*363*
Tablas de propiedades termodinámicas del Freón FX57	*366*
Tablas de propiedades termodinámicas del Freón 22	*368*
Tabla de propiedades termodinámicas del Freón 123	*371*
Tabla de propiedades termodinámicas del Vapor de amoníaco	*374*

XIV.- CRIOGENIA

El fenómeno de la estrangulación	*375*
Curvas y coeficiente de inversión	*376*
Determinación del calor específico a presión constante de un gas	*379*
Aplicación del efecto Joule.-Kelvin a la ecuación de Van der Waals	*380*
Licuación de gases	*384*
Licuación del aire por el método Linde	*387*

Proceso Linde con presión intermedia supercrítica	*392*
Proceso Linde con presión intermedia subcrítica	*396*
Licuación por el método Claude	*398*
ANEXO.- Tratamiento industrial del aire (Antecedentes históricos)	*403*
Efecto Joule Thomson	*405*
Expansión con trabajo exterior	*411*
Fundamentos de la destilación	*413*
Técnicas de destilación	*416*
Instalaciones industriales	*419*
Procedimiento Hampson	*420*
Procedimiento Linde	*420*
Procedimiento Claude	*423*
Procedimiento Heyland	*426*
Procedimiento Fraenkl	*427*
Separación de O_2 y N_2 por vía química	*430*
Gases nobles	*431*

XV.- CICLOS DE AIRE ACONDICIONADO

Introducción al aire acondicionado	*435*
Condiciones de ventilación	*437*
Aire húmedo	*439*
Punto de rocío	*440*
Humedad relativa	*440*
Humedad específica	*441*
Grado de saturación	*441*
Tabla de propiedades termodinámicas del aire	*442*
Entalpía del aire	*444*
Entalpía del aire húmedo y del aire seco	*444*
Entalpía del aire por debajo del punto de rocío, y por debajo del punto de congelación	*445*
Peso del aire seco y del aire húmedo	*445*
Psicrómetros	*446*
Diagrama de Mollier del aire húmedo	*447*
Diagrama psicrométrico del aire (Mollier)	*449*
Diagrama psicrométrico del aire (Carrier)	*450*
Mezcla de una corriente de aire y otra de agua pulverizada, en regimen permanente	*451*
Proceso de saturación adiabática	*453*
Mezcla adiabática	*455*
Transformaciones del aire húmedo	*455*
Procesos de acondicionamiento de aire	*457*
Carga térmica de un local	*458*
Calentamiento y refrigeración del aire sin variación de la humedad específica	*459*
Enfriamiento con deshumidificación	*460*
Deshumidificación con calentamiento	*461*
Enfriamiento por evaporación	*462*
Calentamiento con humidificación	*464*
Torres de enfriamiento	*465*
Equipos de aire acondicionado	*467*
Instalaciones de aire acondicionado	*467*
Cálculo de instalaciones	*467*
Acondicionamiento de aire en invierno sin recirculación	*469*
Acondicionamiento de aire en invierno con recirculación	*471*
Acondicionamiento de aire en verano sin recirculación	*472*
Acondicionamiento de aire en verano con recirculación	*473*
Proceso típico de acondicionamiento de aire en verano	*474*

XVI.- COMBUSTION

Introducción a la combustión	*481*
Balances de materia en las combustiones completas; reacciones químicas de combustión	*482*
Características de los combustibles	*483*
Calores de reacción y potencia calorífica	*484*
Combustión estequiométrica	*484*
Cálculo del poder comburívoro	*485*
Volumen de aire mínimo por kg de combustible	*485*
Volumen de aire mínimo por m^3 de combustible	*486*
Cálculo del poder fumígeno	*487*
Volúmenes de humos y aire mínimo para combustibles sólidos, líquidos y gaseosos (Rosin)	*488*
Formulación empírica para el cálculo del volumen de humos total	*488*
Combustión con exceso o con defecto de aire	*489*
Coeficiente de exceso de aire	*489*
Volumen total de los gases de combustión	*491*
Diagrama de Ostwald	*491*
Estudio de las isolíneas del Diagrama de Ostwald	*493*
Utilización del diagrama de Ostwald	*496*
Construcción del diagrama de Ostwald	*497*
Triángulos de la combustión perfecta para combustibles sólidos y líquidos	*499*
Triángulos de combustión perfecta e imperfecta	*500*
ANEXO.- Problemas combustión	*501*

Tablas y diagramas	*515*

Indice	*589*