INDICE

I.- INTRODUCCIÓN A LAS CENTRALES TÉRMICAS

Generadores de vapor; Metodología	*2*
Metodología	*4*
Configuración del sistema	*6*
Prediseño del generador de vapor	*9*
Influencia de la fuente energética	*10*
Influencia de las condiciones del vapor	*12*
Fundamentos de la generación de vapor	*12*
Vaporización	*12*
Vaporización en tubos	*13*
Circulación natural	*13*
Circulación forzada	*14*
Componentes del generador de vapor de combustible fósil	*15*
Hogar	*16*
Sobrecalentadores y recalentadores	*16*
Banco de caldera	*17*
Economizador	*18*
Calderín de vapor	*18*
Calentador de aire	*19*
Sistemas de flujos	*19*
Sistemas de flujo agua-vapor	*19*
Sistemas de combustión y auxiliares	*21*
Circuito del flujo de gases	*21*
Control de emisiones	*22*
Tabla de emisiones y subproductos de un generador de vapor de 500 MW que quema carbón	*23*
Sistemas nucleares de generación de vapor	*23*
El sistema nuclear de vapor (NSS)	*25*
Reactor de agua a presión (PWR)	*25*
Componentes del sistema nuclear de vapor NSS	*25*
Esquema del flujo del sistema de refrigeración del reactor	*26*
Componentes de un reactor de agua a presión (PWR)	*27*
Esquemas de la vasija del reactor PWR y partes internas	*28*
Generadores de vapor correspondientes a los NSS	*29*
Generador de vapor de un paso (OTSG)	*29*
Generador de vapor de recirculación (RSG)	*29*
Módulos con barras de control y haz de barras de combustible	*30*
Clasificación de los sistemas nucleares de vapor (NSS)	*32*
Reactor de agua presurizada (PWR)	*32*
Reactor de agua en ebullición (BWR)	*32*
Reactor de agua pesada presurizada (PHWR) CANDU	*32*
Reactor refrigerado por gas (GCR)	*32*
Reactor reproductor (BR)	*33*
Seguridad de las centrales nucleares de generación de vapor	*33*
Diseño del sistema de vapor	*34*
Aire comburente	*39*
Agua de alimentación	*39*

II.-TRANSFORMACIONES TERMODINÁMICAS

Introducción	*43*
Propiedades de los gases y vapores	*44*
Propiedades de los vapores	*44*
Propiedades de los gases	*45*
Conservación de la masa y energía	*46*
Algunas aplicaciones de la ecuación de la energía	*48*
Turbina de vapor	*48*
Caldera de vapor	*48*

Flujo a través de un orificio	*49*
Flujo de un fluido compresible a través de un orificio	*49*
Compresor	*49*
Bomba	*50*
Concepto de entropía	*50*
Procesos reversibles	*50*
Procesos irreversibles	*51*
Ciclos	*52*
Ciclo de Carnot	*52*
Ciclo Rankine	*53*
Ciclo Rankine regenerativo	*55*
Extracciones y sangrías de vapor	*57*
Ciclo Rankine normal	*57*
Temperatura óptima de la primera extracción de vapor	*58*
Temperaturas de extracción para dos y tres extracciones de vapor	*59*
Energía utilizable	*61*
Rendimiento y consumo calorífico del ciclo Rankine	*62*
Ciclos de vapor en plantas nucleares	*63*
Ciclos de vapor supercríticos	*66*
Aplicaciones del vapor a procesos	*67*
Ciclo elemental de turbina de gas	*68*
Ciclos combinados	*71*
Calderas de recuperación	*71*
Cogeneración	*73*
Procesos de combustión	*74*
Energía libre	*75*
Tablas de propiedades termodinámicas del vapor de agua	*78*
Referencias	*91*

III.- PÉRDIDAS DE PRESIÓN

Principios fundamentales	*93*
Principio de conservación de la masa	*94*
Principio de Conservación de la Cantidad de Movimiento	*95*
Ecuación de la Energía (Primer Principio de la Termodinámica)	*96*
Ecuación energética para un flujo de fluido no viscoso	*97*
Pérdida de presión por rozamiento	*98*
Coeficiente de rozamiento	*102*
Diagrama de Moody	*103*
Flujo laminar	*104*
Flujo turbulento	*104*
Campo de velocidades	*106*
Tabla de velocidades comunes en sistemas de generación de vapor	*106*
Tabla de propiedades de gases y líquidos	*106*
Resistencia al flujo en válvulas y accesorios	*108*
Pérdidas irreversibles en estrechamientos y ensanchamientos	*109*
Configuración convergente	*109*
Configuración divergente	*110*
Flujo en codos y curvas	*110*
Flujo en serpentines	*111*
Flujo en conductos de sección rectangular	*112*
Deflectores de dirección	*113*
Caida de presión	*114*
Flujo a través de bancos tubulares	*115*
Tubos lisos	*115*
Coeficiente de profundidad para caída de presión en bancos tubulares de convección	*115*
Coeficiente de rozamiento para flujos cruzados de gas o de aire en configuraciones de tubos alineados	*115*
Tubos con aletas	*116*
Arrastre de fluido por el flujo	*116*
Referencias	*118*

IV.- TRANSMISIÓN DE CALOR

Conducción térmica	*121*
Coeficiente de conductividad térmica, calor específico y densidad	*122*
Metales puros, deposiciones de ceniza, agua, líquidos no metálicos, gases paredes de refractario, aislamientos, etc	*124*
Resistencia de contacto	*125*
Convección	*125*
Formulación práctica para la convección	*126*
Convección natural	*127*
Convección forzada en régimen laminar	*128*
Flujo laminar por el interior de tubos	*128*
Flujo turbulento	*129*
Flujo turbulento por el interior de tubos	*129*
Flujo turbulento cruzado por el exterior de tubos	*132*
Radiación	*135*
Factores de forma de radiación en configuraciones de 2 dimensiones	*137*
Balance de radiación para recintos con medio no participante	*138*
Recinto formado por dos superficies grises, difusas y opacas con $F_{12} = 1$	*138*
Balance de radiación para recintos con medio participante	*139*
Propiedades de la radiación	*140*
Emisividad de los gases	*141*
Tablas de emisividades normales del vapor de agua y del anhidrido carbónico; factores de corrección	*142*
Tabla de longitudes medias L del haz para diversas situaciones geométricas del gas	*145*
Absortividad de los gases	*146*
Tabla de emisividades normales de metales, no metales y pinturas	*147*
Determinación práctica de la emisividad y de la absortividad: CO2, óxido de C, vapor de agua, humos	*148*
Tablas de absortividad en superficies metálicas y no metálicas	*150*
Radiación de nubes de partículas: Llamas de carbón pulverizado, de sebos, de fuel	*150*
Llamas luminosas	*151*
Emisividad en llamas de carbón pulverizado	*152*
Hornos y hogares	*152*
Ejemplos: Conducción a través de pared plana y de pared compuesta	*155*
Ejemplo: Flujo de calor a través de una tubería aislada	*157*
Ejemplo: Transferencia térmica entre un objeto pequeño y una cavidad grande	*158*
Ejemplo: Transferencia de calor entre dos superficies	*158*
Ejemplo: Radiación de un gas caliente a las paredes de hogar	*159*
Ejemplo: Radiación en una cavidad	*160*
Factores de forma de radiación (configuraciones en 3 dimensiones)	*161*
Tablas de propiedades térmicas de algunos metales y aleaciones	*168*
Tabla de propiedades térmicas de algunos aleaciones	*172*
Tabla de propiedades térmicas de algunos aceros y aleaciones especiales	*173*
Tabla de propiedades térmicas de algunos materiales de construcción y aislantes	*174*
Tabla de propiedades térmicas de algunos materiales cerámicos	*175*
Tabla de propiedades térmicas de materiales diversos	*177*
Tablas de propiedades térmicas de algunos aceites y glicerinas	*179*
Tablas de propiedades térmicas de algunos metales líquidos	*180*
Tablas de propiedades térmicas de algunos líquidos saturados	*182*
Tablas de propiedades térmicas de algunos gases y vapores	*184*
Referencias	*186*

V.- INTERCAMBIADORES DE CALOR

Introducción a los intercambiadores de calor (Método LMTD)	*187*
Introducción a los intercambiadores de calor (Método NTU)	*195*
Métodos particulares de transmisión de calor	*198*
Transferencia de calor en superficies ampliadas	*198*
Correlación Schmidt	*199*
Aleta longitudinal de sección uniforme, superficie constante y extremo libre aislado	*200*
Aleta longitudinal de perfil triangular	*200*
Aleta anular de espesor constante	*201*
Transferencia de calor en materiales porosos	*202*
Condensación en película	*202*

Difusión y transferencia de masa	*202*
Vaporización	*203*
Transferencia de calor en lecho fluidificado	*204*
Consideraciones de diseño en hogares de calderas y bancos de convección	*204*
Banco de convección	*205*
Espaciado y disposición de los tubos	*205*
Diámetro de los tubos	*206*
Penetración de la radiación	*206*
Efecto pasillo	*207*
Transferencia de calor al agua	*207*
Coeficiente de transferencia de calor	*207*
Efecto de la presencia de aceites e incrustaciones	*207*
Transferencia de calor al vapor	*207*
Cavidades	*209*
Aislamientos	*210*
Temperatura de la cara caliente	*210*
Pérdida de calor y temperatura de la cara fría	*210*
Condiciones del aire ambiente	*210*
Límites de temperatura y conductividades	*210*
Modelos numéricos	*210*
Analogía eléctrica de la conducción	*210*
Diseño de hogares	*211*
Diseño empírico	*212*
Modelos numéricos de calderas	*215*
Referencias	*218*

VI.- VAPORIZACIÓN

Fundamentos del proceso de vaporización	*219*
Curva de vaporización	*220*
Vaporización forzada	*222*
Evaluación del intercambio térmico en la vaporización	*224*
Coeficientes de transferencia de calor	*224*
Convección en fase única	*225*
Vaporización subenfriada	*225*
Vaporización convectiva y puntual	*225*
Postflujo térmico crítico	*225*
Reinundación	*226*
Fenomenología del flujo térmico crítico	*226*
Factores que afectan al flujo térmico crítico	*227*
Tubos estriados	*228*
Criterios para la evaluación del flujo térmico crítico	*230*
Intercambio térmico supercrítico. Seudovaporización y vaporización seudopelicular	*231*
Regímenes de transferencia térmica	*232*
Flujo en dos fases	*232*
Flujo en burbujas	*233*
Flujo intermedio o taponado	*233*
Flujo anular	*233*
Flujo en neblina	*233*
Diagramas de flujo	*234*
Caída y gradiente de presión	*235*
Modelo de flujo homogéneo	*236*
Modelo de flujos separados	*237*
Inestabilidades	*238*
Inestabilidad errática	*238*
Inestabilidad de densidad oscilante	*240*
Separación vapor-agua	*240*
Factores que afectan a la separación del vapor	*243*
Separación natural	*244*
Separación primaria asistida por deflectores	*245*
Separadores mecánicos	*246*
Características funcionales del separador mecánico	*247*

Caída de presión en el separador de vapor	*248*
Volumen del calderín de vapor	*248*
Circulación	*249*
Sistemas con recirculación	*250*
Sistemas de paso único	*250*
Circulación natural	*251*
Circulación forzada	*252*
Evaluación de la circulación	*253*
Criterios de diseño	*253*
Límites de flujo térmico crítico y de estabilidad	*253*
Límites en separadores de vapor y en calderín de vapor	*254*
Límites mínimos de velocidad	*254*
Sensibilidad	*254*
Flujo térmico crítico	*255*
Referencias	*257*

VII.- MATERIALES UTILIZADOS EN LOS GENERADORES DE VAPOR

Metalurgia	*259*
Estructuras cristalinas	*260*
Defectos en cristales	*261*
Defectos puntuales	*261*
Contorno de los granos; defectos volumétricos	*262*
Metalurgia física del acero	*262*
Fases	*262*
Diagrama Fe-C	*263*
Temperaturas de transformaciones críticas	*265*
Diagrama de transformaciones isotérmicas	*267*
Efecto de los elementos aleados en el diagrama Fe-Fe3C	*269*
Carbono, manganeso, molibdeno, cromo, níquel, cobalto, etc	*270*
Agentes desgasificadores, P, S	*275*
Tratamientos térmicos	*276*
Recocidos de regeneración, solubilización, estabilización, etc	*277*
Normalizado, temple, revenido y tratamientos térmicos posteriores a la elaboración	*277*
Procesos de fabricación	*278*
Operaciones de trabajo en frío	*279*
Soldadura	*280*
Metales de aportación	*281*
Factores que afectan a la calidad de la soldadura, contenido en ferrita, grafitización, tratamientos térmicos, etc	*281*
Materiales utilizados en la fabricación de calderas	*283*
Aceros calmados, semicalmados, efervescentes y microaleados	*284*
Acero (C + 0,5 Mo), Acero (C + Mo), Acero (0,5 C + 0,5 Mo), Acero (2,25 Cr +1 Mo), etc	*285*
Aleaciones altas de (Cr-Mo)	*286*
Aceros inoxidables austeníticos	*286*
Materiales bimetálicos	*286*
Fundiciones, blanca, gris, dúctil y aceros colados	*288*
Materiales cerámicos y refractarios	*290*
Envolturas y protecciones, cromado, aluminización, envolturas refundidas, galvanización	*290*
Propiedades mecánicas a baja temperatura; ensayos de tracción, dureza, tenacidad, conformación	*292*
Propiedades mecánicas a alta temperatura	*297*
Resistencia a la tracción	*297*
Ensayo de termofluencia y rotura por fluencia	*298*
Materiales para calderas.- Especificaciones ASME y tensiones admisibles	*300*
Tabla de materiales de calderas y aplicaciones típicas (unidades inglesas)	*301*
Caldera, paredes hogar, zonas de convección y economizadores, sobrecalentadores y recalentadores	*302*
Factores de selección; espesor mínimo de la pared tubular	*303*
Espesor mínimo de la pared tubular, materiales para colectores, tuberías y calderines, Aceros termoresistentes	*303*
Equipos medioambientales: Desulfuración de humos, Entrada en la torre de absorción, zona humidificada por rociado	*307*
Zona de salida y separador de humedad en la torre de absorción	*308*
Referencias	*310*

VIII.- DISEÑO Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE RECIPIENTES A PRESIÓN

Diseño de recipientes a presión	*311*
Condiciones estacionarias	*313*
Condiciones transitorias	*313*
Teoría de la tensión máxima	*313*
Teoría del esfuerzo cortante máximo	*314*
Teoría de la energía de distorsión	*314*
Clasificación de las tensiones: primarias, secundarias y de pico	*314*
Requisitos para el análisis y el diseño	*315*
Métodos de análisis de tensiones	*316*
Restricciones. Tensiones térmicas. Tensiones por fatiga	*316*
Expresiones analíticas de las tensiones debidas a las presiones	*316*
Recipientes cilíndricos, esféricos, cónicos, con forma de elipsoide	*317*
Recipiente toroidal	*317*
Restricciones	*318*
Tensiones térmicas, radial, tangencial axial	*318*
Tensiones por fatiga	*320*
Análisis de discontinuidades	*321*
Análisis por elementos finitos	*323*
Propiedades térmicas del material en función de la temperatura	*325*
Aplicación del análisis por elementos finitos	*326*
Método de mecánica de fractura	*326*
Mecánica de fractura elástica lineal	*327*
Mecánica de fractura elastoplástica	*329*
Propagación subcrítica de grietas	*331*
Propagación subcrítica de grietas por fatiga	*331*
Propagación subcrítica de grietas por fluencia	*332*
Configuraciones constructivas, aberturas, refuerzos, ligamentos, cargas en uniones	*333*
Aberturas	*333*
Refuerzos	*333*
Ligamentos	*334*
Cargas en uniones y tubuladuras	*334*
Componentes estructurales de soportes	*334*
Criterios de diseño y condiciones de carga	*335*
Soportes de placa y carcasa	*336*
Soportes de tipo lineal	*337*
Cálculos a partir del Código ASME	*339*
Referencias	*341*

IX.- FUENTES DE ENERGÏA

Formación de los carbones	*343*
Clasificación de los carbones.- Clasificación ASTM por porcentajes	*345*
Características de cada tipo de carbón: Turba, lignito, subbituminoso, bituminoso, antracita	*349*
Caracterización de los carbones	*351*
Análisis standard ASTM	*351*
Humedad	*351*
Humedad estructural, superficial, de equilibrio y residual	*352*
Análisis inmediato	*352*
Análisis elemental ASTM-D3176	*352*
Poder calorífico superior del carbón	*353*
Grindabilidad	*353*
Indice de hinchamiento libre	*354*
Composición de la ceniza	*354*
Temperatura de fusión de la ceniza	*354*
Perfil de la combustión	*354*
Indice de abrasividad	*355*
Indice de erosión	*356*
Viscosidad de la escoria	*356*
Propiedades y tipos de carbones	*356*
Combustibles derivados del carbón: cocke, subcoque y líquidos	*356*

Combustibles gaseosos	*359*
Gas de batería de coque	*360*
Gas de horno alto	*360*
Gas de agua y gas pobre o gas de gasógeno	*361*
Subproductos gaseosos de la gasificación	*361*
Combustible mezcla carbón y agua	*362*
Fuelóleos	*363*
Características de los fuelóleos	*363*
Destilados y residuales	*364*
Análisis de fuelóleos	*365*
Análisis elemental de fuelóleos	*365*
Densidad API	*365*
Viscosidad	*366*
Poder calorífico	*366*
Punto de congelación y de gasificación	*366*
Agua y sedimentos	*367*
Propiedades de los fuelòleos	*367*
Gas natural	*369*
Otros combustibles	*370*
Subproductos del petróleo	*370*
Coque retardado	*370*
Alquitrán de petróleo y emulsiones de aceites	*371*
Madera	*371*
Subproductos y desechos de la madera	*373*
El bagazo y otros desechos vegetales	*373*
Residuos sólidos urbanos	*373*
Referencias	*375*

X.- PREPARACIÓN Y MANIPULACIÓN DE CARBONES

Clasificación del carbón bruto	*377*
Equipos para reducir el tamaño del carbón	*379*
Triturador rotativo	*379*
Triturador simple	*380*
Triturador de doble tambor	*380*
Triturador con retención de martillos	*381*
Cribas	*381*
Criba de gravedad	*382*
Criba giratoria	*382*
Criba de sacudidas	*382*
Criba oscilante	*382*
Preparación y limpieza del carbón	*382*
Caracterización de impurezas del carbón	*383*
Operaciones de limpieza y preparación del carbón	*385*
Concentración húmeda	*385*
Concentración por gravedad en vía húmeda	*386*
a) Lavado con criba	*386*
b) Concentración en mesa hidráulica	*387*
c) Procesos de separación por medios densos	*387*
Concentración por flotación	*387*
Concentración por vía seca	*388*
Deshidratación	*388*
Manipulación y almacenamiento de carbón en centrales térmicas	*389*
Manipulación del carbón bruto	*390*
Descarga de vagones ferroviarios	*390*
Descarga de camiones	*391*
Almacenamiento	*391*
Almacenamiento en pila	*391*
Almacenamiento en silo	*392*
Almacenamiento en tolva	*392*
Diseño de los conductos de transferencia	*393*
Alimentadores	*393*

Alimentadores volumétricos y gravimétricos	*393*
Mezcla de carbones	*395*
Manipulación del carbón	*396*
Supresión de polvo	*396*
Oxidación	*396*
Carbón congelado	*397*
Incendio en pilas de carbón	*397*
Flujo en tolvas	*397*
Incendio en tolvas	*398*
Situación medioambiental	*398*
Manipulación de combustibles sólidos alternativos	*398*
Residuos sólidos municipales	*398*
Desechos de madera	*399*
Referencias	*400*

XI.- INTRODUCCIÓN A LA COMBUSTIÓN

Introducción	*401*
Leyes fundamentales	*402*
Leyes de conservación de la masa y energía	*402*
Ley de los gases ideales	*403*
Ley de pesos combinados	*403*
Leyes de Avogadro, Dalton y Amagat	*403*
Aplicación de las leyes fundamentales	*403*
Evaluación molar de la combustión	*406*
Combustibles gaseosos	*406*
Combustibles sólidos y líquidos	*407*
Composición del aire	*408*
Aire teórico para la combustión	*409*
Productos de la combustión por unidad de masa de combustible	*410*
Unidades gravimétricas alternativas	*411*
Método en Btu	*411*
Calor de combustión	*413*
Medida del calor de combustión	*414*
Poderes caloríficos superior e inferior	*415*
Temperatura de ignición	*415*
Temperatura adiabática de la llama	*416*
Cálculos de combustión en operaciones comerciales	*418*
Absorbentes y aditivos	*418*
Residuos y desechos	*420*
$C_{inquemado}$	*420*
Exceso de aire ($aire_{exceso}$)	*421*
Cálculos de combustión y rendimiento	*422*
$Aire_{comburente}$-$aire_{teórico}$	*423*
Gases de combustión	*424*
Agua procedente del combustible	*424*
Humedad total de los humos	*425*
Masa de residuos procedentes del combustible	*425*
Eficiencia del combustible	*425*
Pérdidas por radiación y convección	*427*
Otras pérdidas	*427*
Entalpía	*427*
Entalpía del aire y gases	*427*
Entalpía de sólidos y combustibles	*429*
Medida del exceso de aire	*429*
Análisis de humos	*430*
Toma de muestras de los humos	*432*
Ensayo de combustibles heterogéneos	*432*
Ejemplos de cálculos de combustión	*433*
Método en Mol	*433*
Mátodo en Btu	*434*
Tabla.- Cálculos de combustión en Btu de un carbón bituminoso	*435*

Tabla.- Cálculos de combustión en Btu de un carbón bituminoso, con absorbente	*436*
Tabla.- Cálculos de combustión con absorbente	*438*
Tabla.- Cálculos de aire$_{exceso}$ de un carbón bituminoso a partir del O_2 medido en humos en base húmeda	*439*
Tabla.- Cálculos de aire$_{exces}$ en carbón bituminoso, a partir del O_2 en base húmeda, con absorbente.	*440*
Tabla.- Captura de S por análisis de humos en un carbón bituminoso	*441*
Tabla.- Cálculos de Combustión para determinar el peso de humos$_{secos}$, de agua$_{evaporada}$ y de aire$_{exceso}$	*441*
Referencias	*442*

XII.- COMBUSTIÓN DE GASES Y FUELÓLEOS

Fuelóleos	*443*
Almacenamiento, viscosidad, análisis elemental, poder calorífico y densidad relativa	*445*
Temperatura de desprendimiento de gases, punto de inflamabilidad y temperatura de fluidez	*446*
Destilación, agua y sedimentos, residuo carbonoso, contenido en asfaltenos y perfil de la combustión	*446*
Gas natural	*447*
Transporte, almacenamiento y manipulación	*447*
Combustión de fuelóleos y gases	*448*
Quemadores	*448*
Ventiladores	*449*
Exceso de aire	*450*
Estabilidad y campo operativo de un quemador	*451*
Pulsación de quemadores	*451*
Rendimiento de la combustión	*452*
Técnicas de control de emisiones	*453*
Oxidos de nitrógeno	*453*
Aire exceso bajo	*454*
Quemadores fuera de servicio	*455*
Combustión en dos etapas	*455*
Estequiometría en zona de quemadores	*456*
Lumbreras de aire terciario y su ubicación	*456*
Quemadores	*456*
Geometría del hogar, control del gasto de aire y reciurculación de humos	*456*
Recombustión	*459*
Oxidos de azufre	*460*
Materias sólidas	*460*
Opacidad	*461*
Selección y diseño de quemadores	*462*
Quemador circular	*462*
Quemadores tipo S y tipo XCL-S para fuelóleo y gas	*462*
Quemador tipo DRB-XCL, para fuelóleo y gas	*463*
Atomizadores	*465*
Atomizadores mecánicos	*466*
Mecheros con atomizador mecánico uniflujo y con retroflujo	*466*
Mechero combinado con atomizador mecánico y con vapor	*467*
Atomizadores por vapor	*468*
Atomizador chorro-Y	*469*
Atomizador Racer	*469*
Atomizadores Chorro-T y Chorro-I	*469*
Equipamiento para gas natural	*470*
Antorchas multilanza de mezcla variable, hemisféricas y radiales	*470*
Gases subproductos	*472*
Puesta en servicio de calderas desde el estado frío	*473*
Ignitores y pilotos	*474*
Precauciones de seguridad	*477*
Referencias	*479*

XIII.- PULVERIZADORES DE CARBÓN

Pulverizadores verticales con extracción por chorro de aire	*481*
Principios operativos	*482*
Control del pulverizador	*485*
Requisitos de diseño	*486*

Pulverizadores tipos E y EL	*487*
Pulverizadores horizontales con extracción por chorro de aire	*490*
Pulverizadores horizontales de alta velocidad	*490*
Tecnología de molienda y secado	*490*
Pulverizadores de baja velocidad	*491*
Pulverizadores tubulares con carga de bolas	*492*
Quemadores de carbón	*493*
Combustión indirecta	*493*
Combustión directa	*494*
Ventiladores	*494*
Sistemas de control	*495*
Curvas de coordinación entre el pulverizador MPS y el quemador	*496*
Tamaño de las partículas	*498*
Temperatura de salida	*499*
Grindabilidad	*500*
Propiedades de desgaste	*501*
Abrasividad	*501*
Erosividad	*501*
Humedad	*502*
Selección del tamaño del pulverizador	*502*
Factor de corrección de la capacidad	*503*
Consumo energético	*503*
Mantenimiento	*504*
Materiales cerámicos	*504*
Incendios y explosiones	*505*
Interrupciones de servicio súbitas	*506*
Controles de seguridad en pulverizadores	*506*
Sistemas especiales de seguridad	*507*
Pulverizadores avanzados	*508*
Clasificadores giratorios	*508*
Mejoras en los pulverizadores de carbón MPS	*508*
Molienda ultrafina	*509*
Referencias	*511*

XIV.- QUEMADORES Y SISTEMAS DE COMBUSTIÓN PARA CARBÓN PULVERIZADO

Introducción	*513*
Combustión	*515*
Contenido en materias volátiles.	*516*
Partículas de subcoque (char)	*516*
Efecto del contenido en humedad	*517*
Efecto del contenido en materia mineral	*518*
Sistema de combustión del carbón pulverizado	*518*
Carbón pulverizado convencional	*518*
Carbones bajos en volátiles	*519*
Carbones altos en humedad	*520*
Integración del sistema de combustión y de la caldera	*521*
Principios fundamentales del quemador	*522*
Control	*522*
Estabilidad de la llama	*522*
Mezcla aire + combustible	*523*
Regímenes de flujos de aire primario y carbón	*524*
Pérdida por carbono inquemado	*525*
Requisitos de características operativas.	*525*
Quemadores convencionales para carbón pulverizado	*526*
Quemador convencional circular	*526*
Quemador alveolar	*527*
Quemador tipo S	*527*
Sistemas de combustión con bajos NO_x	*528*
Normativa y control de NO_x en la combustión; métodos	*528*
Quemador de cortatiros dual para carbón pulverizado, (DRB)	*531*
Quemador DRB - XCL (2ª generación)	*532*

Quemador DRB - 4Z (3ª generación)	*534*
Quemador AIREJET (4ª generación)	*536*
Quemador alveolar de bajos NO_x	*538*
Portillas de NO_x	*540*
OFA con quemadores de pared	*541*
OFA con sistemas de combustión en esquina	*544*
Quemadores para carbones difíciles	*548*
Quemador de ignición mejorada	*548*
Quemador con derivación de aire primario (PAX)	*549*
Equipo auxiliar	*549*
Equipos de combustión de fuelóleo/gas	*549*
Ignitores	*550*
Sistemas de seguridad de la llama	*551*
Seguridad y operatividad	*551*
Referencias	*552*

XV.- HOGARES CICLON

Disposición del combustor ciclón	*555*
Principios operativos del combustor ciclón	*558*
Combustor ciclón	*558*
Combustión ciclón	*559*
Distribución del aire	*559*
Regímenes de calor	*560*
Capa de escoria	*561*
Combustibles idóneos	*562*
Criterios de evaluación de combustibles	*562*
Factor T_{250} de viscosidad de la escoria	*563*
Tipos de combustores ciclón para carbones	*564*
Quemador espiral	*564*
Quemador vorticial	*565*
Quemador radial	*565*
Características de diseño	*566*
Hogar de caldera principal	*566*
Entrega del carbón	*567*
a) Sistema de combustión indirecta (sistema de silo)	*567*
b) Sistema de combustión directa	*567*
c) Sistema de combustión directa con presecado	*568*
Alimentadores de carbón	*568*
Equipo de manipulación de escoria	*570*
Quemadores de fuelóleo y de gas	*571*
Otros combustibles	*572*
Combustibles de desechos y de derivados de residuos	*572*
Combustibles derivados de cubiertas de caucho	*572*
Coque de petróleo	*572*
Virutas de madera	*572*
Control de la combustión	*573*
Ignitores	*573*
Cortatiros seccionales de control del aire secundario	*573*
Funcionamiento a cargas bajas	*574*
Requisitos de energía	*574*
Mantenimiento	*575*
Tubos con protuberancias y refractario	*575*
Tubos con protuberancias planas	*576*
Revestimiento por metalización y revestimiento refractario	*576*
Trituradores de carbón	*576*
Control de la contaminación atmosférica	*577*
Polvo	*577*
Reducción de SO_2	*577*
Reducción de NO_x	*578*
Referencias	*580*

XVI.- HOGARES MECÁNICOS

Introducción	*581*
Hogar mecánico de carga superior con alimentación a granel	*582*
Hogar mecánico de carga superior con alimentador distribuidor	*583*
Hogares mecánicos con alimentación inferior	*584*
- Hogar mecánico con descarga lateral de la ceniza	*584*
- Hogar mecánico con alimentación del combustible a granel por gravedad	*586*
Parrillas mecánicas planas	*589*
Combustión del carbón	*589*
Alimentadores distribuidores	*590*
Parrillas para alimentadores distribuidores	*591*
Sistema de reinyección de carbono	*592*
Sistema de aire comburente.	*593*
Características del carbón a utilizar	*594*
Selección de la parrilla	*595*
Evacuación de la ceniza	*596*
Combustión de cortezas, maderas y otros combustibles de biomasa en parrillas mecánicas planas	*597*
Alimentadores distribuidores de cortezas	*597*
Parrillas para cortezas (combustión de biomasa)	*598*
Sistema de aire comburente	*600*
Tamaño de la parrilla	*602*
Parrilla vibratoria refrigerada por agua	*602*
Evacuación de la ceniza	*602*
Emisiones	*603*
Referencias	*606*

XVII.- CALDERAS DE LECHO FLUIDIFICADO

Tecnología de la combustión en lecho fluidificado	*607*
Antecedentes	*609*
Comparación con otros métodos de combustión	*611*
Ventajas de la combustión en lecho fluidificado	*613*
Emisiones reducidas de SO_2 y NO_x	*614*
Ceniza del combustible	*614*
Combustibles de bajo poder calorífico y preparación del combustible	*614*
Calderas de lecho fluidificado a presión atmosférica:	*615*
Calderas de lecho fluidificado burbujeante (BFB)	*615*
Calderas de lecho fluidificado circulante, (CFB)	*618*
Emisiones	*618*
Dióxido de azufre, SO_2	*619*
Óxidos de nitrógeno NO_x	*619*
Combustión estratificada	*620*
CO e hidrocarburos	*621*
Partículas	*621*
Diseño del hogar de una caldera de lecho fluidificado	*621*
Requisitos de combustión	*622*
Caracterización y medida de partículas	*624*
Caída de presión en el lecho	*625*
Lecho burbujeante	*625*
Lecho circulante	*626*
Transferencia de calor	*627*
Lecho burbujeante	*628*
Desde lecho denso a bancos de tubos y a paredes	*628*
Desde la zona de desprendimiento a tubos y a paredes	*630*
En la parte superior del hogar	*630*
Lecho circulante	*630*
Desde el lecho denso	*631*
Desde la zona de desprendimiento y la parte superior del hogar	*631*
Balances de calor y de materia	*632*
Balance de materia en lechos fluidificados circulantes y en lechos burbujeantes	*632*
Balance térmico	*635*

Configuración de calderas de lecho fluidificado	*637*
Placa distribuidora y casquetes de burbujeo	*637*
Sistema de aire secundario	*638*
Cerramiento de la caldera	*638*
Sistema de alimentación del combustible	*638*
Sistemas de alimentación inferior y superior	*639*
Sistema de alimentación del absorbente y de evacuación de la ceniza del lecho	*640*
Sopladores	*641*
Diseño de calderas de lecho fluidificado	*641*
Remodelación con lechos burbujeante	*641*
Calderas de lecho fluidificado circulante	*642*
Puesta en servicio de las calderas de lecho fluidificado	*647*
Control de la temperatura del lecho burbujeante y circulante	*651*
Control de la densidad del lecho	*652*
Control del aire secundario	*654*
Referencias	*656*

XVIII.- GASIFICACIÓN DEL CARBÓN

Introducción	*657*
Química de los procesos de gasificación	*659*
Reacciones de gasificación	*659*
Reacciones exotérmicas y endotérmicas	*659*
Etapas de las reacciones	*660*
Clasificación de los procesos de gasificación	*661*
- Lecho agitado (fijo) (contracorriente)	*663*
- Lecho fluidificado o de mezcla (contracorriente)	*664*
- Flujo arrastrado o lecho suspendido (equicorriente)	*665*
Tecnologías prácticas	*665*
Gasificador de lecho agitado	*665*
Gasificador de lecho fluidificado	*666*
Gasificador de flujo arrastrado	*666*
Gasificador primitivo a presión atmosférica	*667*
Gasificadores primitivos presurizados	*667*
Gasificador de flujo arrastrado, ventajas e inconvenientes	*669*
Gasificadores modernos	*671*
Gasificador Texaco	*671*
Gasificador Shell (SCGP).	*672*
Gasificador Dow	*673*
Gasificador Winkler de alta temperatura (HTW)	*674*
Gasificador Conoco Phillips E-Gas	*674*
Gasificador Lurgi de escoria fundida BGC, y Lurgi Mark IV	*675*
Gasificador British Gas Lurgi (BGL)	*676*
Gasificador Siemens (GSP/Noell)	*676*
Gasificador GTI (U-Gas), de lecho fluidificado	*676*
Gasificador KBR Transport	*677*
Líneas en desarrollo	*678*
Materiales del refrigerador de gas sintético	*678*
Servicio como economizador, vaporizador y sobrecalentador	*679*
Limpieza de los productos de gasificación	*680*
Composición del gas producto	*680*
Purificación del gas	*682*
Procesos convencionales.	*682*
Eliminación de ácido	*683*
Proceso Claus	*684*
Emisiones de NOx	*685*
Procesos en desarrollo	*685*
Filtros de material cerámico	*685*
Filtros de lecho granular	*685*
Desulfuración en caliente	*686*
Efluentes acuosos	*687*
Descarga de sólidos	*687*

Gasificación del carbón para generación de energía	*688*
Planta energética de ciclo combinado	*688*
Ventajas de la planta de ciclo combinado	*690*
Eficiencia de un ciclo combinado	*691*
Referencias	*694*

XIX.- CALDERAS, SOBRECALENTADORES Y RECALENTADORES

Calderas de vapor	*695*
Calderas industriales de pequeña potencia	*697*
Caldera de hogar integrado y caldera Stirling	*697*
Grandes calderas energéticas, Carolina, El Paso,...	*701*
Diseño de calderas	*702*
Circulación natural, Proceso directo o paso único	*703*
Criterios de diseño generales	*705*
Superficie de cerramiento	*706*
Tamaño del hogar y requisitos del ciclo	*706*
Criterios de diseño del hogar	*708*
Influencia de la ceniza, hogar de ceniza sólida	*709*
Paredes refrigeradas por agua, superficie de convección de la caldera	*711*
Análisis del cálculo numérico aplicado a calderas	*713*
Modelización de las líneas de flujo de corriente de gases, y de la estequiometría local "combustible-aire"	*714*
Diseño de las partes a presión	*715*
Modelizaciones diversas cuando se modifica el sistema de aire	*716*
Soportes de caldera	*718*
Sobrecalentadores y recalentadores, ventajas	*719*
Tipos de sobrecalentadores	*719*
El sobrecalentador de convección y de radiación	*720*
Tamaño de los tubos	*721*
Diseño de sobrecalentadores y recalentadores	*722*
Metal de los tubos y soportes del sobrecalentador y del recalentador	*723*
Limpieza interior y exterior; espaciado entre superficies	*725*
Ajuste y control de la temperatura del vapor	*726*
Atemperación	*729*
Atemperadores de mezcla y de superficie, de simple etapa, doble, de dos etapas	*729*
Aplicación del atemperador en calderas de presión universal	*731*
Cortatiros de distribución de los gases	*731*
Recirculación de gases	*732*
Selección de quemadores	*735*
Hogares con diferentes caldeos	*736*
Sobrecalentadores autónomos	*736*
Sistema bipaso y puesta en servicio	*737*
Sistema bipaso de caldera con calderín	*737*
Cambio rápido de la carga y control de la presión del calderín y a la salida del sobrecalentador	*737*
Control de la temperatura del vapor recalentado y sobrecalentado	*740*
Puesta en servicio fría, templada y en caliente	*740*
Retirada de servicio	*741*
Funcionamiento a presión variable	*741*
Sistema de puesta en servicio de calderas de presión universal	*742*
Sistema de puesta en servicio a presión constante	*742*
Control de la temperatura del vapor y reducción de la sobrepresión	*744*
Sistema de puesta en servicio a presión variable	*745*
Válvulas de presión dual	*746*
Bipaso de sobrecalentador a condensador	*747*
Regímenes permisibles en los cambios de carga	*747*
Referencias	*749*

XX.- ECONOMIZADORES Y CALENTADORES DE AIRE

Economizadores	*751*
Economizador de superficie	*753*
Tubos lisos	*753*

Superficies ampliadas	*753*
Protuberancias	*755*
Aletas longitudinales	*756*
Aletas helicoidales	*756*
Aletas anulares de perfil rectangular	*756*
Deflectores	*757*
Límite de velocidades	*758*
Economizadores de recorrido alargado	*758*
Economizadores vaporizadores	*759*
Transferencia térmica y caída de presión	*760*
Tubos desnudos	*760*
Tubos aleteados	*761*
Caída de presión del lado de humos	*761*
Caída de presión del lado de agua	*761*
Sistemas soporte del economizador	*762*
Tamaño del banco tubular	*763*
Colectores	*763*
Ligaduras contra vibraciones; consideraciones geométricas	*764*
Calentadores de aire	*765*
Calentadores de aire recuperativos	*765*
Calentadores tubulares de acero	*766*
Calentadores tubulares de fundición	*767*
Calentadores de chapas	*767*
Calentadores con serpentines de vapor-agua	*768*
Calentadores con tubos isotermos	*768*
Calentadores de aire regenerativos	*770*
Calentador Ljungström	*770*
Calentador Rothemühle	*771*
Superficies calefactoras	*772*
Características funcionales	*774*
Características térmicas	*774*
Fugas de holgura y arrastre	*775*
Caída de presión	*776*
Corrosión	*777*
Temperatura mínima del metal	*778*
Obstrucción y limpieza	*779*
Erosión e incendios	*779*
Aplicación a plantas energéticas	*780*
Reducción de los NOx	*781*
Reducción de los SOx	*782*
Referencias	*783*

XXI.- EFECTO DE LA CENIZA DEL COMBUSTIBLE EN EL DISEÑO Y FUNCIONAMIENTO

Introducción	*785*
Diseño del hogar para la evacuación de la ceniza	*787*
Contenido de ceniza en el carbón	*787*
a) Hogares de ceniza seca, b) Hogares de ceniza líquida	*788*
Deposición de la ceniza, escorificación y ensuciamiento	*789*
Características de la ceniza del carbón: Origen de la ceniza del carbón	*790*
Composición mineralógica	*791*
Composición química	*791*
Fusibilidad de la ceniza	*794*
Influencia de los elementos de la ceniza	*796*
Clasificación de las cenizas; efecto del Fe	*796*
Relación entre componentes básicos y ácidos	*797*
Viscosidad de la ceniza	*798*
Influencia de los álcalis en el ensuciamiento	*800*
Relación entre la viscosidad y la temperatura de la ceniza de un carbón	*802*
Métodos de caracterización de la ceniza: clasificación	*804*
Índice de escorificación R_s para ceniza lignítica*	*805*
Índice de escorificación viscosidad-temperatura, Rvs	*805*

Índice de ensuciamiento R_f de las cenizas bituminosa y lignítica	*806*
Efecto de la ceniza del carbón en el diseño de la caldera	*807*
Diseño del hogar	*807*
Efecto de la escorificación en el tamaño del hogar	*809*
Diseño del paso de convección	*810*
Erosión de la ceniza volante en polvo	*811*
Efecto de las variables de funcionamiento	*811*
Aplicación de los sistemas de diagnóstico de caldera	*812*
Métodos no habituales de evaluación de la ceniza: Hogar incinerador de laboratorio	*814*
Medida de la viscosidad y de la resistencia de sinterización de la ceniza	*815*
Corrosión de la ceniza de carbón	*816*
Características generales de la corrosión	*817*
Depósitos de cenizas corrosivas: capas exterior, intermedia e interior	*818*
Mecanismos de la corrosión	*819*
Ceniza del fuelóleo: origen y liberación de la ceniza durante la combustión	*821*
Formación y deposición de las cenizas de aceites	*823*
a) Características de la ceniza del fuelóleo	*823*
b) Diseño de la caldera y funcionamiento	*824*
Corrosión de la ceniza del aceite, a alta y baja temperatura	*825*
Métodos de control del ensuciamiento y escorificación en calderas	*827*
Suministro de fuelóleo y control del exceso de aire	*828*
Referencias	*832*

XXII.- CARACTERÍSTICAS OPERATIVAS DE LOS COMPONENTES DE UNA CALDERA

Introdución	*833*
Condiciones de funcionamiento	*836*
Balances de calor y de materia	*838*
Tabla de cálculos de combustión	*839*
Cálculo de las características de funcionamiento de los diversos componentes:	*840*
a) Hogar	*840*
b) Pantalla de salida del hogar	*841*
Transferencia de calor	*841*
Radiación del hogar hacia la pantalla	*842*
Pérdida de tiro	*850*
Caida de presión en el interior de los tubos de la pantalla	*850*
c) Sobrecalentador	*850*
Transferencia de calor	*850*
Pérdida de tiro en el lado de humos del sobrecalentador	*855*
Caida de presión del vapor en el sobrecalentador.	*856*
d) Banco de caldera	*857*
Transferencia de calor	*857*
Pérdida de tiro en el lado de humos del banco de caldera	*859*
e) Cavidad banco de caldera a economizador	*859*
Transferencia de calor	*859*
El calor se transfiere desde cada cavidad hacia los bancos tubulares	*859*
Para la radiación de la cavidad hacia el economizador	*860*
f) Economizador	*861*
Transferencia de calor	*861*
Pérdida de tiro	*863*
Caida de presión en el agua que circula por el interior de los tubos	*863*
Caida total de presión (desde la entrada en el economizador hasta el calderín de vapor)	*864*
g) Calentador de aire	*865*
Transferencia de calor	*865*
Temperaturas de película de humos y de aire	*866*
Pérdida de tiro (humos en el interior de los tubos)	*868*
Caida de presión en el aire (flujo cruzado exterior a los tubos)	*868*
h) Conductos de aire, humos y chimenea	*868*
Pérdidas de tiro en el lado aire-salida ventilador forzado a hogar	*869*
Referencias	*875*

XXIII.- CIERRES EN CALDERAS

Estanqueidad de la caldera	*877*
Cerramientos con paredes tubulares:	*879*
Paredes membrana	*879*
Paredes membrana con revestimiento refractario	*879*
Paredes de tubos con aletas planas	*880*
Paredes de tubos tangentes	*881*
Mejora de paredes con tubos de aletas y tubos tangentes	*881*
Cerramiento de envolventes	*883*
Tolvas	*883*
Caja de aire	*883*
Cámara de humos de atemperación	*883*
Cobertizo	*884*
Consideraciones de diseño:	*884*
Resistencia a la ceniza en polvo y escoria	*884*
Expansiones	*885*
En unidades apoyadas	*885*
En unidades colgadas	*886*
Soportes	*886*
Explosiones	*886*
Implosiones	*887*
Vibraciones	*887*
Pérdidas de calor	*888*
Materiales para aislamiento térmico	*888*
Lana mineral, bloques y mantas	*888*
Bloques de silicato cálcico	*888*
Pasta plástica para alta temperatura	*888*
Fibras cerámicas	*888*
Cálculos	*889*
Flujo de calor a través de una pared compuesta	*889*
Ventilación y temperatura superficial	*890*
Fugas e infiltraciones	*892*
Corrosión	*892*
Resistencia a la intemperie	*893*
Fabricación y montaje	*893*
Referencias	*895*

XXIV.- ELEMENTOS AUXILIARES DE CALDERA

Sopladores	*897*
Medios de limpieza	*899*
Presión máxima de impacto y velocidad del chorro	*900*
Tipos de sopladores: de posición fija y retráctiles de carrera corta	*900*
Retráctil de carrera larga	*901*
De lanza de agua	*902*
Para limpieza de calentadores de aire	*903*
Aplicación a diversos tipos de calderas	*905*
Calderas que queman carbón pulverizado	*905*
Calderas que queman aceite, calderas recuperadoras de calor de procesos y calderas que queman basuras	*906*
Calderas de lecho fluidificado	*907*
Medios de control	*907*
Válvulas de seguridad y desahogo	*908*
Sistemas de manipulación de ceniza	*910*
Sistemas de escoria, ceniceros llenos de agua	*911*
Transportador de cadena sumergida	*912*
Sistemas de piritas	*913*
Sistema de ceniza del paso de convección de la caldera	*913*
Sistemas de manipulación de ceniza seca en polvo	*914*
Transporte neumático	*914*
Presurizado y en fase densa	*914*
Por vacío y colector de cenizas primario	*917*

Equipos de desempolvado	*918*
Transporte mecánico	*919*
Transportadores de cadena, de masas, de tornillo y elevadores de cangilones	*919*
Almacenamiento de ceniza y descarga	*919*
Cortatiros de aire y de humos	*920*
Cortatiros de persianas, de compuerta y de lenteja	*920*
Chimeneas, pérdida de tiro	*922*
Efecto chimenea; ejemplo de cálculo	*923*
Chimeneas metálicas y de hormigón, pérdidas por flujo y dimensiones	*927*
Agentes externos que afectan a la altura de la chimenea; mantenimiento	*931*
Ventiladores; potencia	*932*
Curvas características de funcionamiento	*934*
Características aerodinámicas	*935*
Control de ventiladores centrífugos a la salida, (por cortatiros y por velocidad variable)	*937*
Accionamiento de ventiladores	*938*
Ventiladores de tiro forzado y de tiro inducido	*939*
Ventiladores de recirculación de humos, y de aire primario	*940*
Ventiladores axiales	*941*
Características operativas y de control	*941*
Funcionamiento de ventiladores axiales en paralelo y zona de inestabilidad	*942*
Ruido	*946*
Sistema atemperador de condensación	*946*
Referencias	*949*

XXV.- CALDERAS PARA PLANTAS ELÉCTRICAS

Selección del equipo generador de vapor	*951*
Requisitos del vapor	*953*
Flujo de vapor	*953*
Agua de alimentación de la caldera	*954*
Consideraciones medioambientales	*955*
Combustión de carbón pulverizado	*955*
Caldera radiante (RB)	*955*
Caldera radiante para carbón pulverizado, Carolina (RBC)	*957*
Flujo de combustible	*957*
Flujo de aire	*957*
Flujo de humos	*958*
Flujos de agua y de vapor	*959*
Caldera radiante para carbón pulverizado, tipo Torre	*960*
Flujo de combustible	*960*
Flujos de aire y humos	*963*
Flujos de agua y de vapor	*963*
Caldera de presión universal (UP)	*963*
Caldera de presión universal Zimmer	*966*
Flujo de combustible	*966*
Flujos de aire y humos	*966*
Flujos de agua y de vapor	*967*
Caldera universal (SWUP) para carbón pulverizado, con paredes de tubos del hogar en espiral.	*967*
Esquemas de calderas Bemson de presión universal	*970*
Calderas de gas natural	*971*
Caldera radiante para gas natural y aceite	*972*
Flujos de aire y humos	*973*
Flujos de agua y de vapor	*973*
Referencias	*974*
XXVI.- DISEÑO DE CALDERAS INDUSTRIALES	
Introducción	*975*
Equipo generador de vapor	*977*
Banco de caldera	*977*
Flujo de vapor	*979*
Vapor para procesos y calentamientos	*979*

Servicio combinado de calor y energía	*980*
Procesos de cogeneración	*980*
Para un sistema energético basado en turbina de gas	*980*
Para un sistema energético basado en turbina de vapor	*981*
Generación de energía	*981*
Potencia de los servicios auxiliares	*982*
Agua de alimentación de la caldera	*982*
Control medioambiental	*983*
Tipos de calderas para aplicaciones industriales	*984*
Caldera energética Stirling de uno y dos calderines (SPB)	*984*
Caldera Towerpack de uno y dos calderines	*988*
Caldera (PFI)	*990*
Caldera (PFT)	*991*
Caldera (FM)	*992*
Calderas de alta capacidad (HCFM)	*993*
Caldera (PFM)	*994*
Calderas de lecho fluidificado	*994*
Calderas de lecho fluidificado circulante (CFB)	*995*
Calderas de lecho fluidificado burbujeante (BFB)	*996*
Caldera para mejorar la extracción de petróleo (EOR)	*999*
Referencias	*1001*

XXVII.- RECUPERACIÓN DE PRODUCTOS Y CALOR EN LA INDUSTRIA PAPELERA

Procesos de pulpa	*1003*
Proceso de sulfato: Licor blanco, negro, verde	*1004*
Filtros de licor verde, de sedimentos (dregs), y de licor blanco	*1007*
Capacidad de una unidad recuperadora de una fábrica de pulpa	*1009*
Flujos en el proceso Kraft de la caldera recuperadora	*1010*
Diagrama del proceso de la planta de energía Kraft Ahlholmens	*1010*
Sistema de distribución de aire	*1011*
Distribución y combustión del licor negro en el hogar:	*1012*
Reacciones de reducción y oxidación del S en el lecho de fundido, y sistema de alimentación de aire	*1013*
Características de diseño de la caldera	*1014*
Características térmicas de la caldera	*1014*
El licor negro como combustible	*1020*
Emisiones: de NO_x y SO_2	*1022*
Cenizas procedentes de arrastres, y de efluvios	*1023*
Evolución del diseño de la caldera recuperadora de licor negro	*1024*
Caldera Tomlinson con uno y dos calderines	*1024*
Consideraciones de diseño para calderas recuperadoras	*1028*
Diseño del hogar	*1028*
Disposición de la bóveda superior o nariz del hogar	*1029*
Pantalla de hogar, superficie de convección, sobrecalentador, banco de caldera y economizador	*1030*
Sistemas auxiliares de la caldera recuperadora	*1033*
Evaporadores de licor negro: en ciclón y en cascada	*1033*
Oxidación del licor negro	*1036*
Calderas recuperadoras de licor negro	*1036*
Quemadores de licor negro: oscilador y barrido vertical limitado (LVS)	*1037*
Sistemas de ceniza	*1038*
Aire comburente	*1040*
Limpieza de las portillas, humos y limpieza de cenizas	*1042*
Sistema de combustible auxiliar	*1043*
Sistema de licor verde	*1044*
Caldera recuperadora del proceso de sosa	*1045*
Caldera recuperadora para licor de fibras no leñosas	*1046*
Procesos de sulfito: sodio, magnesio, calcio y amoníaco	*1047*
Pulpa de magnesio: proceso recuperador, combustión del licor de magnesio y absorción del SO_2	*1048*
Recolección de gases olorosos en las líneas de fibras, planta de evaporación y en la caldera de recuperación GOL	*1050*
Recolección en la planta de licor blanco	*1051*
Calderas de gases olorosos:	*1051*
Calderas de gases de bajo volumen y alta concentración (GOS, LVHC)	*1051*

Calderas de gases de gran volumen y baja concentración (GOL, HVLC)	*1051*
Recolección de gases diluidos para la incineración en la caldera de recuperación	*1052*
Recolección e incineración de gases olorosos (concentrados y débiles) en el horno de cal	*1053*
Anexo.- Desarrollo de gasificadores de licor negro	*1056*
Referencias	*1059*

XXVIII.- CENTRALES QUE QUEMAN BASURAS

Introducción	*1061*
Combustión de basuras: en masa y preparadas (RDF)	*1064*
Corrosión	*1065*
Unidades de combustión en masa	*1067*
Unidades que queman combustibles derivados de basuras	*1068*
Combustión en masa	*1069*
Tamaño de la planta de caldera y capacidad del hogar mecánico	*1070*
Diseño del hogar mecánico	*1072*
Manipulación y sistema de alimentación del combustible	*1073*
Sistema de aire comburente	*1074*
Sistemas de manipulación de ceniza	*1075*
Extractor de ceniza de brazo móvil	*1076*
Tolva de ceniza de compuerta doble	*1076*
Ceniza volante de limpiadores, precipitadores y filtros de saco	*1076*
Combustión de basuras preparadas RDF	*1077*
Calderas específicas para quemar RDF	*1078*
Sistemas de preparación de los RDF	*1081*
Rendimiento y calidad de los RDF	*1082*
Procesado de los RDF	*1084*
Separación de vidrio, piedras, arenisca y polvo	*1085*
Recuperación de latas de Al, y residuos voluminosos de tamaños superiores (OBW)	*1085*
Línea de troceado de neumáticos	*1086*
Sistemas de alimentación de combustible	*1086*
Alimentador aforador de RDF, espitas distribuidoras por chorro de aire, y parrillas sinfín	*1086*
Diseño del hogar inferior	*1087*
Temperatura de los humos a la salida del hogar	*1088*
Sistemas de manipulación de ceniza	*1088*
Readaptaciones para RDF	*1089*
Diseño del sobrecalentador	*1090*
Diseño de la caldera	*1091*
Diseño del hogar superior	*1091*
Banco de generación de vapor	*1092*
Economizador y calentadores de aire	*1092*
Equipo de limpieza de ceniza	*1093*
Quemadores auxiliares de aporte	*1093*
Equipo de control de contaminación atmosférica	*1094*
Anexo.- Central para la incineración de residuos basura (RDF) y lodos RV-LENZING DE 110 MWt (CFB)	*1098*
Referencias	*1111*

XXIX.- CENTRALES QUE QUEMAN MADERAS Y BIOMASA

Suministro de vapor a procesos industriales	*1115*
Pulpa y papel	*1116*
Procesado de alimentos	*1116*
Suministro de vapor para generación energética	*1117*
Cogeneración	*1117*
Plantas que queman biomasa	*1117*
Combustibles	*1118*
Combustión de madera y biomasa	*1118*
Combustión combinada con combustibles tradicionales	*1119*
Combustión de lodos	*1120*
Sistemas de combustión	*1120*
Cámara exterior anexa	*1120*
Parrilla porosa	*1122*

Parrilla móvil	*1123*
Hogar con zona de combustión controlada (CCZ)	*1125*
Secadores y pulverizadores	*1126*
Lecho fluidificado	*1128*
Diseño de componentes de caldera para combustión de madera y biomasa	*1128*
Parrilla, distribuidor de combustible, quemadores y hogar	*1129*
Sobrecalentador	*1129*
Banco de caldera	*1130*
Economizador	*1130*
Equipos auxiliares	*1132*
Ventiladores de tiro forzado (FD), inducido (ID), y de aire secundario (OFA)	*1132*
Sopladores retráctiles, rotativos y de rastrillo	*1133*
Sistemas de manipulación del combustible	*1134*
Sistemas de manipulación de la ceniza	*1134*
Sistemas de aire	*1135*
Aire bajo la parrilla (aire primario) y sobre el nivel del fuego (aire secundario)	*1135*
Equipos para el control de emisiones	*1136*
Colectores de polvo	*1136*
Precipitadores	*1136*
Filtros de tela o cámaras de sacos	*1137*
Depuradores húmedos	*1137*
Impacto medio ambiental	*1137*
Emisión de partículas, óxidos de NOx, SOx, CO y compuestos orgánicos volátiles (VOC)	*1137*
Tecnología avanzada para el control de los NOx en plantas de residuos	*1139*
Fundamentos físicos del método	*1141*
Correcciones y errores de medida	*1142*
Descripción del sistema de medida AGAM	*1143*
Tecnología avanzada en plantas de residuos procedentes de la molienda de granos	*1145*
Referencias	*1147*

XXX.- COMBUSTIÓN EN LECHO FLUIDO PRESURIZADO

Introducción	*1149*
Proceso de combustión en lecho fluidificado presurizado (PFBC)	*1151*
Eficiencia del ciclo	*1151*
Emisiones reducidas y combustión mejorada	*1153*
Tamaño reducido de la caldera	*1154*
Construcción modular	*1155*
Ciclos para plantas de (PFBC)	*1155*
Ciclo turboalimentado	*1155*
Ciclo combinado	*1156*
Funcionamiento	*1158*
Ciclo combinado avanzado	*1159*
Diseño del ciclo combinado	*1160*
Procesos en el lecho fluidificado	*1160*
Fluidificación	*1160*
Transferencia calor	*1161*
Eficiencia combustión	*1164*
Emisiones	*1164*
Óxidos de nitrógeno y captura de azufre	*1164*
Ciclos de los fluidos	*1165*
Ciclo agua-vapor	*1165*
Ciclo aire-humos	*1166*
Pérdidas de energía	*1167*
Sistemas de (PFBC)	*1168*
Generador de vapor:	*1170*
Tipo de caldera	*1170*
Cerramiento de la caldera	*1172*
Bancos tubulares	*1174*
Agua de alimentación	*1175*
Distribuidor de aire	*1175*
Turbina de gas	*1176*

Equipos auxiliares	*1178*
Vasija del combustor	*1179*
Preparación y alimentación del combustible	*1179*
Alimentación del absorbente	*1180*
Reinyección en el lecho	*1181*
Limpieza de humos	*1181*
Filtros de bujías, filtros candela y filtros de tubos cerámicos	*1182*
Evacuación de la ceniza	*1184*
Funcionamiento de unidades de (PFBC)	*1184*
Control y puesta en servicio	*1185*
Operación normal y cambio de carga	*1186*
Retirada de servicio o parada y condiciones anormales	*1186*
Referencias	*1188*

XXXI.- CICLOS COMBINADOS, RECUPERACIÓN DE CALOR RESIDUAL Y OTROS SISTEMAS

Introducción	*1191*
Ciclos combinados y cogeneración	*1193*
Sistema de ciclo combinado simple	*1193*
Sistemas comerciales de ciclo combinado	*1194*
Ejemplo de sistema de ciclo combinado simple	*1196*
Cogeneración	*1199*
Generador de vapor recuperador de calor HRSG	*1199*
Consideraciones técnicas	*1200*
Perfiles de temperaturas en diversas unidades (HRSG). Punto de acercamiento Pinch	*1203*
Sistemas de vapor basados en calor residual	*1204*
Factores de aplicación	*1206*
Hogar de oxígeno básico	*1207*
Campana de generador de vapor	*1208*
Campana de vapor presurizado en circuito cerrado	*1209*
Sistema de vapor presurizado y agua a alta temperatura en circuito cerrado	*1210*
Calderas de calor residual	*1210*
Hornos Martin-Siemens	*1210*
Calderas de calor residual para condiciones especiales	*1211*
Caldera simple de calor residual de tres calderines	*1211*
Sistemas de vapor mediante combustibles singulares	*1213*
Calderas de CO	*1213*
Calderas que queman gas de horno alto (BFG) y gas de batería de coque (COG)	*1216*
Calderas que queman gases peligrosos (RCRA)	*1216*
Sistemas MHD	*1217*
Referencias	*1219*

XXXII.- CONSIDERACIONES MEDIOAMBIENTALES

Introducción	*1221*
Fuentes de emisiones y descargas de planta	*1222*
Métodos de control de la contaminación atmosférica	*1226*
Tipos de contaminantes, fuentes e impactos	*1226*
Tecnologías de control de la contaminación atmosférica	*1229*
Tecnologías de control de SO_2	*1230*
Técnicas de precombustión	*1230*
Técnicas de la combustión, y de inyección de absorbente	*1230*
Tecnologías de depuración húmeda y seca	*1231*
Procesos húmedos de desulfurización de gases. Procesos no regenerativos	*1233*
Procesos regenerativos	*1235*
Proceso Wellman-Lord, Proceso con MgO, Proceso de desulfurización catalítica/IFP	*1235*
Proceso de citrato/fosfato, Proceso Chiyoda Thoroughbred	*1236*
Tecnologías de control de NOx	*1236*
Modificación del proceso de combustión	*1236*
Quemadores de bajo NOx	*1238*
Combustión escalonada	*1238*
Recirculación de humos	*1239*

Recombustión	*1239*
Combustión con poco exceso de aire, Combustión catalítica, Combustión en lecho fluidificado	*1239*
Tratamientos postcombustión para controlar los NOx	*1240*
Reducción selectiva no catalítica (SNCR)	*1240*
Reducción selectiva catalítica (SCR)	*1241*
Tecnologías de control de partículas: Lavado del carbón, Colectores mecánicos, Filtros de tela,	*1242*
Precipitadores electrostáticos (ESP)	*1243*
Control de contaminación del agua	*1244*
Fuentes de descarga (efluentes) de plantas energéticas	*1244*
Agua de refrigeración en circuito abierto	*1244*
Retorno a la fuente, Purgas de torres de refrigeración, Residuos de agua en la manipulación de la ceniza	*1245*
Purga de depuración (desulfuración) de humos (FGD)	*1247*
Residuos acuosos de limpieza de metales	*1247*
Tecnologías utilizadas para el tratamiento del agua residual	*1248*
Clarificación y filtración	*1248*
Métodos de eliminación de CO_2	*1249*
Absorción química y física	*1249*
Criogénicos y membranas	*1250*
Adsorción física	*1250*
Vertido de residuos sólidos	*1252*
Flujos de residuos sólidos	*1253*
Métodos de tratamiento de residuos sólidos	*1253*
Métodos de colocación y utilización	*1255*
Referencias	*1257*

XXXIII.- ELIMINACIÓN DE PARTÍCULAS

Cenizas	*1259*
Regulación de las emisiones de partículas y equipamiento para su control	*1262*
Características del combustible y ceniza	*1263*
Precipitadores electrostáticos secos (ESP)	*1263*
Carga, recolección, descarga, golpeado y retirada de la ceniza	*1264*
Dimensiones del precipitador	*1264*
Distribución del flujo	*1265*
Componentes del precipitador	*1266*
Electrodos de descarga	*1266*
Superficie colectora	*1269*
Sistema de golpeo	*1270*
Sistema de impulsos magnéticos	*1271*
Martillos inclinados para electrodos de descarga de bastidor rígido	*1271*
Vibrador eléctrico	*1271*
Cerramiento	*1272*
Tolvas	*1272*
Transportadores de tornillo, arrastre y neumáticos	*1273*
Control de la energía	*1274*
Aplicaciones y características funcionales	*1274*
Energéticas, industriales, pulpa y papel	*1274*
Mejora de las características funcionales	*1275*
Precipitadores electrostáticos húmedos	*1277*
Cámaras de filtros de sacos	*1278*
Fundamentos operativos	*1278*
Tipos de filtros de sacos	*1279*
De aire inverso	*1280*
Sistema de filtro	*1281*
Tecnología del chorro de pulsos	*1281*
Materiales de los sacos y soportes	*1281*
Colectores mecánicos	*1282*
Depuradores húmedos	*1283*
Depurador húmedo de aletas	*1284*
Depurador dinámico	*1285*
Depurador Venturi	*1285*
Depurador multi-Venturi	*1286*

Depurador torre de absorción	*1286*
Otros dispositivos	*1288*
Filtro de lecho móvil granular	*1288*
Filtro depurador electrostático Electroscrubber	*1288*
Filtros de tubos cerámicos	*1290*
Selección del equipo	*1290*
Referencias	*1292*

XXXIV.- CONTROL Y ELIMINACIÓN DE LOS NO_x

Mecanismos de formación de los NO_x	*1293*
NO_x térmico	*1294*
NO_x del combustible	*1295*
Vías de reacciiones	*1296*
Efecto del NO_x sobre la salud y medio ambiente	*1297*
Ozono/huminiebla fotoquímica	*1297*
Lluvia ácida	*1297*
Partículas sólidas en suspensión	*1297*
Control de las emisiones de NO_x en generadores de vapor	*1298*
Tratamientos previos a la combustión	*1298*
Técnicas de combustión	*1299*
Técnicas de postcombustión	*1299*
Técnica de la reducción selectiva no catalítica (SNCR)	*1301*
Reducción selectiva catalítica (SCR)	*1308*
Catalizadores	*1310*
Catalizadores de metales ordinarios y aleaciones	*1311*
Catalizadores de zeolita	*1312*
Catalizadores de metales preciosos	*1312*
Consideraciones sobre el amoniaco y estequiometría	*1313*
Parrilla de inyección de amoníaco (AIG)	*1314*
Ubicación del sistema (SCR) en una unidad generadora de vapor	*1315*
Ubicación con elevadas concentraciones de polvo en el lado caliente	*1318*
Ubicación con bajas concentraciones de polvo en el lado frío	*1318*
Futuro	*1319*
Referencias	*1320*

XXXV.- CONTROL Y ELIMINACIÓN DE LOS SO_X

Introducción	*1323*
Desulfuración del carbón	*1325*
Desulfuración física de carbón	*1325*
Desulfuración química del carbón	*1325*
Desulfurización microbiológica del carbón	*1326*
Eliminación de SO_2 durante la combustión	*1326*
Control de los SO_x	*1329*
Eliminacion del SO2 de gases de combustion	*1330*
Diseño de depuradores húmedos (FGD)	*1330*
Consideraciones sobre el depurador de humos	*1333*
Procesos de (FGD) con caliza y con cal	*1335*
Preparación del reactivo	*1335*
Caliza	*1335*
Cal	*1337*
Secado y colocación de la lechada	*1338*
Deshidratación primaria	*1338*
Deshidratación secundaria de los subproductos de FGD	*1338*
Diagramas de flujo y balance de masa del proceso global	*1339*
Proceso caliza -Yeso	*1341*
Proceso sulfato amónico	*1541*
Diagrama de flujo del sistema húmedo FGD con cal	*1342*
Química del depurador húmedo	*1343*
Características que refuerzan los aditivos	*1347*
Ácidos orgánicos blandos	*1348*

Oxido de magnesio	*1349*
Aditivos para el control de incrustaciones	*1349*
Medida del pH	*1350*
Eliminacion del SO_2 de gases de combustion: depuración seca	*1351*
Proceso de inyección seca	*1352*
Proceso de absorción-secado por atomización	*1352*
Química del depurador seco	*1357*
Otras tecnologías	*1359*
Inyección de absorbente en el hogar	*1359*
Trona y nacolita	*1360*
Lechos móviles de carbono activado	*1361*
El trióxido de azufre SO_3 y la formación de vapor ácido	*1361*
Métodos de control del SO_3	*1362*
Inyección de sorbente	*1362*
Humidificación	*1363*
Inyección de amoníaco	*1363*
Referencias	*1365*

XXXVI.- CONTROL MEDIO AMBIENTAL.- APARATOS

Situación de las tomas de muestras	*1367*
Medidas del lado de humos	*1372*
Consumo de reactivo	*1375*
Pureza del yeso	*1376*
Otros métodos de ensayo	*1376*
Medidas de presión y temperatura	*1376*
Aparatos de medida de la presión	*1378*
Aparatos de medida de la temperatura	*1379*
Pirometría óptica	*1380*
Pirometría de radiación	*1380*
Propiedades eléctricas	*1381*
Termómetro de resistencia eléctrica	*1381*
Termopares	*1381*
Circuitos múltiples	*1382*
Selección de materiales	*1382*
Termopar encamisado	*1383*
Hilos conductores en termopares	*1384*
Unión caliente	*1384*
Medida de la temperatura de fluidos en tuberías	*1385*
Medida de la temperatura de los tubos	*1386*
Tubos de paredes de hogar	*1386*
Propiedades acústicas	*1388*
Medida del flujo térmico	*1389*
Detección de incrustaciones	*1389*
Aplicación a sobrecalentadores y recalentadores	*1390*
Medida de la temperatura de los humos	*1390*
Termopar de alta velocidad	*1391*
Medida de la temperatura del aislamiento y envolventes	*1393*
Superficies aislantes externas	*1393*
Envolventes de acero	*1394*
Medida del título y pureza del vapor	*1395*
Obtención de la muestra de vapor	*1395*
Método trazador de Na	*1396*
Método de conductividad eléctrica para determinar la pureza del vapor en generadores de vapor	*1397*
Calorímetro de laminación	*1398*
Análisis gravimétrico	*1400*
Medida de caudales: ventajas e inconvenientes de cada tipo de medidor elemental	*1400*
Referencias	*1405*

XXXVII.- QUIMICA DEL AGUA

Introducción	*1407*

Tratamiento del agua de aporte bruta	*1410*
Ablandamiento en ciclo de Na, o ablandamiento por zeolitas sódicas	*1412*
Ablandamiento por zeolita con caliza caliente	*1412*
Desmineralización, evaporación, permutación iónica, ósmosis, electrodiálisis, ultrafiltración	*1413*
Limpieza y procesos pre-operación	*1416*
Agua para prueba hidrostática	*1416*
Hervido alcalino, limpieza química y soplado de tuberías con vapor	*1417*
Tratamiento del agua de calderas con calderín	*1418*
Límites de la calidad del agua	*1418*
Tratamiento del agua de caldera	*1420*
Tratamiento con hidróxido	*1420*
Tratamiento convencional	*1421*
Tratamiento coordinado con fosfato	*1422*
Tratamiento de fosfato en equilibrio, volátil, con quelatos y con polímeros	*1423*
Arrastres desde calderín y pureza del vapor	*1425*
Medida de la calidad y pureza del vapor	*1426*
Obtención de las muestras de vapor	*1426*
Métodos trazador de Na, de conductividad, del calorímetro de laminación y gravimétricos	*1427*
Tratamiento del agua de calderas de proceso directo	*1428*
Tratamiento de pulido del condensado	*1431*
Control de la corrosión y productos químicos	*1432*
Sistemas de inyección química, purgas	*1433*
Control y tratamiento con oxígeno, y control del pH	*1434*
Transporte de productos químicos por el vapor	*1435*
Tapizado (ocultación del fosfato)	*1437*
Limpieza química de unidades de combustible fósil.- Frecuencia de la limpieza	*1439*
Termopares cordales	*1440*
Procedimientos y métodos generales de la limpieza química	*1442*
Limpieza por circulación	*1443*
Limpieza por inundación	*1444*
Disolventes	*1445*
Depósitos e incrustaciones; inhibidores	*1446*
Determinación de las características del disolvente (concentración, temperatura y tiempo de limpieza)	*1447*
Limpieza del equipo de transferencia de calor (equipo, disoluciones y procedimientos de limpieza)	*1449*
Limpieza de sobrecalentadores, recalentadores y tuberías	*1451*
Residuos de limpiezas químicas de calderas, métodos y opciones	*1453*
Corrosión en calderas de combustible fósil e industriales	*1454*
Corrosión uniforme, ataque crateriforme, ataque galvánico, daños por hidrógeno	*1455*
Fisuración por tenso-corrosión, ataque cáustico, ataque ácido	*1456*
Corrosiones por fatiga, intergranular, inducida microbiana; Erosión-corrosión (cavitación)	*1459*
Resumen de los mecanismos de corrosión	*1462*
Toma de muestras y técnicas de medida	*1462*
Técnicas para el análisis del agua de caldera (muestras manuales, absorción atómica, cromatografía de iones)	*1464*
Monitorización y adquisición de datos en línea	*1465*
Tratamiento de aguas residuales	*1466*
Referencias	*1468*

INDICE	*1471*