

ÍNDICE

PREFACIO	19
-----------------------	-----------

BLOQUE TEMÁTICO I GENERALIDADES

CAPÍTULO 1. MÁQUINAS Y MOTORES TÉRMICOS. GENERALIDADES	27
Objetivos fundamentales del capítulo	27
1.1. Introducción	27
1.2. Concepto de máquina térmica	28
1.2.1. Clasificación de las máquinas de fluido	28
1.2.2. Distinción entre máquina hidráulica y máquina térmica	30
1.2.3. Clasificación de las máquinas térmicas	31
1.3. Motores térmicos de combustión interna y de combustión ex- terna. Distinción entre máquina térmica y motor térmico	33
1.4. Rendimiento de los motores térmicos	39
1.4.1. Rendimiento del ciclo y rendimiento de la instalación	39
1.4.2. Rendimiento exergetico	40
1.5. Cogeneración	41
1.6. Campos de aplicación de los motores térmicos	43
CAPÍTULO 2. PROCESOS EN FLUÍDOS COMPRESIBLES	53
Objetivos fundamentales del capítulo	55
2.1. Introducción	55
2.2. Procesos termodinámicos de importancia en el estudio de las máquinas y los motores térmicos	57
2.3. Principios y ecuaciones que rigen el comportamiento de los flujos compresibles	60
2.3.1. Principio de conservación de la masa	61
2.3.2. Primer Principio de la termodinámica	61

2.3.3. Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento	64
2.3.4. Segundo Principio de la termodinámica	64
2.3.5. Exergía y balance energético	66
2.3.6. Ecuaciones de Gibbs	68
2.3.7. Ecuaciones calóricas	69
2.3.8. Trabajo intercambiado con el entorno	71
2.4. Propiedades termodinámicas de mezclas de gases ideales	76
2.5. El Factor de Carnot. Rendimiento máximo de los motores térmicos	78
2.6. Concepto de velocidad del sonido y número de mach	81
2.6.1. Velocidad del sonido	81
2.6.2. Concepto de número de Mach	84
2.6.3. Concepto de onda de choque	85
2.7. Expansión y compresión en conductos, toberas y difusores	86
2.7.1. Efecto de la compresibilidad	86
2.7.2. Forma del conducto en toberas y difusores	88
2.7.3. Parámetros críticos de un gas	90
2.7.4. Comportamiento del fluido en conductos sin fricción	91
2.7.4.1. Expresión del gasto en toberas y difusores	91
2.7.4.2. Expansión en conductos convergentes	93
2.7.4.3. Comportamiento del fluido en un conducto convergente- divergente	95
2.7.4.4. Evaluación de las pérdidas en toberas y difusores	102
2.7.4.4.1. Comparación de los casos de expansión y compresión	103
2.7.4.4.2. Coeficientes para evaluar la fricción en toberas y difusores	106
CAPÍTULO 3. FUNDAMENTOS DE LA COMBUSTIÓN	109
Objetivos fundamentales del capítulo	111
3.1. Introducción	112
3.2. Fenómenos que intervienen en el proceso de combustión. Ecuaciones de gobierno	113
3.3. Reacción estequiométrica	115
3.3.1. Ajuste de la reacción estequiométrica	115
3.3.2. Cálculo del dosado estequiométrico	116

3.4. Combustión completa con exceso de aire	117
3.4.1. Ajuste de la reacción con exceso de aire	119
3.5. Mecanismo de la reacción de combustión	120
3.5.1. Velocidad de la reacción química	121
3.6. Combustión incompleta	122
3.6.1. Composición de los productos de la combustión	123
3.7. Balance energético en el proceso de combustión	125
3.7.1. Procesos estacionarios en sistemas abiertos	126
3.7.1.1. Procesos de combustión adiabáticos. Temperatura adiabática de la llama	126
3.7.1.2. Procesos de combustión con transmisión de calor a un segundo fluido caloportador	128
3.7.2. Procesos no estacionarios en sistemas cerrados	130
3.8. Rendimiento de la combustión	138
3.9. Clasificación de los procesos de combustión	140
3.10. Autoinflamación de la mezcla aire-combustible	141
3.11. Llamas de premezcla	143
3.11.1. Deflagración	143
3.11.2. Detonación	147
3.12. Llamas de difusión	148
3.12.1. Llamas de difusión con combustible gaseoso	149
3.12.2. Llamas de difusión con combustible líquido	152
3.12.3. Llamas de difusión con combustible sólido	154

CAPÍTULO 4. COMBUSTIBLES EMPLEADOS EN SISTEMAS Y MOTORES

TÉRMICOS	155
Objetivos fundamentales del capítulo	157
4.1. Introducción	158
4.2. Clasificación de los combustibles	159
4.2.1. Clasificación de los combustibles atendiendo a su origen	160
4.2.2. Clasificación de los combustibles atendiendo a su origen a su estado físico	161
4.2.3. Clasificación de los combustibles atendiendo a su carácter renovable o no	163
4.2.4. Otras clasificaciones	164
4.3. Combustibles de origen fósil. Características y aplicaciones	165
4.3.1. El carbón	165

4.3.2. Combustibles derivados del petróleo	168
4.3.3. Gas natural	172
4.4. Combustibles alternativos o de sustitución. Características y aplicaciones	173
4.5. Propiedades de los combustibles	179
4.5.1. Propiedades relacionadas con la composición del combustible	179
4.5.2. Propiedades físicas del combustible	180
4.5.3. Propiedades químicas del combustible	181
4.5.4. Comportamiento del combustible en relación con la combustión	182
4.5.5. Propiedades más importantes de los principales combustibles	185

BLOQUE TEMÁTICO II

MÁQUINAS Y MOTORES VOLUMÉTRICOS

CAPÍTULO 5. GENERALIDADES DE LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVOS	189
Objetivos fundamentales del capítulo	191
5.1. Componentes y procesos básicos de un motor de combustión interna alternativo	192
5.2. Clasificación de los MCIA	195
5.2.1. Según el proceso de combustión	195
5.2.2. Según el modo de realizar el ciclo	197
5.2.3. Según el tipo de refrigeración	202
5.2.4. Según la presión de admisión	203
5.2.5. Según el número y disposición de cilindros	204
5.3. Evolución del fluido de trabajo durante el funcionamiento del motor Diagrama p - α y diagrama del indiciador	205
5.3.1. Diagrama p - α	205
5.3.2. Diagrama del indicador	206
5.4. Parámetros, prestaciones y curvas características del motor	209
5.5. Ciclos del aire equivalente	222
5.5.1. Ciclo de aire equivalente de volumen constante	223
5.5.2. Ciclo de aire equivalente de presión limitada	231
5.6. Otros motores volumétricos	247

CAPÍTULO 6. EL PROCESO DE COMBUSTIÓN EN LOS MOTORES DE ENCENDIDO PROVOCADO Y EN LOS MOTORES DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN.....	251
Objetivos fundamentales del capítulo.....	253
6.1. Tipos de combustión en motores de combustión interna alternativos.....	254
6.2. Combustión en MEP.....	255
6.2.1. Conceptos básicos de combustión en MEP.....	255
6.2.2. Fases de la combustión.....	258
6.2.2.1. Primera fase.....	258
6.2.2.2. Segunda fase.....	259
6.2.2.3. Tercera fase.....	263
6.2.3. Factores que influyen en la determinación del avance del encendido.....	263
6.2.4. Combustión anormal en MEP. Combustión detonante y encendido superficial.....	266
6.2.4.1. Combustión detonante.....	266
6.2.4.2. Encendido superficial.....	270
6.3. Combustión en MEC.....	271
6.3.1. Conceptos básicos en combustión en MEC.....	271
6.3.2. Principales funciones de la inyección en MEC. Micromezcla y macromezcla.....	273
6.3.3. Fases de la combustión.....	275
6.3.3.1. Fase del tiempo de retraso.....	275
6.3.3.2. Combustión rápida.....	277
6.3.3.3. Combustión por difusión.....	279
6.3.4. Factores que influyen en el diagrama $p-\alpha$	280
6.4. Otros tipos de combustión en MCIA.....	284
6.4.1. Motores duales.....	284
6.4.2. Motores de mezcla estratificada.....	285
6.4.3. Motores de combustión HCCI.....	286
 CAPÍTULO 7. COMPRESORES VOLUMÉTRICOS.....	 287
Objetivos fundamentales del capítulo.....	289
7.1. Introducción. Definición y clasificación.....	289
7.2. Compresores alternativos.....	291
7.2.1. Principio de funcionamiento. Diagrama $p-V$	291
7.2.2. Análisis termodinámico.....	294

7.2.2.1. Consideraciones generales.....	294
7.2.2.2. Potencia absorbida.....	297
7.2.2.3. Rendimiento volumétrico. Selección de la cilindrada.....	304
7.2.2.4. Rendimiento isoterma.....	310
7.2.2.5. Rendimiento isentrópico.....	312
7.2.3. Compresión en etapas.....	312
7.2.4. Tipos y configuraciones mecánicas.....	316
7.2.5. Campos de aplicación.....	318
7.2.6. Compresores alternativos de membrana.....	319
7.2.7. Métodos de regulación de los compresores alternativos.....	321
7.3. Compresores rotativos.....	324
7.3.1. Compresores de tornillo.....	324
7.3.1.1. Principio de funcionamiento. Diagramas p-V.....	324
7.3.1.2. Tipos.....	325
7.3.1.3. Ventajas e inconvenientes y campos de aplicación.....	327
7.3.2. Compresores de paletas.....	328
7.3.2.1. Principio de funcionamiento y tipo.....	328
7.3.2.2. Campos de aplicación.....	329
7.3.3. Compresores Scroll.....	329
7.3.3.1. Principio de funcionamiento.....	329
7.3.3.2. Campos de aplicación.....	330
7.3.4. Compresores Roots.....	331
7.3.4.1. Principio de funcionamiento.....	331
7.3.4.2. Campos de aplicación.....	332
7.4. Soplares y bombas de vacío.....	332

BLOQUE TEMÁTICO III

PLANTAS DE POTENCIA BASADAS EN TURBOMÁQUINAS

CAPÍTULO 8. TURBINAS DE GAS PARA LA OBTENCIÓN DE POTENCIA MECÁNICA I.....	335
Objetivos fundamentales del capítulo.....	337
8.1. Introducción.....	337
8.2. Tipos de instalaciones.....	339
8.3. Análisis termodinámico de los ciclos de aire ideales.....	345

8.3.1. Ciclo Brayton ideal de aire simple.....	346
8.3.2. Ciclo Brayton ideal de aire regenerativo.....	349
8.3.3. Ciclo ideal compuesto.....	351
8.4. Elección de los parámetros que definen del ciclo termodinámico de una turbina de gas	355
8.4.1. Ciclo simple.....	357
8.4.2. Ciclo simple regenerativo	365
8.4.3. Ciclo compuesto.....	370
8.4.4. Ciclo compuesto regenerativo	379
8.5. Comportamiento de las turbinas de gas en el punto de diseño ..	380

Capítulo 9. TURBINAS DE GAS PARA LA OBTENCIÓN DE POTENCIA MECÁNICA II	383
Objetivos fundamentales del capítulo.....	385
9.1. Criterios de diseño de las instalaciones de turbina de gas	385
9.2. Evolución en el diseño y estado del arte de las turbinas de gas ..	387
9.3. Regulación de la potencia de las turbinas de gas industriales.....	392
9.4. Cogeneración con turbinas de gas.....	395
9.5. Turbinas de gas de aviación.....	397
9.5.1. Turborreactor. Esquema mecánico y principio de funcionamiento	398
9.6. Descripción del proceso de combustión en turbinas de gas.....	399
9.7. Sistemas de control de la contaminación en turbinas de gas.....	403

CAPÍTULO 10. INSTALACIONES DE POTENCIA BASADAS EN TURBINAS DE VAPOR	407
Objetivos fundamentales del capítulo.....	409
10.1. Componentes principales de las instalaciones de potencia basadas en turbinas de vapor.....	410
10.2. Influencia de los parámetros termodinámicos de las centrales de ciclo de vapor.....	424
10.2.1. Influencia de la presión del vapor a la entrada de la turbina.....	425
10.2.2. Influencia de la temperatura del vapor vivo	427
10.2.3. Influencia de la presión de condensación	428
10.3. Ciclos de vapor utilizados en grandes centrales de vapor.....	429
10.3.1. Ciclos de vapor con recalentamiento intermedio	429
10.3.2. Ciclos de vapor regenerativos	431

10.4. Turbinas de vapor en usos industriales.....	441
10.4.1. Cogeneración en plantas de ciclo de vapor.....	442
10.4.1.1. Turbinas con toma intermedia.....	443
10.4.1.2. Turbinas de contrapresión.....	443
10.5. Definición y clasificación de las calderas.....	444
10.5.1. Calderas de tubos de humo o pirotubulares.....	447
10.5.2. Calderas de tubos de agua o acuotubulares.....	448
10.5.3. Procesos que tienen lugar en las calderas.....	451
10.5.3.1. Proceso de combustión.....	451
10.5.3.2. Mecanismos de transferencia de calor entre el gas y el agua.....	452
10.5.4. Diseño de calderas y generadores de vapor.....	454
10.5.4.1. Parámetros y fundamentos del diseño de calderas.....	454
10.5.4.2. Balance de energía.....	457
10.5.4.3. Otras consideraciones y especificaciones de los diseños.....	458
CAPÍTULO 11. INSTALACIONES DE CICLO COMBINADO GAS-VAPOR.....	465
Objetivos fundamentales del capítulo.....	467
11.1. Definición y clasificación de ciclos combinados.....	467
11.2. Esquema general de una planta de ciclo combinado de turbi- na de gas y de vapor.....	471
11.3. Características de las turbinas de gas.....	473
11.3.1. Influencia de los parámetros de diseño de la turbina de gas.....	473
11.3.2. Configuraciones de ciclo simple, de ciclo compuesto y de ciclo regenerativo.....	476
11.3.3. Turbinas de gas refrigeradas.....	477
11.3.4. Regulación de carga de la turbina de gas.....	478
11.3.5. Configuraciones 2x1 y 3x1.....	479
11.4. Caldera de recuperación de calor.....	480
11.5. Características del ciclo de vapor.....	487

BLOQUE TEMÁTICO IV TURBOMÁQUINAS TÉRMICAS

CAPÍTULO 12. CONCEPTOS BÁSICOS GENERALES SOBRE TURBOMÁQUINAS TÉRMICAS.....	503
Objetivos fundamentales del capítulo.....	507
12.1. Ecuación fundamental de las turbomáquinas.....	508
12.2. Análisis del intercambio energético que tiene lugar en las turbomáquinas.....	514
12.3. Estructura de las turbomáquinas térmicas.....	517
12.4. Clasificación de las turbomáquinas térmicas.....	518
12.5. Aplicación de las ecuaciones y conceptos anteriores a turbinas y compresores. Tipos de escalonamientos.....	521
12.5.1 Turbomáquinas térmicas axiales.....	521
12.5.1.1. Turbomáquinas axiales de reacción.....	523
12.5.1.2. Turbomáquinas axiales de acción.....	526
12.5.1.3. Turbocompresores axiales.....	528
12.5.2. Turbomáquinas térmicas radiales.....	534
12.5.2.1. Turbinas centrípetas.....	535
12.5.2.2. Turbocompresores centrífugos.....	536
12.6. Criterios que se utilizan para definir el rendimiento de las turbomáquinas térmicas.....	539
12.7. Origen de las pérdidas en las turbomáquinas térmicas.....	543
12.7.1. Pérdidas internas.....	543
12.7.2. Pérdidas externas.....	545
12.8. Potencia interna y potencia efectiva.....	546
CAPÍTULO 13. TURBINAS AXIALES.....	549
Objetivos fundamentales del capítulo.....	551
13.1. Campos de aplicación de las turbinas axiales y de las turbinas centrípetas.....	552
13.2. Parámetros que definen la geometría de una corona de álabes y el flujo que la atraviesa.....	552
13.2.1. Flujo alrededor de un perfil aerodinámico en cascadas de álabes.....	555
13.2.2. Relación entre la geometría de la máquina y los triángulos de velocidades.....	557

13.3. Parámetros que permiten definir el diagrama de velocidades en un escalonamiento de turbina	559
13.4. Factores de los que dependen las pérdidas y el rendimiento en los escalonamientos de turbinas axiales	565
13.4.1. Importancia del diagrama de velocidades en el prediseño de la máquina	567
13.5. Valores óptimos de los parámetros que caracterizan la forma del diagrama de velocidades	571
13.5.1. Escalonamientos en los que se recupera la velocidad de salida	571
13.5.2. Escalonamientos en los que no se recupera la velocidad de salida	576
13.6. Comparación entre escalonamientos de acción y de reacción	578
13.7. Justificación de la necesidad de fraccionar el salto en una turbina axial	579
13.8. Rendimiento de una turbina formada por múltiples escalonamientos	584
CAPÍTULO 14. COMPRESORES AXIALES	589
Objetivos fundamentales del capítulo	591
14.1. Introducción	591
14.2. Parámetros de los que dependen las pérdidas en compresores axiales	595
14.3. Valores óptimos de los parámetros que caracterizan la forma del diagrama de velocidades	598
14.4. Razones por las que es necesario utilizar múltiples escalonamientos en compresores axiales	603
14.5. Relación entre el rendimiento de los escalonamientos que componen la máquina y el rendimiento del turbocompresor en su conjunto	610
14.6. Consideraciones sobre el diseño de turbomáquinas axiales	615
14.7. Comparación entre compresores axiales, centrífugos y volumétricos	617
14.8. Curvas características de las turbomáquinas térmicas	619

ANEXOS

ANEXO I. CÁLCULO DE LA COMPOSICIÓN EN EQUILÍBRIO QUÍMICO.....	625
A1.1. Cinética química y constantes de equilibrio.....	627
A1.2. Cálculo de la composición de los productos de la combustión suponiendo equilibrio químico.....	629
 ANEXO II. EFICIENCIA DE INTERCAMBIADORES DE CALOR DE SUPERFICIE.....	 635
 ANEXO III. CORRELACIONES DE PERDIDAS EN TURBOMÁQUINAS TÉRMICAS.....	 641
A3.1. Turbinas axiales.....	643
A3.2. Turbocompresores axiales.....	648
 ANEXO IV. TABLAS DE PROPIEDADES TERMODINÁMICAS Y ENTALPÍAS DE FORMACIÓN.....	 655
 BIBLIOGRAFÍA	 665
 LISTA DE SÍMBOLOS	 669

Turbomáquina generadora (turbocompresor)

En este caso el fluido absorbe trabajo específico comunicado a través de un par de accionamiento. Para evitar el empleo de pares y potencias de signo negativo, el trabajo específico que absorbe el fluido en este caso se expresa como¹:

$$W_u = u_2 \cdot c_{u2} - u_1 \cdot c_{u1} \quad [12.5]$$

La *ecuación de Euler* permite, por tanto, obtener el trabajo específico o la potencia conocidos los triángulos de velocidades de entrada y salida del rotor.

Las direcciones de las velocidades del fluido a la entrada y a la salida del rotor, tanto absolutas y como relativas, se definirán mediante ángulos referidos a la dirección perpendicular a la sección de paso o meridiana². Se denominan α_1 y α_2 a los ángulos que forman las velocidades absolutas de entrada y salida, respectivamente, con la dirección de referencia y β_1 , β_2 los que forman las velocidades relativas con dicha dirección. Los ángulos α_1 y α_2 se considerarán positivos cuando las proyecciones de las velocidades absolutas sobre la dirección tangencial, c_{u1} y c_{u2} , tengan el mismo sentido que las velocidades periféricas y negativos en caso contrario³.

$$W_u = u_1 \cdot c_1 \cdot \text{sen}\alpha_1 - u_2 \cdot c_2 \cdot \text{sen}\alpha_2 \quad [12.6]$$

Teniendo en cuenta el teorema del coseno, se deducen las siguientes relaciones entre los módulos de las velocidades de los triángulos de entrada y de salida:

$$w_1^2 = c_1^2 + u_1^2 - 2u_1 \cdot c_1 \cdot \cos(90^\circ - \alpha_1) = c_1^2 + u_1^2 - 2u_1 \cdot c_{u1} \quad [12.7]$$

$$w_2^2 = c_2^2 + u_2^2 - 2u_2 \cdot c_2 \cdot \cos(90^\circ - \alpha_2) = c_2^2 + u_2^2 - 2u_2 \cdot c_{u2} \quad [12.8]$$

Sustituyendo estas expresiones en la ecuación [12.4] del trabajo específico, resulta una segunda expresión para la *ecuación de Euler*:

¹ En los capítulos 12, 13 y 14 el trabajo específico se denota con W mayúscula para no confundirlo con la velocidad relativa.

² En las máquinas axiales es la dirección axial tanto a la entrada como a la salida, en las radiales es la dirección axial a la entrada y radial a la salida.

³ En la figura 12.13-b ambos ángulos son positivos. En la figura 12.15-b el ángulo α_2 será negativo. El criterio de signos para los ángulos β no es el mismo (ver final epígrafe 12.5.1.3).

$$W_u = \frac{c_1^2 - c_2^2}{2} + \frac{u_1^2 - u_2^2}{2} + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} \quad [12.9]$$

12.2. ANÁLISIS DEL INTERCAMBIO ENERGÉTICO QUE TIENE LUGAR EN LAS TURBOMÁQUINAS

El trabajo específico de una turbomáquina también puede obtenerse a través del *Primer Principio de la Termodinámica* aplicado a sistemas abiertos *adiabáticos* (capítulo 2). En el caso de una turbomáquina motora, se tiene:

$$W_u = h_{01} - h_{02} = \left(h_1 + \frac{c_1^2}{2} \right) - \left(h_2 + \frac{c_2^2}{2} \right) = \frac{c_1^2 - c_2^2}{2} + (h_1 - h_2) \quad [12.10]$$

La ecuación anterior pone de manifiesto que el trabajo específico tiene su origen en la disminución de la energía cinética del fluido que atraviesa el rotor —término $(c_1^2 - c_2^2)/2$ que se podría denominar *carga dinámica*— y en la disminución de entalpía del fluido en el rotor —término $(h_1 - h_2)$, que se puede denominar *carga estática*—.

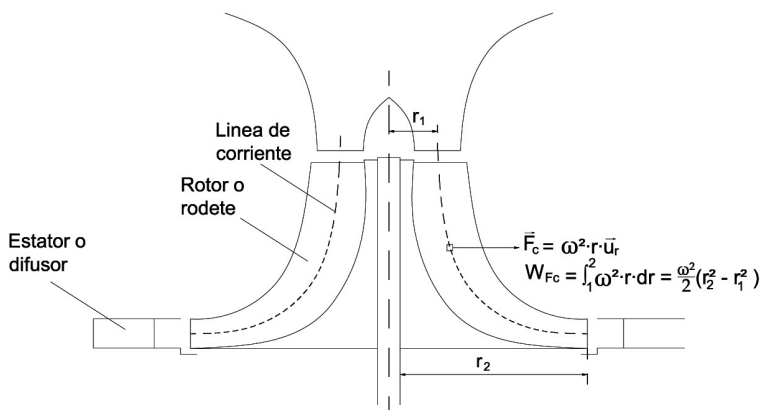


Figura 12.3. Conducto en el que la masa está sometida a la fuerza centrífuga. Expresión de dicha fuerza.

Por otra parte, se puede analizar a qué se debe la disminución de entalpía del fluido en el rotor para identificar de dónde procede el trabajo específico

debido a la carga estática. Igualando las dos expresiones del trabajo específico: [12.9] y [12.10], se obtiene:

$$h_1 - h_2 = \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} + \frac{u_1^2 - u_2^2}{2} \quad [12.11]$$

La disminución de entalpía, como se deduce de la ecuación [12.11], proviene en primer lugar de la expansión del fluido en el rotor —término $(w_2^2 - w_1^2)/2$ —, y del *trabajo de la fuerza centrífuga* —término $(u_1^2 - u_2^2)/2$ —.

Cabe resaltar que la ecuación [12.11] también puede obtenerse de la ecuación de conservación de la energía basada en el Primer Principio de la Termodinámica aplicada al sistema abierto (rotor) respecto de unos ejes de referencia móviles, solidarios al rotor. En este caso la ecuación del capítulo 2 [2. 41] resulta:

$$h_1 + \frac{w_1^2}{2} + W_{no\ inercial} = h_2 + \frac{w_2^2}{2} \quad [12.12]$$

donde $W_{no\ inercial}$ es precisamente el trabajo de las fuerzas de inercia que actúan sobre el fluido en el conducto, respecto al sistema de referencia móvil. Puede justificarse que dicho trabajo corresponde exclusivamente al trabajo de la fuerza centrífuga, que está representada en la figura 12.3.

La ecuación [12.12] puede expresarse como⁴:

$$h_{01R} + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2} = h_{02R} \quad [12.13]$$

donde se pone de manifiesto que la *entalpía de parada*⁵ para un observador situado en el rotor y que, por tanto, se mueve solidario a éste (referencia no inercial) no se mantiene debido al término $(u_2^2 - u_1^2)/2$, que como se ha indicado es el trabajo específico de la fuerza centrífuga sobre el fluido.

Es importante, llegado a este punto, definir un parámetro al que se denomina *grado de reacción* que da idea de la manera en que se realiza el intercambio energético en el rotor. Dicho parámetro relaciona la *energía trans-*

⁴ El subíndice R quiere poner de manifiesto que la velocidad que se considera en la definición de la entalpía de parada es en ese caso la relativa al conducto.

⁵ La entalpía de parada se denomina también entalpía de remanso o entalpía total.

ferida como consecuencia de la diferencia de entalpía específica en el mismo ($h_1 - h_2$) con la *energía total transferida al eje* por unidad de masa ($h_{01} - h_{02} = W_u$). Es decir, relaciona la carga estática en el rotor con la carga total, estática más dinámica.

La expresión de este parámetro para máquinas motoras y generadoras (adiabáticas) será:

$$R = \frac{h_1 - h_2}{h_{01} - h_{02}} \quad (\text{turbina}) \quad [12.14]$$

$$R = \frac{h_2 - h_1}{h_{02} - h_{01}} \quad (\text{turbocompresor}) \quad [12.15]$$

Como se verá más adelante, el grado de reacción es un parámetro muy utilizado en la caracterización del flujo en las turbomáquinas, ya que, como se ha indicado anteriormente, este parámetro proporciona información sobre la manera en que se realiza el intercambio energético en el rotor. Por ejemplo, en una turbomáquina con $R=0$ la carga estática es nula y la energía transferida en el rotor procede exclusivamente de la variación de la energía cinética absoluta del fluido a su paso por el mismo ($c_1^2/2 - c_2^2/2$ o carga dinámica). Para grados de reacción $R>0$, el rotor estará sometido a una cierta carga estática ($h_1 - h_2$), además de a la carga dinámica. Se tendrá ocasión de profundizar sobre el sentido y utilidad de este parámetro en epígrafes posteriores.

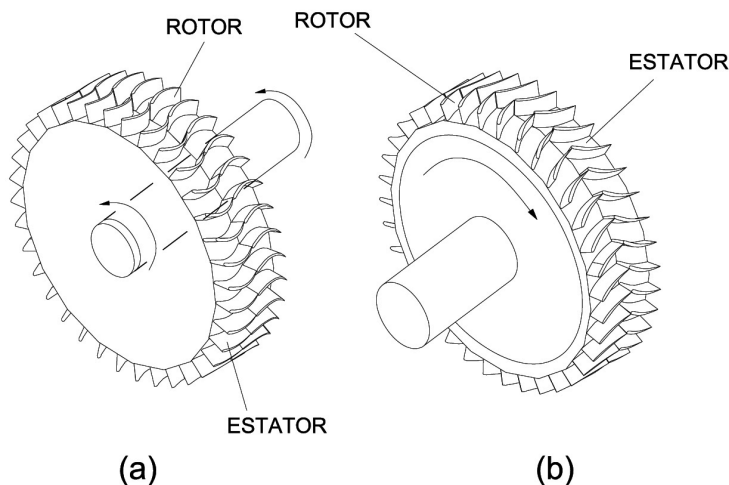


Figura 12.4. a) turbina elemental axial y b) turbocompresor elemental axial.