

# Turbomáquinas térmicas

PROYECTO EDITORIAL  
SÍNTESIS INGENIERÍA

*Áreas de Publicación*

INGENIERÍA INDUSTRIAL  
COORDINADORA: *Alicia Larena*



Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra sin contar con autorización de los titulares de la propiedad intelectual. La infracción de los

derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (arts. 270 y sigs. Código Penal). El Centro Español de Derechos Reprográficos ([www.cedro.org](http://www.cedro.org)) vela por el respeto de los citados derechos.

# Turbomáquinas térmicas

Tomás Sánchez Lencero

Catedrático de Máquinas y Motores Térmicos

Antonio Muñoz Blanco

Catedrático de Máquinas y Motores Térmicos

Francisco José Jiménez-Espadafor Aguilar

Profesor Titular de Máquinas y Motores Térmicos

Departamento de Ingeniería Energética  
Escuela Técnica Superior de Ingenieros  
Universidad de Sevilla



Consulte nuestra página web: [www.sintesis.com](http://www.sintesis.com)  
En ella encontrará el catálogo completo y comentado

© Tomás Sánchez Lencero  
Antonio Muñoz Blanco  
Francisco José Jiménez-Espadafor Aguilar

© EDITORIAL SÍNTESIS, S. A.  
Vallehermoso, 34. 28015 Madrid  
Teléfono: 91 593 20 98

Depósito legal: M. 25.937-2004  
ISBN: 84-9756-185-6

Impreso en España - Printed in Spain

Reservados todos los derechos. Está prohibido, bajo las sanciones penales y el resarcimiento civil previstos en las leyes, reproducir, registrar o transmitir esta publicación, íntegra o parcialmente, por cualquier sistema de recuperación y por cualquier medio, sea mecánico, electrónico, magnético, electroóptico, por fotocopia o cualquier otro, sin la autorización previa por escrito de Editorial Síntesis, S. A.

# Índice

<b>Prólogo</b>	<b>11</b>
<hr/>	
<b>1. Ecuación fundamental de las turbomáquinas</b>	<b>13</b>
<hr/>	
1.1. Ecuación fundamental de las turbomáquinas	13
1.2. Ecuación de la energía referida a ejes fijos y móviles	16
1.3. Turbomáquinas térmicas elementales	19
1.3.1. Turbinas axiales	20
1.3.2. Turbina radial (Turbina centrípeta)	24
1.3.3. Turbocompresor axial	26
1.3.4. Turbocompresor radial (Turbocompresor centrífugo)	28
<b>2. Escalonamientos en las turbomáquinas</b>	<b>31</b>
<hr/>	
2.1. Introducción	31
2.2. Escalonamientos en las turbinas	31
2.3. Relación entre los rendimientos del escalonamiento y de la turbina: factor de recuperación	36
2.4. Factor de recuperación de una turbina con un número infinito de escalonamientos	40
2.5. Factor de recuperación para una turbina con un número finito de escalonamientos. Influencia del número de escalonamientos en el factor de recuperación	43
2.6. Escalonamientos en los turbocompresores	50
2.7. Rendimiento de un turbocompresor en función de su rendimiento politrópico	52
<b>3. Cascadas de álabes</b>	<b>55</b>
<hr/>	
3.1. Introducción	55
3.2. Nomenclatura de la cascada de álabes	55
3.3. Análisis de fuerzas en cascadas de álabes	57
3.4. Pérdidas de energía. Coeficientes característicos	59
3.5. Relación entre las componentes deducidas de los triángulos de velocidades y las componentes aerodinámicas. Coeficientes de sustentación y resistencia	60

3.6. Circulación y sustentación. Teorema de Kutta-Joukowski	63
3.7. Rendimiento de una cascada de álabes	64
3.7.1. Rendimiento de una cascada de álabes de compresor	64
3.7.2. Rendimiento de una cascada de álabes de turbina	67
<b>4. Actuación de las cascadas de álabes</b>	<b>69</b>
<hr/>	
4.1. Introducción	69
4.2. Actuación de una cascada de álabes de compresor.	
Correlaciones de Howell y de Lieblein	71
4.2.1. Correlación de Howell	72
4.2.2. Correlación de Lieblein	75
4.3. Coeficiente global de pérdidas en una corona de álabes de compresor axial	94
4.4. Influencia de los números de Reynolds y de Mach	97
4.5. Actuación de cascadas de álabes de turbina. Correlaciones de Ainley y Mathieson, y de Soderberg	99
4.5.1. Correlación de Ainley y Mathieson	101
4.5.2. Correlación de Soderberg	107
4.6. Relación paso/cuerda óptima de cascadas de álabes de turbina. Criterio de Zweifel	109
<b>5. Turbinas de flujo axial. Estudio bidimensional</b>	<b>113</b>
<hr/>	
5.1. Introducción. Diagrama de velocidades	113
5.2. Parámetros empleados para definir la geometría de los triángulos de velocidades	114
5.2.1. Coeficiente de carga $\psi$	114
5.2.2. Coeficiente de flujo $\phi$	115
5.2.3. Grado de reacción $R$	115
5.3. Formas de los triángulos de velocidades al variar $\psi$ , $\phi$ y $R$	117
5.4. Diseños básicos de escalonamientos de turbinas axiales	118
5.4.1. Grado de reacción cero	118
5.4.2. Grado de reacción 0,5	120
5.4.3. Velocidad de salida axial	121
5.5. Pérdidas en el escalonamiento y rendimientos	125
5.6. Elección de los parámetros de diseño ( $\psi$ , $\phi$ , $R$ ) de un escalonamiento de turbina	127
5.7. Relaciones cinemáticas de máximo rendimiento con coeficientes de pérdidas constantes	133
5.8. Grado de reacción 0,5. Rendimientos total a estático y total a total	134
5.8.1. Energía cinética de salida del escalonamiento perdida	135
5.8.2. Energía cinética de salida recuperada	137
5.8.3. Conclusiones más importantes	139

5.9. Grado de reacción $R = 0$ . Rendimientos total a total y total a estático	142
5.9.1. Energía cinética de salida del escalonamiento perdida	142
5.9.2. Energía cinética de salida recuperada	145
5.9.3. Conclusiones más importantes	147
5.10. Escalonamiento de acción con presión constante en el rotor	150
5.11. Escalonamientos de velocidad. Rueda Curtis	155

**6. Turbocompresores axiales. Análisis bidimensional** **163**

---

6.1. Introducción	163
6.2. Análisis bidimensional del escalonamiento. Diagrama de velocidades. Factor de trabajo realizado	164
6.3. Pérdidas en el escalonamiento. Rendimiento	169
6.4. Elección del grado de reacción, del coeficiente de flujo y del coeficiente de carga	174
6.5. Influencia de los parámetros de diseño en el funcionamiento fuera de diseño	181

**7. Análisis tridimensional simplificado del flujo en turbomáquinas térmicas axiales** **187**

---

7.1. Introducción	187
7.2. Origen de los flujos radiales	188
7.2.1. Componente tangencial de la velocidad	188
7.2.2. Distribución de espesores del álabe	189
7.2.3. Componente radial del esfuerzo del álabe	190
7.2.4. Flujo no libre de torbellino	191
7.2.5. Forma del tambor y de la envolvente	191
7.3. Ecuaciones generales del flujo tridimensional en una turbomáquina térmica	192
7.4. Leyes torsionales	197
7.4.1. Ley de torbellino libre	197
7.4.2. Ley torsional de grado de reacción constante. Distribución general de torbellino	200
7.4.3. Diseño con flujo másico específico constante	205
7.4.4. Diseño con ángulo de salida del estátor constante	206

**8. Turbinas axiales de álabes refrigerados** **211**

---

8.1. Introducción	211
8.2. Termodinámica de la turbina refrigerada	213
8.3. Métodos de refrigeración de álabes	220

8.3.1. Refrigeración por líquidos	220
8.3.2. Refrigeración por aire	221
8.4. Aproximación al análisis de la transmisión de calor en álabes refrigerados por convección	226
8.4.1. Estimación del gasto de aire refrigerante requerido para una temperatura media del álabe dada	227
8.4.2. Evaluación del coeficiente de transmisión de calor interior $h_c$	231
8.4.3. Determinación del coeficiente de transmisión de calor exterior $h_g$	231
8.5. Consideraciones sobre la problemática general de la refrigeración de álabes	237
8.5.1. Aspectos termodinámicos	237
8.5.2. Aspectos aerodinámicos	237
8.5.3. Aspectos relacionados con el flujo	239
8.5.4. Aspectos térmicos	241
8.5.5. Aspectos internos	241
<b>9. Turbocompresores centrífugos</b>	<b>243</b>
<hr/>	
9.1. Introducción	243
9.2. Triángulos de velocidades de entrada y salida. Ecuaciones generales	246
9.3. Grado de reacción	248
9.4. Influencia del ángulo de salida del álabe en el trabajo específico y en grado de reacción. Tipos de álabes	248
9.5. Influencia del ángulo de entrada	252
9.6. Coeficientes de deslizamiento y de potencia	254
9.7. Relación de compresión y número de Mach	257
9.8. Consideraciones de diseño para la sección de entrada del rotor	261
9.9. Consideraciones sobre las condiciones del fluido a la salida del rotor	264
9.10. El difusor	266
9.10.1. Difusor sin álabes	266
9.10.2. Difusor con álabes	268
9.11. El colector o voluta	270
9.12. Pérdidas en el escalonamiento	272
9.12.1. Pérdidas de origen aerodinámico	272
9.12.2. Pérdidas por rozamiento del disco	274
9.12.3. Pérdidas intersticiales	275
<b>10. Turbinas radiales</b>	<b>277</b>
<hr/>	
10.1. Introducción	277
10.2. La turbina centrípeta. Ecuaciones generales	279
10.3. Grado de reacción	280



10.4. Efectos del ángulo de entrada del rodete	281
10.5. Rendimiento	283
10.6. Análisis unidimensional del flujo	285
10.6.1. Voluta de admisión	286
10.6.2. Toberas de admisión	288
10.6.3. Espacio sin álabes	289
10.6.4. Rotor	289
10.7. Pérdidas en el escalonamiento	292
10.7.1. Pérdidas de origen aerodinámico	292
10.7.2. Pérdidas por rozamiento del disco	293
10.7.3. Pérdidas intersticiales	293
<b>11. Curvas características de las turbomáquinas térmicas</b>	<b>295</b>
<hr/>	
11.1. Análisis dimensional	295
11.1.1. Introducción	295
11.1.2. Variables que intervienen	295
11.1.3. Obtención de los parámetros adimensionales	297
11.2. Otros parámetros utilizados para representar las características de funcionamiento de una turbomáquina	304
11.3. Curvas características de los turbocompresores	305
11.4. Inestabilidades de funcionamiento de los turbocompresores	308
11.4.1. Inestabilidad local. Desprendimiento rotativo	308
11.4.2. Inestabilidad del escalonamiento	309
11.4.3. Inestabilidad global del compresor, el fenómeno de bombeo	309
11.4.4. Bloqueo del compresor	314
11.5. Curvas características de los turbocompresores centrífugos	314
11.6. Curvas características de los turbocompresores axiales	316
11.7. Curvas características de las turbinas	321
11.7.1. Curvas características de las turbinas radiales	321
11.7.2. Curvas características de las turbinas axiales	323
11.7.3. Otras formas de representación de las características de una turbina	324
11.7.4. Determinación del área de la tobera equivalente a una turbina	325
11.7.5. Turbinas de geometría variable	327
11.8. Control del gasto en turbocompresores	328
11.8.1. Control del gasto en turbocompresores centrífugos	330
11.8.2. Control del gasto en turbocompresores axiales	341
<b>Bibliografía</b>	<b>347</b>
<hr/>	



# Prólogo

En este libro el estudio termofluidodinámico de las turbomáquinas térmicas se plantea de forma general, independientemente de la naturaleza del fluido de trabajo o del tipo de servicio.

El capítulo 1 se dedica al análisis de los principios por los que se rige el intercambio de energía mecánica con el fluido de trabajo a través del eje de la turbomáquina. Para ello se comienza con la deducción de la Ecuación de Euler, planteando a continuación la ecuación de la energía para ejes inerciales y no inerciales, y analizando las características fundamentales de la evolución del fluido a través de cada uno de los tipos de turbomáquinas elementales o escalonamientos.

En el capítulo 2 se precisan los conceptos de rendimiento total a estático y total a total, tanto a nivel de máquina completa como de escalonamiento, analizando la relación que existe entre el rendimiento de la máquina de varios escalonamientos y el rendimiento de éstos.

En los capítulos 3 y 4 se analizan las fuerzas que actúan sobre los álabes de una cascada, se establecen las expresiones del rendimiento de una cascada y se analizan los métodos empíricos más usuales para la resolución de los problemas directo e inverso (de diseño).

Los capítulos 5 y 6 se dedican al estudio bidimensional de las turbomáquinas axiales, el primero de ellos a las turbinas y el segundo a los turbocompresores. Éste se realiza mediante la definición de los parámetros adimensionales: coeficiente de carga, coeficiente de flujo y grado de reacción, que configuran la geometría de los triángulos de velocidad, y considerando variables los coeficientes de pérdidas cuando se trata de obtener la geometría de máximo rendimiento. En el caso de las turbinas de vapor, tradicionalmente se ha empleado para la definición de la geometría de los triángulos de velocidad la terna: relación cinemática, ángulo de salida del estátor y grado de reacción. Este planteamiento es quizás más intuitivo, por lo que, desde el punto de vista pedagógico, parece conveniente incluir un planteamiento de este tipo en los cuatro escalonamientos de turbina más típicos: grado de reacción 0, grado de reacción 0,5, presión constante en el rotor y de velocidad. Los coeficientes de pérdidas se toman como constantes en la obtención de las geometrías de máximo rendimiento.

En el estudio bidimensional de turbocompresores axiales se plantea la elección de los parámetros de diseño, por lo que el capítulo dedicado al estudio del flujo en cascadas se

revela aquí de importancia capital dada la influencia del desprendimiento de capa límite y los efectos de compresibilidad ligados al número de Mach en la elección de aquéllos.

El capítulo 7 se dedica al análisis del flujo tridimensional y comienza con una revisión de aquellas causas que dan lugar a las componentes radiales del flujo y el planteamiento de las ecuaciones generales del flujo. Posteriormente, se enuncian y se justifica la validez de las hipótesis que permiten simplificar dichas ecuaciones convirtiendo el problema tridimensional en dos bidimensionales, a saber: uno en el plano circunferencial y otro en el plano meridional. El del plano circunferencial se resolverá por aplicación de los métodos estudiados en el capítulo dedicado a cascadas bidimensionales y el del plano meridional estableciendo unas condiciones de contorno, llamadas “leyes torsionales”, que permiten integrar la ecuación del equilibrio radial simplificado. Las leyes torsionales más utilizadas en turbinas y turbocompresores son asimismo analizadas con sus características más importantes.

Dadas las altas temperaturas que se utilizan en la admisión a la turbina de una turbina de gas, se considera necesario dedicar un capítulo al estudio del escalonamiento de turbina refrigerado. El capítulo 8 incluye la influencia de la refrigeración sobre el rendimiento interno, los métodos de refrigeración más utilizados y diversos aspectos asociados a la problemática general de la refrigeración de álabes.

Los capítulos 9 y 10 se dedican al estudio de los turbocompresores centrífugos y las turbinas centrípetas. El análisis de estas máquinas se realiza, como suele ser habitual, bajo la denominada aproximación “unidimensional” que simplifica el modelo del flujo, pero que da buenos resultados en el cálculo de las dimensiones principales de las mismas. Los fundamentos aerodinámicos estudiados en los capítulos 3 y 4 son de utilidad en el diseño de estas máquinas, particularmente en lo que se refiere a los álabes fijos. Actualmente, el interés por estas máquinas ha cobrado un renovado impulso debido a la ampliación de su campo de aplicación.

El conocimiento de las actuaciones fuera de diseño de las turbomáquinas es de suma importancia tanto desde el punto de vista del diseñador como del usuario. El capítulo 11 trata esta materia; comienza el capítulo con el análisis dimensional que permite reducir el número de variables que representan el comportamiento de las turbomáquinas y obtener resultados que faciliten la predicción de las actuaciones de un prototipo o la elección del tipo de máquina más adecuado para un tipo de servicio y condiciones operativas dadas. Posteriormente se analizan las tendencias que presentan las curvas características de cada tipo de turbomáquina, dedicando una particular atención a los fenómenos de inestabilidad de los turbocompresores y al bloqueo del flujo tanto en turbocompresores como en turbinas. Este capítulo es de gran interés para la práctica industrial: actuaciones de motores sobrealimentados, regulación de turbinas de vapor y de gas, integración de turbomáquinas en procesos industriales, etc. Termina el capítulo con un análisis del control del gasto en turbocompresores, cuestión de indudable interés para el ingeniero de planta.