

MÁQUINAS TÉRMICAS DE FLUXO

MÁQUINAS TÉRMICAS DE FLUXO

Cálculos Termodinâmicos e Estruturais

Anton Stanislavovich Mazurenko
Zulcy de Souza
Electo Eduardo Silva Lora



EDITORA INTERCIÊNCIA
Rio de Janeiro – 2013

Copyright © 2013, by Anton Stanislavovich Mazurenko, Zulcy de Souza,
Electo Eduardo Silva Lora

Direitos Reservados em 2013 por **Editora Interciência Ltda.**

Diagramação: K2 Design e Serviços Ltda.

Revisão Ortográfica: Maria Paula da M. Ribeiro
Maria Helena de A. Huebra

Capa: Marcos Dias

CIP-Brasil. Catalogação-na-Fonte
Sindicato Nacional dos Editores de Livros, RJ

M428m

Mazurenko, Anton Stanislavovich

Máquinas térmicas de fluxo: cálculos termodinâmicos e estruturais/Anton Stanislavovich Mazurenko, Zulcy de Souza, Electo Eduardo Silva Lora. – 1ª ed. – Rio de Janeiro: Interciência, 2013.

504 p.: il.; 25 cm.

Inclui bibliografia e índice
ISBN 978-85-7193-286-9

1. Máquinas. 2. Turbinas. I. Souza, Zulcy de. II. Lora, Electo Eduardo Silva.
III. Título.

13-00083.

CDD: 621

CDU: 621

É proibida a reprodução total ou parcial, por quaisquer meios,
sem autorização por escrito da editora.

www.editorainterciencia.com.br



Editora Interciência Ltda.

Rua Verna Magalhães, 66 – Engenho Novo

Rio de Janeiro – RJ – 20710-290

Tels.: (21) 2581-9378 / 2241-6916 – Fax: (21) 2501-4760

e-mail: vendas@editorainterciencia.com.br

Impresso no Brasil – *Printed in Brazil*

“Aqueles que admiram a civilização, geralmente a identificam com o motor a vapor e o telégrafo elétrico”

– George Bernard Shaw, 1905

“A ciência lhe deve mais ao motor a vapor, que o motor a vapor à ciência”

– Lawrence Joseph Henderson

APRESENTAÇÃO

O livro que apresentamos aqui com o título “MÁQUINAS TÉRMICAS DE FLUXO: Cálculos Termodinâmicos e Estruturais” é o resultado de vários anos de colaboração entre a Universidade Nacional Politécnica de Odessa – UNPO na Ucrânia e a Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI no Brasil. Vale destacar também que o mesmo representa uma confluência das escolas soviéticas e alemãs. A composição e o conteúdo deste livro foram concebidos com base na análise dos avanços científicos e tecnológicos e da metodologia de ensino nos melhores cursos universitários em turbomáquinas: de Kharkov, de São-Petersburgo e de Moscou (Instituto de Energia e Universidade Tecnológica “Bauman”). O Professor Richard Brand, fundador da escola de turbomáquinas da UNIFEI, se dedicou à formação de dezenas de especialistas nesta universidade, seguindo a experiência da escola alemã de projeto de turbomáquinas. Foram aproveitados resultados de troca de ideias durante contatos com extraordinários especialistas desta área, tais como Troianovskii, Shneie, Deich, e principalmente, com o fundador de escola de tecnologias de turbinas de Odessa, Professor Dr. Oleseievich Kiril Vladimirovich.

Uma contribuição importante para esta obra foi o trabalho conjunto do professor Anton Mazurenko com uma equipe de professores e alunos do Núcleo de Excelência em Geração Termelétrica e Distribuída – NEST no projeto de P&D “Desenvolvimento de Ferramentas Computacionais e Procedimentos de Cálculos para Turbinas a Vapor” realizado em colaboração com a TGM turbinas e que também contou com o apoio financeiro do Conselho Nacional de Pesquisas do Brasil – CNPq. Agradecemos à TGM também pelo fornecimento de inúmeras fotografias para a ilustração do livro e pelo apoio financeiro para a sua publicação.

O Professor Anton Stanislavovich Mazurenko, renomado especialista ucraniano no assunto, tem vindo a UNIFEI 5 vezes nos últimos anos a fim de ministrar cursos, palestras e participar em projetos de P&D no tema de turbomáquinas. A apostila das suas palestras traduzida ao português contou com a importante contribuição do Professor Zulcy de Souza, que incorporou novos capítulos, itens e exemplos de cálculo, além de fazer uma criteriosa revisão de todo o texto. O Professor Electo Silva Lora, responsável pela tradução ao português das palestras e capítulos, contribuiu também ao enriquecimento

do material, ficou também a cargo de um capítulo do livro. Não podemos esquecer que o Prof. Arnaldo Martinez Reyes da Universidade de Oriente em Cuba, também especialista em turbinas a vapor, teve a gentileza de ler e sugerir correções nos capítulos do livro durante a sua estadia como pesquisador visitante na UNIFEI. Em fim, trata-se de uma obra conjunta de especialistas ucranianos, brasileiros e cubanos, apenas possível num mundo globalizado.

As turbinas a vapor radiais e axiais constituem uma das máquinas térmicas mais antigas, cujos inícios tiveram a contribuição de gênios como Parson, Ljungstrom, Rateau, Curtis e outros. Hoje ainda são amplamente utilizadas na geração de energia e na cogeração e geração distribuída na indústria. O desenvolvimento tecnológico das mesmas continua com a introdução de paletas com perfil 3D, novos tipos de selagem, modificações nos esquemas térmicos das centrais a vapor, desenvolvimento de turbinas radiais para geração em pequena escala, uso de fluidos de trabalho alternativos, implementação de sistemas de diagnóstico, uso da ferramenta CFD para a otimização do projeto da seção de fluxo, etc.

Tudo isto determina a importância de formação de profissionais com profundos conhecimentos na área de turbomáquinas, incluindo o seu projeto, características construtivas, operação, manutenção, testes, bem como fundamentos de análise térmica e de resistência. Na literatura técnica brasileira praticamente não existem livros sobre turbinas a vapor, pelo que esta obra vem a preencher uma lacuna existente.

O presente livro, composto por 11 capítulos, e com um pouco mais de 500 páginas, não constitui uma monografia científica, apesar de incluir resultados de algumas pesquisas desenvolvidas pelos autores. Também não é um “handbook” de projetista, apesar da abundância de dados e exemplos, que ajudam a desenvolver projetos de turbina e de seus componentes. Também não é um manual de operação de grupos turbogeradores, apesar de incluir questões relacionadas à partida, funcionamento e parada de turbina.

Este livro é definitivamente um manual útil no estudo dos processos que ocorrem na turbina durante a sua operação, na avaliação das condições operacionais de seus elementos, na análise do funcionamento da mesma como elemento da usina termelétrica. A utilização deste livro, ilustrado com vários exemplos de cálculo, processos e soluções técnicas, permitirá subsidiar o desenvolvimento de projetos reais de turbinas, a tomada de decisões corretas durante a operação, a solução de problemas relacionados com o aumento da eficiência e da confiabilidade dos grupos turbogeradores.

Justamente tal abordagem do estudo dos grupos turbogeradores permite formar especialistas que, além de ter o conhecimento das características e particularidades de projeto e operação de determinadas máquinas, também possuem criatividade para desenvolvimento de novos equipamentos, habilidade para elaboração de manuais e instruções, com o objetivo da operação otimizada, e para escolha de grupos turbogeradores com características técnicas otimizadas.

Em função disso, o livro pode ser interesse tanto para estudantes universitários, com especialização na área de energia, quanto para os técnicos das empresas de energia e de usinas termelétricas que desejam ampliar seus conhecimentos sobre processos e fenômenos

que ocorrem nas turbinas e, desta maneira, atingir um patamar mais elevado na operação e manutenção desses equipamentos.

O livro, embora objeto de múltiplas revisões, não está livre de erros e possíveis melhoras. Solicitamos então que nos comuniquem através do e-mail as suas sugestões visando a futuras edições.

Os autores

PREFÁCIO

A Escola de Especialistas em Energética da Universidade Nacional Politécnica de Odessa na especialidade de Centrais Termelétricas é bastante conhecida tanto na Ucrânia como em todo o mundo, bastando considerar que atualmente os diretores das maiores centrais termelétricas da Ucrânia, com potência de 2 500 até 3 600 (MW), nela se formaram. Além disso, uma grande quantidade de nossos formandos trabalham no setor energético da Rússia, Moldávia, Bulgária, República Checa, Cuba e outros países.

Uma das disciplinas principais na formação dos especialistas em termoenergética é o curso “Turbinas a vapor e a gás”. Nos últimos 30 anos este curso é ministrado pelo Professor Titular, Chefe do Departamento de Centrais Termelétricas e Tecnologias de Conservação de Energia, Dr. Anton Stanislavovich Mazurenko, que é o autor principal do presente livro. O coautor deste livro é o Professor Electo Silva Lora, atualmente coordenador do Núcleo de Excelência em Geração Termelétrica e Distribuída da Universidade Federal de Itajubá, no Brasil. De origem cubana, ele também é ex-aluno da nossa universidade.

Desta maneira, podemos considerar que este livro é, em grande parte, resultado do trabalho coletivo da Escola de Especialistas em Energia de Odessa com a incorporação dos desenvolvimentos e resultados de gerações anteriores. É agradável constatar que se juntou aos autores o reconhecido cientista e pesquisador brasileiro Professor Zulcy de Souza, um dos fundadores dos cursos em energia da Universidade Federal de Itajuba – UNIFEI. Com a sua participação, o livro consolidou o seu caráter internacional.

Uma das particularidades deste livro é a combinação de informação de caráter aplicado com uma apresentação aprofundada das questões relacionadas com a teoria dos processos nas Máquinas de Fluxo, das questões de cálculo de resistência e da operação das mesmas. A apresentação dos assuntos teóricos se complementa com exemplos numéricos e a análise dos resultados obtidos.

Observa-se continuamente no livro, um princípio importante da pedagogia – a passagem gradual dos conceitos simples aos mais complexos. Essa abordagem do processo de ensino é característica da Universidade Nacional Politécnica de Odessa, que vem demonstrando a sua validade com o tempo.

Prof. Oborskii, G.A.

Reitor da Universidade Nacional Politécnica de Odessa

Презентация

Существующая в Одесском политехническом университете (ОНПУ) школа подготовки специалистов в области теплоэнергетики хорошо известна как в Украине, так и в мире. Подтверждением этому служит то, что руководителями самых крупных в Украине тепловых электрических станций (до 3600 МВт) и атомных электрических станций (до 6000 МВт) являются выпускники ОНПУ. Успешно работают наши выпускники и в энергетических отраслях России, Молдовы, Болгарии, Германии, Чешской республики, Кубы, Канады и др. стран.

Одним из основных предметов в подготовке инженеров-теплоэнергетиков является курс паровых и газовых турбин. Последние 30 лет этот курс преподает в ОНПУ профессор, заведующий кафедрой Тепловых электрических станций и энергосберегающих технологий, доктор наук, Мазуренко Антон Станиславович, который является одним из авторов данного учебника. Соавтором этой книги является профессор, координатор Центра передового опыта в области термоэлектрических преобразований Бразильского федерального университета в Итаджубе Електо Сильва Лора. Кубинец по происхождению, он также является выпускником Одесского политехнического университета. Таким образом, можно говорить, что эта книга в значительной мере является результатом коллективной работы Одесской школы специалистов-энергетиков различных поколений. Отрадно отметить, что к коллективу авторов присоединился известный бразильский ученый и исследователь, профессор Зулси де Соулза, один из основателей энергетической подготовки в федеральном университете Итаджубы. В таком составе авторов книга подтверждает свой международный статус.

Одной из особенностей этой книги является сочетание общих вопросов теории преобразования энергии с детальным изложением вопросов, связанных с теорией процессов в турбомашинах, вопросами расчетов на прочность турбин и их эксплуатацией. Рассмотрение теоретических вопросов дополняется числовыми примерами с анализом полученных результатов. На протяжении всей книги сохраняется в изложении материала основной принцип педагогики - постепенный переход от простых к сложным понятиям. Такой подход к преподаванию характерен для Одесского национального политехнического университета, и он на протяжении длительного времени подтвердил свою эффективность.

Ректор Одесского национального политехнического университета,
профессор Оборский Г.А.

ABREVIACOES E DEFINIOES

AAP	- aquecedor de alta pressão
ABP	- aquecedor de baixa pressão
BAT	- bomba de alimentao com acionamento por turbina
BEA	- bomba de alimentao elétrica
CCGV	- ciclo combinado gás / vapor
CN	- central nuclear
CG	- grupo gerador
CTE	- central ou usina termelétrica
CTF	- caminho termodinâmico do fluxo
CTE	- central térmica estacionária ou caminho térmico do escoamento
CTN	- central térmica nuclear
CTO	- turbocompressor
CTV	- central térmica a vapor
DRR	- dispositivo de reduo e resfriamento
Ef	- eficiência
GE	- gerador elétrico
GGT	- grande grupo térmico
GTG	- grupo turbogerador ou grande turbina a gás
MF	- máquina de fluxo
MPA	- método de análise probabilística
MT	- máquinas térmicas
MTF	- máquina térmica de fluxo
MTP	- máquina térmica a pistão
PTV	- pequenas turbinas a vapor
RCV	- regulador centrífugo de velocidade

-
- SIU – sistema internacional de unidades
- STU – sistema técnico de unidades
- TAP – seção de alta pressão da turbina ou turbina de alta pressão
- TBP – seção de baixa pressão da turbina ou turbina de baixa pressão
- TCN – turbina de central nuclear
- TCO – turbo compressor
- TG – turbina a gás
- TGE – turbo gerador elétrico
- TGV – grupo turbogerador a vapor
- TMP – seção de média pressão da turbina
- TG – turbina a gás
- TH – turbina hidráulica
- TT – turbina térmica
- TV – turbina a vapor
- TVR – turbina a vapor radial
- ALETA – palavra usada para designar o perfil dos componentes de estatores (bocais) e distribuidores que objetiva direcionar o escoamento
- PÁ – palavra usada para designar o perfil dos componentes dos rotores que têm objetivo de transformar energia térmica em trabalho mecânico
- PERFIL – palavra usada para designar, indistintamente, aletas e pás

SIMBOLOGIA

MAIÚSCULA

- A – área
- A_s – área da seção transversal do labirinto
- A_0 – seção de entrada do bocal
- A_1 – seção de saída do bocal
- $A_0; A_1$ – forma do tipo de oscilação
- B – largura do perfil
- C – porcentagem de carbono
- C_a – custo anual da água consumida ou da energia de aquecimento
- C_n – característica do perfil quanto à ressonância
- D – diâmetro ou dimensão característica geométrica
- E – energia do fluido em escoamento ou módulo de elasticidade de Young
- E_{ag} – energia da água
- E_{aq} – energia de aquecimento
- E_c – economia anual de energia ou tensão de indução elétrica
- F – força
- F_c – força centrífuga
- F_p – força de pressão
- F_u – força propulsora da direção axial
- H – porcentagem de hidrogênio ou entalpia da massa em escoamento
- I – momento de inércia ou corrente elétrica
- L – altura do perfil o trabalho específico
- L_b – trabalho específico consumido pela bomba
- \bar{L} – comprimento infinito
- M_f – momento de flexão

- M_t – momento de torção
- M_{t_0} – momento máximo de rotação gerado pela turbina a vapor em regime de máxima potência
- $M(x)$ – momento fletor
- N_m – número de mols
- N_{Ma} – número de Mach
- N_{Pa} – número de Parsons
- N_{Pr} – número de Prandtl
- N_{Re} – número de Reynolds
- O – porcentagem de oxigênio
- P – potência
- P_e – potência no eixo
- P_{el} – potência elétrica
- P_i – potência interna total ou do estágio
- P_L – potencia consumida nos labirintos
- P_m – potência mecânica
- P_p – potência perdida
- P_{pa} – potência perdida por atrito
- P_{pal} – potência perdida por atrito lateral
- P_{pav} – potência perdida por atrito e ventilação
- P_{pv} – potência perdida por ventilação
- P_t – potência teórica ou disponível
- P_u – potência útil ou específica
- PC_i – poder calórico inferior do combustível
- Q – calor ou força de tração
- Q_{PC} – poder calorífico do combustível
- Q_{23} – calor recebido pelo ar no recuperador de calor
- Q_{24} ou Q_{34} – calor recebido oriundo de trocador de calor ou da câmara de combustão
- Q_{56} – calor entregue pelo gás na saída da turbina a gás para o arrefecedor
- $Q(x)$ – força cortante
- R – constante dos gases ou registro
- R_0 – força inicial no parafuso prisioneiro
- R1; R2 – registros com regulação
- S – porcentagem de enxofre ou área da seção transversal
- T – temperatura absoluta ou força de reação na direção tangencial
- T_m – temperatura absoluta média

$T_{\text{máx}}$	– temperatura absoluta máxima do ciclo
$T_{\text{mín}}$	– temperatura absoluta mínima do ciclo
T_0	– temperatura absoluta do gás ou vapor antes da entrada do bocal ou do distribuidor
T_1	– temperatura absoluta do gás ou vapor na entrada do bocal ou do distribuidor
T_2	– temperatura absoluta do gás ou vapor na saída do bocal ou do distribuidor
T_3	– temperatura absoluta do gás ou vapor no anel entre a saída do bocal ou do distribuidor e entrada no rotor ou na entrada da turbina a gás
T_4	– temperatura absoluta do gás ou vapor na entrada do rotor
T_5	– temperatura absoluta do gás ou vapor na saída do rotor
T_6	– temperatura absoluta do gás ou vapor no anel na saída do rotor
U	– energia interna ou tensão elétrica
V	– volume ou volume de controle
VR1; VR2	– válvulas de regulação
\dot{V}	– volume em escoamento
Y	– trabalho específico ou queda entálpica específica
Y_C	– trabalho específico de compressão ou do turbocompressor ou dos estágios Curtis
Y_L	– trabalho específico dos estágios de Laval
Y_{pa}	– energia ou trabalho específico perdido por atrito
Y_{pal}	– energia ou trabalho específico perdido por atrito lateral
Y_{pav}	– energia ou trabalho específico perdido por atrito e ventilação
Y_b	– energia ou trabalho específico do bocal
Y_{cr}	– energia ou trabalho específico crítico
Y_d	– energia ou trabalho específico do difusor
Y_p	– energia ou trabalho específico perdido ou da pá ou total perdido
Y_{pb}	– energia ou trabalho específico perdido nos canais dos bocais ou das aletas
Y_{pe}	– energia ou trabalho específico perdido no estágio
Y_{pf}	– energia ou trabalho específico perdido por fuga
Y_{po}	– energia ou trabalho específico perdido por turbulência
Y_{pr}	– energia ou trabalho específico perdido nos canais das pás do rotor
Y_{ps}	– energia ou trabalho específico perdido na saída do estágio
Y_{pu}	– energia ou trabalho específico perdido por umidade do vapor
Y_R	– trabalho específico dos estágios Rateau
Y_t	– energia ou trabalho específico disponível
Y_T	– trabalho específico de expansão ou da turbina a gás
Y_u	– trabalho específico útil
Y_{pv}	– energia ou trabalho específico perdido por ventilação

- Y_{12} – trabalho específico de compressão do gás
 Y_{45} – trabalho específico de expansão do vapor ou do gás
 W – momento resistente do perfil
 W_p – momento resistente polar

MINÚSCULA

- a – perda de calor por radiação ou coeficiente de limpeza dos tubos do condensador
 b – corda do perfil
 c – velocidade absoluta
 c_{cr} – velocidade crítica ou celeridade
 c_{ex} – velocidade no limite externo da camada-limite
 c_m – componente da velocidade absoluta na direção meridional normal a seção transversal ou na axial correspondente
 c_p – calor específico à pressão constante
 c_s – velocidade do som no meio ou celeridade
 c_t – velocidade absoluta na direção radial
 c_u – componente da velocidade absoluta na direção tangencial
 c_v – calor específico a volume constante
 c_0 – velocidade absoluta na entrada do bocal
 c_1 – velocidade absoluta na saída do bocal
 d – diâmetro do eixo
 d_{pr} – diâmetro do parafuso prisioneiro
 e – espessura
 e_{ar} – relação de ar
 e_t – espessura tangencial
 f – folga nos labirintos ou coeficiente de fusão do mancal
 f' – coeficiente de atrito da metade superior do mancal
 f_{A_j} – frequência de ressonância do tipo A_j
 f_e – fator de estrangulamento
 f_{din} – frequência dinâmica de vibração
 g – aceleração da gravidade
 h – entalpia específica
 \bar{h} – altura relativa
 h_{min} – folga mínima da cunha de óleo no mancal
 h_0 – entalpia específica na entrada do bocal
 h_1 – entalpia específica na saída do bocal

i	– número do estágio genérico
j	– número de estágios
k	– relação de calores específicos ou constantes para o vapor ou coeficiente total de transmissão de calor ou constante da frequência de oscilações ou fator de perturbação
k_a	– constante do tipo de selo do labirinto
k_b	– coeficiente de vazão dos bocais
k_p	– coeficiente de vazão das pás
k_σ	– coeficiente da tensão máxima no corpo do diafragma
k_Δ	– coeficiente da tensão máxima da deflexão máxima no diafragma
m	– massa
m_a	– massa de água
m_{ar}	– massa de ar
$m_{ar\text{mín}}$	– massa de ar mínimo para combustão estequiométrica
m_b	– escala geométrica do bocal
$m_c = m_{co}$	– massa de combustível
m_f	– massa de fuga
$m_{gás}$	– massa de gás
m_r	– multiplicidade de arrefecimento do condensador ou massa retirada
m_s	– massa de vapor seco
m_p	– escala geométrica da pá
\dot{m}	– massa em escoamento
\dot{m}_{ag}	– massa de água em escoamento
\dot{m}_{ar}	– massa de ar em escoamento
$\dot{m}_c = \dot{m}_o$	– massa de combustível em escoamento
\dot{m}_{ca}	– massa de combustível em escoamento consumida anualmente
\dot{m}_{co}	– massa em escoamento para o condensador
\dot{m}_f	– massa de vapor de fuga
$\dot{m}_{gás}$	– massa de gás em escoamento
\dot{m}_r	– massa retirada do escoamento
n	– rotação
n_C	– rotação do turbocompressor
n_{cr}	– rotação crítica do rotor
n_G	– rotação do gerador elétrico
n_r	– rotação da turbina a gás
n_{sr}	– rotação de ressonância
n_T	– rotação da turbina a gás ou a vapor

p	– pressão
p_{ar}	– pressão barométrica
p_{cr}	– pressão total crítica
p_n	– pressão nominal
$p_r = p_{re}$	– pressão de reaquecimento de retirada de vapor
p_{rot}	– pressão de reaquecimento ótima
p_{t_o}	– pressão total em um ponto do perfil
p_0	– pressão total do gás ou vapor antes da entrada do bocal ou do distribuidor
p_1	– pressão total do gás ou vapor na entrada ou na saída do bocal ou do distribuidor
p_{1est}	– pressão estática em um ponto do perfil
p_2	– pressão total do gás ou vapor na saída do bocal ou do distribuidor
p_3	– pressão total do gás ou vapor no anel entre a saída do bocal ou do distribuidor e entrada no rotor
p_4	– pressão total do gás ou vapor na entrada do rotor
p_5	– pressão total do gás ou vapor na saída do rotor
p_6	– pressão total do gás ou vapor no anel na saída do rotor
q	– calor por unidade de massa
q_i	– força de inércia por unidade de comprimento
q_{45}	– calor específico entregue ao gás
r	– raio ou resistência elétrica ativa interna
\bar{r}	– raio relativo
r_{ar}	– relação de ar
r_{cg}	– raio do centro de gravidade da área de cada elemento
r_D	– relação de diâmetros
r_c	– raio do centro de massa
r	– grau de compressão
r_{pr}	– raio do parafuso prisioneiro
r_v	– relação de velocidades
s	– entropia específica
t	– temperatura ou passo teórico
\bar{t}	– passo relativo ou temperatura média
t_a	– passo das aletas
\bar{t}_a	– passo relativo das aletas
t_{ar}	– temperatura do ambiente
t_b	– passo dos bocais
\bar{t}_b	– passo relativo dos bocais

t_p	– passo das pás
\bar{t}_p	– passo relativo das pás
t_0	– temperatura do escoamento na entrada do vapor ou sua temperatura máxima
t_1	– temperatura do escoamento na saída do vapor
u	– velocidade tangencial
u_r	– velocidade tangencial no diâmetro interno, do rotor ou do cubo
v	– volume específico
v_0	– volume específico na entrada do escoamento
V_{pc}	– velocidade média do movimento dos componentes
v_1	– volume específico na saída do escoamento
w	– velocidade relativa
x	– coordenada ou distância ou reatividade das bobinas do estator do gerador elétrico ou título do vapor
w	– velocidade relativa
y	– coordenada
y_c	– amplitude da deflexão estática
$y_p = y_i$	– distância vertical da corda do perfil a sua superfície de pressão
$y_s = y_L$	– distância vertical da corda do perfil a sua superfície de sucção
y_δ	– amplitude de ressonância
z	– distância vertical deste plano de referência ou número de tubos de trocador de calor
z_a	– número de aletas
z_b	– número de bocais
z_d	– número de lâminas ou de dentes do selo labiríntico
z_e	– número de estágio
z_f	– número de fluxo paralelos do vapor em escoamento
z_p	– número de pás
z_{pa}	– número de passagens da água no condensador
z_{pr}	– número de parafusos prisioneiros

GREGA

α	– ângulo que a direção da velocidade u forma com a direção da velocidade c ou coeficiente de expansão térmica ou coeficiente de transmissão de calor por convecção ou relação de frequências
α_{rc}	– coeficiente de retorno de calor
α_y	– ângulo construtivo dos bocais

β	– ângulo que a direção de u forma com a direção de w ou coeficiente de correção ou coeficiente de amplificação de ressonância
β_y	– ângulo construtivo das pás
χ	– coeficiente de alívio
δ	– ângulo de ataque ou estatismo ou decremento de temperatura ou de logaritmo de amortecimento de oscilação ou grau de compressão ou espessura da camada-limite ou folga ou espessura
δ_e	– folga equivalente
δ_t	– diferença entre a temperatura do condensado e a do fluido de arrefecimento
Δ	– deflexão do diafragma
Δt_m	– diferença logarítmica de temperaturas
Δt_a	– diferença máxima entre a temperatura do condensado e a temperatura da água de arrefecimento
Φ_{z_p}	– coeficiente do número de passagens no trocador de calor
ε	– relação entre a pressão crítica na seção mínima do bocal e a pressão em sua entrada
ε_b	– grau de abrangência dos bocais
ε_{el}	– eficiência elétrica
ε_{pl}	– consumo específico da planta
Γ	– circulação da velocidade
γ	– peso específico
η	– rendimento do ciclo
η_{aq}	– rendimento do aquecedor
η_{ap}	– rendimento do aproveitamento
η_c	– rendimento do ciclo de Carnot
η_{co}	– rendimento da combustão
η_{Ci}	– rendimento Curtis interno
η_C	– rendimento do turbocompressor ou interno da compressão
η_e	– rendimento efetivo total ou do estágio
η_{el}	– rendimento total elétrico
η_{el}	– rendimento
η_f	– rendimento de fuga
η_g	– rendimento do gerador elétrico
η_i	– rendimento interno ou relativo interno
η_{Li}	– rendimento interno de Laval
η_m	– rendimento mecânico
η_{oi}	– rendimento interno do cilindro
η_{Pi}	– rendimento Parsons interno

η_{pl}	– rendimento da planta
η_r	– rendimento do redutor de velocidade
η_R	– rendimento do recuperador
η_{re}	– rendimento relativo efetivo ou do estágio
η_{ri}	– rendimento relativo interno
η_{Ri}	– rendimento Rateau interno
η_t	– rendimento interno total teórico do ciclo ou teórico da planta
$\eta_{t_{re}}$	– rendimento do ciclo com reaquecimento
η_T	– rendimento da turbina a vapor ou da expansão
η_T^*	– rendimento da turbina a gás incluindo as perdas totais de pressão no circuito
η_v	– rendimento volumétrico
φ	– coeficiente de perda de velocidade nos bocais ou nas aletas ou por turbulência ou ângulo de defasagem elétrica ou ângulo
λ	– coeficiente de perda ou de carga ou de energia ou de transmissão de calor por condução escala geométrica ou frequência circular
μ	– coeficiente de aproveitamento da velocidade na saída do estágio ou viscosidade dinâmica
μ_s	– coeficiente de vazão do labirinto
ν	– viscosidade cinemática ou taxa de fluência do material
θ	– ângulo
ρ	– massa específica
ρ_t	– grau de reação teórico
σ	– tensão
σ_b	– tensão na base das pás
σ_{cr}	– tensão de creep ou do limite de termofluência
σ_{el}	– tensão de elasticidade
σ_{es}	– tensão de esmagamento
σ_f	– tensão de flexão
$\sigma_{f_{ad}}$	– tensão de flexão admissível
$\sigma_{fa} = \sigma_{0,2}$	– tensão de fadiga
σ_{min}	– tensão no parafuso prisioneiro para manter a vedação na junta
σ_{pr}	– tensão proporcional
σ_{re}	– tensão de ressonância
σ_{ru}	– tensão de ruptura
σ_t	– tensão de tração
σ_{tad}	– tensão de tração admissível

σ_0	– tensão inicial
τ	– tensão de torção
τ_{ad}	– tensão de torção admissível
τ_{cis}	– tensão de cisalhamento
ω	– velocidade angular
ω_{cr}	– velocidade angular crítica
ζ	– deflexão ou desvio
ζ_{at}	– perda por atrito nas superfícies do perfil
ζ_b	– perda nas bordas do perfil ou no canal dos bocais
ζ_{ct}	– perdas totais nas pás
ζ_o	– perda ondulatória
ζ_p	– perda no canal das pás
ζ_{pt}	– perdas no perfil
ζ_k	– perda nos terminais do perfil
ζ_1	– perdas totais nos bocais e nas pás
ζ_∞	– perdas do perfil da pá
ψ	– coeficiente de perda de velocidade nas pás ou de pressão
ψ_C	– coeficiente de compressão

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	VII
PREFÁCIO	XI
ABREVIACÕES E DEFINIÇÕES	XV
SIMBOLOGIA	XVII
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2 HISTÓRIA DO DESENVOLVIMENTO E DA APLICAÇÃO DAS TURBINAS TÉRMICAS	2
1.3 ÁREAS DE APLICAÇÃO DE TV E DE TG.....	6
1.3.1 Geração de energia.....	6
1.3.2 Indústrias.....	7
1.3.3 Transporte marítimo	8
1.3.4 Movimentos puramente rotativos	10
1.3.5 Confiabilidade elevada.....	11
1.3.6 Dimensões relativamente compactas.....	11
1.3.7 Eficiência elevada	11
1.3.8 Utilização de combustíveis de diversos tipos	11
1.4 PERSPECTIVAS DA UTILIZAÇÃO DE GTG A VAPOR.....	12
CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTOS DA TEORIA DAS MÁQUINAS TÉRMICAS DE FLUXO	13
2.1 MÁQUINAS TÉRMICAS DE FLUXO E MÁQUINAS TÉRMICAS A PISTÃO.....	13
2.2 PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DAS MF	14

2.3	PROCESSOS DE TRANSFORMAÇÃO DE ENERGIA EM MTF	15
2.4	EQUAÇÃO DA CONSERVAÇÃO DA ENERGIA	19
2.5	EQUAÇÃO DE BERNOULLI E EQUAÇÃO DE CONTINUIDADE	22
2.6	ESCOAMENTO DE GÁS CONSIDERANDO SUA COMPRESSIBILIDADE ..	23

CAPÍTULO 3 – CICLOS E PLANTAS TÉRMICAS COM TURBINAS A VAPOR E COM TURBINAS A GÁS. 27

3.1	CICLOS E PLANTAS TÉRMICAS	27
3.2	RENDIMENTO DAS PLANTAS TÉRMICAS E DE SEUS COMPONENTES.	33
3.2.1	Rendimento térmico do ciclo	33
3.2.2	Rendimento de Carnot.	37
3.2.3	Rendimento dos componentes	39
3.3	TURBINA A GÁS.	42
3.3.1	Teoria básica	42
3.3.2	Câmara de combustão	47
3.4	APLICAÇÕES.	48
3.4.1	Rendimento térmico do ciclo a vapor	48
3.4.2	Potência da TV	49
3.4.3	Dimensionamento térmico básico de planta com TG.	52

CAPÍTULO 4 – ESTÁGIO – PROCESSOS. 61

4.1	CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS, PRINCÍPIO DE TRABALHO, GRAU DE REAÇÃO	61
4.2	REPRESENTAÇÃO DO PROCESSO DO ESCOAMENTO NO DIAGRAMA DE MOLLIER	63
4.3	TRIÂNGULOS DE VELOCIDADES	64
4.4	APLICAÇÃO SOBRE TRIÂNGULOS DE VELOCIDADE	67
4.5	CARACTERÍSTICAS DOS PERFIS E DAS GRADES PARA TT	69
4.5.1	Grade básica	69
4.5.2	Traçado do perfil.	69
4.5.3	Escolha e reprodução da forma do perfil	72
4.5.4	Exemplo de seleção de perfil ótimo para um estágio.	73
4.6	CARACTERÍSTICAS AERODINÂMICAS DE PERFIS E GRADES PARA TT	75
4.6.1	Perdas no perfil	75

4.6.2	Determinação das perdas no perfil	84
4.6.3	Exemplo de utilização das características dos perfis para TT	85
4.7	CÁLCULO DA ALTURA DOS BOCAIS OU ALETAS E DAS PÁS	87
4.7.1	Bocais ou aletas	87
4.7.2	Pás	89
4.7.3	Exemplo de cálculo da altura de bocais e pás	90
4.8	TORÇÃO DE PÁS COMPRIDAS	92
4.8.1	Método da constância da circulação da velocidade	92
4.8.2	Exemplo da aplicação do método da constância da circulação da velocidade	98
4.9	ESTUDO GERAL DAS PERDAS DE ENERGIA	103
4.9.1	Perdas de energia no canal de bocais ou de aletas	103
4.9.2	Perdas de energia no canal das pás	103
4.9.3	Perdas de energia na saída do estágio	103
4.9.4	Rendimento relativo do estágio	104
4.9.5	Exemplo do cálculo das perdas e do rendimento relativo do estágio	105
4.9.6	Perdas de energia por atrito viscoso e por ventilação	107
4.9.7	Exemplo de cálculo das perdas por atrito viscoso e por ventilação	110
4.9.8	Perdas por fugas	111
4.9.9	Exemplo de cálculo das perdas por fugas de vapor	114
4.9.10	Curva de Fanno	117
4.9.11	Exemplo de cálculo e traçado da curva de Fanno objetivando obtenção do número de lâminas do selo labiríntico	119
4.9.12	Selos labirínticos terminais	121
4.10	PERDAS DE ENERGIA DEVIDO À UMIDADE DO VAPOR	122
4.10.1	Considerações	122
4.10.2	Exemplo de cálculo das perdas por umidade do vapor	124
4.11	RENDIMENTO RELATIVO INTERNO DO ESTÁGIO	125
4.11.1	Considerações	125
4.11.2	Exemplo do cálculo do rendimento e da potência interna	126
4.12	RELAÇÃO ÓTIMA u/c PARA ESTÁGIOS DE AÇÃO E REAÇÃO	127
4.12.1	Estágios de ação pura	127
4.12.2	Estágio de reação intermediária	130
4.12.3	Estágio de reação pura	131
4.12.4	Comentários	132

CAPÍTULO 5 – TURBINAS A VAPOR DE MÚLTIPLOS ESTÁGIOS E PARA SISTEMAS DE COGERAÇÃO.....	135
5.1 ESTÁGIOS DE VELOCIDADE – ESTÁGIO CURTIS.....	135
5.1.1 Considerações – equacionamento	135
5.1.2 Exemplo do cálculo de um estágio Curtis com duas coroas.....	139
5.1.3 Exemplo do traçado dos processos no diagrama $h-s$ para um estágio Curtis.....	143
5.2 COEFICIENTE DE RETORNO DE CALOR	145
5.3 DIVISÃO DO TRABALHO ESPECÍFICO POR ESTÁGIOS NUMA SEÇÃO OU EM TODA A TV.....	146
5.3.1 Equacionamento.....	146
5.3.2 Exemplo da divisão do trabalho específico por estágios.....	148
5.4 ÚLTIMO ESTÁGIO DE TV DE ALTA POTÊNCIA	153
5.4.1 Número de fluxos ou seções de exaustão.....	153
5.4.2 Estágio tipo Bauman	153
5.4.3 Exemplo da determinação do número de seções de exaustão	154
5.5 TV DE CONDENSAÇÃO E PARA SISTEMAS DE COGERAÇÃO	155
5.5.1 TV de condensação	155
5.5.2 TV para sistemas de cogeração.....	159
CAPÍTULO 6 – PEQUENAS TURBINAS A VAPOR.....	167
6.1 CONSIDERAÇÕES	167
6.2 ROTEIRO PARA PTV DE LAVAL	168
6.2.1 Dados	168
6.2.2 Características adotadas iterativamente	169
6.2.3 Cálculos e decisões.....	169
6.2.4 Comentários	173
6.3 ROTEIRO PARA PTV CURTIS.....	174
6.3.1 Dados	174
6.3.2 Características adotadas iterativamente	174
6.3.3 Cálculos e Decisões	177
6.3.4 Comentários	187
6.4 ROTEIRO PARA CÁLCULO TERMODINÂMICO DE PTV CURTIS-RATEAU.....	188
6.4.1 Dados	188
6.4.2 Características adotadas iterativamente	188

6.4.3	Estágio Curtis	191
6.4.4	Estágios Rateau	198
6.4.5	Dimensionamento geométrico preliminar dos estágios Rateau.....	206
6.4.6	Comentários	209
6.5	ROTEIRO PARA PTV PARSONS.....	210
6.5.1	Dados	210
6.5.2	Considerações	210
6.5.3	Elementos de orientação	211
6.5.4	Cálculos – estágio de Laval	213
6.5.5	Cálculos – estágios de reação	216
6.5.6	Comentários	220
6.6	ANÁLISES, COMENTÁRIOS, SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES.....	220
6.6.1	Tabela, resumo e gráficos.....	220
6.6.2	Análises, Comentários, Sugestões e Recomendações	222

CAPÍTULO 7 – CÁLCULO ESTRUTURAL DOS COMPONENTES DOS ROTORES DAS TURBINAS A VAPOR..... 225

7.1	CONSIDERAÇÕES	225
7.2	CÁLCULO DAS PÁS DO ROTOR NA RUPTURA POR AÇÃO DE FORÇAS CENTRÍFUGAS.....	227
7.2.1	Pás com seção transversal constante	227
7.2.2	Pás com perfil variável pela altura	228
7.2.3	Exemplo do cálculo da tensão de ruptura para pá de seção constante	230
7.2.4	Exemplo do cálculo da tensão de ruptura para pá de seção variável.	230
7.3	ESFORÇOS DE FLEXÃO NA PÁ	233
7.3.1	Equacionamento.....	233
7.3.2	Alívio das tensões de flexão na pá	235
7.3.3	Exemplo da determinação das tensões de flexão	236
7.4	TENSÕES ADMISSÍVEIS PARA MATERIAIS DAS PÁS.....	238
7.5	VIBRAÇÃO DAS PÁS DAS TV.....	240
7.5.1	Equacionamento.....	240
7.5.2	Frequência dinâmica de vibração	246
7.5.3	Reserva de segurança contra a ressonância e diagrama de Campbell....	246
7.5.4	Decremento logarítmico de amortecimento das oscilações	247

7.5.5	Vibrações dos conjuntos das pás	251
7.5.6	Exemplo de determinação da frequência natural de pá isolada.....	251
7.6	TIPOS DA FIXAÇÃO DAS PÁS E CÁLCULO DE RESISTÊNCIA.....	252
7.6.1	Fixação na forma de T	252
7.6.2	Fixação na forma de cogumelo.....	253
7.6.3	Fixação em forma de garfo	253
7.6.4	Fixação na forma de pinheiro	254
7.6.5	Cálculo de resistência das fixações.....	255
7.6.6	Exemplo do cálculo de resistência da fixação da pá.....	257
7.7	CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS E CÁLCULO DE RESISTÊNCIA DE ROTORES E DISCOS DE FORMA ALEATÓRIA.....	259
7.7.1	Características.....	259
7.7.2	Cálculo de resistência de um disco de forma qualquer.....	260
7.7.3	Disco de resistência uniforme ou disco de Laval	262
7.7.4	Exemplo do cálculo de disco de resistência uniforme.....	263
7.7.5	Cálculo de resistência de um disco de forma aleatória sob aquecimento não uniforme.....	264
7.7.6	Cálculo de tensões em um disco de forma complexa com orifício central livre	269
7.7.7	Exemplo do cálculo de um disco de forma complexa com aquecimento não homogêneo.....	271

CAPÍTULO 8 – CÁLCULO ESTRUTURAL DOS COMPONENTES

	COMPLEMENTARES DAS TURBINAS A VAPOR.....	275
8.1	RESISTÊNCIA DOS ROTORES DAS TV	275
8.2	ROTAÇÕES CRÍTICAS DO ROTOR.....	278
8.3	VERIFICAÇÃO PARA O CASO DE CURTO CIRCUITO NO GE	280
8.4	EXEMPLO DA DETERMINAÇÃO DAS ROTAÇÕES CRÍTICAS DO ROTOR DE TV.....	281
8.5	ACOPLAMENTOS DE TV	282
8.5.1	Tipos, características e dimensionamento.....	282
8.5.2	Exemplo da determinação do número de parafusos prisioneiros	285
8.6	CARCAÇA E FLANGES DAS TV.....	286
8.6.1	Considerações e características.....	286
8.6.2	Cálculo da flange da carcaça	289

8.6.3	Exemplo da determinação da força de tração dos prisioneiros de uma união por flanges de uma TV.	292
8.6.4	Determinação da força de aperto considerando a relaxação de tensões..	294
8.7	CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS E DE RESISTÊNCIA DE DIAFRAGMAS E BRAÇADEIRAS PARA TV	297
8.7.1	Características e equacionamento	297
8.7.2	Exemplo de cálculo de diafragma e das aletas à flexão e deflexão.....	300
8.8	MANCAIS PARA TV E SISTEMAS PARA FORNECIMENTO DE ÓLEO ...	302
8.8.1	Mancais para TV.....	302
8.8.2	Mancal de apoio	302
8.8.3	Exemplo de cálculo de um mancal de apoio.....	307
8.9	MANCAL DE ESCORA	311
8.10	ESQUEMAS E COMPONENTES PRINCIPAIS DO SISTEMA DE LUBRIFICAÇÃO DAS TV	312
8.11	INSTALAÇÃO DE TV SOBRE A SUA BASE	315

CAPÍTULO 9 – SISTEMA DE CONDENSAÇÃO PARA TURBINAS A VAPOR

9.1	COMPONENTES DO SISTEMA PARA CONDENSAÇÃO	319
9.2	CONDENSADOR E SEUS PERTENCES.....	320
9.2.1	Considerações	320
9.2.2	Equacionamento termodinâmico básico.....	324
9.2.3	Exemplo da determinação expedita de k.....	326
9.3	CÁLCULO TERMODINÂMICO DO CONDENSADOR	329
9.3.1	Considerações	329
9.3.2	Roteiro básico para o cálculo termodinâmico	329
9.3.3	Aplicação	331

CAPÍTULO 10 – OPERAÇÃO DE PLANTAS ENERGÉTICAS E DE TURBINAS A VAPOR.....

10.1	FUNDAMENTOS DA OPERAÇÃO DE PLANTAS ENERGÉTICAS COM TV	335
10.1.1	Particularidades do funcionamento de turbogeradores em plantas energéticas	335
10.1.2	Redistribuição otimizada de carga entre GG	340
10.1.3	Regimes de mínima demanda e picos	346

10.1.4	Exemplo de seleção do regime de passagem pela carga mínima no período noturno	348
10.1.5	Análise probabilística da confiabilidade dos equipamentos energéticos	350
10.2	OPERAÇÃO DE TURBINAS A VAPOR EM REGIME VARIÁVEL	357
10.2.1	Comportamento de bocais e rotores	357
10.2.2	Diagrama de consumo relativo de vapor	360
10.2.3	Aplicações	360
10.2.4	Bocal divergente de Laval operando em regime variável	363
10.2.5	Escoamento do vapor no corte oblíquo do bocal	364
10.2.6	Operação de TV de múltiplos estágios com carga variável	368
10.2.7	Sistema de distribuição de vapor e regulação da potência das TV	374
10.3	SISTEMAS DE REGULAGEM DE TV EM CTE	381

CAPÍTULO 11 – TENDÊNCIAS PRINCIPAIS DO DESENVOLVIMENTO DAS MÁQUINAS TÉRMICAS DE FLUXO

11.1	UTILIZAÇÃO DA MECÂNICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL PARA O PROJETO DE MT	392
11.2	ACRÉSCIMO DA POTÊNCIA UNITÁRIA, DOS PARÂMETROS DO VAPOR E DA EFICIÊNCIA RELATIVA INTERNA DAS TV	396
11.2.1	Acréscimo da potência unitária	396
11.2.2	Acréscimo dos parâmetros do vapor	397
11.2.3	Acréscimo da eficiência dos estágios	399
11.2.4	Implementação do duplo reaquecimento	400
11.2.5	Novas tecnologias de selagem	401
11.3	DIAGNÓSTICO E ACRÉSCIMO DA VIDA ÚTIL DAS TV E DAS TG	403
11.3.1	Diagnóstico das TV	403
11.3.2	Monitoramento e Diagnóstico das TG	405
11.4	DESENVOLVIMENTO DE CONDENSADORES A AR PARA TV	407
11.5	PROJETO DE TV RADIAIS DE PEQUENA POTÊNCIA E ALTA EFICIÊNCIA	410
11.6	USO DE FLUIDOS DE TRABALHO ALTERNATIVOS COM CICLO ORGÂNICO RANKINE E KALINA	415
11.6.1	Ciclo orgânico Rankine – ORC	415
11.6.2	Ciclo Kalina	423
11.7	TG DE QUEIMA EXTERNA	424

11.8 EXPANSORES DE ROSCA E TIPO <i>SCROLL</i> COMO MFT ALTERNATIVAS PARA SISTEMAS DE PEQUENA CAPACIDADE	428
11.8.1 Expansores de rosca	428
11.8.2 Expansores em espiral ou tipo <i>scroll</i>	431
11.9 CICLOS COMBINADOS GÁS, VAPOR E TECNOLOGIAS IGCC	432
11.9.1 Ciclos combinados gás e de vapor	432
11.9.2 Sistemas IGCC	438
11.10 CONDICIONAMENTO DO AR DE ENTRADA EM TURBINAS A GÁS	441
ANEXO	445
REFERÊNCIAS	453
ÍNDICE ALFABÉTICO-REMISSIVO	461