

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR *Rodrigo Renó*
Gonzaga..... E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM *15.1.12.1.2009*
J. Llagostera
.....
ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Modelagem Computacional para Análise de Desempenho de Turbinas a Gás para Geração de Potência

Autor: **Rodrigo Renó Gonzaga**

Orientador: Jorge Isaías Llagostera Beltran

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENERGIA**

Modelagem Computacional para Análise de Desempenho de Turbinas a Gás para Geração de Potência

Autor: **Rodrigo Renó Gonzaga**

Orientador: Jorge Isaías Llagostera Beltran

Curso: Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Térmica e Fluídos

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2009

S.P. – Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA – BAE – UNICAMP

Gonzaga, Rodrigo Renó
G589m Modelagem computacional para análise de desempenho de turbinas a gás para geração de potência / Rodrigo Renó Gonzaga. – Campinas, SP: [s.n.], 2009.

Orientador: Jorge Isaías Llagostera Beltran.

Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Modelagem de dados. 2. Turbina a Gás. 3. Mapas. 4. Desempenho. 5. Curvas. I. Llagostera Beltran, Jorge Isaías. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Título em Inglês: Computational modelling of gas turbine off-design performance for power generation.

Palavras-chave em Inglês: Modelling data, Gas Turbine, Maps, Performance, Curves.

Área de concentração: Térmica e Fluídos

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: José Antônio Perrella Balestieri e Denilson Boschiero do Espírito Santo.

Data da defesa: 15/12/2009

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENERGIA**

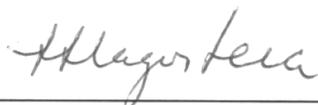
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

**Modelagem Computacional para Análise de
Desempenho de Turbinas a Gás para Geração de
Potência**

Autor: **Rodrigo Renó Gonzaga**

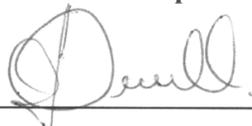
Orientador: Jorge Isaías Llagostera Beltran

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



Prof. Dr. Jorge Isaías Llagostera Beltran, Presidente

Universidade Estadual de Campinas – FEM / UNICAMP



Prof. Dr. José Antônio Perrella Balestieri

Universidade Estadual Paulista – FEG / UNESP – Guaratinguetá



Prof. Dr. Denilson Boschiero do Espírito Santo

Universidade Estadual de Campinas – FEM / UNICAMP

Campinas, 15 de dezembro de 2009

Dedicatória:

Dedico este trabalho aos meus pais, à minha esposa e ao meu orientador.

Agradecimentos

Agradeço em especial ao meu orientador, e amigo, Llagostera por toda a atenção dada nos anos de desenvolvimento desta dissertação. Agradeço a ele por suas sábias palavras, que muito colaboraram para meu crescimento pessoal e acadêmico, e pelo tempo sempre disponível para discussões sobre a dissertação e sobre a vida.

Agradeço à minha esposa Fernanda, pela compreensão a muitos dos dias passados estudando, em substituição aos nossos momentos de descanso e lazer, e pela motivação a mim depositada quando também iniciou seus estudos de Pós-Graduação.

Agradeço à minha irmã Flaviane, na qual busquei espelhar-me para concluir este trabalho.

Agradeço aos meus pais, Ana e Lairton, por sempre acreditarem em meu potencial.

Agradeço a todos os meus amigos da Pós-Graduação. Cito aqui Paulo César e Josias, sempre abertos a boas conversas e sempre motivadores do estudo acadêmico. Muitos dos dias de estudo foram com eles compartilhados.

Agradeço a todos os professores do Departamento de Energia (DE), dos quais tive o privilégio de ser um de seus alunos.

Por fim, agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudos concedida no primeiro ano de desenvolvimento deste trabalho.

'Somente a Persistência leva à Vitória'
'Todos os Nossos Sonhos são Possíveis'

Resumo

GONZAGA, Rodrigo Renó, *Modelagem Computacional para Análise de Desempenho de Turbinas a Gás para Geração de Potência*, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), 2009. 139 p. Dissertação de Mestrado.

Este trabalho é resultado do desenvolvimento de um programa computacional para representação termodinâmica de desempenho ‘off-design’ de ciclos de turbinas a gás para geração de potência elétrica, ou seja, desempenho fora das condições de projeto ou condições nominais. Foram utilizados mapas genéricos de desempenho de compressores e turbinas, gerados a partir de mapas disponíveis na literatura. Tais mapas foram normalizados e relativizados em relação às características de projeto, de tal forma que a metodologia utilizada permite abranger máquinas de todas as faixas operativas para razão de pressão, fluxo e velocidade de rotação. O modelo desenvolvido possibilita a geração de curvas confiáveis de desempenho de turbinas a gás a partir de poucos pontos conhecidos e, com isso, a estimativa de desempenho ‘off-design’ destas máquinas para um determinado ponto de operação escolhido dentro da região útil do mapa da curva. Permite ainda a automatização do processo de cálculo em condições fora de projeto, além dos procedimentos de cálculo serem úteis para o projeto de sistemas de controle de turbinas a gás.

Palavras Chave: Modelagem Computacional, Turbina a Gás, Mapas de Desempenho, Desempenho ‘Off-Design’.

Abstract

GONZAGA, Rodrigo Renó, *Computational Modelling of Gas Turbine Off-Design Performance for Power Generation*, Campinas, Mechanical Engineering Faculty, State University of Campinas (UNICAMP), 2009. 139 p. Master Dissertation.

In this work a computer program was developed for thermodynamic representation of gas turbine cycles off-design performance for electric power generation. Generic performance maps of compressors and turbines were generated using maps available in the literature. These ones were normalized in relation to design features, by the way that the methodology used allowed to cover engines of all operative ranges for pressure ratio, flow and rotational speed. The model developed makes possible the generation of reliable maps of gas turbine performance by a few points known and so, the estimate of off-design performance of these engines for a determined operation point chosen in map curve useful region. It allows yet the automatization of the off-design calculation process, besides of the calculation procedures be useful to gas turbines control systems.

Key Words: Computational Modelling, Gas Turbine, Performance Maps, Off-Design Performance.

Índice

Lista de Figuras.....	xiv
Lista de Tabelas.....	xvii
Nomenclatura	xviii
Capítulo 1.....	1
Introdução.....	1
1.1 Panorama da Geração Elétrica no Brasil.....	1
1.2 Turbinas a Gás.....	2
1.3 Objetivos do Trabalho	3
1.4 Organização do Trabalho	5
Capítulo 2.....	8
Revisão Bibliográfica	8
Capítulo 3.....	15
Metodologia	15
3.1 Determinação das Curvas de Desempenho de Compressores e Turbinas.....	15
3.2 Curvas de Desempenho de Compressores obtidas de Referências	16

3.3	Curvas de Desempenho de Turbinas obtidas de Referências.....	21
3.4	Traçado das Curvas do Compressor.....	26
3.5	Traçado das Curvas da Turbina.....	29
3.6	Automatização do Cálculo de Desempenho do Ponto de Operação.....	31
3.6.1	Cálculo do Desempenho do Ponto de Operação de um Compressor.....	31
3.6.2	Cálculo de Desempenho do Ponto de Operação de uma Turbina.....	34
3.7	Ciclo Termodinâmico a Gás.....	37
3.7.1	Parâmetros dos Mapas de Desempenho.....	38
3.7.2	Compressor.....	39
3.7.3	Câmara de Combustão.....	40
3.7.4	Turbina Geradora de Gases.....	48
3.7.5	Turbina de Potência.....	49
Capítulo 4.....	52
Modelagem Computacional.....	52
4.1	Dados de Entrada.....	53
4.1.1	Programa de Geração de Curvas de Desempenho de Compressores.....	53
4.1.2	Programa de Geração de Curvas de Desempenho de Turbinas.....	54
4.1.3	Programa Principal.....	55
4.2	Rotinas Computacionais Desenvolvidas.....	58
4.2.1	Sub-Rotina Mapa Compressor.....	58
4.2.2	Sub-Rotina YY.....	60
4.2.3	Sub-Rotina Intervalo.....	61
4.2.4	Sub-Rotina Isolando.....	62
4.2.5	Sub-Rotina RP x EFI.....	62

4.2.6	Sub-Rotina Compressor	63
4.2.7	Sub-Rotina Combustor.....	64
4.2.8	Sub-Rotina Combustão	65
4.2.9	Sub-Rotina Turbina GG.....	66
4.2.10	Sub-Rotina Turbina P.....	67
4.2.11	Sub-Rotina Compressor Off.....	68
4.2.12	Sub-Rotina Turbina GG Off	69
4.2.13	Sub-Rotina Turbina P Off	70
4.2.14	Sub-Rotina Test\$.....	71
4.2.15	Sub-Rotina Choque	72
4.2.16	Sub-Rotina Tricolor	72
4.2.17	Sub-Rotina Tgg_off\$	73
4.2.18	Sub-Rotina tp_off\$.....	74
4.3	Dados de Saída	75
4.3.1	Programa de Geração de Curvas de Desempenho de Compressores.....	75
4.3.2	Programa de Geração de Curvas de Desempenho de Turbinas	75
4.3.3	Programa Principal.....	76
Capítulo 5.....		79
Estudo de Caso		79
5.1	Representação da Turbina a Gás em Estudo	79
5.2	Geração de Curvas para Compressor	80
5.3	Geração de Curvas para Turbina	84
5.4	Simulação do Programa Principal	88
5.4.1	Caso 1.....	88

5.4.2	Caso 2.....	88
5.5	Dados do Programa Principal.....	88
5.5.1	Dados Nominais.....	89
5.5.2	Dados ‘Off-Design’.....	89
5.6	Caso 1 - Resultados e Análise.....	90
5.6.1	Resultados da Simulação.....	90
5.6.2	Análise.....	91
5.7	Caso 2 - Análise de Resultados para Variação de Dados ‘Off-Design’.....	93
5.8	Variações dos Dados de Operação ‘Off-Design’.....	95
5.8.1	Variação da Temperatura na Entrada do Compressor.....	95
5.8.2	Variação da Relação de Pressão no Compressor.....	99
5.8.3	Variação da Temperatura na Entrada da Turbina Geradora de Gases.....	102
5.8.4	Variação do Fluxo Corrigido na Entrada do Compressor.....	105
5.8.5	Variação da Pressão na Entrada do Compressor.....	109
	Capítulo 6.....	112
	Conclusão.....	112
	Referências Bibliográficas.....	114
	Anexos.....	117
	Anexo I – Programa para Geração de Funções para as Curvas dos Mapas de Desempenho de Compressores.....	118
	Anexo II – Programa para Geração de Funções para as Curvas dos Mapas de Desempenho de Turbinas.....	121

Anexo III – Programa Computacional de Análise de Desempenho de Turbinas a Gás para Geração de Potência	124
--	-----

Lista de Figuras

Figura 3.1 – Mapa de Desempenho de Compressor dado por Cohen, Rogers e Saravanamuttoo, 1996 (Fluxo Normalizado Relativo X Razão de Pressão de Estagnação)	16
Figura 3.2 – Mapa de Desempenho de Compressor dado por Cohen, Rogers e Saravanamuttoo, 1996 (Fluxo Normalizado Relativo X Eficiência Isentrópica)	17
Figura 3.3 – Região Útil do Mapa de Desempenho da Referência dado pela Figura 3.1	20
Figura 3.4 – Região Útil do Mapa de Desempenho de Referência dado pela Figura 3.2.....	21
Figura 3.5 – Mapa de Desempenho de Turbina dado por Kurzke, 2003 (Razão de Pressão X Fluxo Corrigido Relativo Percentual)	22
Figura 3.6 – Mapa de Desempenho de Turbina dado por Kurzke, 2003 (Razão de Pressão X Eficiência Isentrópica)	22
Figura 3.7 – Região Útil do Mapa de Desempenho da Referência dado pela Figura 3.5.....	25
Figura 3.8 – Região Útil do Mapa de Desempenho da Referência dado pela Figura 3.6.....	26
Figura 3.9 – Cálculo da Velocidade no Ponto de Operação ‘Off-Design’ de um Compressor	33
Figura 3.10 – Cálculo da Eficiência no Ponto de Operação ‘Off-Design’ de um Compressor	34
Figura 3.11 – Cálculo da Velocidade no Ponto de Operação ‘Off-Design’ de uma Turbina	36
Figura 3.12 – Cálculo da Eficiência no Ponto de Operação ‘Off-Design’ de uma Turbina	36
Figura 3.13 – Representação da Turbina a Gás do Ciclo Termodinâmico a Gás Modelado.....	37
Figura 4.1 – Representação dos dados nominais ou condições de projeto para Turbina a Gás do Ciclo Termodinâmico a Gás Modelado	56

Figura 4.2 – Representação dos dados de operação fora das condições de projeto, ou dados ‘off-design’, para Turbina a Gás do Ciclo Termodinâmico a Gás Modelado.....	57
Figura 4.3 – Representação dos dados de saída nominais para Turbina a Gás do Ciclo Termodinâmico a Gás Modelado.....	77
Figura 4.4 – Representação dos dados de saída ‘off-design’ para Turbina a Gás do Ciclo Termodinâmico a Gás Modelado.....	77
Figura 5.1 – Mapa de Compressor Genérico (Fluxo Corrigido x Razão de Pressão).....	81
Figura 5.2 – Mapa de Compressor Genérico (Fluxo Corrigido x Eficiência)	83
Figura 5.3 – Mapa de Turbina Genérica (Razão de Pressão x Fluxo Corrigido).....	85
Figura 5.4 – Mapa de Turbina Genérica (Razão de Pressão x Eficiência)	87
Figura 5.5 – Gráfico 1 para Variação Percentual de Variáveis em Relação à Operação Nominal, em Função da Variação da Temperatura na Entrada do Compressor	98
Figura 5.6 – Gráfico 2 para Variação Percentual de Variáveis em Relação à Operação Nominal, em Função da Variação da Temperatura na Entrada do Compressor	98
Figura 5.7 – Gráfico 1 para Variação Percentual de Variáveis em Relação à Operação Nominal, em Função da Variação da Relação de Pressão no Compressor.....	101
Figura 5.8 – Gráfico 2 para Variação Percentual de Variáveis em Relação à Operação Nominal, em Função da Variação da Relação de Pressão no Compressor.....	101
Figura 5.9 – Gráfico 1 para Variação Percentual de Variáveis em Relação à Operação Nominal, em Função da Variação da Temperatura na Entrada da Turbina Geradora de Gases (TGG).....	104
Figura 5.10 – Gráfico 2 para Variação Percentual de Variáveis em Relação à Operação Nominal, em Função da Temperatura na Entrada da Turbina Geradora de Gases (TGG).....	104
Figura 5.11 – Gráfico 1 para Variação Percentual de Variáveis em Relação à Operação Nominal, em Função da Variação do Fluxo Corrigido na Entrada do Compressor	108
Figura 5.12 – Gráfico 2 para Variação Percentual de Variáveis em Relação à Operação Nominal, em Função da Variação do Fluxo Corrigido na Entrada do Compressor	108
Figura 5.13 – Gráfico 1 para Variação Percentual de Variáveis em Relação à Operação Nominal, em Função da Variação de Pressão na Entrada do Compressor	111

Figura 5.14 – Gráfico 2 para Variação Percentual de Variáveis em Relação à Operação Nominal, em Função da Variação de Pressão na Entrada do Compressor111

Lista de Tabelas

Tabela 5.1 – Pontos Escolhidos no Mapa de Desempenho da Figura 3.1	80
Tabela 5.2 – Pontos Escolhidos no Mapa de Desempenho da Figura 3.2	82
Tabela 5.3 – Pontos Escolhidos no Mapa de Desempenho da Figura 3.5	84
Tabela 5.4 – Pontos Escolhidos no Mapa de Desempenho da Figura 3.6	86
Tabela 5.5 – Resultados para Variação na Temperatura de Entrada do Compressor	97
Tabela 5.6 – Resultados para Variação da Relação de Pressão no Compressor	100
Tabela 5.7 – Resultados para Variação da Temperatura na Entrada da Turbina Geradora de Gases	103
Tabela 5.8 – Resultados para Variação do Fluxo Corrigido na Entrada do Compressor.....	107
Tabela 5.9 – Resultados para Variação da Pressão na Entrada do Compressor	110

Nomenclatura

Letras Latinas

a	– Coeficiente polinomial adotado para o traçado de curvas	[adimensional]
AC	– Relação Ar/Combustível	[adimensional]
b	– Coeficiente polinomial adotado para o traçado de curvas	[adimensional]
c	– Coeficiente polinomial adotado para o traçado de curvas	[adimensional]
coeficiente	– Relativo aos coeficientes das curvas de velocidade	[adimensional]
d	– Coeficiente polinomial adotado para o traçado de curvas	[adimensional]
dist	– Distância entre o ponto de operação ‘off-design’ e a curva de velocidade do mapa de desempenho do compressor	[adimensional]
e	– Coeficiente polinomial adotado para o traçado de curvas	[adimensional]
exc	– Excesso	[fração adimensional]
f	– Fração volumétrica	[fração adimensional]
fator	– fator de multiplicação	[fração adimensional]
fc	– Fluxo corrigido	[kg.K ^{0,5} /bar]
fm	– Fração mássica	[fração adimensional]
fru	– Matriz de coeficientes da Linha β	[adimensional]
gru	– Matriz de coeficientes da curva ‘surge’ e limite inferior	[adimensional]

h	– Entalpia	[kJ/kg]
H	– Entalpia	[kJ]
I	– Ponto de intersecção da linha β com as curvas de velocidade	[texto]
m	– Massa	[kg]
MM	– Massa molar	[kg/kmol]
msn	– Mensagem numérica	[adimensional]
mst	– Mensagem de texto	[texto]
N	– Rotação	[RPM]
nc	– Velocidade corrigida	[RPM/K ^{0.5}]
nmol	– Número de mols	[kmol]
T	– Temperatura	[K]
P	– Pressão	[bar]
PCS	– Poder Calorífico Superior	[kJ/kg]
Ponto	– Ponto de Operação	[texto]
rp	– Relação de Pressão	[adimensional]
s	– Entropia	[kJ/kg.K]
W	– Potência	[kW]
x	– Abscissa polinomial adotado para o traçado de curvas	[conforme unidade da propriedade relacionada]
y	– Ordenada polinomial adotado para o traçado de curvas	[conforme unidade da propriedade relacionada]
\$	– Acompanha a variável de mensagem de texto na chamada da sub-rotina	

Letras Gregas

Δ	– Diferença ou variação de alguma das propriedades	[conforme unidade da propriedade relacionada]
β	– Referente à Linha β	
η	– Eficiência	[% ou fração adimensional]

λ – Relação entre distâncias do ponto de operação ‘off-design’ do compressor e as linhas surge e limite inferior [fração adimensional]

Subscritos

– – Separação entre subscritos distintos

1 – Entrada do Compressor

2 – Saída do Compressor

3 – Saída da Câmara de Combustão e Entrada na Turbina Geradora de Gases

4 – Saída da Turbina Geradora de Gases e Entrada na Turbina de Potência

5 – Saída da Turbina de Potência

AR – Ar

Arg – Argônio

C – Compressor

CAM – Câmara de Combustão

C2H6 – C₂H₆ (etano)

C3H8 – C₃H₈ (propano)

CH4 – CH₄ (metano)

CHOQUE – Relativo ao fluxo de choque

CO2 – CO₂ (dióxido de carbono)

COMB – Combustível

curva – Relativo à curva de velocidade

G – Gerador

GAS – Gases de Combustão

H2O – H₂O (água)

i – Relativo à curva de velocidade do mapa de desempenho (compressor ou turbina) imediatamente inferior ao ponto de operação ‘off-design’

i+1 – Relativo à curva de velocidade do mapa de desempenho (compressor ou turbina) imediatamente superior ao ponto de operação ‘off-design’

M	– Transmissão Mecânica
mass	– Relativo a mássico ou mássica
molar	– Relativo a molar
N2	– N ₂ (nitrogênio)
O2	– O ₂ (oxigênio)
off	– Operação ‘off-design’
S	– Indica processo isoentrópico
T	– Turbina (Geradora de Gases ou de Potência)
TGG	– Turbina Geradora de Gases
TP	– Turbina de Potência

Sobrescrito

·	– Indica vazão por segundo
··	– Indica valor específico de propriedade
—	– Indica valor relativo ao valor de projeto
'	– Indica uma segunda forma de cálculo para uma mesma variável
''	– Indica uma terceira forma de cálculo para uma mesma variável

Siglas

ANEEL	– Agência Nacional de Energia Elétrica
CAD	– Computer Aided Design
DE	– Departamento de Energia
EES	– Engineering Equation Solver
FEG	– Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá
FEM	– Faculdade de Engenharia Mecânica
ISO	– International Organization for Standardization
MME	– Ministério de Minas e Energia

SIN – Sistema Interligado Nacional
UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas

Capítulo 1

Introdução

1.1 Panorama da Geração Elétrica no Brasil

De acordo com a última publicação da ANEEL (ANEEL, 2008) e de dados do MME (MME, 2008), o Brasil conta com uma capacidade instalada de geração elétrica de 104.816 MW. Do total de usinas, são contabilizadas: 159 Grandes Hidrelétricas (74.633 MW ou 71,20%); 1.042 Térmicas (25.384 MW ou 24,22%) abastecidas por fontes diversas (gás natural, biomassa, óleo diesel, óleo combustível e carvão mineral); 320 Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs de potência instalada entre 1 e 30 MW, totalizando 2.400 MW ou 2,29%); 2 Nucleares (2.007 MW ou 1,91%); 17 Centrais Geradoras Eólicas (273 MW ou 0,26%); 227 Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGHs de potência instalada abaixo de 1 MW, totalizando 120 MW ou 0,11%) e 1 Solar (20 kW).

Da quantidade de usinas térmicas relacionadas, 85 são abastecidas por gás natural, equivalendo a um potencial de 11.570 MW (11,04% do total). São usinas nas quais prevalecem ciclos de geração a gás (ciclos Brayton), dotados de turbinas a gás axiais, combinados ou não com ciclos a vapor, formando ciclos combinados de potência (gás e vapor).

A ANEEL relaciona ainda 130 empreendimentos em construção e mais 469 outorgados, o que permitirá a inserção de mais 33.865 MW à capacidade instalada no país nos próximos anos. A maior parte provém de usinas hidrelétricas (16.945 MW ou 50,04%), e, em segundo lugar, estão as

térmicas (14.055 MW ou 41,50%) e, na seqüência, o conjunto de demais empreendimentos menores (2.865 MW ou 8,46%).

O crescimento na participação da geração térmica na matriz energética para geração de energia elétrica deu-se principalmente em 2001, quando o país passou por um período de racionamento de energia em função da redução histórica do nível dos reservatórios das usinas hidrelétricas, e após o término do gasoduto Brasil-Bolívia, o qual aumentou a oferta de gás natural.

Atualmente, o crescimento é justificado pelo aumento nas reservas de gás natural e incrementos no aproveitamento de biomassa como fonte energética, além da necessidade de manutenção dos níveis de confiabilidade do SIN. No futuro, há a possibilidade de utilização de gaseificação de biomassa integrada à tecnologia de ciclos combinados.

1.2 Turbinas a Gás

O presente trabalho insere-se no âmbito do Panorama da Geração Elétrica no Brasil, exposto acima, mostrando-se útil ao desenvolvimento de conhecimentos nacionais nesse campo, dado que a aplicação de turbinas a gás no Brasil mostra-se em permanente expansão.

O mercado de turbinas a gás mostrou grande crescimento durante as últimas décadas. Em todo o mundo, ciclos combinados são a principal opção para expansão do setor de potência centralizada. Por outro lado, a geração de potência distribuída tem exercido papel importante em grandes centros de consumo de energia, onde plantas de cogeração baseadas em turbinas a gás são preferencialmente escolhidas (Walter, 2000). No Brasil, a situação não poderia ser diferente, onde a maior parte das usinas térmicas é encontrada em regiões de difícil integração às linhas de transmissão de energia elétrica do SIN (sistemas isolados) e na região Sudeste.

Plantas de potência térmica baseadas em turbinas a gás têm sido as principais opções para novos investimentos em sistemas elétricos devido à sua alta eficiência e relativo baixo custo capital de implantação.

Uma das vantagens da instalação de uma central termelétrica é que seu período de construção é bastante reduzido quando comparado à construção de uma hidrelétrica, podendo reduzir num prazo relativamente curto a dependência em relação a este.

Outra vantagem da utilização da geração térmica para produção de energia elétrica é permitir complementar a geração de energia elétrica nos períodos de estiagem, quando a geração hidrelétrica torna-se mais sensível, além de suprir demandas pontuais de energia elétrica que acontecem principalmente nos horários de pico diários.

1.3 Objetivos do Trabalho

O presente estudo buscou enriquecer a literatura disponível para o tratamento da operação de ciclos a gás de geração de potência elétrica por meio de turbinas axiais.

A turbina a gás é um conjunto complexo de uma variedade de componentes que são projetados com base nas leis aerotermodinâmicas, com complicadas teorias de operação e projeto destes componentes individuais. Dada a complexidade das análises aerotermodinâmicas torna-se impossível resolver matematicamente as equações de otimização envolvidas em vários ciclos de turbina a gás.

Quando turbinas a gás foram projetadas durante o último século, a necessidade de avaliar o desempenho de máquinas nas condições iguais e diferentes às condições de projeto ('design' e 'off-design', respectivamente) tornou-se aparente.

Fabricantes e projetistas de turbinas a gás tomaram consciência de que algumas ferramentas eram necessárias para prever a 'performance' de turbinas a gás, especialmente em condições 'off-design', onde o desempenho era significativamente afetado pela carga e condições de operação. Também era esperado que estas ferramentas ajudassem a prever o desempenho de componentes individuais, tais como compressores, expansores, câmaras de combustão, etc. Neste trabalho, o

termo expensor é empregado para designar a turbina, a qual, juntamente com os componentes anteriores, compõe a turbina a gás axial.

No estágio inicial do desenvolvimento de turbinas a gás, testes experimentais de protótipos de máquinas inteiras ou componentes individuais foram os únicos métodos utilizados para determinar o desempenho das máquinas ou componentes. Entretanto, este procedimento era não somente custoso, mas também consumia muito tempo. Portanto, a modelagem matemática usando técnicas computacionais foi considerada uma solução econômica (Al-Hamdan e Ebaid, 2006) e complementar ao uso de técnicas experimentais.

O objetivo deste trabalho consistiu no desenvolvimento de rotinas e sub-rotinas computacionais para modelagem termodinâmica de turbinas a gás para geração de potência, em condições não nominais, ou 'off-design', ditas fora das condições de projeto.

Os cálculos de desempenho de turbinas a gás fora das condições de projeto necessitam de boas representações numéricas do comportamento dos componentes, em especial, pelo fato de que perdas de 1% na eficiência dos compressores geram incrementos de 0,5% no consumo específico de combustível, representando um número que não se pode negligenciar. Isso estabelece a diferença entre um projeto aceitável e inaceitável de máquina (Kurzke, 1996).

A utilização de mapas de desempenho disponíveis na literatura (Cohen, Rogers e Saravanamuttoo, 1996 e Kurzke, 2003) permitiu, a partir de correlações matemáticas dadas às curvas de desempenho, avaliar a 'performance' do conjunto que compõe o sistema de potência a gás, tendo como dados de entrada pontos quaisquer pertencentes à região passível de operação do compressor e do expensor.

As rotinas e sub-rotinas incorporam o cálculo automatizado de propriedades termodinâmicas do gás e o equacionamento necessário para aplicação da Primeira e da Segunda Lei Termodinâmica. Fez-se uso de ferramentas computacionais com licença disponível para o uso em fins de pesquisa na Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP. As principais ferramentas empregadas foram o EES (Engineering Equation Solver, 2008) e o Excel (Microsoft Excel, 2007), respectivamente para

interface matemático-termodinâmica e gráfica. Também foi utilizado o programa AutoCAD (AutoCAD, 2007) para coleta precisa de dados dos mapas de desempenho referenciados.

Existem atualmente alguns programas computacionais desenvolvidos para o cálculo de desempenho 'off-design' de Ciclos Brayton de Turbinas a Gás. No entanto, tais programas não estão disponíveis para uso livre em pesquisas científicas, já que suas licenças de uso devem ser obtidas mediante compra, a exemplo do software GateCycle de propriedade da empresa General Electric Energy.

Este foi mais um motivo para o desenvolvimento de tais rotinas e sub-rotinas, disponibilizar toda a pesquisa feita para aplicação direta em análises e continuidade de pesquisa no assunto. A importância do desenvolvimento de softwares livres, disponíveis ao público acadêmico, reside no fato de se ter acesso aos códigos fonte e, portanto, à tecnologia utilizada, motivo este também destacado por muitos pesquisadores, a exemplo de Hess (2006).

Outra dificuldade encontrada foi a falta de mapas de desempenho de compressores e turbinas disponibilizados pelos fabricantes, dada a preocupação dos mesmos em proteger sua propriedade industrial. Fez-se uso de mapas de desempenho encontrados na literatura, também pouco disponíveis.

A automatização do processo de cálculo em condições 'off-design' foi também um dos objetivos deste trabalho, juntamente com a possibilidade de utilização das rotinas e sub-rotinas desenvolvidas em projetos de sistemas de controle de turbinas a gás.

1.4 Organização do Trabalho

No capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica de estudos relacionados à operação 'off-design' de turbinas a gás.

O capítulo 3 contempla a metodologia do trabalho, para determinação de curvas de desempenho de compressores e turbinas.

É apresentada a representação das curvas de desempenho de um mapa de compressor dado pela literatura (Cohen, Rogers e Saravanamuttoo, 1996) por meio de funções polinomiais. Estas foram normalizadas pela divisão dos valores numéricos das curvas pelo respectivo valor nominal do mapa de referência. As curvas representam gráficos Fluxo Corrigido X Razão de Pressão e Fluxo Corrigido X Eficiência Isentrópica. As funções polinomiais geradas foram limitadas para representar apenas a região útil para análise. Tais funções passaram a representar o desempenho de um compressor genérico.

O mesmo procedimento foi empregado para representar as curvas de desempenho de um mapa de turbina dado na literatura (Kurzke, 2003) por meio de funções polinomiais. A normalização também foi feita. Igualmente, novas funções passaram a representar o desempenho de uma turbina genérica, também limitada para representar apenas a região útil para análise.

O capítulo 3 expõe também a metodologia de automatização do cálculo do ponto de operação 'off-design' e inserção dos mapas genéricos gerados nos cálculos termodinâmicos do ciclo a gás. O capítulo contempla ainda todo o equacionamento termodinâmico utilizado na simulação da turbina a gás.

No capítulo 4 é apresentada a modelagem computacional desenvolvida, considerando ciclo simples de turbina a gás com dois eixos, sendo: 1 eixo para compressor e turbina geradora de gases e 1 eixo para turbina de potência e gerador. São descritos os programas de geração de curvas de desempenho de compressores e turbinas, e o programa principal. São também relacionadas e descritas todas as rotinas inseridas no programa principal.

O capítulo 5 apresenta o estudo de caso, consistindo na simulação de uma turbina a gás axial genérica. Estão relacionados os dados numéricos tomados como referência para geração das curvas de desempenho de compressores e turbinas, e dados numéricos de entrada do programa principal. É apresentada uma análise dos resultados obtidos, quando comparados com resultados apresentados

por um exemplo da literatura. Também é exposta uma análise de resultados quando os mais relevantes dados de operação ‘off-design’ são variados individualmente.

Encerrando o trabalho, conclusões e propostas para a realização de futuras pesquisas sobre este assunto são apresentadas no capítulo 6.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

A literatura técnica referente ao desempenho de turbinas a gás contém um número relativamente pequeno de publicações que tratam do problema de cálculo de desempenho das turbinas fora das condições de projeto.

O avanço tecnológico tem requerido o estudo cada vez mais aprofundado dos ciclos termodinâmicos que incluem as turbinas a gás. Esses ciclos são utilizados para monitorar as turbinas a gás, determinando as áreas críticas e sensíveis que devem ser analisadas tanto em equipamentos novos como naqueles em desenvolvimento.

O estudo paramétrico dos ciclos requer o cálculo, no ponto de projeto, de um número muito grande de equipamentos, para permitir a otimização do ciclo (Bringhenti, 1999). Uma turbina a gás pode operar em ambientes cujas características variam muito, sendo solicitada diferentemente, o que requer o cálculo de grande número de ciclos na condição fora do ponto de projeto, tornando fundamental a automatização dos cálculos através de programas de computador.

O desempenho de compressores pode ser representado de vários modos, sendo que a prática comumente aceita é traçar linhas de velocidade como funções de fluxos desenvolvidos e pressões ou como funções de pressões e eficiências (Boyce, 2001). Atribui-se ainda a estas variáveis, correções através da multiplicação do fluxo e velocidade pelos fatores \sqrt{T}/P e $1/\sqrt{T}$, respectivamente,

passando a referi-los como fluxo corrigido e velocidade corrigida. Linhas de eficiência adiabática constante são também traçadas em mapas de desempenho de compressor.

Para a avaliação do desempenho de turbinas, a forma mais comum de apresentar um mapa de desempenho é traçar linhas de velocidade como funções de pressões e fluxos desenvolvidos ou como funções de pressões e eficiências, admitindo correções de variáveis através da multiplicação por fatores de correção ou normalização em relação aos valores de projeto (Walsh e Fletcher, 2000).

Kurzke (1996) expõe que programas de cálculo de desempenho geralmente requerem dados de mapa num formato específico, o que necessita algum processamento para tal, ou seja, a correção de variáveis pela multiplicação de fatores. Dados medidos não podem ser usados diretamente porque eles mostram uma dispersão e não estão uniformemente distribuídos acima da faixa de interesse. Devido a limitações no equipamento de teste, freqüentemente há falta de dados para muito baixa e muito alta velocidades. Tal autor desenvolveu um programa de projeto especializado disponível no computador, podendo-se facilmente eliminar a dispersão nos dados e também interpolar e extrapolar linhas adicionais de velocidade corrigida constante. Muitos gráficos mostram ambos os dados de medida e linhas passando através dos dados, como uma função de parâmetros de significado físico, permitindo averiguar se os resultados têm sentido ou não. Ao invés de dados de medidas reais, podem ser usados dados lidos de mapas publicados na literatura aberta. Seu programa mostrou-se ser também uma excelente ferramenta para verificar e estender mapas de componentes que são derivados de informações escassas a respeito de turbinas a gás a serem simuladas.

Um mapa de compressor no estado padrão não pode ser usado diretamente no programa de cálculo de desempenho. Não é possível ler eficiência de um mapa com dada velocidade e fluxo corrigidos porque em parte do mapa as linhas de velocidade podem ser verticais. Também não é possível ler o mapa com dada velocidade corrigida e razão de pressão porque em parte do mapa as linhas de velocidade podem ser horizontais. A solução para o problema dada por Kurzke (1996) foi introduzir coordenadas auxiliares (chamadas linhas β), as quais interceptam as linhas de velocidade. Isto permite ler o mapa independentemente da forma das linhas, com dado β e velocidade corrigida.

Kurzke (2002) aperfeiçoou seus estudos anteriores e desenvolveu um programa computacional comercial capaz de gerar diversos tipos de curvas de desempenho de compressores a partir de pontos de desempenho conhecidos (fluxo corrigido, razão de pressão e eficiência) para determinada curva de velocidade informada, utilizando a metodologia empregada em seu estudo de 1996, ou seja, utilizando a definição de linhas β . As curvas podem ser geradas a partir de determinada aproximação polinomial escolhida pelo usuário, para funções de grau 3 ao grau 9. O programa de Kurzke também é capaz de utilizar pontos lidos diretamente de imagens de curvas de desempenho. Tal processo é semelhante ao desenvolvimento proposto neste trabalho para geração dos tipos de curvas de desempenho abordados. O mesmo procedimento foi empregado no desenvolvimento do programa comercial para geração de curvas de desempenho de turbinas (Kurzke, 2003).

Al-Hamdan e Ebaid (2006) construíram um modelamento computacional para operação de turbinas a gás fora das condições de projeto, para sistemas de geração de potência. Foi apresentada uma discussão a respeito de abordagens de modelos de turbinas a gás. Ajustes de operação de componentes de turbina a gás entre o compressor e a turbina foram feitos pela superposição das características de 'performance' da turbina com as características de 'performance' do compressor, com conveniente transformação de coordenadas. Foram também introduzidas as coordenadas β , trabalhadas por Kurzke (1996). O programa de computador apresentado no citado trabalho basicamente satisfaz às condições de ajuste entre os vários componentes da turbina a gás para produzir linhas de operação ('running lines') de equilíbrio. O programa de computador determina a faixa de operação (na curva) e a linha de operação dos componentes ajustados ('matching components'), além da proximidade dos pontos de operação da linha 'surge' do compressor, e a proximidade dos pontos de operação da máxima temperatura permissível para entrada da turbina. Da saída da turbina a gás é concluído se a mesma está operando na região de adequada eficiência do compressor e da turbina. As técnicas de ajuste propostas no artigo foram usadas para desenvolver um programa de simulação de computador, que pode servir como uma valiosa ferramenta para investigar o desempenho de turbinas a gás em condições 'off-design'. Também, esta investigação pode ajudar a projetar um eficiente sistema de controle para turbinas a gás de uma aplicação particular, sendo uma parte da planta de geração de potência.

Bringhenti (1999) trata da simulação numérica do funcionamento e desempenho de uma turbina a gás para propulsão aeronáutica, utilizando-se da decomposição do equipamento em blocos cujas características de funcionamento são modeladas a partir de suas características operacionais. Componentes importantes como compressor e turbina tiveram seus desempenhos obtidos com o auxílio de curvas levantadas experimentalmente, sendo o programa desenvolvido capaz de simular operação fora das condições de projeto para uma grande variedade de tipos de turbinas a gás. A comparação feita com dados disponíveis na literatura mostrou-se satisfatória, sendo os resultados bastante próximos dos esperados.

Dadas as condições nominais de operação de uma turbina a gás, o problema permanece em encontrar a variação de seu desempenho pela faixa de operação de velocidade e saída de potência, além de variações na temperatura de entrada do compressor e do expensor. As características de desempenho ‘off-design’ de componentes individuais podem ser estimadas com base em experiências prévias ou obtidas a partir de testes reais (Cohen, Rogers e Saravanamuttoo, 1996). Quando os componentes estão acoplados na máquina, a faixa de condições de operação possíveis para cada componente é consideravelmente reduzida. Os pontos de operação em equilíbrio para uma série de velocidades podem ser plotados nas características do compressor, e unidos para formar uma linha de operação em equilíbrio (ou zona, dependendo do tipo de turbina a gás e carga), formando o diagrama de operação em equilíbrio. O diagrama de operação em equilíbrio também mostra a proximidade da zona ou linha de operação com a linha ‘surge’ do compressor.

Greitzer (1980) expõe em seu artigo uma revisão do fenômeno ‘stall’, observado em compressores, associando-o com o início de vários tipos de instabilidades dinâmicas do fluido. A faixa de operação de compressores é limitada devido à ocorrência deste fenômeno. Nos mapas de desempenho, tal limitação é expressa pelas chamadas linhas ‘surge’ ou ‘stall lines’, acima das quais a operação da máquina é instável e prejudicial. O fenômeno é dividido em ‘surge’ e ‘rotating stall’. O primeiro causa grandes oscilações na taxa de fluxo de massa no compressor, cujo decréscimo pode levar a sobretensões na turbina. O segundo é causado pela auto-indução de distorções de fluxo circunferencial, o que gera grandes tensões vibratórias nas pás do compressor, sendo freqüentemente inaceitável por razões estruturais, resultando em grande queda no desempenho e conseqüente inviabilidade de um ciclo auto-sustentável. Wilson e Korakianitis (1998) também

relatam o efeito da extinção da combustão ou ‘flame-out’ causado pela operação na região da linha ‘surge’, o que representa riscos ainda maiores às turbinas de aplicações aeronáuticas.

Se o ponto de operação ‘off-design’ intercepta a linha ‘surge’, a turbina a gás não será capaz de ser levada à velocidade de operação sem que alguma ação remediadora seja tomada (Cohen, Rogers e Saravanamuttoo, 1996). O diagrama de operação mostra ainda se a máquina está operando na região de eficiência adequada do compressor. Idealmente, a linha ou zona de operação deve encontrar-se próxima do local dos pontos de máxima eficiência do compressor mostrados nos mapas de desempenho do componente.

Segundo Brun e Kurz (2009), uma vez que o fenômeno ‘surge’ ocorre, a reversão do fluxo reduz a pressão de descarga ou aumenta a pressão na sucção. O fluxo volta a direcionar-se no sentido correto com aumento na pressão de descarga, retornando ao ponto ‘surge’. Este ciclo continua à baixa frequência até que alguma mudança seja feita no processo ou nas condições de operação do compressor. ‘Surge’ é uma instabilidade global no fluxo no compressor, resultando em completo colapso ou fluxo reverso. O ‘surge’ completamente desenvolvido é uma fonte de forças dinâmicas axiais e radiais nos elementos do compressor, devendo ser completamente evitado.

Na turbina, para cada linha de velocidade existe um fluxo máximo de gases que não pode ser excedido com incrementos de razões de expansão ou variações de temperatura. Tal fluxo é definido como fluxo de ‘choke’ ou fluxo de choque (Walsh e Fletcher, 2000).

O fenômeno ‘choke’, comumente relatado na operação de turbinas, também ocorre na operação de compressores (Brun e Kurz, 2009). Nos compressores ocorre na região do mapa de desempenho de fluxo corrigido por razão de pressão onde as linhas de velocidade são verticais, principalmente a altas velocidades. Com o choque, parte do fluxo induzido é bloqueado devido à velocidade sônica ser atingida. Para muitos modelos de compressores, operação em choque não causa problemas. Entretanto, operação contínua nesta região pode resultar em vibração das pás e fadiga de seu material. Além disso, a região de choque é um local de baixa eficiência do compressor.

Segundo Cohen, Rogers e Saravanamuttoo (1996), ao determinar o desempenho ‘off-design’, é importante prever não somente o efeito de consumo específico de combustível na operação com carga parcial, mas também o efeito das condições ambientais requeridas na saída. Os efeitos de altas e baixas temperaturas e pressões ambientais devem ser considerados. Turbinas a gás fixas estacionárias, para geração de potência elétrica, podem operar entre temperaturas ambientes de -60°C no Ártico a 50°C nos trópicos, e a altitudes em relação ao nível do mar até aproximadamente 4000 metros. A variação da potência máxima com as condições ambientais é claramente de primeira importância para o cliente, e o fabricante deve estar preparado para garantir o desempenho disponível em qualquer condição específica. Se considerado o uso de turbinas a gás para geração de eletricidade em cargas de pico, estas deverão ocorrer nos dias mais frios do inverno na Europa, mas podem ocorrer no verão nos Estados Unidos por causa da pesada demanda de sistemas de ar condicionado ou sistemas de refrigeração. Já no Brasil, tal fato acontece no início da noite.

Todos os cálculos ‘off-design’ devem satisfazer as condições essenciais de compatibilidade de fluxo de massa, trabalho e velocidade rotacional entre os vários componentes (Cohen, Rogers e Saravanamuttoo, 1996).

O uso de sistemas de cogeração baseados em turbinas a gás têm também crescido muito rapidamente. Estudos de plantas de potência e unidades de cogeração devem considerar uma larga faixa de condições operacionais. Para sistemas baseados em turbinas a gás, é essencial a avaliação do efeito das condições atmosféricas e operação em carga parcial no desempenho da máquina. Para fazer isso, um procedimento de ‘off-design’ é requerido. Um procedimento de simulação de turbina a gás ‘off-design’ é descrito por Walter (2000), utilizando uma máquina Ruston RM, fabricada pela Alston, para validar o procedimento de simulação, o qual, em senso geral, apresenta desvios menores que 2,5% em comparação aos dados do fabricante.

Primeiramente foi necessário avaliar os parâmetros da máquina dados pelo fabricante. Para isso, foi requerido um arranjo apropriado de equações modelando a conversão de energia dentro da máquina e o conhecimento de alguns parâmetros operacionais e de desempenho desta, para verificar a adequação das informações do fabricante. Utiliza-se as condições ISO (queimando um

combustível de referência, como o gás natural, a 15°C e 1 atm, e umidade relativa de 60%) como ponto de partida para as predições de desempenho 'off-design'. Foi requerido um procedimento especial para simulação. Em seu artigo, é apresentada a simulação básica de turbina a gás operando em condições fora de projeto, norteadas pelo impacto sobre os resultados de alguns parâmetros avaliados, tais como nova razão de pressão no compressor, fluxo corrigido de ar no compressor e eficiência corrigida do compressor. A operação em diferentes temperaturas e cargas parciais foram as situações analisadas.

Muitas turbinas a gás para geração de energia elétrica apresentam o expensor dividido em turbina geradora de gases e turbina de potência, sendo a primeira acoplada ao eixo do compressor e a segunda ao eixo da carga. Korakianitis e Svensson (1999) discutem sobre diferentes arranjos de turbinas a gás e o conseqüente impacto em seus mapas de desempenho. Como regra geral, arranjos com somente um eixo podem operar apenas a velocidades acima de 50% da velocidade de projeto, dada a igualdade de velocidades do compressor e da carga acoplada. Turbinas de vários eixos, com turbina de potência em eixo distinto, podem operar em velocidades muito baixas em potência razoável, além de permitirem uma operação mais eficiente e em pontos onde o outro arranjo não poderia operar. Esta mesma conclusão aparece destacada na referência Kim, Kim, Sonh e Ro (2003).

Capítulo 3

Metodologia

Este capítulo descreve a metodologia utilizada neste trabalho para determinação de curvas de desempenho de compressores e turbinas e automatização de cálculos de desempenho de pontos de operação ‘off-design’, além da metodologia para o equacionamento termodinâmico do ciclo a gás.

3.1 Determinação das Curvas de Desempenho de Compressores e Turbinas

Tendo como base mapas disponíveis na literatura (Cohen, Rogers e Saravanamuttoo, 1996; Kurzke, 2003), a primeira etapa do desenvolvimento foi, a partir de pontos lidos dos mesmos, encontrar funções matemáticas que pudessem descrever o comportamento das curvas em toda região útil dos mapas de desempenho de compressores e turbinas.

Os mapas utilizados foram digitalizados, sendo as imagens trabalhadas no programa AutoCAD (AutoCAD, 2007), de modo a tornar possível a leitura precisa dos pontos escolhidos, utilizando-se de transformação conveniente de escalas.

3.2 Curvas de Desempenho de Compressores obtidas de Referências

Nas figuras 3.1 e 3.2 podem-se visualizar os mapas de desempenho do compressor obtidos em Cohen, Rogers e Saravanamuttoo (1996) utilizados neste trabalho para geração de mapas genéricos de desempenho de compressores. As figuras 3.1 e 3.2 representam fac-símiles da representação utilizada na referência indicada.

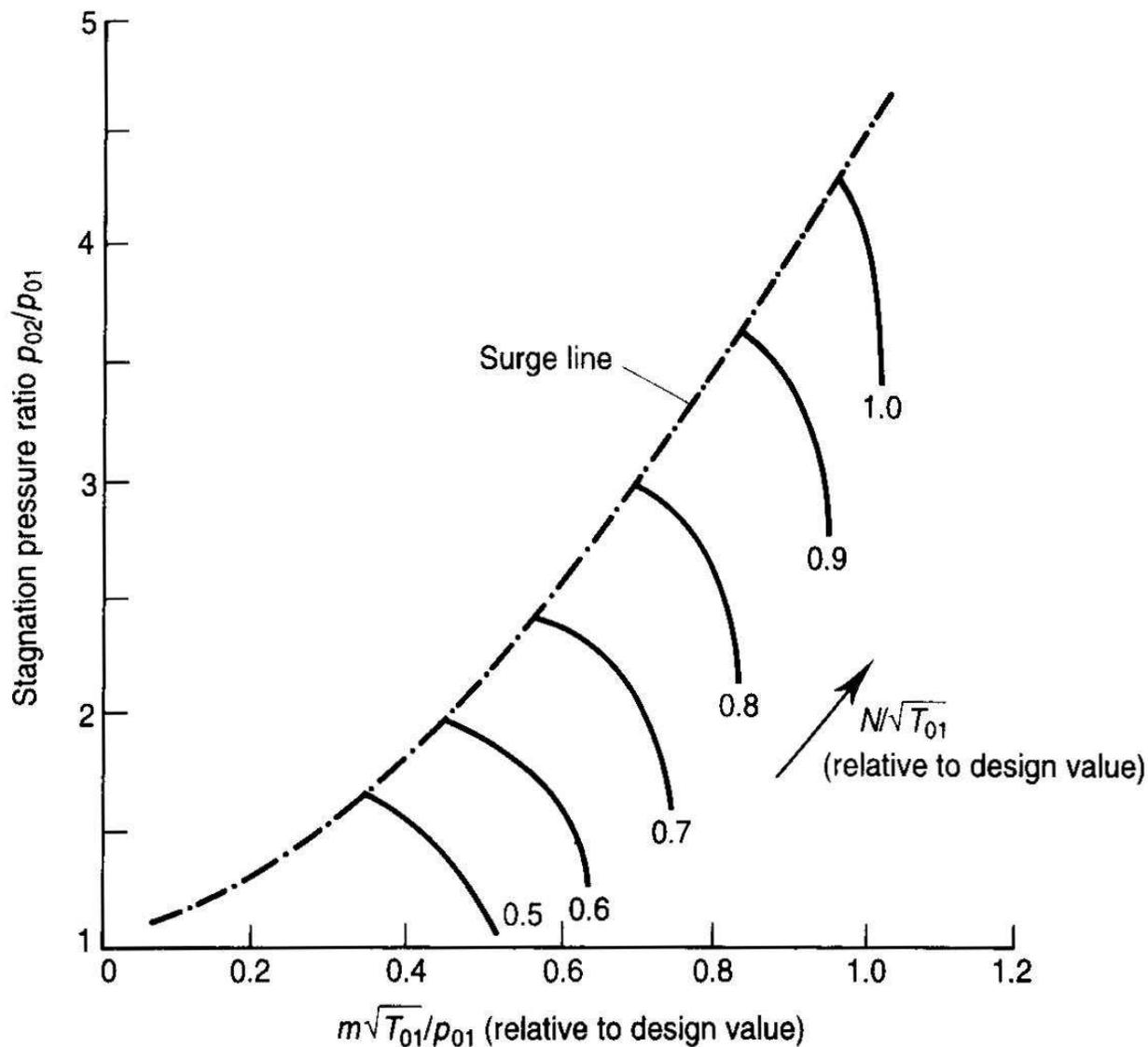


Figura 3.1 – Mapa de Desempenho de Compressor dado por Cohen, Rogers e Saravanamuttoo, 1996 (Fluxo Normalizado Relativo X Razão de Pressão de Estagnação)

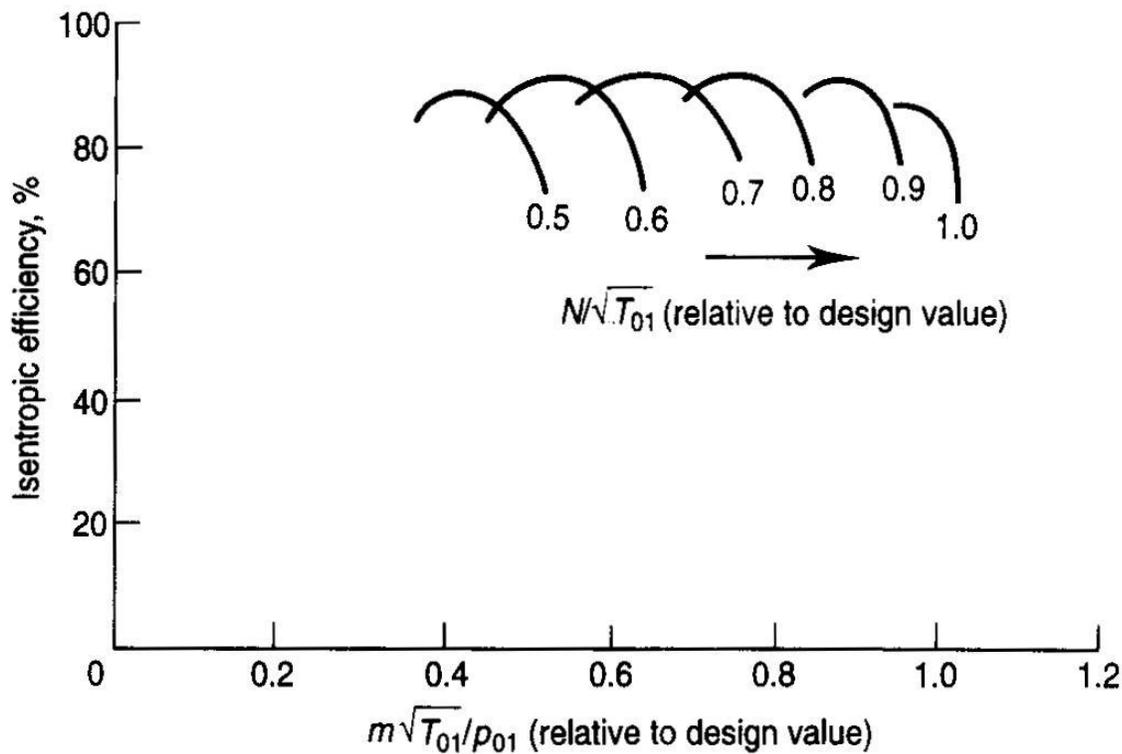


Figura 3.2 – Mapa de Desempenho de Compressor dado por Cohen, Rogers e Saravanamuttoo, 1996 (Fluxo Normalizado Relativo X Eficiência Isentrópica)

A figura 3.1 descreve linhas de desempenho nas quais:

- A abscissa representa a vazão normalizada, na entrada do compressor, relativa à vazão nominal normalizada de projeto, ou fluxo corrigido relativo ao fluxo de projeto;
- A ordenada representa a razão de pressão de estagnação ou razão de compressão;
- As diferentes linhas representadas são referentes a diferentes velocidades de rotações normalizadas relativas à velocidade de rotação nominal normalizada de projeto, ou velocidades de rotações corrigidas relativas à de projeto. Neste trabalho são simplesmente denominadas velocidades corrigidas relativas à de projeto.

Para o compressor, o fluxo corrigido de projeto é definido como:

$$f_{c_c} = \frac{\dot{m}_c \cdot \sqrt{T}}{P} \quad (3.1)$$

Quando relativo ao fluxo corrigido de projeto, o fluxo corrigido relativo (para um ponto de operação qualquer ou 'off-design') é expresso por:

$$\overline{f_{c_{c_off}}} = \frac{\frac{\dot{m}_{c_off} \cdot \sqrt{T_{off}}}{P_{off}}}{\frac{\dot{m}_c \cdot \sqrt{T}}{P}} \quad (3.2)$$

Onde as propriedades pressão e temperatura são sempre as da entrada do compressor.

Para o compressor, a velocidade corrigida de projeto é dada como:

$$n_{c_c} = \frac{N_c}{\sqrt{T}} \quad (3.3)$$

Quando relativa à velocidade de projeto, a velocidade corrigida relativa (para um ponto de operação qualquer ou 'off-design') é expressa por:

$$\overline{n_{c_{c_off}}} = \frac{\frac{N_{c_off}}{\sqrt{T_{off}}}}{\frac{N_c}{\sqrt{T}}} \quad (3.4)$$

Para o mapa de desempenho gerado a partir da figura 3.1, a razão de compressão (para um ponto de operação qualquer, 'off-design', ou rp_{c_off}) foi dada como relativa à razão de compressão nominal (rp_c), obtendo-se assim um mapa genérico de desempenho de compressores contendo apenas informações relativas ao comportamento dentro das condições de operação nominal. Assim, segue o equacionamento:

$$\overline{rp_{C_off}} = \frac{rp_{C_off}}{rp_C} \quad (3.5)$$

A figura 3.2 descreve linhas de desempenho nas quais:

- A abscissa representa a vazão normalizada, na entrada do compressor, relativa à vazão nominal normalizada de projeto, ou fluxo corrigido relativo ao fluxo de projeto;
- A ordenada representa a eficiência isentrópica em percentagem;
- As diferentes linhas representadas são referentes a diferentes velocidades de rotações normalizadas relativas à velocidade de rotação nominal normalizada de projeto. Voltando a enfatizar, neste trabalho são simplesmente denominadas velocidades corrigidas relativas à de projeto.

Da mesma forma como descrito anteriormente, para o mapa de desempenho gerado a partir da figura 3.2, a eficiência isentrópica (para um ponto de operação qualquer, ‘off-design’, ou η_{C_off}) foi dada como relativa à eficiência isentrópica nominal η_C :

$$\overline{\eta_{C_off}} = \frac{\eta_{C_off}}{\eta_C} \quad (3.6)$$

Na figura 3.3 é representada a região útil (região hachurada) do mapa da figura 3.1, considerada pelo desenvolvimento matemático.

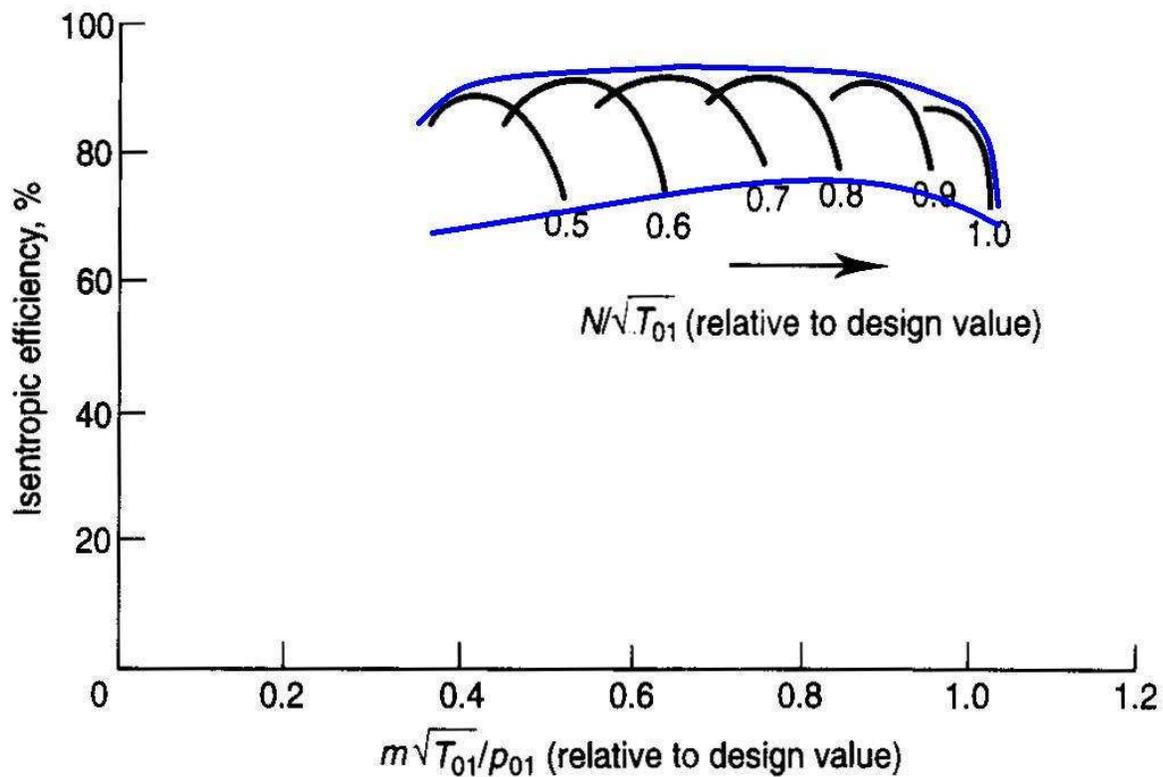


Figura 3.4 – Região Útil do Mapa de Desempenho de Referência dado pela Figura 3.2

3.3 Curvas de Desempenho de Turbinas obtidas de Referências

Nas figuras 3.5 e 3.6 podem-se visualizar os mapas da turbina obtidos da referência Kurzke (2003), utilizados neste trabalho para geração de mapas genéricos de desempenho de turbinas. As figuras 3.5 e 3.6 representam fac-símiles da representação gerada a partir da referência indicada.

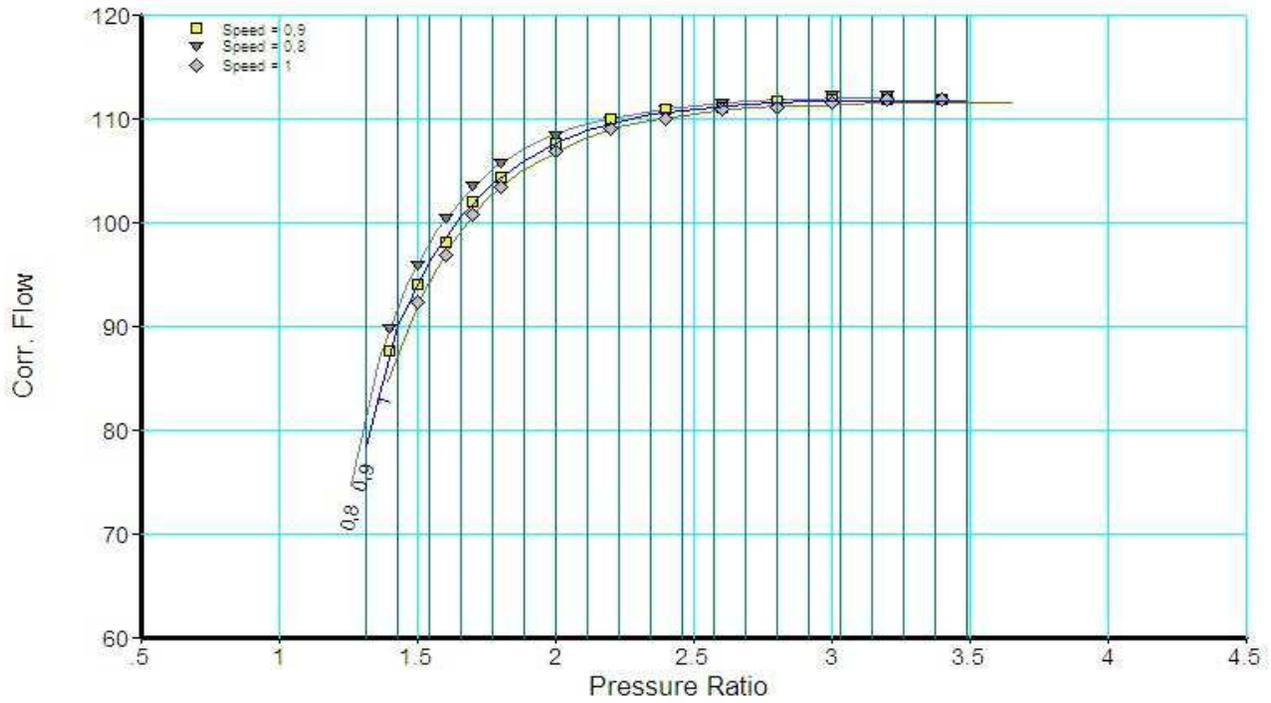


Figura 3.5 – Mapa de Desempenho de Turbina dado por Kurzke, 2003 (Razão de Pressão X Fluxo Corrigido Relativo Percentual)

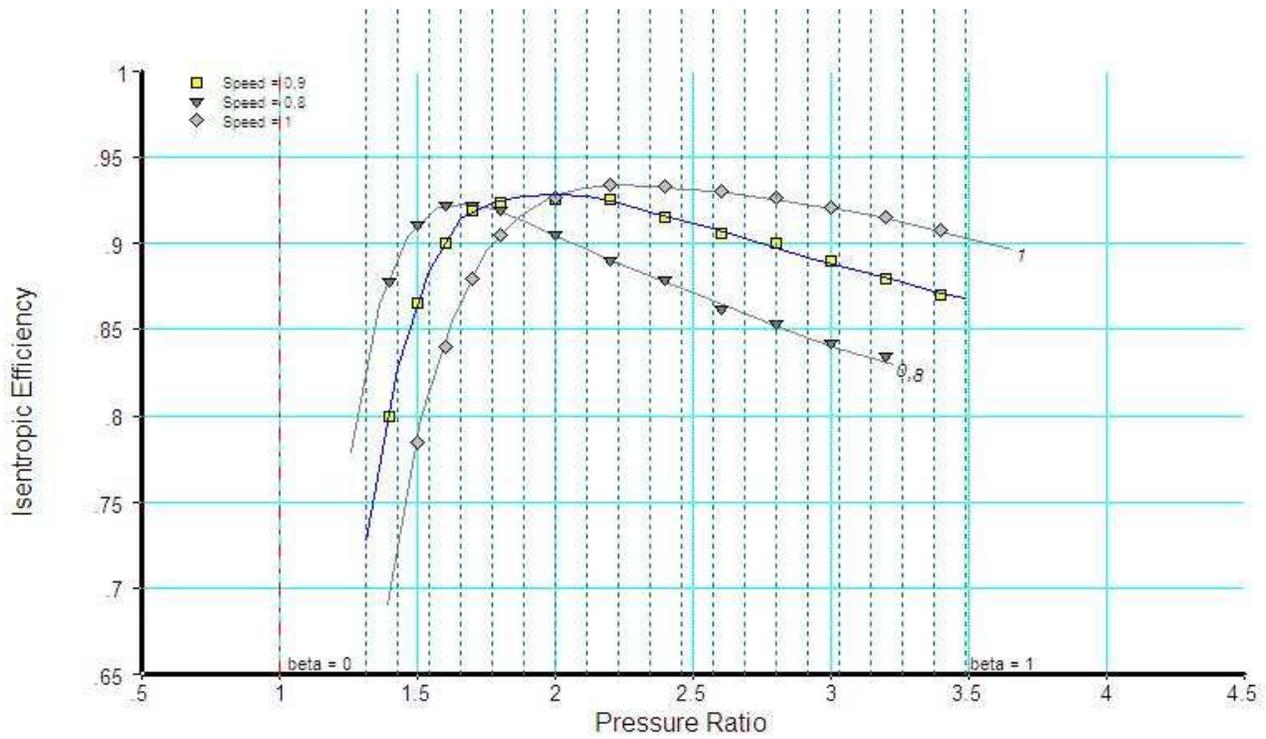


Figura 3.6 – Mapa de Desempenho de Turbina dado por Kurzke, 2003 (Razão de Pressão X Eficiência Isentrópica)

A figura 3.5 descreve linhas de desempenho nas quais:

- A abscissa representa a razão de pressão para expansão dos gases pela turbina;
- A ordenada representa o fluxo corrigido percentual de gases, na entrada da turbina, relativo ao fluxo corrigido nominal de projeto;
- As diferentes linhas representadas são referentes a diferentes velocidades de rotações corrigidas normalizadas relativas à velocidade de rotação corrigida nominal de projeto. Neste trabalho são simplesmente denominadas velocidades corrigidas relativas à de projeto.

Para a turbina, o fluxo corrigido de projeto é definido como:

$$fc_T = \frac{\dot{m}_T \cdot \sqrt{T}}{P} \quad (3.7)$$

Quando relativo ao fluxo corrigido de projeto, o fluxo corrigido relativo (para um ponto de operação qualquer ou 'off-design') é expresso por:

$$\frac{fc_{T_off}}{fc_T} = \frac{\frac{\dot{m}_{T_off} \cdot \sqrt{T_{off}}}{P_{off}}}{\frac{\dot{m}_T \cdot \sqrt{T}}{P}} \quad (3.8)$$

Onde as propriedades pressão e temperatura são sempre as da entrada da turbina.

Para a turbina, a velocidade corrigida de projeto é dada como:

$$nc_T = \frac{N_T}{\sqrt{T}} \quad (3.9)$$

Quando relativa à velocidade de projeto, a velocidade corrigida relativa (para um ponto de operação qualquer ou 'off-design') é expressa por:

$$\overline{nC_{T_off}} = \frac{\frac{N_{T_off}}{\sqrt{T_{off}}}}{\frac{N_T}{\sqrt{T}}} \quad (3.10)$$

Para o mapa de desempenho obtido da figura 3.5, a razão de pressão (para um ponto de operação qualquer, ‘off-design’, ou rp_{T_off}) foi dada como relativa à razão de pressão nominal (rp_T), assim como o fluxo corrigido anteriormente equacionado, obtendo-se assim um mapa genérico de desempenho de turbinas contendo apenas informações relativas ao comportamento dentro das condições de operação nominal. O equacionamento para a relação de pressão relativa é:

$$\overline{rp_{T_off}} = \frac{rp_{T_off}}{rp_T} \quad (3.11)$$

A figura 3.6 descreve linhas de desempenho nas quais:

- A abscissa representa a razão de pressão para expansão do fluxo de gases pela turbina;
- A ordenada representa a eficiência isentrópica em fração;
- As diferentes linhas representadas são referentes a diferentes velocidades de rotações normalizadas relativas à velocidade de rotação nominal normalizada de projeto. Voltando a enfatizar, neste trabalho são simplesmente denominadas velocidades corrigidas relativas à de projeto.

Para o mapa de desempenho obtido da figura 3.6, a razão de pressão e eficiência foram dadas como relativas à razão de pressão nominal e eficiência nominal, respectivamente, obtendo-se assim um mapa genérico de desempenho de turbinas contendo apenas informações relativas ao comportamento dentro das condições de operação nominal. O equacionamento para eficiência relativa (para um ponto de operação qualquer, ‘off-design’) é:

$$\overline{\eta_{T_off}} = \frac{\eta_{T_off}}{\eta_T} \quad (3.12)$$

Na figura 3.7 é representada (entre as linhas inseridas que não aparecem na figura 3.5) a região útil do mapa da figura 3.5, considerada pelo desenvolvimento matemático.

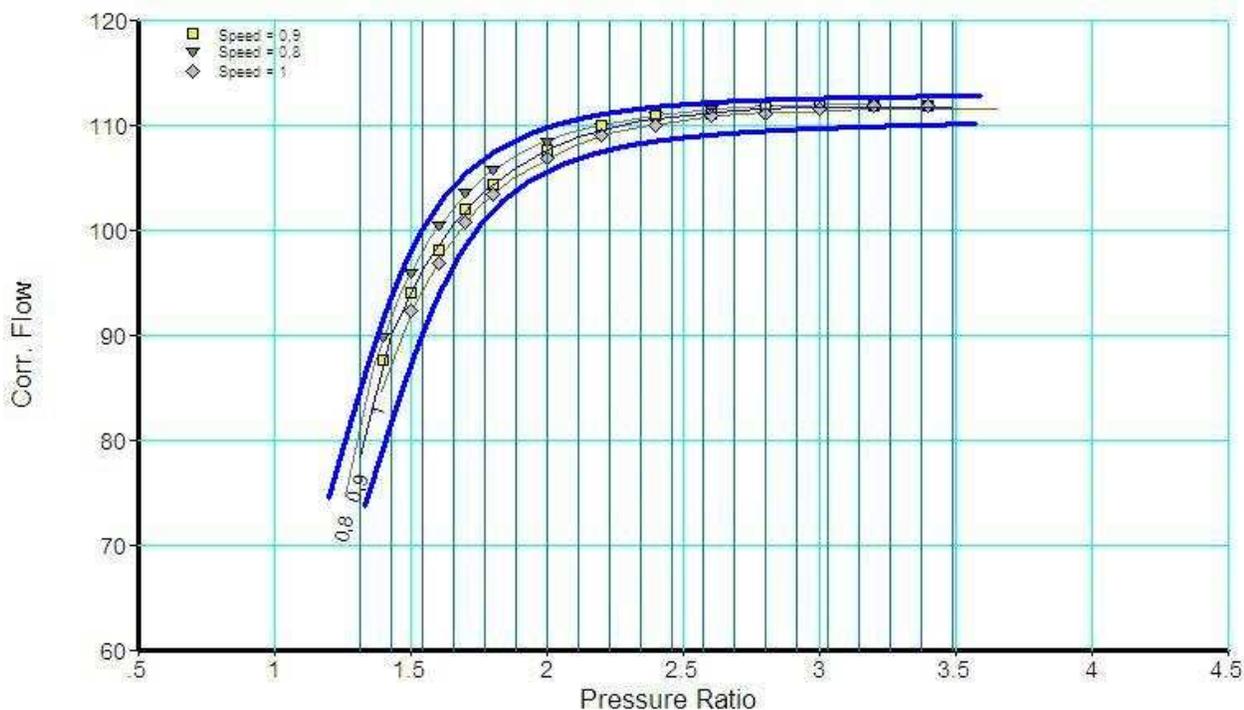


Figura 3.7 – Região Útil do Mapa de Desempenho da Referência dado pela Figura 3.5

Nota-se que a região útil do mapa corresponde a pontos localizados ao redor das linhas de velocidade. É importante ressaltar que o fluxo máximo é limitado ao valor do fluxo de choque. Já o fluxo mínimo é limitado aos valores mínimos dos pontos utilizados para o traçado das curvas.

Para o mapa da figura 3.6, a região útil foi delimitada considerando pontos localizados ao redor das linhas de velocidade (entre as linhas inseridas que não aparecem na figura 3.6), conforme figura 3.8.

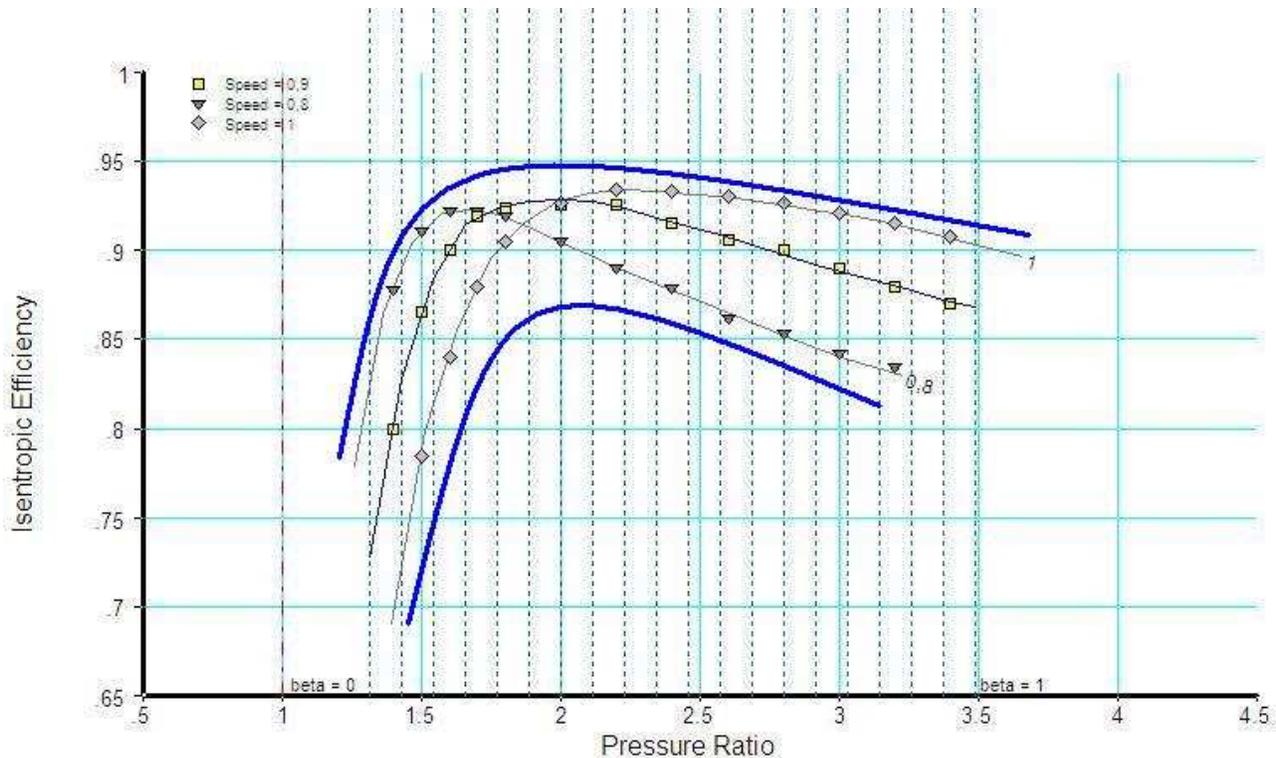


Figura 3.8 – Região Útil do Mapa de Desempenho da Referência dado pela Figura 3.6

3.4 Traçado das Curvas do Compressor

As curvas das linhas de velocidade do mapa de desempenho de compressor dadas na figura 3.1 foram obtidas da seguinte forma:

- Foram selecionados 3 pontos espaçados de cada curva de velocidade, sendo o primeiro correspondente à intersecção da curva de velocidade com a linha ‘surge’;
- A curva foi aproximada para uma função polinomial de grau 3;
- A função polinomial de grau 3 é dada genericamente pela equação (3.13):

$$y = a \cdot x^3 + b \cdot x^2 + c \cdot x + d \quad (3.13)$$

Onde,

x e y são as coordenadas do ponto selecionado

a, b, c e d são os coeficientes da função

- Na equação (3.13) existem 4 coeficientes a determinar, portanto, faz-se necessário existirem 4 equações;
- 3 das equações são obtidas substituindo-se os 3 pontos selecionados na função polinomial da equação (3.13);
- Uma condição considerada foi ter derivada segunda igual a zero no primeiro ponto da curva, de modo a ter uma inflexão (Guidorizzi, 1987) da curva neste ponto. Logo, a quarta equação foi obtida substituindo o primeiro ponto na equação que descreve a derivada segunda da equação polinomial (3.13) igualada a zero, genericamente dada pela equação (3.14):

$$0 = 6 \cdot a \cdot x + 2 \cdot b \quad (3.14)$$

- De posse das 4 equações e com a utilização do programa computacional EES (Engineering Equation Solver, 2008) para resolução dos sistema de equações, encontram-se os coeficientes procurados, estabelecendo matematicamente as curvas procuradas.

Já as curvas para as linhas ‘surge’ e limite inferior foram obtidas empregando-se 4 pontos escolhidos, substituindo-os na equação polinomial (3.13) para serem obtidas as 4 equações necessárias. Destaca-se que a escolha destes pontos deve obedecer a um espaçamento entre eles aproximadamente igual.

As curvas das linhas de velocidade do mapa de desempenho de compressor dadas na figura 3.2 foram obtidas da seguinte forma:

- Foram selecionados 4 pontos espaçados de cada curva de velocidade, sendo um deles correspondente ao ponto de máximo da curva de velocidade;
- A curva foi aproximada para uma função polinomial de grau 4;
- A função polinomial de grau 4 é dada genericamente pela equação (3.15):

$$y = a \cdot x^4 + b \cdot x^3 + c \cdot x^2 + d \cdot x + e \quad (3.15)$$

Onde,

x e y são as coordenadas do ponto selecionado

a, b, c, d, e são os coeficientes da função

- Na equação (3.15) existem 5 coeficientes a determinar, portanto, faz-se necessário existirem 5 equações;
- 4 das equações são obtidas substituindo-se na função polinomial (3.15), os 4 pontos selecionados;
- Uma condição considerada foi ter-se derivada primeira igual a zero no ponto de máximo da curva (Guidorizzi, 1987), já que este é o comportamento da curva. Portanto, a quinta equação foi obtida substituindo o ponto de máximo na equação que descreve a derivada primeira da equação polinomial anterior igualada a zero, genericamente dada pela equação (3.16):

$$0 = 4 \cdot a \cdot x^3 + 3 \cdot b \cdot x^2 + 2 \cdot c \cdot x + d \quad (3.16)$$

- De posse das 5 equações e com a utilização do programa computacional EES (Engineering Equation Solver, 2008) para resolução do sistema de equações, encontram-se os coeficientes procurados, estabelecendo matematicamente as curvas procuradas.

Os graus utilizados nas funções polinomiais das equações (3.13) e (3.15) foram escolhidos em virtude dos melhores resultados obtidos para curvas mais próximas das curvas reais de desempenho do compressor tomado como referência. Foram testadas a construção de curvas de graus 2 a 6, escolhendo-se os graus dados anteriormente.

É importante ressaltar que as funções geradas representam funções genéricas de compressores, ou seja, apresentam coordenadas relativas às coordenadas nominais da curva tomada como referência.

3.5 Traçado das Curvas da Turbina

As curvas das linhas de velocidade do mapa de desempenho de turbina dadas na figura 3.5 foram obtidas da seguinte forma:

- Foram selecionados 3 pontos espaçados de cada curva de velocidade, sendo o primeiro correspondente ao ponto onde o fluxo de gases na turbina atinge a condição de choque, ou seja, quando aumentos na razão de compressão da turbina não implicam em aumento de seu fluxo;
- A curva representa uma aproximação à função erro de Gauss, ou função erf, bastante utilizada em transferência de calor em sólidos semi-infinitos (Incropera and DeWitt, 1998). Foi utilizado, no entanto, a expressão polinomial, obtida de Wankat (1994), a qual descreve a função erf, dada pela equação (3.17):

$$\text{Erf}(x) = 1 - [1 - (1 + 0,2784 \cdot |x| + 0,2314 \cdot |x|^2 + 0,0781 \cdot |x|^4)]^{(-4)} \quad (3.17)$$

- Para adequar expressão polinomial (3.17) às necessidades para geração da curva, tal expressão foi modificada, passando a ser representada pela equação (3.18):

$$y = a - [b - (1 + 0,2784 \cdot |x + c| + 0,2314 \cdot |x + c|^2 + 0,0781 \cdot |x + c|^4)]^{(-4)} \quad (3.18)$$

Onde,

a representa o valor do fluxo na condição de choque definido pelo primeiro ponto escolhido

b representa um dos coeficientes da função

c representa o coeficiente que permite o deslocamento da função em relação ao seu eixo vertical

- Na equação (3.18) existem 2 coeficientes a determinar, portanto, faz-se necessário existirem 2 equações, obtidas substituindo na função polinomial (3.18), o segundo e o terceiro pontos selecionados;

- De posse das 2 equações e com a utilização do programa computacional EES (Engineering Equation Solver, 2008) para resolução do sistema de equações, encontram-se os coeficientes procurados, estabelecendo matematicamente as curvas procuradas.

As curvas das linhas de velocidade do mapa de desempenho da turbina dadas na figura 3.6 foram obtidas da seguinte forma:

- Foram selecionados 7 pontos espaçados de cada curva de velocidade, de forma a representarem pontos de 3 funções distintas de grau 2;
- A curva foi aproximada, portanto, para três funções polinomiais distintas de grau 2: primeira função passando pelos pontos 1, 2 e 3; segunda função passando pelos pontos 3, 4 e 5; terceira função passando pelos pontos 5, 6 e 7;
- As funções polinomiais de grau 2 são dadas genericamente pela equação (3.19):

$$y = a \cdot x^2 + b \cdot x + c \quad (3.19)$$

Onde,

x e y são as coordenadas do ponto selecionado

a, b e c são os coeficientes da função

- Como existem 9 coeficientes a determinar – três coeficientes para cada uma das funções distintas dadas pela equação (3.19) – faz-se necessário ter-se 9 equações;
- Tais equações são obtidas pela substituição dos pontos escolhidos em cada função distinta;
- De posse das 9 equações e com a utilização do programa computacional EES (Engineering Equation Solver, 2008) para resolução do sistema de equações, são encontrados os coeficientes procurados, estabelecendo matematicamente as curvas procuradas.

Foram testadas a construção de curvas únicas de graus 2 a 6, curvas que representassem as funções Erf e exponencial, além de combinação de curvas distintas, optando-se pela escolha dos formatos de funções dados pelas equações (3.18) e (3.19), pois apresentaram melhores resultados por representarem curvas mais próximas das curvas reais de desempenho da turbina tomada como referência.

É importante ressaltar que as funções geradas representam funções genéricas de turbinas, ou seja, apresentam coordenadas relativas às coordenadas nominais da curva tomada como referência.

3.6 Automatização do Cálculo de Desempenho do Ponto de Operação

A seguir é apresentado o procedimento de cálculo de desempenho de compressores e turbinas para um ponto de operação qualquer informado.

3.6.1 Cálculo do Desempenho do Ponto de Operação de um Compressor

Um ponto qualquer de operação ‘off-design’ é escolhido dentro da região útil do mapa de desempenho do compressor, Fluxo Corrigido X Razão de Pressão, conforme ponto indicado na figura 3.9 (Ponto_{C_off}), correspondente à coordenada (fc_{C_off} , rp_{C_off}), também indicada nesta figura.

O cálculo da velocidade correspondente e a geração de sua curva são feitos da seguinte forma, tomando a figura 3.9 como referência:

- Uma linha entre as linhas ‘surge’ e limite inferior, denominada linha β , é gerada;
- A linha β , da mesma forma que as linhas ‘surge’ e limite inferior, é uma curva também aproximada para uma função polinomial de grau 3;
- Os coeficientes da linha β são uma combinação dos coeficientes das linhas ‘surge’ e limite inferior. São obtidos por um processo de iteração numérica no qual linhas β são geradas até que o fluxo corrigido do ponto de operação (fc_{C_off}), quando substituído na função da linha β , resulte em valor de relação de pressão próximo (dentro de um valor de tolerância atribuído) à relação de pressão do ponto de operação (rp_{C_off}). Desta forma é garantido que a linha β passe pelo ponto de operação ‘off-design’;
- São encontrados os pontos de intersecção da linha β com as curvas de velocidade anterior e posterior ao ponto de operação (pontos I_i e I_{i+1} , respectivamente), por meio da igualdade das funções envolvidas;

- São calculadas as distâncias geométricas entre os pontos Ponto_{C_off} e I_i , e Ponto_{C_off} e I_{i+1} , denominadas dist_i e dist_{i+1} respectivamente;
- O fator de multiplicação para as curvas de desempenho de compressores, fator_C , é obtido pela fórmula:

$$\text{fator}_C = \frac{\text{dist}_i}{\text{dist}_i + \text{dist}_{i+1}} \quad (3.20)$$

- A velocidade corrigida do compressor para operação ‘off-design’, nc_{C_off} , é obtida por:

$$\text{nc}_{C_off} = \text{fator}_C \cdot \text{nc}_{C_{i+1}} + (1 - \text{fator}_C) \cdot \text{nc}_{C_i} \quad (3.21)$$

Onde,

$\text{nc}_{C_{i+1}}$ é a velocidade corrigida no compressor correspondente à curva de velocidade do mapa de desempenho, posterior ao ponto de operação

nc_{C_i} é a velocidade corrigida no compressor correspondente à curva de velocidade do mapa de desempenho, anterior ao ponto de operação

- Os coeficientes da curva de velocidade corrigida do compressor para operação ‘off-design’ são obtidos pela relação da equação 3.21, sendo nc_{C_off} substituído por cada um dos coeficientes da curva ‘off-design’, nc_{C_i} e $\text{nc}_{C_{i+1}}$, pelos coeficientes das curvas de velocidade corrigida posterior e anterior ao ponto dado, de acordo com o equacionamento abaixo:

$$\text{coeficiente}_{\text{curva}_{C_off}} = \text{fator}_C \cdot \text{coeficiente}_{\text{curva}_{C_{i+1}}} + (1 - \text{fator}_C) \cdot \text{coeficiente}_{\text{curva}_{C_i}} \quad (3.22)$$

Onde,

$\text{coeficiente}_{\text{curva}}$ representa cada um dos coeficientes das curvas envolvidas

- Na figura 3.9, a curva de velocidade corrigida é indicada como curva de velocidade gerada.

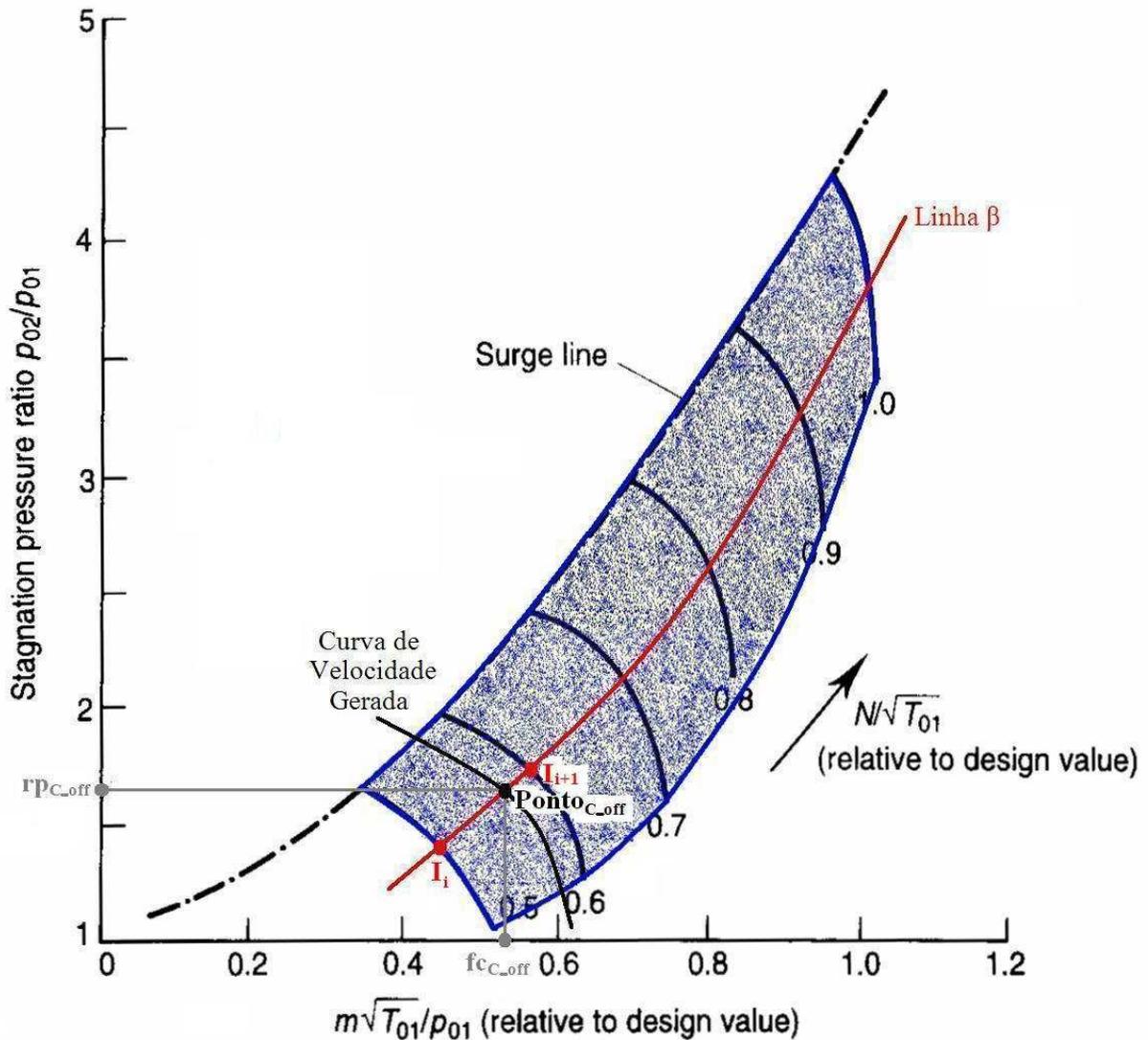


Figura 3.9 – Cálculo da Velocidade no Ponto de Operação ‘Off-Design’ de um Compressor

Após o cálculo da curva de velocidade e seu traçado no mapa Fluxo Corrigido X Relação de Pressão, o traçado desta curva no mapa Fluxo Corrigido X Eficiência é feito da mesma forma como descrito anteriormente, ou seja, pela relação da equação 3.22.

A figura 3.10 mostra a curva de velocidade traçada neste caso. A leitura da eficiência do compressor para operação ‘off-design’, η_{C_off} , é feita a partir da intersecção do fluxo corrigido (fc_{C_off}) do ponto de operação (Ponto_{C_off}) com a curva de velocidade traçada, conforme indicado na figura 3.10.

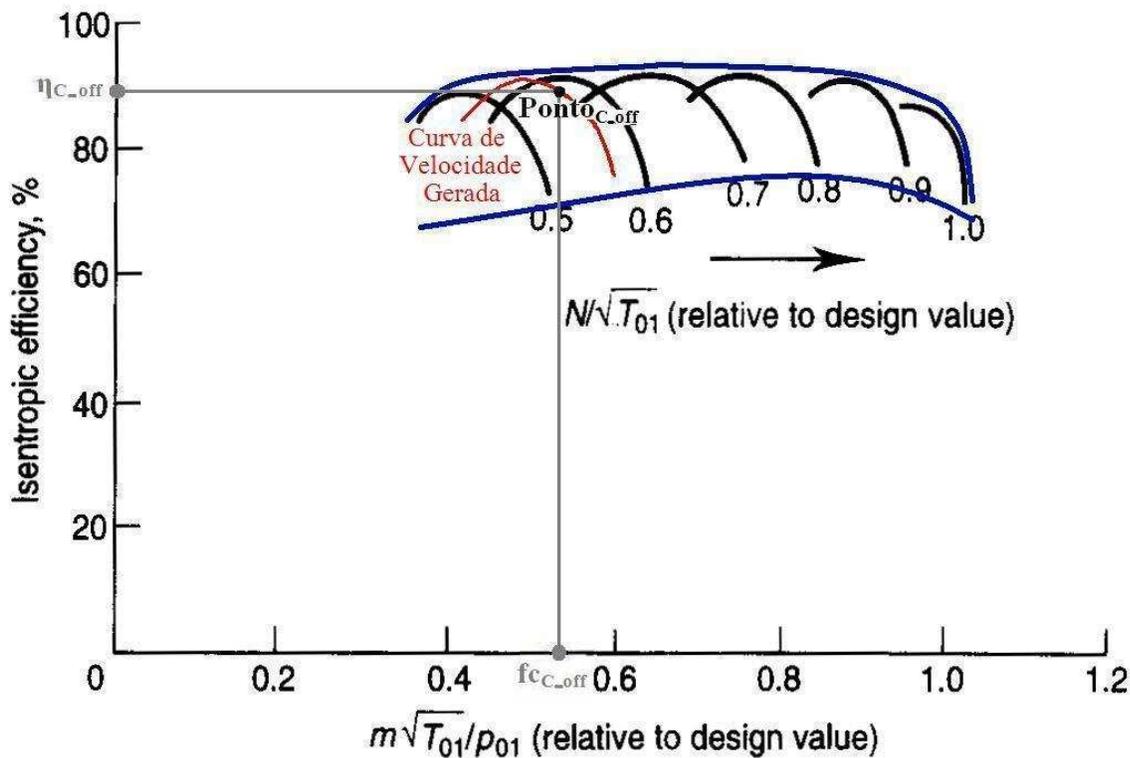


Figura 3.10 – Cálculo da Eficiência no Ponto de Operação ‘Off-Design’ de um Compressor

3.6.2 Cálculo de Desempenho do Ponto de Operação de uma Turbina

O ponto de operação ‘off-design’ em uma turbina é determinado pela relação de pressão e fluxo corrigido calculados pelo equacionamento termodinâmico, ao contrário do ponto de operação ‘off-design’ do compressor, o qual é definido como dado de entrada.

O ponto de operação ‘off-design’ na turbina está indicado na figura 3.11 como $\text{Ponto}_{T.off}$, correspondente à coordenada $(rp_{T.off}, fc_{T.off})$, também indicada nesta figura.

Informações de desempenho da turbina podem ser calculadas a partir do fluxo corrigido na sua entrada e relação de pressão em sua expansão, obtidos pelo equacionamento termodinâmico, e a partir dos dados de velocidade fornecidos como dados de entrada ou calculados em função da rotação do compressor.

O traçado da curva de velocidade gerada no mapa Relação de Pressão X Fluxo Corrigido é mostrado na figura 3.11.

O fator de multiplicação para as curvas de desempenho de turbinas, $fator_T$, é obtido pela expressão:

$$fator_T = \frac{nc_{T_off} - nc_{T_i}}{nc_{T_{i+1}} - nc_{T_i}} \quad (3.23)$$

Os coeficientes das curvas de velocidades geradas para o mapa de desempenho Relação de Pressão X Fluxo Corrigido e Relação de Pressão X Eficiência são obtidos similarmente ao descrito para obtenção da equação 3.22, a qual é reescrita como:

$$coeficiente_{curva_{T_off}} = fator_T \cdot coeficiente_{curva_{T_{i+1}}} + (1 - fator_T) \cdot coeficiente_{curva_{T_i}} \quad (3.24)$$

As curvas de velocidade geradas para operação 'off-design' estão representadas nas figuras 3.11 e 3.12.

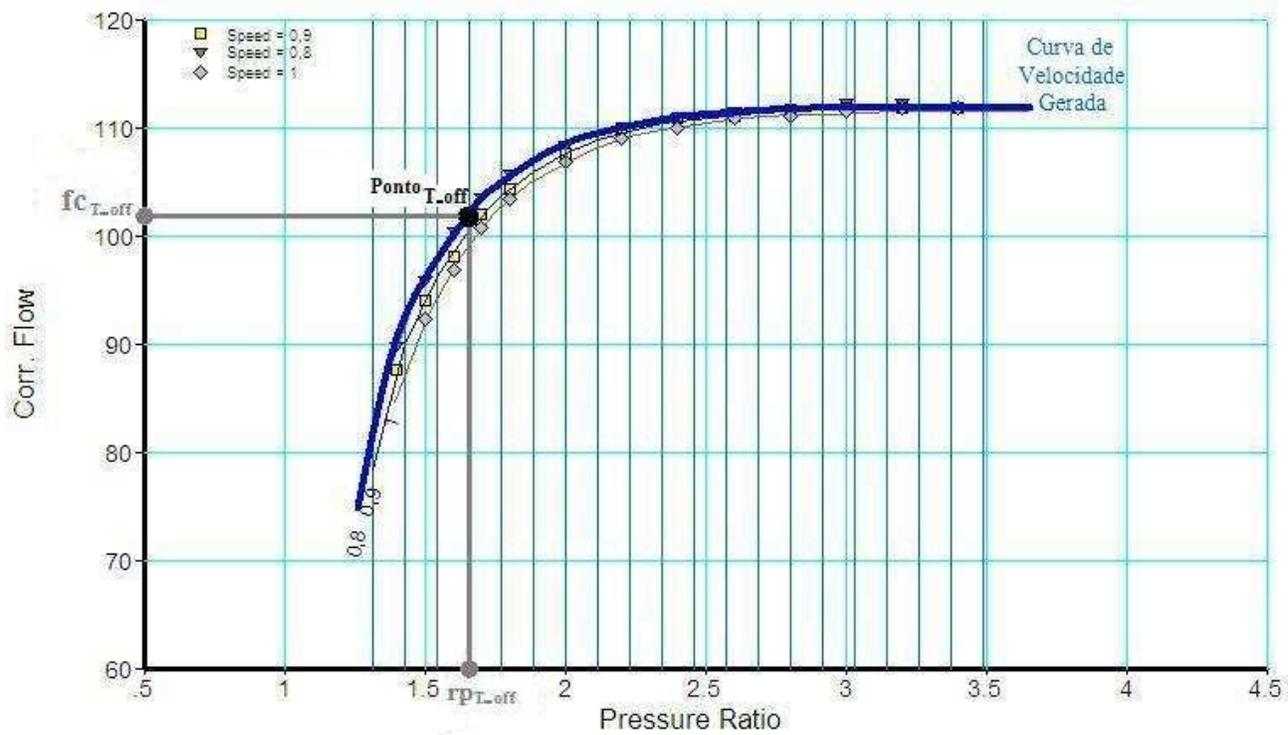


Figura 3.11 – Cálculo da Velocidade no Ponto de Operação ‘Off-Design’ de uma Turbina

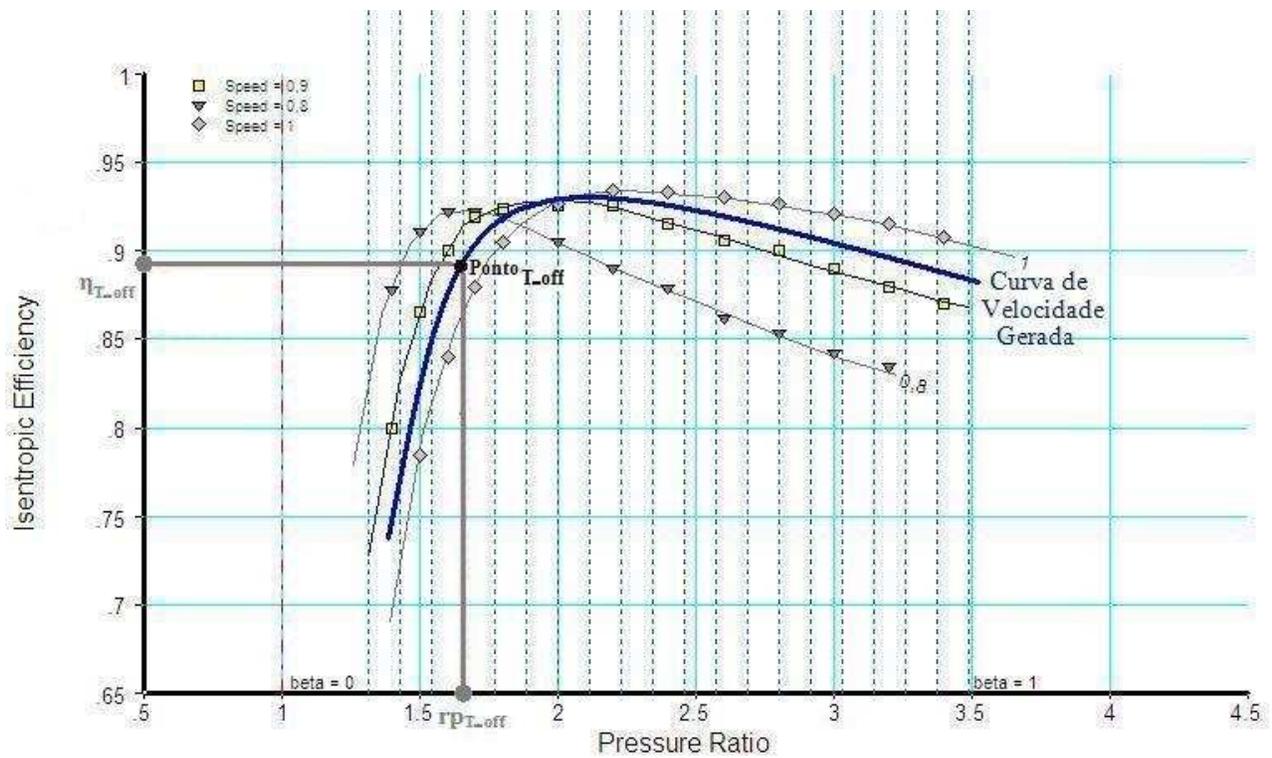


Figura 3.12 – Cálculo da Eficiência no Ponto de Operação ‘Off-Design’ de uma Turbina

A leitura da eficiência da turbina para operação ‘off-design’, η_{T_off} , é feita a partir da intersecção da razão de pressão rp_{T_off} do ponto de operação (Ponto $_{T_off}$) com a curva de velocidade gerada, conforme indicado na figura 3.12.

3.7 Ciclo Termodinâmico a Gás

O ciclo termodinâmico a Gás, ciclo Brayton, modelado, considera ciclo simples de turbina a gás, com dois eixos, sendo um eixo para o compressor e turbina geradora de gases e um eixo para turbina de potência e gerador de energia elétrica, conforme mostrado na figura 3.13. Com o objetivo de manter constante a frequência da tensão gerada, admite-se rotação fixa para o eixo do conjunto turbina de potência e gerador. Considera-se também operação em regime permanente.

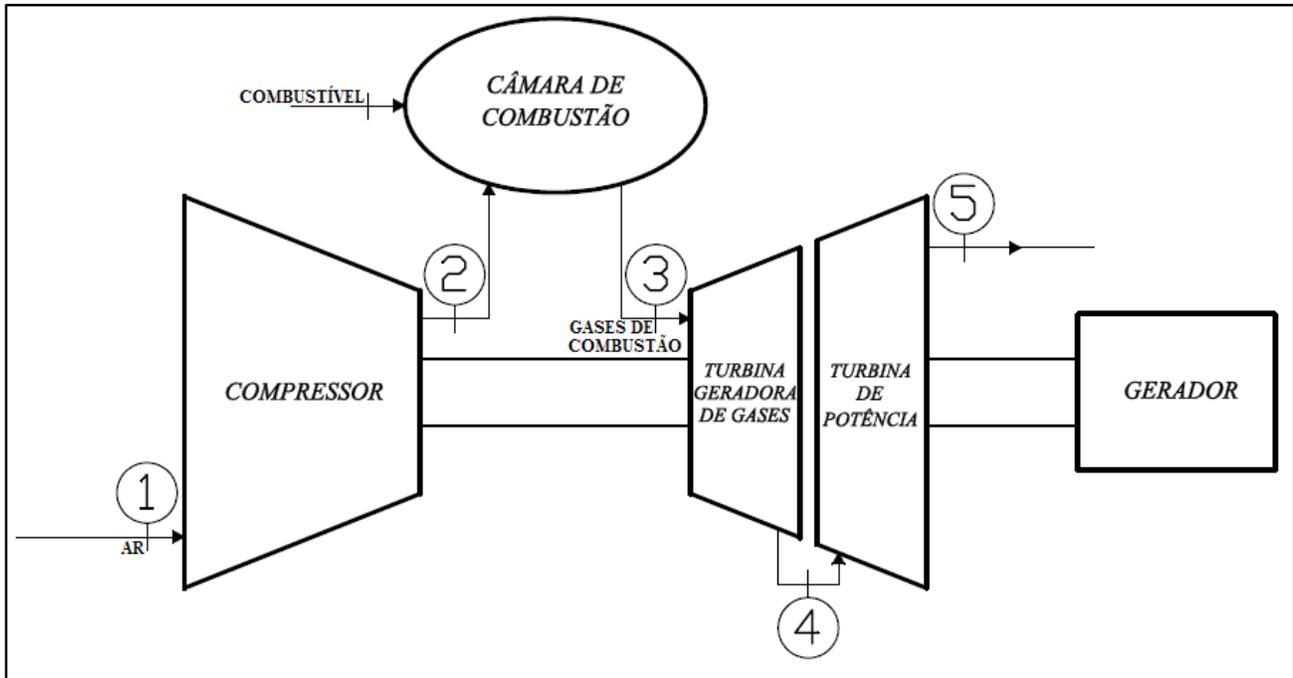


Figura 3.13 – Representação da Turbina a Gás do Ciclo Termodinâmico a Gás Modelado

Na figura 3.13, os números indicados representam:

- 1: admissão ou entrada no compressor, equivalendo ao ar nas condições ambientes;
- 2: saída do compressor após compressão do ar admitido e conseqüente aumento de temperatura;
- 3: saída da câmara de combustão após aquecimento por combustão e entrada na turbina geradora de gases;
- 4: saída da turbina geradora de gases e entrada na turbina de potência;
- 5: saída da turbina de potência e escape à atmosfera.

3.7.1 Parâmetros dos Mapas de Desempenho

Na entrada do compressor, o fluxo corrigido passa a ser representado por:

$$f_{cC} = \frac{\dot{m}_C \cdot \sqrt{T_1}}{P_1} \quad (3.25)$$

Na entrada da turbina geradora de gases, o fluxo corrigido passa a ser representado por:

$$f_{cTGG} = \frac{\dot{m}_{TGG} \cdot \sqrt{T_3}}{P_3} \quad (3.26)$$

Na entrada da turbina de potência, o fluxo corrigido passa a ser representado por:

$$f_{cTP} = \frac{\dot{m}_{TP} \cdot \sqrt{T_4}}{P_4} \quad (3.27)$$

Na entrada do compressor, a velocidade corrigida passa a ser representada por:

$$nc_C = \frac{N_C}{\sqrt{T_1}} \quad (3.28)$$

Na entrada da turbina geradora de gases, a velocidade corrigida passa a ser representada por:

$$nc_{TGG} = \frac{N_{TGG}}{\sqrt{T_3}} \quad (3.29)$$

Na entrada da turbina de potência, a velocidade corrigida passa a ser representada por:

$$nc_{TP} = \frac{N_{TP}}{\sqrt{T_4}} \quad (3.30)$$

Os demais parâmetros não equacionados são a relação de pressão no compressor (rp_C), a relação de pressão na turbina geradora de gases (rp_{TGG}), a relação de pressão na turbina de potência (rp_{TP}), a eficiência isentrópica no compressor (η_C), a eficiência isentrópica na turbina geradora de gases (η_{TGG}) e a eficiência isentrópica na turbina de potência (η_{TP}).

É importante observar que os parâmetros de mapas de desempenho de compressores e turbinas apresentados no item 3.7.1 estão expressos para as condições de projeto e são também válidos para as condições ‘off-design’, desde que acrescido o subscrito ‘off’.

3.7.2 Compressor

A passagem de ar pelo compressor considera a compressão adiabática e irreversível de ar atmosférico.

O balanço energético ao longo do compressor é dado por:

$$\dot{m}_{AR} \cdot h_1 = \dot{m}_{AR} \cdot h_2 - W_C \quad (3.31)$$

Onde,

$$h_1 = h_{AR}(T_1) \quad (3.32)$$

$$h_2 = h_{AR}(T_2) \quad (3.33)$$

$$\dot{m}_{AR} = \dot{m}_C \quad (3.34)$$

Logo, a potência do compressor é definida como:

$$W_C = \dot{m}_{AR} \cdot (h_2 - h_1) \quad (3.35)$$

A eficiência do compressor é definida em relação à compressão isoentrópica:

$$\eta_C = \frac{(h_{2_S} - h_1)}{(h_2 - h_1)} \quad (3.36)$$

Onde,

$$h_{2_S} = h_{AR}(T_{2_S}) \quad (3.37)$$

$$T_{2_S} = T_{AR}(P_2, s_1) \quad (3.38)$$

A variação de temperatura no compressor é dada por:

$$\Delta T_C = T_2 - T_1 \quad (3.39)$$

É importante observar que as equações apresentadas no item 3.7.2 estão expressas para as condições de projeto e são também válidas para as condições ‘off-design’, desde que acrescido o subscrito ‘off’.

3.7.3 Câmara de Combustão

Considerou-se que o ar atmosférico que passa pelo compressor é formado por uma mistura de nitrogênio (N₂), oxigênio (O₂), dióxido de carbono (CO₂) e gás argônio, sendo que para cada

componente da mistura é atribuída uma fração volumétrica. Estas quatro substâncias são as principais encontradas na composição média do ar atmosférico. Além disso, foi considerado ar atmosférico seco.

Considerou-se que o combustível injetado na câmara de combustão é formado por uma mistura de metano (CH_4), etano (C_2H_6), propano (C_3H_8), dióxido de carbono (CO_2) e nitrogênio (N_2), sendo que para cada componente da mistura é atribuída uma fração volumétrica. Estas cinco substâncias formam a composição assumida para gás natural utilizado como combustível no presente estudo. Considerou-se ainda a ausência de formação de monóxido de carbono (CO) e de óxidos de nitrogênio (NO_x), emissões as quais são influenciadas pela razão ar/combustível e temperatura dos gases de combustão.

Muitos autores, a exemplo de Korakianitis e Svensson (1999) estimam a perda de pressão em câmaras de combustão a partir de correlações matemáticas de perda de pressão em função do fluxo mássico. No entanto, este trabalho não entrou neste mérito e foi assumida uma perda de pressão fixa (ΔP_{CAM}) no combustor:

$$P_3 = P_2 - \Delta P_{\text{CAM}} \quad (3.40)$$

Outra consideração foi assumir que a velocidade de ar na entrada da câmara de combustão é igual à velocidade dos gases após a combustão, na saída da câmara de combustão. O equacionamento apresentado também leva em consideração a eficiência da câmara de combustão.

A combustão na câmara de combustão considera o equacionamento químico descrito nas equações (3.41) a (3.85).

A vazão molar de ar é dada por:

$$n\text{mol}_{\text{AR}} = n\text{mol}_{\text{N}_2} + n\text{mol}_{\text{O}_2} + n\text{mol}_{\text{CO}_2} + n\text{mol}_{\text{Arg}} \quad (3.41)$$

As frações molares ou volumétricas de ar são:

$$f_{AR_N2} = \frac{\dot{n}mol_{AR_N2}}{\dot{n}mol_{AR}} \quad (3.42)$$

$$f_{AR_O2} = \frac{\dot{n}mol_{AR_O2}}{\dot{n}mol_{AR}} \quad (3.43)$$

$$f_{AR_CO2} = \frac{\dot{n}mol_{AR_CO2}}{\dot{n}mol_{AR}} \quad (3.44)$$

$$f_{AR_Arg} = \frac{\dot{n}mol_{AR_Arg}}{\dot{n}mol_{AR}} \quad (3.45)$$

Onde,

$$f_{AR_N2} + f_{AR_O2} + f_{AR_CO2} + f_{AR_Arg} = f_{AR} = 1 \quad (3.46)$$

A massa molar do ar é dada por:

$$MM_{AR} = f_{AR_N2} \cdot MM_{N2} + f_{AR_O2} \cdot MM_{O2} + f_{AR_CO2} \cdot MM_{CO2} + f_{AR_Arg} \cdot MM_{Arg} \quad (3.47)$$

As frações mássicas de ar são:

$$fm_{AR_N2} = f_{AR_N2} \cdot \frac{MM_{N2}}{MM_{AR}} \quad (3.48)$$

$$fm_{AR_O2} = f_{AR_O2} \cdot \frac{MM_{O2}}{MM_{AR}} \quad (3.49)$$

$$f_{m_{AR_CO2}} = f_{m_{AR_CO2}} \cdot \frac{MM_{CO2}}{MM_{AR}} \quad (3.50)$$

$$f_{m_{AR_Arg}} = f_{m_{Arg_O2}} \cdot \frac{MM_{Arg}}{MM_{AR}} \quad (3.51)$$

Onde,

$$f_{m_{AR_N2}} + f_{m_{AR_O2}} + f_{m_{AR_CO2}} + f_{m_{AR_Arg}} = f_{m_{AR}} = 1 \quad (3.52)$$

A relação entre a vazão mássica de ar e a massa molar de ar, ou vazão molar de ar, é:

$$\dot{n}mol_{AR} = \frac{\dot{m}_{AR}}{MM_{AR}} \quad (3.53)$$

A vazão molar de combustível é dada por:

$$\dot{n}mol_{COMB} = \dot{n}mol_{CH4} + \dot{n}mol_{C2H6} + \dot{n}mol_{C3H8} + \dot{n}mol_{CO2} + \dot{n}mol_{N2} \quad (3.54)$$

As frações molares ou volumétricas de combustível são:

$$f_{COMB_CH4} = \frac{\dot{n}mol_{COMB_CH4}}{\dot{n}mol_{COMB}} \quad (3.55)$$

$$f_{COMB_C2H6} = \frac{\dot{n}mol_{COMB_C2H6}}{\dot{n}mol_{COMB}} \quad (3.56)$$

$$f_{COMB_C3H8} = \frac{\dot{n}mol_{COMB_C3H8}}{\dot{n}mol_{COMB}} \quad (3.57)$$

$$f_{COMB_CO2} = \frac{\dot{n}mol_{COMB_CO2}}{\dot{n}mol_{COMB}} \quad (3.58)$$

$$f_{\text{COMB_N2}} = \frac{\dot{n}\text{mol}_{\text{COMB_N2}}}{\dot{n}\text{mol}_{\text{COMB}}} \quad (3.59)$$

Onde,

$$f_{\text{COMB_CH4}} + f_{\text{COMB_C2H6}} + f_{\text{COMB_C3H8}} + f_{\text{COMB_CO2}} + f_{\text{COMB_N2}} = f_{\text{COMB}} = 1 \quad (3.60)$$

A massa molar do combustível é:

$$\begin{aligned} \text{MM}_{\text{COMB}} = & f_{\text{COMB_CH4}} \cdot \text{MM}_{\text{CH4}} + f_{\text{COMB_C2H6}} \cdot \text{MM}_{\text{C2H6}} + f_{\text{COMB_C3H8}} \cdot \text{MM}_{\text{C3H8}} + \\ & f_{\text{COMB_CO2}} \cdot \text{MM}_{\text{CO2}} + f_{\text{COMB_N2}} \cdot \text{MM}_{\text{N2}} \end{aligned} \quad (3.61)$$

As frações mássicas de combustível são:

$$f_{\text{mCOMB_CH4}} = f_{\text{COMB_CH4}} \cdot \frac{\text{MM}_{\text{CH4}}}{\text{MM}_{\text{COMB}}} \quad (3.62)$$

$$f_{\text{mCOMB_C2H6}} = f_{\text{COMB_C2H6}} \cdot \frac{\text{MM}_{\text{C2H6}}}{\text{MM}_{\text{COMB}}} \quad (3.63)$$

$$f_{\text{mCOMB_C3H8}} = f_{\text{COMB_C3H8}} \cdot \frac{\text{MM}_{\text{C3H8}}}{\text{MM}_{\text{COMB}}} \quad (3.64)$$

$$f_{\text{mCOMB_CO2}} = f_{\text{COMB_CO2}} \cdot \frac{\text{MM}_{\text{CO2}}}{\text{MM}_{\text{COMB}}} \quad (3.65)$$

$$f_{\text{mCOMB_N2}} = f_{\text{COMB_N2}} \cdot \frac{\text{MM}_{\text{N2}}}{\text{MM}_{\text{COMB}}} \quad (3.66)$$

Onde,

$$\begin{aligned} f_{\text{mCOMB_CH4}} + f_{\text{mCOMB_C2H6}} + f_{\text{mCOMB_C3H8}} + f_{\text{mCOMB_CO2}} + f_{\text{mCOMB_N2}} = \\ f_{\text{mCOMB}} = 1 \end{aligned} \quad (3.67)$$

A relação entre a vazão mássica de combustível e a massa molar de combustível, ou vazão molar de combustível, é:

$$\dot{n}_{\text{COMB}} = \frac{\dot{m}_{\text{COMB}}}{MM_{\text{COMB}}} \quad (3.68)$$

A entalpia do ar na entrada da câmara de combustão, à temperatura T_2 , é:

$$h_{\text{AR}}(T_2) = fm_{\text{AR}_{\text{N}_2}} \cdot h_{\text{N}_2}(T_2) + fm_{\text{AR}_{\text{O}_2}} \cdot h_{\text{O}_2}(T_2) + fm_{\text{AR}_{\text{CO}_2}} \cdot h_{\text{CO}_2}(T_2) + fm_{\text{AR}_{\text{Arg}}} \cdot h_{\text{Arg}}(T_2) = h_2 \quad (3.69)$$

A entalpia do combustível na entrada da câmara de combustão, à temperatura T_{COMB} , é:

$$h_{\text{COMB}}(T_{\text{COMB}}) = fm_{\text{COMB}_{\text{CH}_4}} \cdot h_{\text{CH}_4}(T_{\text{COMB}}) + fm_{\text{COMB}_{\text{C}_2\text{H}_6}} \cdot h_{\text{C}_2\text{H}_6}(T_{\text{COMB}}) + fm_{\text{COMB}_{\text{C}_3\text{H}_8}} \cdot h_{\text{C}_3\text{H}_8}(T_{\text{COMB}}) + fm_{\text{COMB}_{\text{CO}_2}} \cdot h_{\text{CO}_2}(T_{\text{COMB}}) + fm_{\text{COMB}_{\text{N}_2}} \cdot h_{\text{N}_2}(T_{\text{COMB}}) = h_{\text{COMB}} \quad (3.70)$$

A vazão entálpica na entrada câmara de combustão é dada por:

$$\dot{H}_2 = \dot{m}_{\text{AR}} \cdot h_{\text{AR}}(T_2) + \dot{m}_{\text{COMB}} \cdot h_{\text{COMB}}(T_{\text{COMB}}) \quad (3.71)$$

O balanço de vazão entálpica de reagentes (ar e combustível na entrada da câmara de combustão) e produtos (gases de combustão na saída da câmara de combustão) pode ser escrito como:

$$\dot{H}_2 = \dot{H}_3' \quad (3.72)$$

Onde a vazão entálpica dos produtos da combustão é dada em função da entalpia à temperatura T_3' , ou a temperatura na saída dos gases da câmara de combustão para eficiência de combustão de 100%:

$$\begin{aligned} \dot{H}_{3'} = & \dot{n}_{\text{GAS_CO}_2} \cdot h_{\text{CO}_2}(T_{3'}) \cdot MM_{\text{CO}_2} + \dot{n}_{\text{GAS_H}_2\text{O}} \cdot h_{\text{H}_2\text{O}}(T_{3'}) \cdot MM_{\text{H}_2\text{O}} + \\ & \dot{n}_{\text{GAS_N}_2} \cdot h_{\text{N}_2}(T_{3'}) \cdot MM_{\text{N}_2} + \dot{n}_{\text{GAS_Arg}} \cdot h_{\text{Arg}}(T_{3'}) \cdot MM_{\text{Arg}} + \dot{n}_{\text{GAS_O}_2} \cdot \\ & h_{\text{O}_2}(T_{3'}) \cdot MM_{\text{O}_2} \end{aligned} \quad (3.73)$$

Onde,

$$\begin{aligned} \dot{n}_{\text{GAS_CO}_2} = & \dot{n}_{\text{AR}} \cdot f_{\text{AR_CO}_2} + \dot{n}_{\text{COMB}} \\ & \cdot (f_{\text{COMB_CH}_4} + 2 \cdot f_{\text{COMB_C}_2\text{H}_6} + 3 \cdot f_{\text{COMB_C}_3\text{H}_8} + f_{\text{COMB_CO}_2}) \end{aligned} \quad (3.74)$$

$$\dot{n}_{\text{GAS_H}_2\text{O}} = \dot{n}_{\text{COMB}} \cdot (2 \cdot f_{\text{COMB_CH}_4} + 3 \cdot f_{\text{COMB_C}_2\text{H}_6} + 4 \cdot f_{\text{COMB_C}_3\text{H}_8}) \quad (3.75)$$

$$\dot{n}_{\text{GAS_N}_2} = \dot{n}_{\text{AR}} \cdot f_{\text{AR_N}_2} + \dot{n}_{\text{COMB}} \cdot f_{\text{COMB_N}_2} \quad (3.76)$$

$$\dot{n}_{\text{GAS_Arg}} = \dot{n}_{\text{AR}} \cdot f_{\text{AR_Arg}} \quad (3.77)$$

$$\begin{aligned} \dot{n}_{\text{GAS_O}_2} = & \dot{n}_{\text{AR}} \cdot (f_{\text{AR_O}_2} + f_{\text{AR_CO}_2}) + \dot{n}_{\text{COMB}} \cdot f_{\text{COMB_CO}_2} \\ & - \dot{n}_{\text{GAS_CO}_2} - \frac{\dot{n}_{\text{GAS_H}_2\text{O}}}{2} \end{aligned} \quad (3.78)$$

O fluxo mássico de gás aquecido após a combustão é dado por:

$$\dot{m}_{\text{GAS}} = \dot{m}_{\text{AR}} + \dot{m}_{\text{COMB}} \quad (3.79)$$

A relação entre a temperatura de saída da câmara de combustão (T_3) e a temperatura de saída da câmara de combustão para eficiência da câmara de combustão de 100% ($T_{3'}$) é dada por:

$$\dot{H}_{3'} - \dot{H}_3 = \dot{m}_{\text{COMB}} \cdot (1 - \eta_{\text{CAM}}) \cdot PCS_{\text{COMB}} \quad (3.80)$$

Onde,

$$PCS_{COMB} = fm_{COMB_CH4} \cdot PCS_{CH4} + fm_{COMB_C2H6} \cdot PCS_{C2H6} + fm_{COMB_C3H8} \cdot PCS_{C3H8} \quad (3.81)$$

Os valores utilizados para os poderes caloríficos superiores dos componentes do combustível da equação (3.81) foram obtidos de Moran e Shapiro (2006).

A relação ar/combustível molar é dada por:

$$AC_{molar} = \frac{\dot{n}mol_{AR}}{\dot{n}mol_{COMB}} \quad (3.82)$$

A relação ar/combustível mássica é dada por:

$$AC_{mass} = \frac{\dot{m}_{AR}}{\dot{m}_{COMB}} \quad (3.83)$$

O excesso de ar é dado por:

$$exc_{AR} = \frac{\dot{n}mol_{GAS_O2}}{\dot{n}mol_{AR_O2} - \dot{n}mol_{GAS_O2}} \quad (3.84)$$

A potência térmica total disponibilizada na câmara de combustão é dada por:

$$W_{CAM} = \dot{m}_{COMB} \cdot PCS_{COMB} \quad (3.85)$$

A potência térmica indicada anteriormente não foi utilizada como potência no sentido de trabalho, mas para indicar a energia liberada na combustão. A nomenclatura comumente utilizada na literatura é o Q, porém, para o presente trabalho, foi utilizado o W acrescido do subscrito referente à câmara de combustão.

É importante observar que as equações apresentadas no item 3.7.3 estão expressas para as condições de projeto e são também válidas para as condições ‘off-design’, desde que acrescido o subscrito ‘off’.

3.7.4 Turbina Geradora de Gases

A passagem de gases de combustão pela turbina geradora de gases considera expansão adiabática e irreversível.

O balanço energético ao longo da turbina geradora de gases é dado por:

$$\dot{m}_{GAS} \cdot h_3 = \dot{m}_{GAS} \cdot h_4 + W_{TGG} \quad (3.86)$$

Onde,

$$h_3 = h_{GAS}(h_3) \quad (3.87)$$

$$h_4 = h_{GAS}(h_4) \quad (3.88)$$

$$\dot{m}_{GAS} = \dot{m}_{TGG} \quad (3.89)$$

Logo, a potência na turbina geradora de gases é definida como:

$$W_{TGG} = \dot{m}_{GAS} \cdot (h_3 - h_4) \quad (3.90)$$

A potência da turbina geradora de gases está relacionada à potência do compressor:

$$W_C = \eta_{M_C_TGG} \cdot W_{TGG} \quad (3.91)$$

A eficiência da turbina geradora de gases é definida em relação à expansão isoentrópica:

$$\eta_{TGG} = \frac{(h_4 - h_3)}{(h_{4_S} - h_3)} \quad (3.92)$$

Onde,

$$h_{4_S} = h_{GAS}(T_{4_S}) \quad (3.93)$$

$$T_{4_S} = T_{GAS}(P_4, s_3) \quad (3.94)$$

A variação de temperatura na turbina geradora de gases é dada por:

$$\Delta T_{TGG} = T_4 - T_3 \quad (3.95)$$

É importante observar que as equações apresentadas no item 3.7.4 estão expressas para as condições de projeto e são também válidas para as condições ‘off-design’, desde que acrescido o subscrito ‘off’.

3.7.5 Turbina de Potência

A passagem de gases de combustão pela turbina de potência considera expansão adiabática e irreversível.

O balanço energético ao longo da turbina de potência é dado por:

$$\dot{m}_{GAS} \cdot h_4 = \dot{m}_{GAS} \cdot h_5 + W_{TP} \quad (3.96)$$

Onde,

$$h_5 = h_{GAS}(T_5) \quad (3.97)$$

$$\dot{m}_{GAS} = \dot{m}_{TP} \quad (3.98)$$

Logo, a potência da turbina de potência é definida como:

$$W_{TP} = \dot{m}_{GAS} \cdot (h_4 - h_5) \quad (3.99)$$

A potência da turbina de potência relaciona-se à potência líquida gerada por:

$$W_G = \eta_{M_{TP_G}} \cdot W_{TP} \quad (3.100)$$

A eficiência da turbina de potência é definida em relação à expansão isoentrópica:

$$\eta_{TP} = \frac{(h_5 - h_4)}{(h_{5_S} - h_4)} \quad (3.101)$$

Onde,

$$h_{5_S} = h_{GAS}(T_{5_S}) \quad (3.102)$$

$$T_{5_S} = T_{GAS}(P_5, s_4) \quad (3.103)$$

A variação de temperatura na turbina de potência é dada por:

$$\Delta T_{TP} = T_5 - T_4 \quad (3.104)$$

A potência específica da turbina de potência ou potência específica gerada é definida como:

$$\dot{W}_G = \frac{W_G}{\dot{m}_{COMB}} \quad (3.105)$$

O consumo específico de combustível é definido como:

$$\dot{m}_{\text{COMB}} = \frac{\dot{m}_{\text{COMB}}}{W_G} \quad (3.106)$$

A eficiência do ciclo é definida como:

$$\eta_{\text{CICLO}} = \frac{W_G}{W_{\text{CAM}}} \quad (3.107)$$

É importante observar que as equações apresentadas no item 3.7.5 estão expressas para as condições de projeto e são também válidas para as condições ‘off-design’, desde que acrescido o subscrito ‘off’.

Capítulo 4

Modelagem Computacional

A modelagem computacional desenvolvida considerou o arranjo da figura 3.13, para uma turbina a gás axial de dois eixos e ciclo simples.

Foram desenvolvidas subrotinas, as quais foram inseridas no programa principal de simulação de turbinas a gás. A vantagem de se trabalhar com subrotinas é que o programa principal passa a apresentar um aspecto mais organizado, somando-se ao fato de que alterações nas subrotinas implicam em nenhuma ou pouca necessidade de alteração do programa principal.

Foi utilizado o programa computacional EES (EES, 2008) para programação e simulação computacional.

As rotinas e subrotinas desenvolvidas são apresentadas nos anexos, sendo:

- Anexos I: rotinas desenvolvidas para a geração de curvas de desempenho de compressores (Programa para Geração de Funções para as Curvas dos Mapas de Desempenho de Compressores);
- Anexos II: rotinas desenvolvidas para a geração de curvas de desempenho de turbinas (Programa para Geração de Funções para as Curvas dos Mapas de Desempenho de Turbinas);
- Anexo III: rotinas e subrotinas do programa principal (Programa Computacional de Análise de Desempenho de Turbinas a Gás para Geração de Potência).

Através das curvas de desempenho de compressor e turbina, geradas conforme procedimentos descritos no capítulo 3, é possível a simulação da turbina a gás pelo programa computacional desenvolvido. A determinação das funções matemáticas que descrevem as curvas de desempenho é feita a partir de um programa computacional independente (Anexos I e II). Os coeficientes encontrados para tais curvas são utilizados no programa principal como dados das sub-rotinas associadas.

O programa principal, dado no Anexo III, é formado por uma rotina principal e sub-rotinas para cálculos intermediários, distribuídas no corpo da rotina principal.

Todas as curvas de desempenho utilizadas no programa indicam valores de fluxo corrigido, razão de pressão e eficiência, relativos aos valores de projeto. Isso permite que uma determinada curva de desempenho seja utilizada em faixas mais amplas de razões de pressão.

4.1 Dados de Entrada

4.1.1 Programa de Geração de Curvas de Desempenho de Compressores

Os dados de entrada da parte do programa para geração de curvas de desempenho de Fluxo Corrigido X Relação de Pressão são:

- 3 pontos distintos, pertencentes a cada uma das curvas de velocidade, relativos ao mapa de desempenho relacionado, sendo um dos pontos o de intersecção com a linha “surge”;
- 4 pontos distintos, pertencentes à curva da linha “surge”;
- 4 pontos distintos que delimitam a região útil do mapa de desempenho, abaixo da linha surge, ou seja, pontos da curva limite inferior.

Os dados de entrada da parte do programa para geração de curvas de desempenho de Fluxo Corrigido X Eficiência são:

- 4 pontos distintos, pertencentes a cada uma das curvas de velocidade, relativos ao mapa de desempenho relacionado, sendo um dos pontos o ponto de máximo da curva.

Os dados de entrada gerais do programa são:

- Velocidades corrigidas consideradas.

É importante destacar que os pontos escolhidos devem estar relativizados em relação ao ponto de projeto, assim como a velocidade corrigida considerada.

4.1.2 Programa de Geração de Curvas de Desempenho de Turbinas

Os dados de entrada da parte do programa para geração de curvas de desempenho de Relação de Pressão X Fluxo Corrigido são:

- 3 pontos distintos, pertencentes a cada uma das curvas de velocidade, relativos ao mapa de desempenho relacionado, sendo um dos pontos o de início da tendência de comportamento horizontal da curva.

Os dados de entrada da parte do programa para geração de curvas de desempenho de Relação de Pressão X Eficiência são:

- 7 pontos distintos, pertencentes a cada uma das curvas de velocidade, relativos ao mapa de desempenho relacionado, os quais representem, na seqüência da escolha, tendências de 3 curvas distintas.

Os dados de entrada gerais do programa são:

- Velocidades corrigidas consideradas.

É importante destacar que os pontos escolhidos devem estar relativizados em relação ao ponto de projeto, assim como a velocidade corrigida considerada.

4.1.3 Programa Principal

Os dados de entrada principais do programa são:

- Dados nominais ou condições de projeto dos equipamentos estão abaixo relacionados e também indicados na figura 4.1:
 - Pressão do ar ambiente (P_1), em [bar];
 - Temperatura do ar ambiente (T_1), em [K];
 - Vazão mássica no compressor (\dot{m}_C), em [kg/s];
 - Relação de pressões no compressor ou razão de compressão (rp_C), adimensional;
 - Eficiência isentrópica no compressor (η_C), adimensional;
 - Composição do ar em fração volumétrica (f_{AR}), adimensional, sendo igual à soma das frações volumétricas de nitrogênio (f_{AR_N2}), oxigênio (f_{AR_O2}), gás carbônico (f_{AR_CO2}) e argônio (f_{AR_Arg});
 - Composição do combustível em fração volumétrica (f_{COMB}), adimensional, sendo igual à soma das frações volumétricas de metano (f_{COMB_CH4}), etano (f_{COMB_C2H6}), propano (f_{COMB_C3H8}), gás carbônico (f_{COMB_CO2}) e nitrogênio (f_{COMB_N2});
 - Queda de pressão no combustor ou câmara de combustão (ΔP_{CAM}), em [bar];
 - Eficiência da câmara de combustão (η_{CAM}), adimensional;
 - Temperatura na entrada da Turbina (T_3), em [K];
 - Eficiência isentrópica da turbina geradora de gases (η_{TGG}), adimensional;
 - Eficiência mecânica da transmissão entre compressor e turbina geradora de gases ($\eta_{M_C_TGG}$), adimensional;
 - Pressão de saída da turbina de potência (P_5), em [bar];
 - Eficiência isentrópica da turbina de potência (η_{TP}), adimensional;
 - Eficiência mecânica da turbina de potência ($\eta_{M_TP_G}$), adimensional, na transmissão com o gerador;
 - Velocidade de rotação do compressor (N_C), em [RPM] (mesma velocidade de rotação da turbina geradora de gases);

- Velocidade de rotação do gerador (N_G), em [RPM] (mesma velocidade de rotação da turbina de potência).

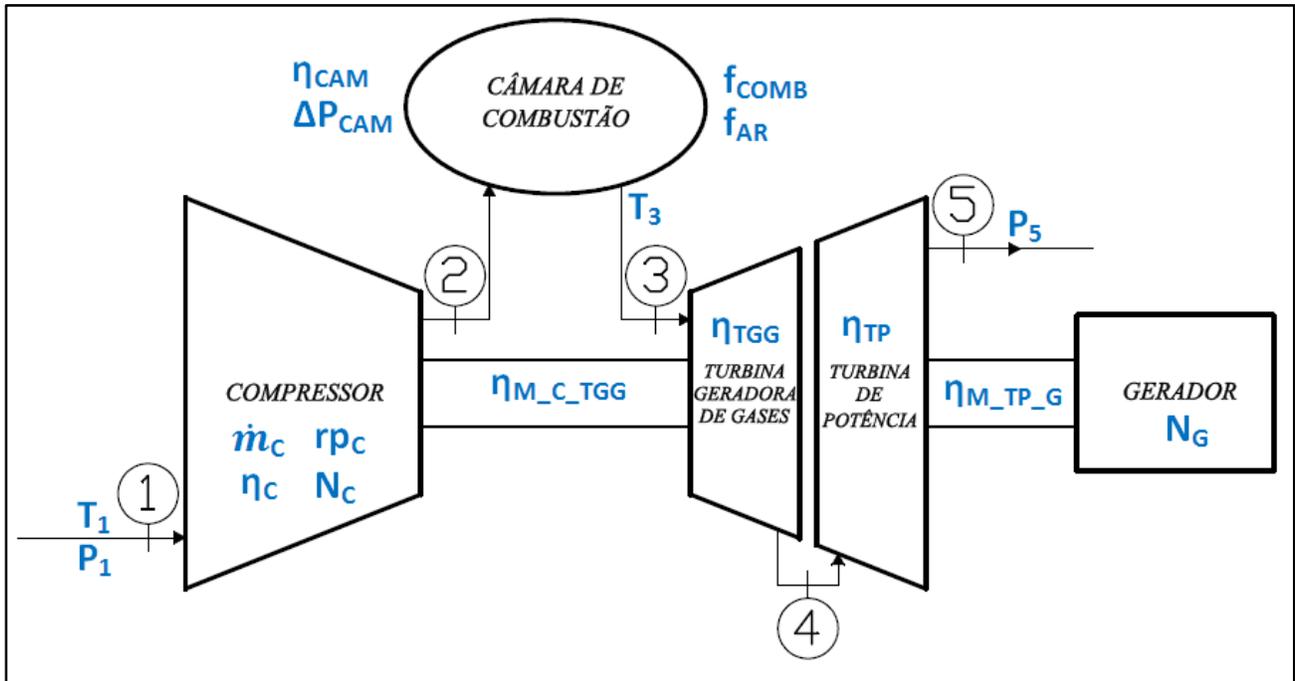


Figura 4.1 – Representação dos dados nominais ou condições de projeto para Turbina a Gás do Ciclo Termodinâmico a Gás Modelado

- Dados de operação fora das condições de projeto, ou dados ‘off-design’ estão abaixo relacionados e também indicados na figura 4.2:
 - Pressão do ar ambiente (P_{1_off}), em [bar];
 - Temperatura do ar ambiente (T_{1_off}), em [K];
 - Composição do ar em fração volumétrica (f_{AR_off}), adimensional, sendo igual à soma das frações volumétricas de nitrogênio ($f_{AR_N2_off}$), oxigênio ($f_{AR_O2_off}$), gás carbônico ($f_{AR_CO2_off}$) e argônio ($f_{AR_Arg_off}$);
 - Composição do combustível em fração volumétrica (f_{COMB_off}), adimensional, sendo igual à soma das frações volumétricas de metano ($f_{COMB_CH4_off}$), etano ($f_{COMB_C2H6_off}$), propano ($f_{COMB_C3H8_off}$), gás carbônico ($f_{COMB_CO2_off}$) e nitrogênio ($f_{COMB_N2_off}$);
 - Queda de pressão no combustor ou câmara de combustão (ΔP_{CAM_off}), adimensional;
 - Eficiência da câmara de combustão (η_{CAM_off}), adimensional;

- Temperatura na entrada da Turbina (T_{3_off}), em [K];
- Eficiência mecânica da transmissão entre compressor e turbina geradora de gases ($\eta_{M_C_TGG_off}$), adimensional;
- Pressão de saída da turbina de potência (P_{5_off}), em [bar];
- Eficiência mecânica da turbina de potência ($\eta_{M_TP_G_off}$), adimensional, na transmissão com o gerador;
- Velocidade de rotação do gerador (N_{G_off}), em [RPM] (mesma velocidade de rotação da turbina de potência).
- Ponto de operação escolhido no mapa de desempenho do compressor (fluxo corrigido relativo ao fluxo de projeto X razão de pressão relativa à razão de pressão de projeto), dado como \overline{Ponto}_{C_off} , (ponto de operação relativo ao ponto de projeto), correspondente às coordenadas \overline{f}_{C_off} (fluxo corrigido no compressor para operação ‘off-design’, relativo ao fluxo corrigido de projeto) e \overline{rp}_{C_off} (relação de pressão no compressor para operação ‘off-design’, relativa à relação de pressão de projeto).

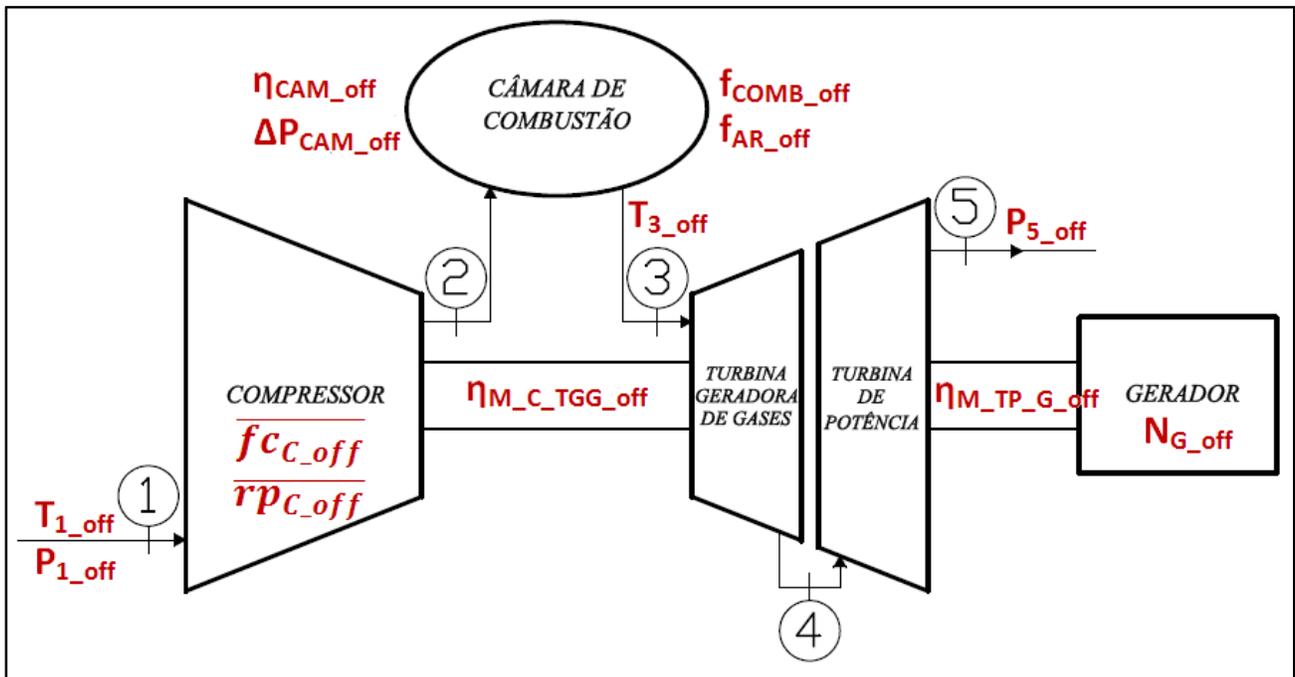


Figura 4.2 – Representação dos dados de operação fora das condições de projeto, ou dados ‘off-design’, para Turbina a Gás do Ciclo Termodinâmico a Gás Modelado

4.2 Rotinas Computacionais Desenvolvidas

As rotinas desenvolvidas para o programa principal são divididas em ‘Procedures’, ‘Functions’ e ‘Sub-Programs’. As ‘Procedures’ são sub-rotinas que fornecem como saída um conjunto de valores atribuídos às variáveis de saída. As ‘Functions’ são sub-rotinas que fornecem como saída um único e determinado valor. Os ‘Sub-Programs’ são sub-programas ou programas independentes e se diferenciam das ‘Procedures’ e ‘Functions’ pois neles não há a necessidade das incógnitas a serem calculadas estarem isoladas e seguirem um cálculo seqüencial. Ou seja, da mesma forma que no programa principal, basta que o número de equações seja igual ao número de incógnitas. Todas permitem a inserção de vários dados de entrada.

A seguir são apresentadas as sub-rotinas utilizadas para os cálculos do programa principal.

4.2.1 Sub-Rotina Mapa Compressor

Esta sub-rotina é responsável pelo cálculo da eficiência atribuída ao compressor para operação ‘off-design’. Para tal, faz uso dos coeficientes calculados no programa dado no Anexo I.

O dado de entrada da sub-rotina é o ponto de operação ‘off-design’ ($\overline{Ponto_{C_{off}}}$) escolhido no mapa de desempenho do compressor, ou seja, o fluxo corrigido ($\overline{f_{C_{off}}}$) e a relação de compressão ($\overline{r_{p_{C_{off}}}}$), ambos relativos ao valor de projeto.

Como saída fornece:

- Velocidade no ponto dado ($\overline{n_{C_{off}}}$);
- Eficiência no ponto dado ($\overline{\eta_{C_{off}}}$), calculada com base na restrição de eficiência máxima e mínima das curvas de velocidade superior e inferior à velocidade calculada. Esta restrição limita o valor da eficiência calculada para o ponto, para valores dentro da região útil do mapa de desempenho do compressor, conforme indicado na figura 3.4.

Velocidade inferior indica o valor da velocidade dada no mapa gerado, imediatamente inferior à velocidade calculada, ou velocidade i . Velocidade superior indica o valor da velocidade dada no mapa gerado, imediatamente superior à velocidade calculada, ou velocidade $i+1$.

- Fração ($fator_C$) que indica a proximidade do ponto dado em relação ao ponto de intersecção da curva que passa pelo ponto dado com a curva de velocidade superior;
- Eficiências ($\overline{\eta_{C_{l+1}}}$ e $\overline{\eta_{C_l}}$) para os pontos de intersecção com as curvas de velocidade superior e inferior, considerando a restrição de eficiência máxima e mínima;
- Eficiência ($\overline{\eta_{C_{off}}}'$) no ponto dado calculada sem as restrições consideradas no cálculo de $\overline{\eta_{C_{off}}}$;
- Variável $\overline{r_{p_{C_{off}}}'}$ (igual a $\overline{r_{p_{C_{off}}}}$);
- Variável $\overline{\eta_{C_{off}}}''$ (igual a $\overline{\eta_{C_{off}}}$);
- Variável $msn_{C_{off}}$. Quando igual a 1, indica que o ponto escolhido está dentro da região útil do mapa. Quando seu resultado é igual a 0, indica a necessidade de escolha de um novo ponto (novos $\overline{f_{C_{off}}}$ e $\overline{r_{p_{C_{off}}}}$).

Genericamente, a sub-rotina é expressa como:

Procedure Mapa Compressor ($\overline{f_{C_{off}}}$; $\overline{r_{p_{C_{off}}}}$; $\overline{nc_{C_{off}}}$; $\overline{\eta_{C_{off}}}$; $fator_C$; $\overline{\eta_{C_{l+1}}}$; $\overline{\eta_{C_l}}$; $\overline{\eta_{C_{off}}}'$; $\overline{r_{p_{C_{off}}}'}$; $\overline{\eta_{C_{off}}}''$; $msn_{C_{off}}$)

Observa-se que o “:” faz a separação entre os dados de entrada e os dados de saída da sub-rotina.

A sub-rotina apresenta como informações próprias todos os coeficientes das curvas geradas para o mapa de desempenho do compressor tomado como referência (oriundas do Anexo I). A sub-rotina faz a verificação para averiguar se o ponto escolhido está na região útil do mapa. Da mesma forma como preconizado por Kurzke (1996) como linhas β , a sub-rotina segue a metodologia apresentada no capítulo 3 (item 3.6.1) para geração dos coeficientes da curva que passa pelo ponto de operação ‘off-design’, dos coeficientes das curvas de velocidade ‘off-design’ e cálculo da

eficiência 'off-design'. Todo o equacionamento utilizado conforme metodologia apresentada no item 3.6.1, pode ser verificado no anexo III.

4.2.2 Sub-Rotina YY

Esta sub-rotina é responsável pelo cálculo dos coeficientes da curva que passa pelo ponto dado, nos cálculos da sub-rotina Mapa Compressor.

Os dados de entrada são:

- Os coeficientes das curvas surge (gru[5..8]) e limite inferior (gru[9..12]), do mapa de desempenho do compressor;
- O fluxo corrigido dado ($\overline{f c_{off}}$);
- Fração λ , número entre 0 e 1, que indica a proximidade da curva em relação à curva limite inferior.

Como saída fornece:

- Os coeficientes da curva que passa pelo ponto dado (fru[1..4]), ou curva β ;
- O valor da razão de compressão ($\overline{r p_{C_{off}}''}$) calculado substituindo o valor de $\overline{f c_{off}}$ na curva que passa pelo ponto dado.

Genericamente, a sub-rotina é expressa como:

Procedure YY (gru[5..12]; $\overline{f c_{off}}$; λ : fru[1..4]; $\overline{r p_{C_{off}}''}$)

Na sub-rotina Mapa Compressor, a sub-rotina YY é repetida até que a diferença entre $\overline{r p_{C_{off}}''}$ e $\overline{r p_{C_{off}}}$ tenha o valor absoluto inferior à tolerância considerada na sub-rotina. Todo o equacionamento utilizado pode ser verificado no anexo III.

4.2.3 Sub-Rotina Intervalo

Esta sub-rotina é utilizada na sub-rotina Mapa Compressor e responsável por indicar entre quais intervalos de velocidade (velocidade inferior e superior, ou velocidade i e $i+1$) encontra-se o ponto de operação ‘off-design’, incluindo a indicação dos pontos de intersecção da curva que passa pelo ponto dado com as curvas de velocidade dos intervalos indicados.

Os dados de entrada são:

- Velocidades dadas no mapa do compressor ($\overline{nc_c}$ [1..6]);
- Pontos de intersecção da curva que passa pelo ponto dado com as curvas de velocidade, ou seja, o fluxo corrigido e a razão de pressão nesses pontos ($\overline{fc_c}$ [1..6] e $\overline{rpk_c}$ [1..6], respectivamente);
- Valor do fluxo corrigido no ponto dado ($\overline{fc_{c_off}}$).

Como saída fornece:

- Ponto da intersecção da curva que passa pelo ponto dado com a curva de velocidade superior ($\overline{rpk_{c_{i+1}}}$ e $\overline{fc_{c_{i+1}}}$);
- Ponto da intersecção da curva que passa pelo ponto dado com a curva de velocidade inferior ($\overline{rpk_{c_i}}$ e $\overline{fc_{c_i}}$);
- Velocidades da curva de velocidade superior e inferior ($\overline{nc_{c_{i+1}}}$ e $\overline{nc_{c_i}}$, respectivamente);
- Índices das curvas de velocidade superior e inferior ($i+1$ e i , respectivamente).

Genericamente, a sub-rotina é expressa como:

Procedure Intervalo ($\overline{rpk_c}$ [1..6] ; $\overline{fc_c}$ [1..6] ; $\overline{nc_c}$ [1..6] ; $\overline{fc_{c_off}}$; $\overline{fc_{c_i}}$; $\overline{fc_{c_{i+1}}}$; $\overline{rpk_{c_i}}$; $\overline{rpk_{c_{i+1}}}$; $\overline{nc_{c_i}}$; $\overline{nc_{c_{i+1}}}$; i ; $i+1$)

Todo o equacionamento utilizado pode ser verificado no anexo III.

4.2.4 Sub-Rotina Isolando

Esta sub-rotina é utilizada na sub-rotina Mapa Compressor para indicar (isolar) as eficiências da interseção do fluxo corrigido 'off-design' relativo ao de projeto ($\overline{fc_{C_off}}$) com as curvas de velocidade (velocidade inferior e superior, ou velocidade i e $i+1$)

Os dados de entrada são:

- Eficiências da interseção do fluxo corrigido 'off-design' relativo ao de projeto ($\overline{fc_{C_off}}$) com as linhas velocidades dadas no mapa do compressor ($\overline{\eta_C}$ [1..6]);
- Índices das curvas de velocidade superior e inferior ($i+1$ e i , respectivamente).

Como saída fornece:

- Eficiências da interseção do fluxo corrigido 'off-design' relativo ao de projeto ($\overline{fc_{C_off}}$) com as curvas de velocidade superior e inferior ($\overline{\eta_{C_i}}$ e $\overline{\eta_{C_i+1}}$, respectivamente).

Genericamente, a sub-rotina é expressa como:

Procedure Isolando ($\overline{\eta_C}$ [1..6]; i ; $i+1$; $\overline{\eta_{C_i}}$; $\overline{\eta_{C_i+1}}$)

Todo o equacionamento utilizado pode ser verificado no anexo III.

4.2.5 Sub-Rotina RP x EFI

Esta sub-rotina é utilizada para calcular a eficiência isentrópica na turbina (turbina geradora de gases ou turbina de potência).

Esta procedure contém como informações próprias os coeficientes das curvas do mapa normalizado (relativo aos valores de projeto) de turbina para Relação de Pressão x Eficiência, conforme programa do anexo II.

Os dados de entrada são:

- Variável $msn_{C_{off}}$, a qual é um valor oriundo da sub-rotina Mapa Compressor. Quando igual a 1, indica que o ponto escolhido está dentro da região útil do mapa do compressor. Quando igual a 0 indica que o ponto escolhido está fora da região útil;
- Velocidade para operação ‘off-design’ ($\overline{nc}_{T_{off}}$);
- Relação de pressão não relativa, na turbina (rp_T), para condições nominais;
- Relação de pressão não relativa, na turbina ($rp_{T_{off}}$), para operação ‘off-design’;
- Eficiência da turbina, não relativa, para condições nominais (η_T).

Como saída fornece:

- Eficiência da turbina, não relativa, para condição ‘off-design’ ($\eta_{T_{off}}$).

Genericamente, a sub-rotina é expressa como:

Procedure RPxEFI ($msn_{C_{off}}$; $\overline{nc}_{T_{off}}$; rp_T ; $rp_{T_{off}}$; η_T ; $\eta_{T_{off}}$)

Todo o equacionamento utilizado conforme metodologia apresentada no item 3.6.2, pode ser verificado no anexo III.

4.2.6 Sub-Rotina Compressor

Esta sub-rotina é utilizada para execução de cálculos termodinâmicos no compressor, considerando seus dados nominais.

Os dados de entrada são:

- Pressão de entrada no compressor (P_1);
- Temperatura de entrada no compressor (T_1);
- Valor não relativo da relação de compressão (rp_C);
- Valor não relativo da eficiência isentrópica no compressor (η_C);
- Fluxo máxico no compressor (\dot{m}_C);

Como saída fornece:

- Pressão de saída no compressor (P_2);
- Temperatura de saída no compressor (T_2);
- Fluxo corrigido na entrada do compressor (fc_C);
- Variação de temperatura no compressor (ΔT_C);
- Potência no compressor (W_C).

Genericamente, a sub-rotina é expressa como:

Procedure Compressor ($P_1; T_1; rp_C; \eta_C; \dot{m}_C; P_2; T_2; fc_C; \Delta T_C; W_C$)

A sub-rotina calcula as informações de saída do compressor com base na relação de eficiência do compressor, dada pela correlação de diferenças de entalpia para o ciclo isentrópico e o ciclo real. Todo o equacionamento utilizado, conforme metodologia apresentada no item 3.7.2, pode ser verificado no anexo III.

4.2.7 Sub-Rotina Combustor

Esta sub-rotina é utilizada para calcular a pressão na saída da câmara da combustão.

Os dados de entrada são:

- Pressão de entrada da câmara de combustão (P_2);
- Queda de pressão no combustor (ΔP_{CAM});

Como resultado fornece:

- Pressão na saída da câmara de combustão (P_3).

Genericamente, a sub-rotina é expressa como:

$P_3 = Combustor (P_2; \Delta P_{CAM})$

Todo o equacionamento utilizado pode ser verificado no anexo III. Esta sub-rotina é também utilizada para operação ‘off-design’, cuja representação apresentada acima tem acrescido o subscrito ‘off’.

4.2.8 *Sub-Rotina Combustão*

Esta sub-rotina é utilizada para calcular a quantidade combustível acrescentada à massa de ar comprimida.

Os dados de entrada são:

- Eficiência da câmara da combustão (η_{CAM});
- Temperatura do combustível na entrada da câmara de combustão (T_{COMB});
- Temperatura do ar após a compressão ou na entrada da câmara de combustão (T_2);
- Temperatura dos gases após a combustão (T_3);
- Fluxo mássico de ar na entrada da câmara de combustão (\dot{m}_C);
- Pressão de entrada no combustor (P_2);
- Pressão na saída do combustor (P_3);
- Composição do ar: fração volumétrica de Nitrogênio (f_{AR_N2}), fração volumétrica de Oxigênio (f_{AR_O2}), fração volumétrica de Gás Carbônico (f_{AR_CO2}), fração volumétrica de Argônio (f_{AR_Arg});
- Composição do combustível: fração volumétrica de Metano (f_{COMB_CH4}), fração volumétrica de Etano (f_{COMB_C2H6}), fração volumétrica de Propano (f_{COMB_C3H8}), fração volumétrica de Gás Carbônico (f_{COMB_CO2}), fração volumétrica de Nitrogênio (f_{COMB_N2}).

Como saída fornece:

- Fluxo mássico dos gases de combustão de combustão (\dot{m}_{GAS});
- Potência térmica disponibilizada (W_{CAM});
- Excesso de ar (exc_{AR});

- Relação ar/combustível molar (AC_{molar});
- Relação ar/combustível mássica (AC_{mass});

Genericamente, a sub-rotina é expressa como:

Subprogram Combustao (η_{CAM} ; T_{COMB} ; T_2 ; T_3 ; \dot{m}_C ; P_2 ; P_3 ; f_{AR_N2} ; f_{AR_O2} ; f_{AR_CO2} ; f_{AR_Arg} ; f_{COMB_CH4} ; f_{COMB_C2H6} ; f_{COMB_C3H8} ; f_{COMB_CO2} ; f_{COMB_N2} ; \dot{m}_{GAS} ; W_{CAM} ; $excAR$; AC_{molar} ; AC_{mass})

O equacionamento utilizado considera o balanço entálpico de reagentes e produtos, conforme metodologia apresentada no item 3.7.3, e pode ser verificado no anexo III. Esta sub-rotina é também utilizada para operação ‘off-design’, cuja representação apresentada acima tem acrescido o subscrito ‘off’.

4.2.9 Sub-Rotina Turbina GG

Esta sub-rotina é utilizada para execução de cálculos termodinâmicos na turbina geradora de gases, considerando seus dados nominais.

Os dados de entrada são:

- Pressão de entrada da turbina (P_3);
- Temperatura de entrada da turbina (T_3);
- Pressão de saída da turbina (P_4);
- Fluxo mássico na turbina (\dot{m}_{TGG});
- Valor não relativo da eficiência isentrópica na turbina (η_{TGG});
- Eficiência mecânica na transmissão compressor/turbina geradora de gases ($\eta_{M_C_TGG}$).

Como saída fornece:

- Temperatura de saída da turbina (T_4);
- Valor não relativo da relação de pressão na turbina (rp_{TGG});
- Fluxo corrigido na entrada da turbina (fc_{TGG});

- Variação de temperatura na turbina (ΔT_{TGG});
- Potência na turbina geradora de gases (W_{TGG}).

Genericamente, a sub-rotina é expressa como:

Procedure TurbinaGG ($T_3; P_3; P_4; \dot{m}_{TGG}; \eta_{TGG}; \eta_{M_C_TGG}; T_4; r_{pTGG}; \Delta T_{TGG}; f_{cTGG}; W_{TGG}$)

A sub-rotina calcula as informações de saída da turbina geradora de gases com base na relação de eficiência da turbina, dada pela correlação de diferenças de entalpia para o ciclo isentrópico e o ciclo real. É importante também observar que P_4 , embora seja um dado de entrada, é calculado a partir da equação colocada após a chamada da ‘procedure’ no programa principal.

Todo o equacionamento utilizado, conforme metodologia apresentada no item 3.7.4, pode ser verificado no anexo III.

4.2.10 Sub-Rotina Turbina P

Esta sub-rotina é utilizada para execução de cálculos termodinâmicos na turbina de potência, considerando seus dados nominais.

Os dados de entrada são:

- Pressão de entrada da turbina (P_4);
- Temperatura de entrada da turbina (T_4);
- Pressão de saída da turbina (P_5);
- Fluxo mássico na turbina (\dot{m}_{TP});
- Valor não relativo da eficiência isentrópica na turbina (η_{TP});
- Eficiência mecânica na transmissão turbina de potência/gerador ($\eta_{M_TP_G}$).

Como saída fornece:

- Temperatura de saída da turbina (T_5);

- Valor não relativo da relação de pressão na turbina (rp_{TP});
- Fluxo corrigido na entrada da turbina (fc_{TP});
- Variação de temperatura na turbina (ΔT_{TP});
- Potência na turbina (W_G) ou potência líquida fornecida pela turbina a gás.

Genericamente, a sub-rotina é expressa como:

Procedure TurbinaP ($T_4; P_4; P_5; \dot{m}_{TP}; \eta_{TP}; \eta_{M_{TP_G}}; T_5; rp_{TP}; \Delta T_{TP}; fc_{TP}; W_G$)

A sub-rotina calcula as informações de saída da turbina de potência com base na relação de eficiência da turbina, dada pela correlação de diferenças de entalpia para o ciclo isentrópico e o ciclo real. Todo o equacionamento utilizado, conforme metodologia apresentada no item 3.7.5, pode ser verificado no anexo III.

4.2.11 Sub-Rotina Compressor Off

Esta sub-rotina é utilizada para execução de cálculos termodinâmicos no compressor, considerando sua operação ‘off-design’.

Os dados de entrada são:

- Pressão de entrada no compressor (P_{1_off});
- Temperatura de entrada no compressor (T_{1_off});
- Valor não relativo da relação de compressão (rp_{C_off});
- Valor não relativo da eficiência isentrópica no compressor (η_{C_off});
- Fluxo mássico no compressor (\dot{m}_{C_off});

Como saída fornece:

- Pressão de saída no compressor (P_{2_off});
- Temperatura de saída no compressor (T_{2_off});
- Variação de temperatura no compressor (ΔT_{C_off});

- Potência no compressor (W_{C_off}).

Genericamente, a sub-rotina é expressa como:

Procedure CompressorOff (P_{1_off} ; T_{1_off} ; r_{PC_off} ; η_{C_off} ; \dot{m}_{C_off} ; P_{2_off} ; T_{2_off} ; ΔT_{C_off} ; W_{C_off})

A sub-rotina calcula as informações de saída do compressor com base na relação de eficiência do compressor, dada pela correlação de diferenças de entalpia para o ciclo isentrópico e o ciclo real. Todo o equacionamento utilizado, conforme metodologia apresentada no item 3.7.2, pode ser verificado no anexo III.

4.2.12 Sub-Rotina Turbina GG Off

Esta sub-rotina é utilizada para execução de cálculos termodinâmicos na turbina geradora de gases, considerando sua operação ‘off-design’.

Os dados de entrada são:

- Pressão de entrada da turbina (P_{3_off});
- Temperatura de entrada da turbina (T_{3_off});
- Pressão de saída da turbina (P_{4_off});
- Fluxo mássico na turbina (\dot{m}_{TGG_off});
- Eficiência mecânica na transmissão compressor/turbina geradora de gases ($\eta_{M_C_TGG_off}$);
- Potência na turbina geradora de gases (W_{TGG_off}).

Como saída fornece:

- Temperatura de saída da turbina (T_{4_off});
- Variação de temperatura na turbina (ΔT_{TGG_off});

Genericamente, a sub-rotina é expressa como:

Procedure TurbinaGGOff (T_{3_off} ; P_{3_off} ; P_{4_off} ; \dot{m}_{TGG_off} ; $\eta_{M_C_TGG_off}$; W_{TGG_off} ; T_{4_off} ; ΔT_{TGG_off})

A sub-rotina calcula as informações de saída da turbina geradora de gases com base na relação de eficiência da turbina, dada pela correlação de diferenças de entalpia para o ciclo isentrópico e o ciclo real. É importante também observar que P_{4off} , embora seja um dado de entrada, é calculado a partir da equação colocada após a chamada da ‘procedure’ no programa principal.

Todo o equacionamento utilizado, conforme metodologia apresentada no item 3.7.4, pode ser verificado no anexo III.

4.2.13 Sub-Rotina Turbina P Off

Esta sub-rotina é utilizada para execução de cálculos termodinâmicos na turbina de potência, considerando sua operação ‘off-design’.

Os dados de entrada são:

- Pressão de entrada da turbina (P_{4_off});
- Temperatura de entrada da turbina (T_{4_off});
- Pressão de saída da turbina (P_{5_off});
- Fluxo mássico na turbina (\dot{m}_{TP_off});
- Valor não relativo da eficiência isentrópica na turbina (η_{TP_off});
- Eficiência mecânica na transmissão turbina de potência/gerador ($\eta_{M_TGG_G_off}$).

Como saída fornece:

- Temperatura de saída da turbina (T_{5_off});
- Variação de temperatura na turbina (ΔT_{P_off});
- Potência na turbina (W_{G_off}) ou potência líquida da turbina a gás para operação ‘off-design’.

Genericamente, a sub-rotina é expressa como:

Procedure TurbinaGGOff (T_{4_off} ; P_{4_off} ; P_{5_off} ; \dot{m}_{TP_off} ; η_{TP_off} ; $\eta_{M_TGG_G_off}$; T_{5_off} ; ΔT_{TP_off} ; W_{G_off})

A sub-rotina calcula as informações de saída da turbina de potência com base na relação de eficiência da turbina, dada pela correlação de diferenças de entalpia para o ciclo isentrópico e o ciclo real. Todo o equacionamento utilizado, conforme metodologia apresentada no item 3.7.5, pode ser verificado no anexo III.

4.2.14 Sub-Rotina Test\$

Esta sub-rotina é utilizada para retornar mensagem sobre a região do mapa do compressor em que se encontra o ponto escolhido ($Ponto_{C_off}$). Retorna a mensagem de que o ponto escolhido está na região útil do mapa ou a mensagem de que o ponto está fora da região útil do mapa. Neste último caso, deve ser escolhido um novo ponto.

Os dados de entrada são:

- Variável msn_{C_off} , gerada pela sub-rotina Mapa Compressor;

Como resultado fornece:

- Mensagem de texto:
 - Quando $msn_{C_off} = 1$, a mensagem é (mst_{C_off}): ponto escolhido está na região útil do mapa do compressor;
 - Quando $msn_{C_off} = 0$, a mensagem é (mst_{C_off}): ponto escolhido não está na região útil do mapa do compressor, escolher novo ponto.

Genericamente, a sub-rotina é expressa como:

$mst_{C_off}\$ = test\(msn_{C_off})

Todo o equacionamento utilizado pode ser verificado no anexo III.

4.2.15 Sub-Rotina Choque

Esta sub-rotina calcula o valor do fluxo de choque ($\overline{fc_{T_off_CHOQUE}}$) correspondente à velocidade normalizada da turbina, relativa à velocidade de projeto ($\overline{nc_{T_off}}$).

O dado de entrada é:

- Velocidade normalizada da turbina, relativa à velocidade de projeto ($\overline{nc_{T_off}}$).

O dado de saída é:

- Fluxo de choque ($\overline{fc_{T_off_CHOQUE}}$) correspondente à velocidade de projeto ($\overline{nc_{T_off}}$).

Esta ‘procedure’ contém como informações próprias os fluxos de choque para as velocidades das curvas do mapa normalizado (relativo aos valores de projeto) de turbina para Relação de Pressão x Fluxo Corrigido, conforme programa do anexo II.

Genericamente, a sub-rotina é expressa como:

Procedure Choque ($\overline{nc_{T_off}}$: $\overline{fc_{T_off_CHOQUE}}$)

Todo o equacionamento utilizado, conforme metodologia apresentada no item 3.6.2, pode ser verificado no anexo III.

4.2.16 Sub-Rotina Tricolor

Esta sub-rotina é utilizada para retornar mensagem informando se o fluxo ‘off-design’ calculada para a turbina encontra-se abaixo, acima ou igual ao fluxo de choque da mesma.

Os dados de entrada são:

- Fluxo corrigido na turbina geradora de gases ($\overline{fc_{T_off}}$);

- Fluxo de choque ($\overline{fc_{T_off_CHOQUE}}$) correspondente à velocidade normalizada da turbina, relativa à velocidade de projeto ($\overline{nc_{T_off}}$).

O dado de saída é:

- Mensagem (msn_{T_CHOQUE_off}):
 - msn_{T_CHOQUE_off} = 0: fluxo corrigido calculado abaixo do fluxo de choque;
 - msn_{T_CHOQUE_off} = 1: fluxo corrigido calculado igual ao fluxo de choque;
 - msn_{T_CHOQUE_off} = 2: fluxo corrigido calculado acima do fluxo de choque.

Todo o equacionamento utilizado pode ser verificado no anexo III.

4.2.17 Sub-Rotina Tgg_off\$

Esta sub-rotina é utilizada para retornar mensagem sobre o fluxo corrigido relativo ao fluxo corrigido de projeto para a turbina geradora de gases, em relação ao fluxo de choque. Indica a necessidade de modificação no valor de $\overline{fc_{C_off}}$ (diminuição) ou alteração no valor da relação de pressão no compressor ($\overline{rp_{C_off}}$).

O dado de entrada é:

- Mensagem sobre o fluxo corrigido calculado, relativo ao de projeto, para turbina geradora de gases em relação ao fluxo de choque (msn_{TGG_CHOQUE_off}).

Como resultado fornece:

- Mensagem de texto:
 - Quando msn_{TGG_CHOQUE_off} = 0, a mensagem é (mst_{TGG_off}): fluxo na turbina geradora de gases abaixo do fluxo de choque;
 - Quando msn_{TGG_CHOQUE_off} = 1, a mensagem é (mst_{TGG_off}): fluxo na turbina geradora de gases igual ao fluxo de choque;

- Quando $msn_{TGG_CHOQUE_off} = 2$, a mensagem é (mst_{TGG_off}): fluxo na turbina geradora de gases acima do fluxo de choque, diminuir valor de $\overline{fc_{C_off}}$. Caso a diminuição de $\overline{fc_{C_off}}$ não implique em fluxo de corrigido abaixo do fluxo de choque, deverá ser feita alteração no valor de $\overline{rp_{C_off}}$.

Genericamente, a sub-rotina é expressa como:

$$mst_{TGG_off} = tgg_off(msn_{TGG_CHOQUE_off})$$

Todo o equacionamento utilizado pode ser verificado no anexo III.

4.2.18 Sub-Rotina tp_off

Esta sub-rotina é utilizada para retornar mensagem sobre o fluxo corrigido relativo ao fluxo corrigido de projeto para a turbina de potência, em relação ao fluxo de choque. Indica a necessidade de modificação no valor de $\overline{fc_{C_off}}$ (diminuição) ou alteração no valor da relação de pressão no compressor ($\overline{rp_{C_off}}$).

O dado de entrada é:

- Mensagem sobre o fluxo corrigido calculado, relativo ao de projeto, para turbina de potência em relação ao fluxo de choque ($msn_{TP_CHOQUE_off}$).

Como resultado fornece:

- Mensagem de texto:
 - Quando $msn_{TP_CHOQUE_off} = 0$, a mensagem é (mst_{TP_off}): fluxo na turbina de potência abaixo do fluxo de choque;
 - Quando $msn_{TGG_CHOQUE_off} = 1$, a mensagem é (mst_{TP_off}): fluxo na turbina de potência igual ao fluxo de choque;
 - Quando $msn_{TGG_CHOQUE_off} = 2$, a mensagem é (mst_{TP_off}): fluxo na turbina de potência acima do fluxo de choque, diminuir valor de $\overline{fc_{C_off}}$. Caso a diminuição de $\overline{fc_{C_off}}$ não

implique em fluxo de corrigido abaixo do fluxo de choque, deverá ser feita alteração no valor de $\overline{rp_{C_off}}$.

Genericamente, a sub-rotina é expressa como:

$$mst_{TP_off} = tp_off(msn_{TP_CHOQUE_off})$$

Todo o equacionamento utilizado pode ser verificado no anexo III.

4.3 Dados de Saída

4.3.1 Programa de Geração de Curvas de Desempenho de Compressores

Os dados de saída da parte do programa para geração de curvas de desempenho de Fluxo Corrigido X Relação de Pressão são:

- Coeficientes das curvas de velocidade corrigida;
- Coeficientes da curva da linha 'surge';
- Coeficientes da curva de limite inferior.

Os dados de saída da parte do programa para geração de curvas de desempenho de Fluxo Corrido X Eficiência são:

- Coeficientes das curvas de velocidade corrigida.

4.3.2 Programa de Geração de Curvas de Desempenho de Turbinas

Os dados de saída da parte do programa para geração de curvas de desempenho de Relação de Pressão X Fluxo Corrigido são:

- Coeficientes das curvas de velocidade corrigida.

Os dados de saída da parte do programa para geração de curvas de desempenho de Relação de Pressão X Eficiência são:

- Coeficientes das curvas de velocidade corrigida.

4.3.3 Programa Principal

Os principais dados de saída do programa estão abaixo relacionados e também indicados nas figuras 4.3 e 4.4:

- Pressões e temperaturas ao longo do ciclo, para condições de projeto e operação ‘off-design’ ($P_2, P_3, P_4, T_2, T_4, T_5, P_{2_off}, P_{3_off}, P_{4_off}, T_{2_off}, T_{4_off}, T_{5_off}$);
- Fluxos e velocidades corrigidos para operação nominal e ‘off-design’ ($f_{cC}, f_{cTGG}, f_{cTP}, n_{cC}, n_{cTGG}, n_{cTP}, f_{cC_off}, f_{cTGG_off}, f_{cTP_off}, n_{cC_off}, n_{cTGG_off}, n_{cTP_off}$);
- Relações de pressão para operação nominal e ‘off-design’ ($r_{pTGG}, r_{pTP}, r_{pC_off}, r_{pTGG_off}, r_{pTP_off}$);
- Eficiência isentrópicas do compressor e turbinas, de geração de gases e de potência, para operação ‘off-design’ ($\eta_{c_off}, \eta_{TGG_off}, \eta_{TP_off}$);
- Eficiência do ciclo para operação nominal e ‘off-design’ ($\eta_{CICLO}, \eta_{CICLO_off}$);
- Velocidades de rotação do compressor para operação ‘off-design’ (N_{c_off});
- Fluxos mássicos (ar, combustível e gases de combustão) para operação nominal e ‘off-design’ ($\dot{m}_{COMB}, \dot{m}_{GAS}, \dot{m}_{AR_off}, \dot{m}_{COMB_off}, \dot{m}_{GAS_off}$);
- Potências do compressor e do gerador (potência líquida gerada), para condições de projeto e operação ‘off-design’ ($W_C, W_G, W_{C_off}, W_{G_off}$);
- Potência térmica disponibilizada na câmara de combustão, para condições de projeto e operação ‘off-design’ (W_{CAM}, W_{CAM_off});
- Excesso de ar e, relação ar/combustível molar e mássica), para condições de projeto e operação ‘off-design’ ($exc_{AR}, AC_{molar}, AC_{mass}, exc_{AR_off}, AC_{molar_off}, AC_{mass_off}$);
- Consumo específico de combustível e potência específica líquida gerada para operação nominal e ‘off-design’ ($\dot{W}_G, \dot{m}_{COMB}, \dot{W}_{G_off}, \dot{m}_{COMB_off}$);

- Mensagens de texto que indicam a situação de pontos escolhidos para operação 'off-design' aceitáveis, ou a necessidade de nova escolha de pontos (mst_{C_off} , mst_{TGG_off} , mst_{TP_off}).

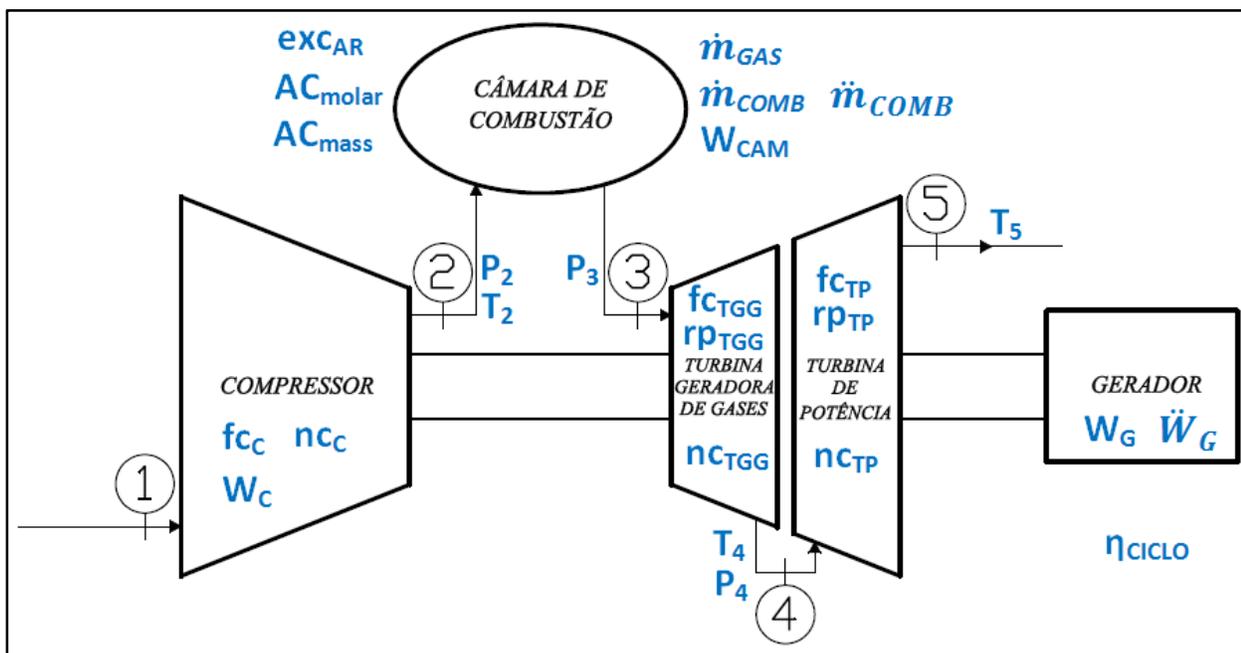


Figura 4.3 – Representação dos dados de saída nominais para Turbina a Gás do Ciclo Termodinâmico a Gás Modelado

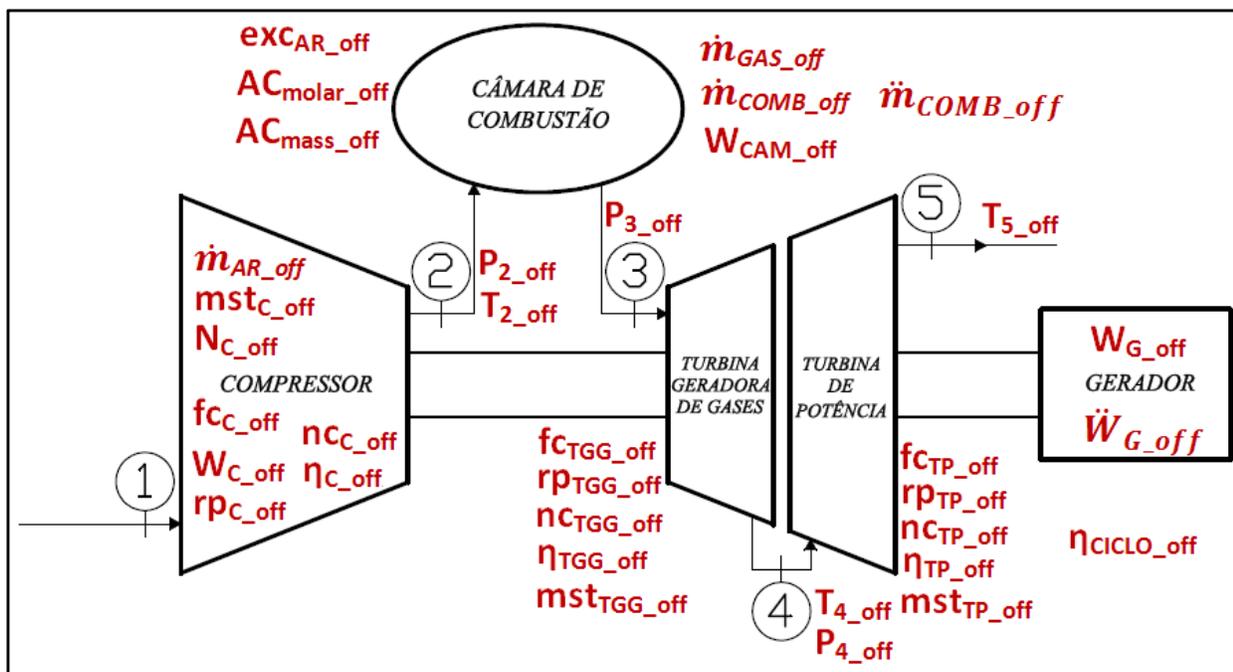


Figura 4.4 – Representação dos dados de saída 'off-design' para Turbina a Gás do Ciclo Termodinâmico a Gás Modelado

Todo o equacionamento utilizado, incluindo a chamada das sub-rotinas descritas anteriormente, pode ser verificado no anexo III.

Capítulo 5

Estudo de Caso

O estudo de caso consistiu na simulação de uma turbina a gás axial genérica cujos mapas de desempenho do compressor e da turbina foram extraídos das referências citadas nos capítulos anteriores (Cohen, Rogers e Saravanamuttoo, 1996; Kurzke, 2003).

Os dados de entrada foram estimados conforme exemplo numérico apresentado por Cohen, Rogers e Saravanamuttoo (1996). Foi feita comparação dos resultados de operação ‘off-design’ do exemplo citado com os resultados obtidos segundo mapas de desempenho gerados pelos programas aqui desenvolvidos. Também foram avaliados os resultados de operação ‘off-design’ quando os principais dados de entrada do programa são variados individualmente.

5.1 Representação da Turbina a Gás em Estudo

A turbina a gás em estudo é a mesma apresentada no arranjo da figura 3.13, ou seja, uma turbina a gás axial de dois eixos e ciclo simples.

5.2 Geração de Curvas para Compressor

A curva de desempenho do compressor genérico foi traçada a partir da escolha de pontos do mapa da referência (Cohen, Rogers e Saravanamuttoo, 1996). Os valores dados no mapa da referência foram divididos pelo valor lido no ponto que representa as condições nominais de operação.

A tabela 1 representa pontos lidos no mapa da figura 3.1, divididos pelo valor lido como nominal. Neste estudo de caso, o valor nominal assumido no mapa da figura 3.1 foi de 0,8 para o fluxo corrigido relativo ao de projeto, 2,63 para a razão de pressão e 0,8 para velocidade.

Tabela 5.1 – Pontos Escolhidos no Mapa de Desempenho da Figura 3.1

Fluxo Corrigido	Razão de Pressão	Velocidade Corrigida
0,430410669	0,631867658	0,625
0,521523835	0,588130931	
0,647299617	0,405106516	
0,563911264	0,753227227	0,75
0,703354021	0,668117919	
0,798230556	0,483517406	
0,712069193	0,920490659	0,875
0,849729301	0,829865007	
0,935296448	0,609408258	
0,879242044	1,135825089	1
1	1	
1,046216823	0,818241282	
1,055526212	1,387409780	1,125
1,143668295	1,282599243	
1,179915489	1,180349866	
1,212399313	1,637221361	1,25
1,242506272	1,586589203	
1,276970817	1,425236139	
0,081407632	0,423625671	surge
0,563911264	0,753227227	
1,055526212	1,387409780	
1,298956820	1,779661244	
0,647299617	0,405106516	limite inferior
0,798230556	0,483517406	
1,195761257	1,060763408	
1,282714908	1,303876570	

O programa desenvolvido para geração das curvas de desempenho do compressor fez uso dos pontos dados na tabela 5.1 para gerar os coeficientes das curvas da figura 3.1, resultando na representação apresentada na figura 5.1.

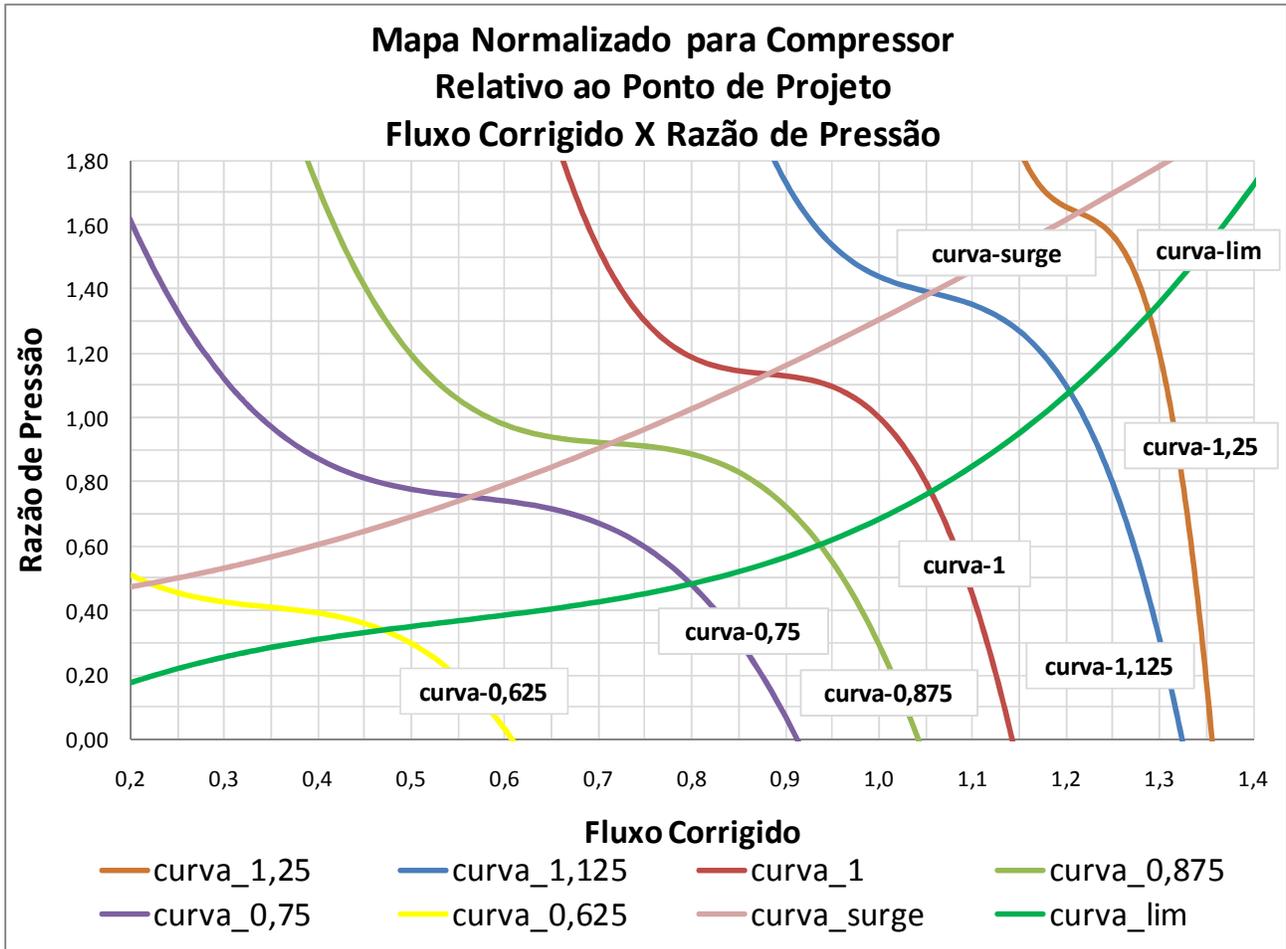


Figura 5.1 – Mapa de Compressor Genérico (Fluxo Corrigido x Razão de Pressão)

Nota-se que as curvas ultrapassam a região útil do mapa genérico de compressor. No entanto, a delimitação é definida da mesma forma como ilustrada na figura 3.3.

A tabela 5.2 representa pontos lidos no mapa da figura 3.2, divididos pelo valor lido como nominal. Neste estudo de caso, o valor nominal assumido no mapa da figura 3.1 foi de 0,8 para o fluxo corrigido, de 89,30% para a eficiência e 0,8 para velocidade.

Tabela 5.2 – Pontos Escolhidos no Mapa de Desempenho da Figura 3.2

Fluxo Corrigido	Eficiência	Velocidade Corrigida
0,462894494	0,951431623	0,625
0,525683349	0,998104747	
0,583916546	0,970567604	
0,63620758	0,82004678	
0,569853427	0,951431623	0,75
0,679189225	1,025408524	
0,732668691	1,000671769	
0,807143800	0,825414190	
0,707117391	0,981535788	0,875
0,816453189	1,028208911	
0,883995774	1,000671769	
0,951340288	0,877454722	
0,869932655	0,987136563	1
0,951340288	1,028208911	
1	1	
1,065429816	0,872087313	
1,053743563	0,989703585	1,125
1,107223029	1,019807749	
1,163079361	0,984336175	
1,19794005	0,872087313	
1,195563185	0,973367991	1,25
1,237554470	0,963566635	
1,253796382	0,949097967	
1,288657071	0,803711187	

O programa desenvolvido para geração das curvas de desempenho do compressor fez uso dos pontos dados na tabela 5.2 para gerar os coeficientes das curvas da figura 3.2, resultando na representação apresentada na figura 5.2.

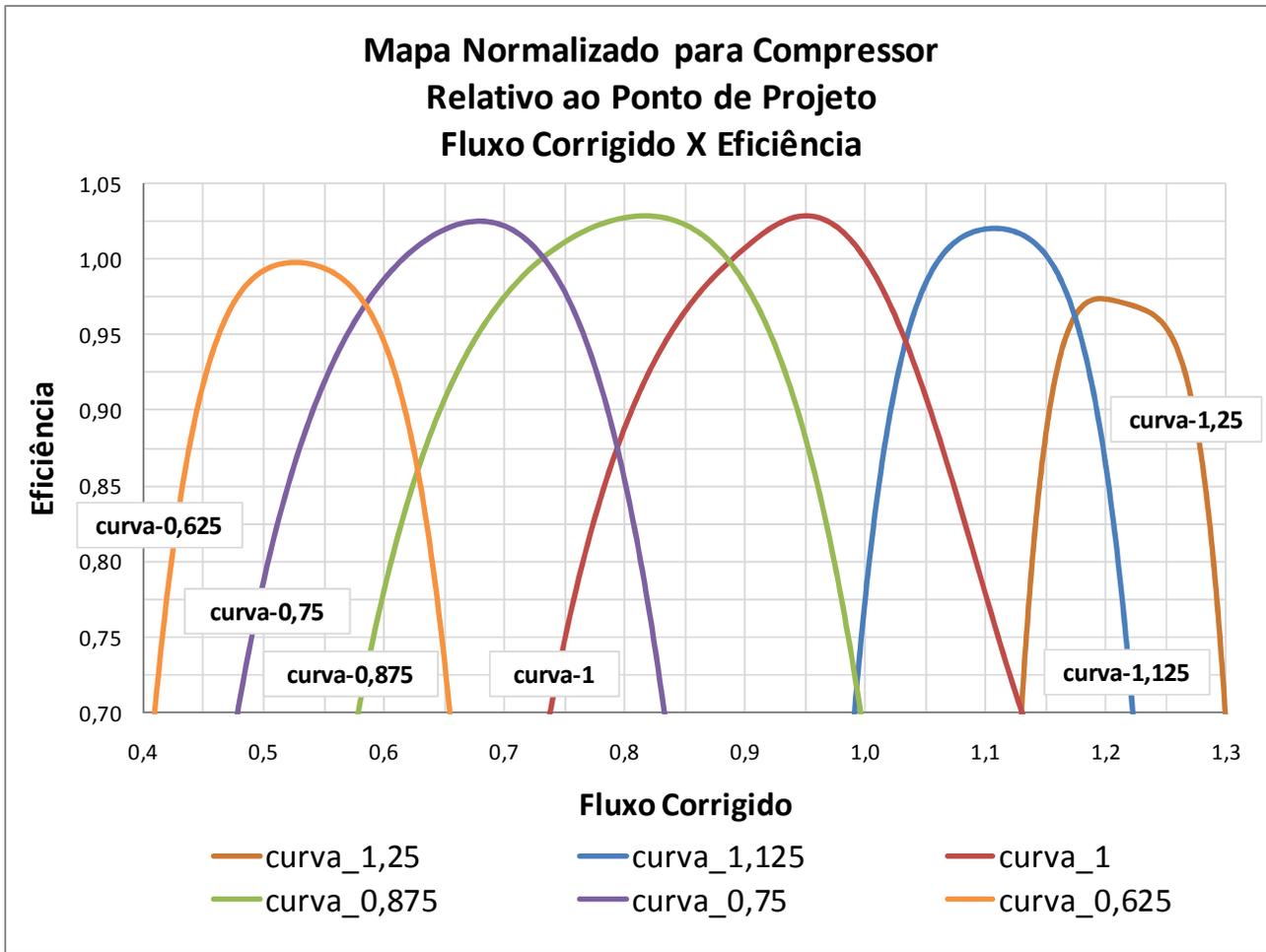


Figura 5.2 – Mapa de Compressor Genérico (Fluxo Corrigido x Eficiência)

Nota-se que as curvas ultrapassam a região útil do mapa genérico de compressor. No entanto, a delimitação é definida da mesma forma como ilustrada na figura 3.4.

Os coeficientes das curvas de desempenho do compressor foram obtidos pelo programa computacional desenvolvido para a geração de curvas de compressores (Anexo I), enquanto que os gráficos das figuras 5.1 e 5.2 foram gerados pelo software Excel (Microsoft Excel, 2007).

5.3 Geração de Curvas para Turbina

A curva de desempenho da turbina genérica foi traçada a partir da escolha de pontos do mapa da referência (Kurzke, 2003). Os valores dados no mapa da referência foram divididos pelo valor lido no ponto que representa as condições nominais de operação.

A tabela 5.3 representa pontos lidos no mapa da figura 3.5, divididos pelo valor lido como nominal. Neste estudo de caso, o valor nominal assumido no mapa da figura 3.5 foi de 1,31 para a relação de pressão, de 80,0% para o fluxo corrigido e 0,8 para velocidade.

Tabela 5.3 – Pontos Escolhidos no Mapa de Desempenho da Figura 3.5

Razão de Pressão	Fluxo Corrigido	Velocidade Corrigida
0,945671740	0,938846746	0,75
1,219615430	1,280346258	
1,889002761	1,401206838	
0,954191180	0,936872387	0,875
1,300083775	1,301755822	
2,200576415	1,403319023	
0,969757873	0,948202555	1
1,302630824	1,291436092	
2,447793518	1,401468708	
1,022472633	1,006624843	1,125
1,301126489	1,274523186	
2,669567041	1,396592312	
1,078666259	1,076082071	1,25
1,379756027	1,294045223	
2,386940868	1,395000000	

O programa desenvolvido para geração das curvas de desempenho do compressor fez uso dos pontos dados na tabela 5.3 para gerar os coeficientes das curvas da figura 3.5, resultando na representação apresentada na figura 5.3.

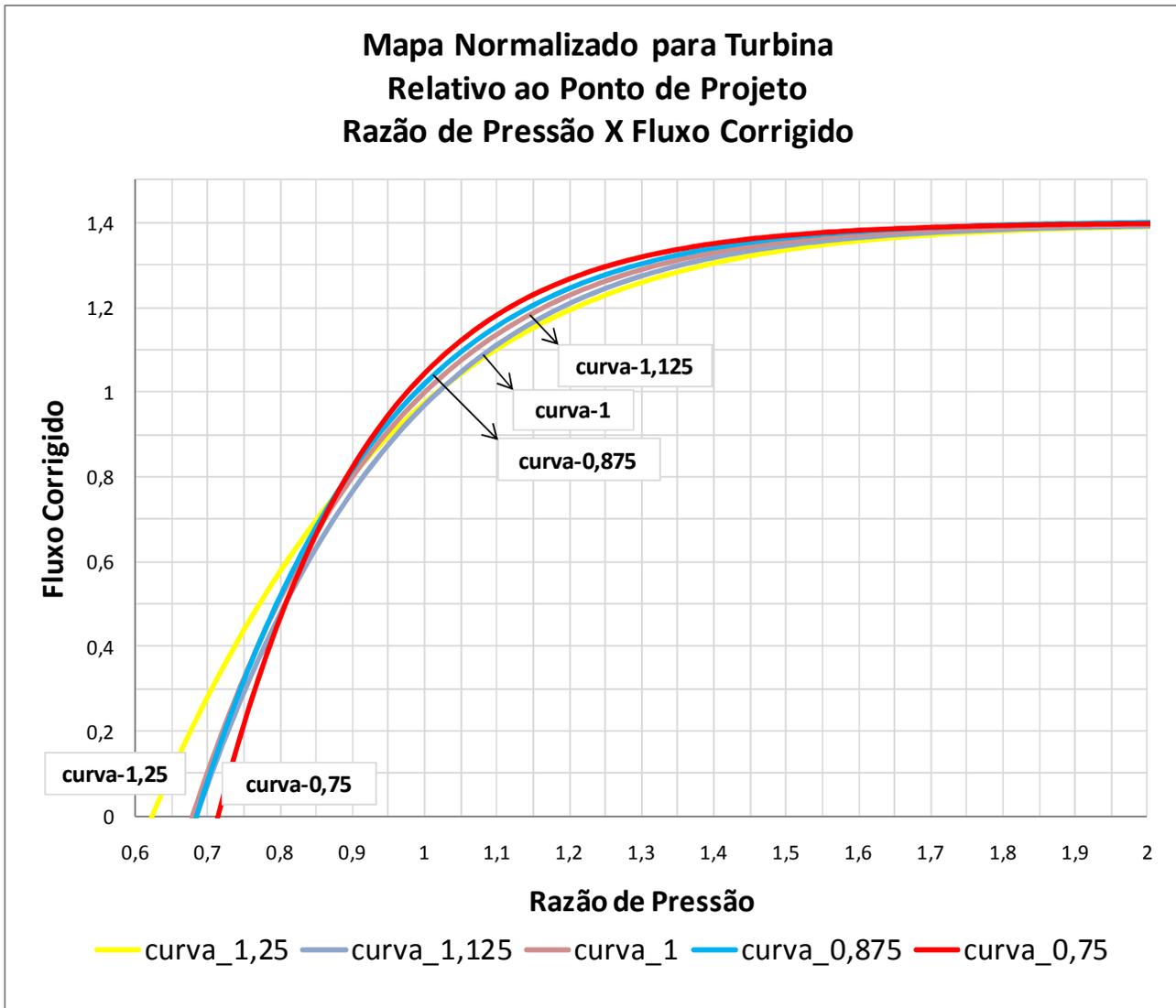


Figura 5.3 – Mapa de Turbina Genérica (Razão de Pressão x Fluxo Corrigido)

Nota-se que as curvas ultrapassam a região útil do mapa genérico da turbina. No entanto, a delimitação é definida da mesma forma como ilustrada na figura 3.7.

A tabela 5.4 representa pontos lidos no mapa da figura 3.6, divididos pelo valor lido como nominal. Neste estudo de caso, o valor nominal assumido no mapa da figura 3.6 foi de 1,31 para a relação de pressão, de 0,822 para a eficiência e 0,8 para velocidade.

Tabela 5.4 – Pontos Escolhidos no Mapa de Desempenho da Figura 3.6

Razão de Pressão	Eficiência	Velocidade Corrigida
0,931222278	1,080414115	0,75
0,978590330	1,103848808	
1,028269197	1,109324035	
1,081414286	1,102205962	
1,163827669	1,074500564	
1,370384535	1,011967528	
1,889228435	0,915429317	
0,938340175	1,019723289	0,875
0,967862242	1,049105570	
1,006242028	1,087162982	
1,136143029	1,114866296	
1,220775721	1,105631973	
1,526829409	1,047706546	
2,204909706	0,961551608	
0,962808706	0,947812832	1
1,041703403	1,053211643	
1,123576293	1,101043467	
1,278948725	1,124059981	
1,374962243	1,118345447	
1,844709250	1,067097685	
2,467593517	1,010024246	
1,010672816	0,888244909	1,125
1,133197463	1,039566807	
1,270257458	1,113936240	
1,378185853	1,125795577	
1,531919822	1,130462973	
2,028244615	1,101541407	
2,663707123	1,056093107	
1,067183701	0,841735148	1,25
1,241035371	1,038556470	
1,342234663	1,091472257	
1,484948357	1,123092967	
1,709996540	1,136859468	
2,247176223	1,122108624	
2,791069346	1,090936760	

O programa desenvolvido para geração das curvas de desempenho do compressor fez uso dos pontos dados na tabela 5.4 para gerar os coeficientes das curvas da figura 3.6, resultando na representação apresentada na figura 5.4.

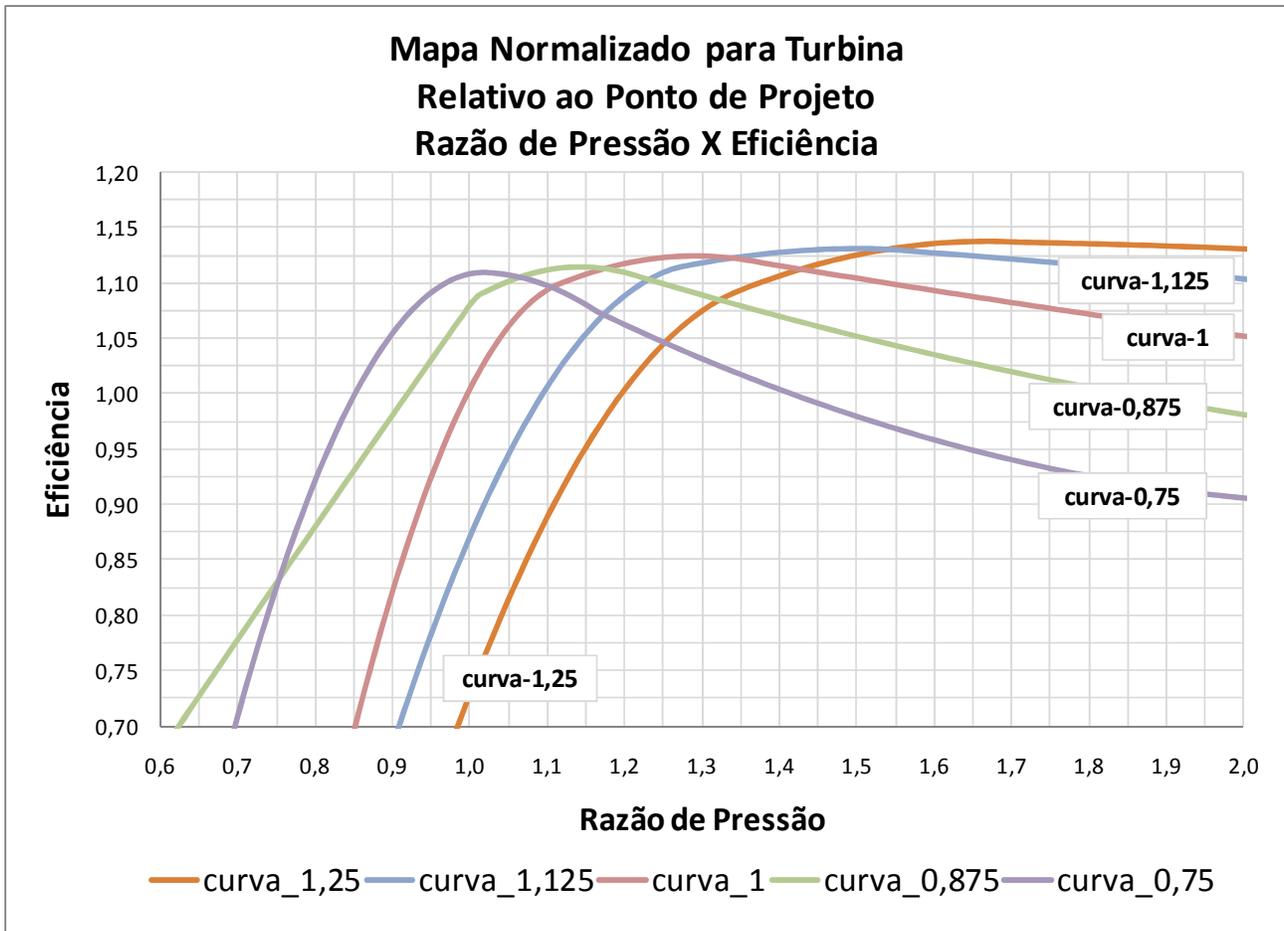


Figura 5.4 – Mapa de Turbina Genérica (Razão de Pressão x Eficiência)

Nota-se que as curvas ultrapassam a região útil do mapa genérico da turbina. No entanto, a delimitação é definida da mesma forma como ilustrada na figura 3.8.

Os coeficientes das curvas de desempenho da turbina foram obtidos pelo programa computacional desenvolvido para a geração de curvas de turbinas (Anexo II), enquanto que os gráficos das figuras 5.3 e 5.4 foram gerados pelo software Excel (Microsoft Excel, 2007).

5.4 Simulação do Programa Principal

Foram dois os casos simulados:

5.4.1 Caso 1

Consistiu na utilização dos dados de entrada apresentados no exercício numérico do capítulo 8 de Cohen, Rogers e Saravanamuttoo (1996). Os resultados obtidos pela simulação foram comparados aos resultados apresentados pelo exercício desta referência.

5.4.2 Caso 2

Consistiu na utilização dos dados de entrada apresentados no exercício numérico do capítulo 8 de Cohen, Rogers e Saravanamuttoo (1996), exceto alguns dos dados de operação ‘off-design’ (T_{1_off} , rp_{C_off} , T_{3_off} , fc_{C_off} , P_{1_off}), que foram variados individualmente. Os resultados obtidos para cada um destes parâmetros, quando variados individualmente, foram avaliados em relação aos resultados para operação nominal.

5.5 Dados do Programa Principal

A seguir são apresentados os dados de entrada utilizados no estudo de caso. As representações apresentadas nas figuras 4.1 e 4.2 servem como orientação para a localização das variáveis informadas como dados de entrada nominais e ‘off-design’.

5.5.1 *Dados Nominais*

Os dados nominais ou condições de projeto da turbina axial dada pela referência são:

- Pressão do ar ambiente: $P_1 = 1,01$ [bar];
- Temperatura do ar ambiente: $T_1 = 288$ [K];
- Vazão mássica no compressor: $\dot{m}_C = 30$ [kg/s];
- Relação de pressões no compressor ou razão de compressão: $rp_C = 6$;
- Eficiência isentrópica no compressor: $\eta_C = 0,84$;
- Queda de pressão no combustor: $\Delta P_{CAM} = 0,2$ [bar];
- Eficiência da câmara de combustão: $\eta_{CAM} = 0,99$;
- Composição do Ar: $f_{AR_N2} = 0,79$; $f_{AR_O2} = 0,21$; $f_{AR_CO2} = 0$; $f_{AR_Arg} = 0$;
- Composição do Combustível: $f_{COMB_CH4} = 0,86$; $f_{COMB_C2H6} = 0,08$; $f_{COMB_C3H8} = 0,03$;
 $f_{COMB_CO2} = 0,02$; $f_{COMB_N2} = 0,01$;
- Temperatura na entrada da turbina: $T_3 = 1200$ [K];
- Eficiência isentrópica da turbina geradora de gases: $\eta_{TGG} = 0,87$;
- Eficiência mecânica da transmissão entre compressor e turbina geradora de gases:
 $\eta_{M_C_TGG} = 0,99$;
- Pressão de saída da turbina de potência: $P_5 = 1,01$ [bar];
- Eficiência isentrópica da turbina de potência: $\eta_{TP} = 0,87$;
- Eficiência mecânica da turbina de potência, na transmissão com o gerador: $\eta_{M_TP_G} = 0,99$;
- Velocidade de rotação do compressor: $N_C = 3600$ [RPM];
- Velocidade de rotação na turbina de potência $N_G = 3600$ [RPM].

5.5.2 *Dados ‘Off-Design’*

Os dados de operação fora das condições de projeto, ou dados ‘off-design’ são:

- Pressão do ar ambiente: $P_{1_off} = 1,01$ [bar];
- Temperatura do ar ambiente: $T_{1_off} = 268$ [K];

- Queda de pressão no combustor: $\Delta P_{CAM_off} = 0,2$ [bar];
- Eficiência da câmara de combustão: $\eta_{CAM_off} = 0,99$;
- Composição do Ar: $f_{AR_N2_off} = 0,79$; $f_{AR_O2_off} = 0,21$; $f_{AR_CO2_off} = 0$; $f_{AR_Arg_off} = 0$;
- Composição do Combustível: $f_{COMB_CH4_off} = 0,86$; $f_{COMB_C2H6_off} = 0,08$; $f_{COMB_C3H8_off} = 0,03$;
 $f_{COMB_CO2_off} = 0,02$; $f_{COMB_N2_off} = 0,01$;
- Temperatura na entrada da turbina: $T_{3_off} = 1163$ [K];
- Eficiência mecânica da transmissão entre compressor e turbina geradora de gases:
 $\eta_{M_C_TGG_off} = 0,99$;
- Pressão de saída da turbina de potência: $P_{5_off} = 1,01$ [bar];
- Eficiência mecânica da turbina de potência: $\eta_{M_TP_G_off} = 0,99$;
- Velocidade de rotação na turbina de potência, na transmissão com o gerador:
 $N_{G_off} = 3600$ [RPM];
- Ponto de operação escolhido no mapa de desempenho do compressor: $\overline{fc}_{C_off} = 1,05$ e
 $\overline{rp}_{C_off} = 1,07$.

5.6 Caso 1 - Resultados e Análise

5.6.1 Resultados da Simulação

Os principais resultados obtidos após a simulação por meio do programa desenvolvido são dados a seguir. As representações apresentadas nas figuras 4.3 e 4.4 servem como orientação para a localização das variáveis informadas como dados de saída nominais e ‘off-design’.

Operação nas condições nominais ou de projeto:

$P_2 = 6,06$ [bar]	$T_4 = 1002$ [K]	$fc_C = 504,1$ [kg.K ^{0,5} /bar]
$P_3 = 5,86$ [bar]	$T_5 = 820,9$ [K]	$fc_{TGG} = 180,4$ [kg.K ^{0,5} /bar]
$P_4 = 2,52$ [bar]	$W_C = 6906$ [kW]	$fc_{TP} = 383,8$ [kg.K ^{0,5} /bar]
$T_2 = 514,8$ [K]	$W_G = 6166$ [kW]	$\dot{m}_{COMB} = 0,52$ [kg/s]

$$\begin{aligned} \dot{m}_{GAS} &= 30,52 \text{ [kg/s]} & \ddot{W}_G &= 11.940 \text{ [kW / kg/s]} \\ \dot{m}_{COMB} &= 8,38 \cdot 10^{-5} & \eta_{CICLO} &= 0,2630 \\ & \text{[kg/s / kW]} & & \end{aligned}$$

Operação 'off-design':

$$\begin{aligned} P_{2_off} &= 6,48 \text{ [bar]} & \eta_{TP_off} &= 0,874 & \dot{m}_{COMB_off} &= 0,53 \text{ [kg/s]} \\ P_{3_off} &= 6,28 \text{ [bar]} & N_{c_off} &= 3596 \text{ [RPM]} & \dot{m}_{GAS_off} &= 33,18 \text{ [kg/s]} \\ P_{4_off} &= 2,57 \text{ [bar]} & W_{C_off} &= 7882 \text{ [kW]} & \dot{m}_{COMB_off} &= 8,19 \cdot 10^{-5} \\ T_{2_off} &= 506,2 \text{ [K]} & W_{G_off} &= 6534 \text{ [kW]} & & \text{[kg/s / kW]} \\ T_{4_off} &= 954,6 \text{ [K]} & fc_{C_off} &= 529,3 \text{ [kg.K}^{0,5}\text{/bar]} & \ddot{W}_{G_off} &= 12.218 \text{ [kW/ kg/s]} \\ T_{5_off} &= 775,9 \text{ [K]} & fc_{TGG_off} &= 180,1 \text{ [kg.K}^{0,5}\text{/bar]} & \eta_{CICLO_off} &= 0,2685 \\ \eta_{C_off} &= 0,782 & fc_{TP_off} &= 399,1 \text{ [kg.K}^{0,5}\text{/bar]} & & \\ \eta_{TGG_off} &= 0,896 & \dot{m}_{C_off} &= 32,65 \text{ [kg/s]} & & \end{aligned}$$

Mensagens de texto:

mst_{C_off} \$ = 'ponto escolhido está na região útil do mapa do compressor'

mst_{TGG_off} \$ = 'fluxo na turbina geradora de gases abaixo do fluxo de choque'

mst_{TP_off} \$ = 'fluxo na turbina de potência abaixo do fluxo de choque'

5.6.2 Análise

Os resultados apresentados em 5.6.1 foram comparados com resultados dados no exercício numérico do capítulo 8 de Cohen, Rogers e Saravanamuttoo (1996). Neste exercício numérico, os principais resultados indicados foram:

Operação nas condições nominais ou de projeto:

$$\begin{aligned} P_2 &= 6,06 \text{ [bar]} & T_5 &= 823,5 \text{ [K]} & fc_{TP} &= 383,5 \text{ [kg.K}^{0,5}\text{/bar]} \\ P_3 &= 5,86 \text{ [bar]} & W_C &\text{ não indicada} & \dot{m}_{COMB} &= 0 \text{ [kg/s]} \\ P_4 &= 2,47 \text{ [bar]} & W_G &= 5910 \text{ [kW]} & \dot{m}_{GAS} &= 30 \text{ [kg/s]} \\ T_2 &\text{ não indicada} & fc_C &= 504,1 \text{ [kg.K}^{0,5}\text{/bar]} & \dot{m}_{COMB} &\text{ não aplicável} \\ T_4 &= 997 \text{ [K]} & fc_{TGG} &= 177,4 \text{ [kg.K}^{0,5}\text{/bar]} & \ddot{W}_G &\text{ não aplicável} \end{aligned}$$

η_{CICLO} não indicada

Operação ‘off-design’:

$P_{2_off} = 6,47$ [bar]	$\eta_{\text{TGG_off}} = 0,870$	$f_{\text{C}_{\text{TP_off}}} = 383,5$ [kg.K ^{0,5} /bar]
$P_{3_off} = 6,27$ [bar]	$\eta_{\text{TP_off}} = 0,870$	$\dot{m}_{\text{C_off}} = 32,65$ [kg/s]
$P_{4_off} = 2,64$ [bar]	$N_{\text{C_off}}$ não indicada	$\dot{m}_{\text{COMB_off}} = 0$ [kg/s]
$T_{2_off} = 489,9$ [K]	$W_{\text{C_off}}$ não indicada	$\dot{m}_{\text{GAS_off}} = 32,65$ [kg/s]
$T_{4_off} = 966,5$ [K]	$W_{\text{G_off}} = 6680$ [kW]	$\dot{m}_{\text{COMB_off}}$ não aplicável
$T_{5_off} = 786,9$ [K]	$f_{\text{C}_{\text{C_off}}} = 529,5$ [kg.K ^{0,5} /bar]	$\dot{W}_{\text{G_off}}$ não aplicável
$\eta_{\text{C_off}} = 0,845$	$f_{\text{C}_{\text{TGG_off}}} = 177,4$ [kg.K ^{0,5} /bar]	$\eta_{\text{CICLO_off}}$ não indicada

Mensagens de texto:

Ponto ‘off-design’ de operação do compressor dentro de sua região útil.

Turbina geradora de gases e de potência operando na condição de choque.

As grandes diferenças encontradas na comparação entre os resultados apresentados pelo exemplo da literatura em relação aos resultados obtidos com a simulação são justificadas pelos seguintes fatos:

- Os mapas de desempenho dos compressores e turbinas apresentam tendências de comportamento distintas em cada caso;
- O exemplo da literatura não considera acréscimo de combustível ao fluxo de ar comprimido;
- O exemplo da literatura calcula potências a partir da variação de temperaturas multiplicada por valores fixos de calor específico, o que representa uma aproximação com erros consideráveis.

Diante do exposto e da limitação do exemplo comparativo da literatura, a aplicabilidade da simulação, comparativamente a este exemplo, não foi satisfatória.

5.7 Caso 2 - Análise de Resultados para Variação de Dados ‘Off-Design’

Nesta análise de resultados, os principais dados de entrada para operação ‘off-design’ foram variados ao longo de uma determinada faixa. Dessa forma buscou-se representar possíveis condições reais de operação de uma turbina a gás para geração de energia elétrica. Os resultados obtidos estão apresentados no item 5.8. As representações apresentadas nas figuras 4.3 e 4.4 servem como orientação para a localização das variáveis informadas como dados de saída nominais e ‘off-design’.

Os dados de entrada ‘off-design’ variados individualmente para cada caso foram:

- Temperatura na entrada do compressor (T_{1_off});
- Relação de pressão no compressor, relativa à relação de pressão de projeto ($\overline{rp_{C_off}}$);
- Temperatura na entrada da turbina geradora de gases (T_{3_off});
- Fluxo corrigido na entrada do compressor, relativo ao fluxo corrigido de projeto ($\overline{f_{C_off}}$);
- Pressão de entrada do compressor (P_{1_off}).

Os resultados obtidos estão apresentados nas tabelas 5.5 a 5.9 e figuras 5.5 a 5.14, e descritos no item 5.8. Para a análise, foram considerados os seguintes dados, os quais representam os mais relevantes dados de saída na operação de turbinas:

- Fluxo mássico de ar no compressor (\dot{m}_C em kg/s);
- Fluxo mássico de combustível (\dot{m}_{COMB} em kg/s);
- Eficiência do compressor (η_C);
- Eficiência da turbina geradora de gases (η_{TGG});
- Eficiência da turbina de potência (η_{TP});
- Eficiência térmica do ciclo (η_{CICLO});
- Velocidade do eixo do compressor (N_C em RPM);
- Relação de pressão na turbina geradora de gases (rp_{TGG});
- Relação de pressão na turbina de potência (rp_{TP});
- Potência do compressor (W_C em kW);
- Potência líquida (W_G em kW);
- Consumo específico de combustível (\dot{m}_{COMB} em kg/s / kW);

- Potência específica (\dot{W}_G em kW / kg/s);
- Ponto de operação do compressor: o resultado OK indica que o ponto de operação escolhido encontra-se dentro da região útil do mapa do compressor; o resultado NOK indica que o ponto escolhido não se encontra dentro da região útil do mapa do compressor e, conseqüentemente, os demais resultados devem ser desconsiderados;
- Choque na turbina geradora de gases: o resultado OK indica que o ponto de operação escolhido resulta em fluxo corrigido na turbina igual ou abaixo do fluxo de choque; o resultado NOK indica que o ponto de operação escolhido resulta em fluxo corrigido na turbina acima do fluxo de choque e, conseqüentemente, os demais resultados devem ser desconsiderados;
- Choque na turbina de potência: a avaliação dos resultados é a mesma descrita para a turbina geradora de gases.

É importante salientar que as avaliações dos resultados obtidos não representam tendências gerais de comportamento de turbinas a gás, pois são referentes a máquinas cujos mapas de desempenho são similares aos gerados neste estudo. Ou seja, os resultados poderão ser afetados quando forem utilizados mapas de desempenho distintos dos utilizados neste estudo.

Os resultados devem sempre ser analisados para cada tipo de máquina estudada, a qual o programa é capaz de gerar mapas de desempenho específicos. O objetivo das análises feitas a seguir foi mostrar como o exemplo ilustrado se comporta diante de variações dos mais importantes dados de entrada 'off-design'.

5.8 Variações dos Dados de Operação ‘Off-Design’

5.8.1 *Variação da Temperatura na Entrada do Compressor*

Esta simulação consistiu em variar somente a temperatura ‘off-design’ de entrada do compressor, mantendo os demais dados de entrada iguais aos dados nominais (‘design’) de operação apresentados no item 5.5.

A tabela 5.5 apresenta resultados obtidos na operação ‘off-design’ para diferentes valores de temperatura na entrada do compressor (valores entre 258K e 318K), incluindo ainda resultados obtidos para operação nas condições de projeto. As figuras 5.5 e 5.6 ilustram graficamente os resultados dados na tabela 5.5, representando-os como variação percentual em relação ao resultado para operação nominal.

Observa-se a melhora no desempenho global da turbina quando há diminuição na temperatura na entrada do compressor (aumento do rendimento térmico do ciclo). A explicação é baseada principalmente no menor gasto de energia na compressão de ar, devido à diminuição do volume específico do ar comprimido. Embora o rendimento da turbina geradora de gases mostre uma queda, a maior queda na necessidade de potência de compressão compensou este fato. Já o rendimento da turbina de potência elevou-se com a redução da temperatura de entrada no compressor, resultando em maior potência líquida gerada, a qual também foi acrescida devido ao aumento no fluxo mássico nas turbinas (fluxo de ar somado ao fluxo de combustível). Já o rendimento do compressor manteve-se constante, pois sua eficiência é definida pelo fluxo corrigido e relação de pressão relativos ao de projeto, os quais mantiveram-se inalterados. Observa-se ainda que a menor necessidade de potência para acionamento do compressor resultou na diminuição da relação de pressão na turbina geradora de gases e no aumento na relação de pressão de pressão na turbina de potência e conseqüente aumento da potência líquida gerada.

A rotação do compressor também foi influenciada: menores temperaturas na entrada do compressor requerem menores rotações.

O consumo de combustível por kW de potência líquida gerada (consumo específico de combustível) diminuiu com a diminuição da temperatura. Inversamente, o kW de potência líquida gerada pelo consumo de combustível (potência específica) aumentou com a diminuição da temperatura. Para incrementos de temperatura, o comportamento foi inverso ao descrito acima.

Nota-se ainda que nenhum dos pontos de operação simulados está fora da região útil do mapa de desempenho do compressor, nem resulta em fluxo corrigido acima do fluxo de choque nas turbinas.

Tabela 5.5 – Resultados para Variação na Temperatura de Entrada do Compressor

Resultados Variação da Temperatura na Entrada do Compressor T₁ (K)	Off-Design						Design	Off-Design					
	258	263	268	273	278	283	288	293	298	303	308	313	318
Fluxo Mássico no Compressor (kg/s)	31,70	31,39	31,10	30,81	30,53	30,26	30,00	29,74	29,49	29,25	29,01	28,78	28,55
Fluxo Mássico de Combustível (kg/s)	0,59	0,58	0,57	0,55	0,54	0,53	0,52	0,51	0,50	0,49	0,48	0,47	0,46
Eficiência do Compressor	83,84%	83,84%	83,84%	83,84%	83,84%	83,84%	83,84%	83,84%	83,84%	83,84%	83,84%	83,84%	83,84%
Eficiência na Turbina Geradora de Gases	81,81%	82,78%	83,73%	84,66%	85,57%	86,46%	87,32%	88,17%	88,99%	89,78%	90,55%	91,29%	92,00%
Eficiência na Turbina de Potência	92,16%	91,54%	90,86%	90,13%	89,35%	88,50%	87,59%	86,56%	85,46%	84,31%	83,09%	81,80%	80,44%
Eficiência Térmica do Ciclo	26,95%	26,80%	26,63%	26,45%	26,25%	26,03%	25,79%	25,51%	25,21%	24,90%	24,55%	24,19%	23,80%
Velocidade do Eixo do Compressor (RPM)	3.401	3.433	3.466	3.498	3.530	3.562	3.593	3.624	3.655	3.685	3.716	3.746	3.775
Relação de Pressão na Turbina Geradora de Gases	2,23	2,24	2,26	2,27	2,29	2,31	2,32	2,34	2,36	2,38	2,39	2,41	2,43
Relação de Pressão na Turbina de Potência	2,60	2,59	2,57	2,55	2,53	2,52	2,50	2,48	2,46	2,44	2,42	2,40	2,39
Potência do Compressor (kW)	6.551	6.614	6.676	6.738	6.799	6.860	6.919	6.979	7.037	7.096	7.154	7.211	7.268
Potência Líquida (kW)	7.352	7.161	6.971	6.782	6.593	6.405	6.217	6.025	5.834	5.643	5.452	5.262	5.072
Consumo Específico de Combustível (kg/s / kW)	8,01E-05	8,05E-05	8,11E-05	8,16E-05	8,22E-05	8,29E-05	8,37E-05	8,46E-05	8,56E-05	8,67E-05	8,79E-05	8,92E-05	9,07E-05
Potência Específica (kW / kg/s)	12.486	12.416	12.338	12.253	12.160	12.059	11.947	11.819	11.681	11.533	11.375	11.206	11.026
Ponto de Operação do Compressor	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Choque na Turbina Geradora de Gases	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Choque na Turbina de Potência	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK

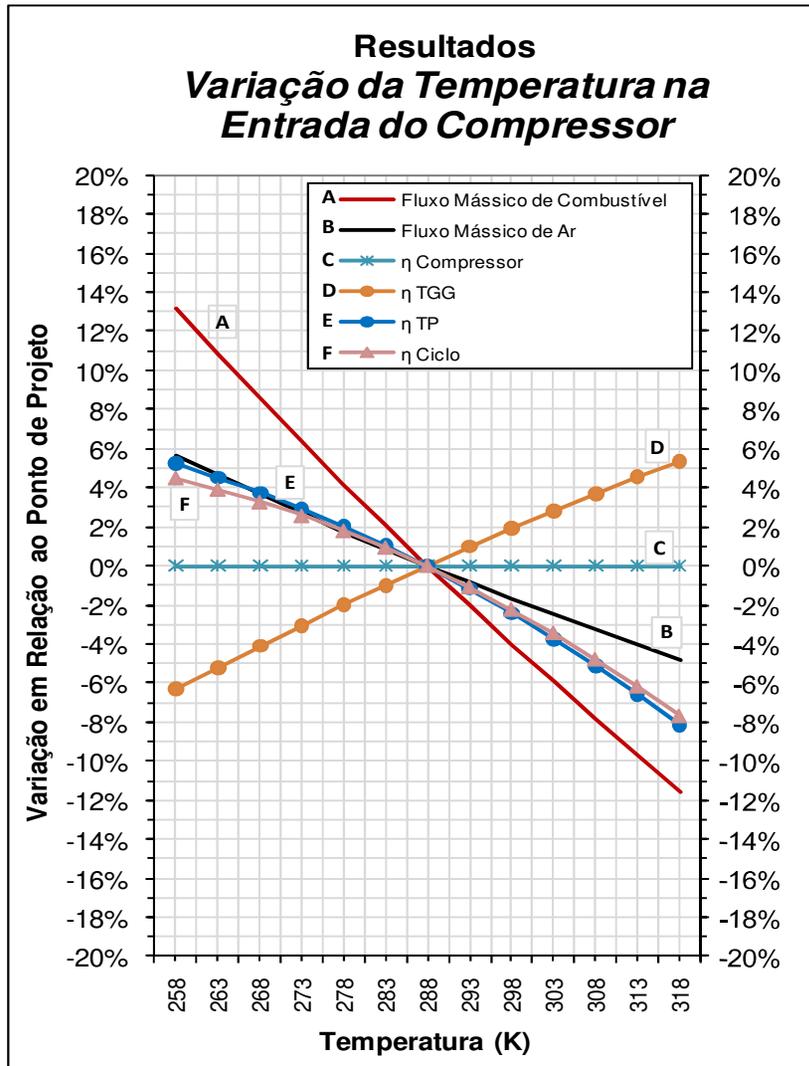


Figura 5.5 – Gráfico 1 para Variação Percentual de Variáveis em Relação à Operação Nominal, em Função da Variação da Temperatura na Entrada do Compressor

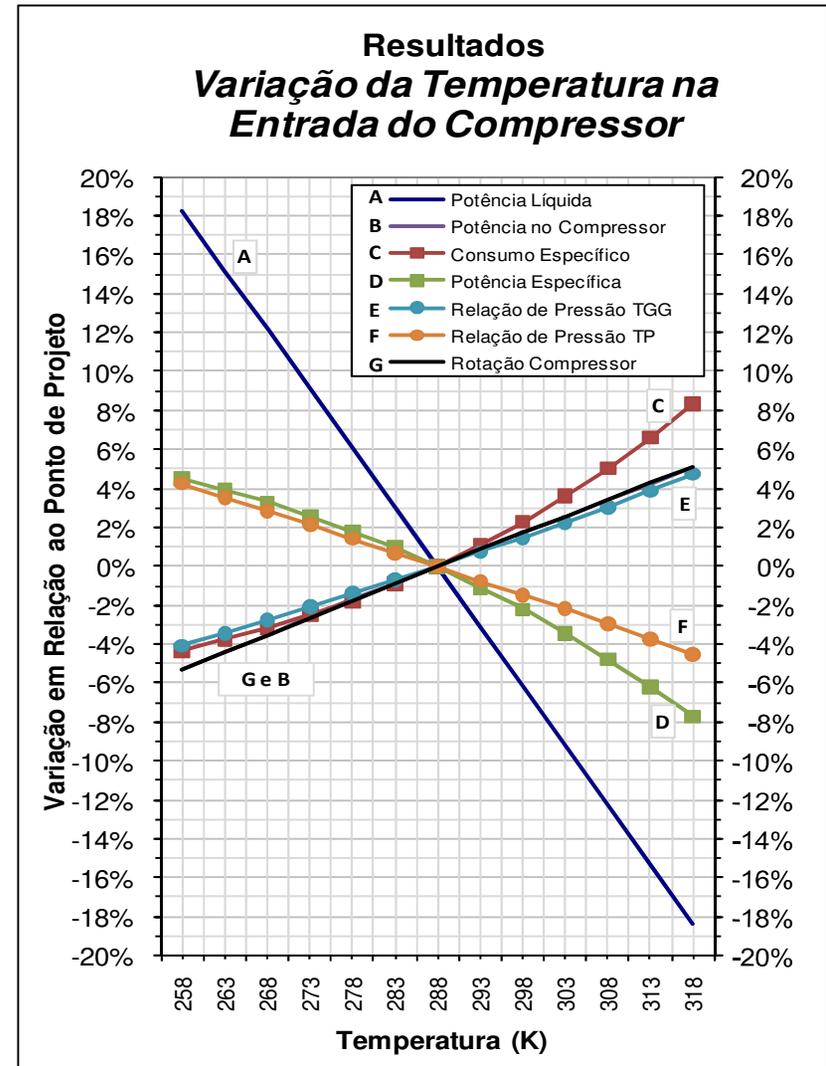


Figura 5.6 – Gráfico 2 para Variação Percentual de Variáveis em Relação à Operação Nominal, em Função da Variação da Temperatura na Entrada do Compressor

5.8.2 *Variação da Relação de Pressão no Compressor*

Esta simulação consistiu em variar somente a relação de pressão ‘off-design’ no compressor, relativa à relação de pressão de projeto, mantendo os demais dados de entrada ‘off-design’ iguais aos dados nominais de operação apresentados no item 5.5.

A tabela 5.6 apresenta resultados obtidos na operação ‘off-design’ para diferentes valores de relação de pressão no compressor (valores entre 0,7 e 1,3), relativos à relação de pressão de projeto, incluindo ainda resultados obtidos para operação nas condições de projeto. As figuras 5.7 e 5.8 ilustram graficamente os resultados dados na tabela 5.6, representando-os como variação percentual em relação ao resultado para operação nominal.

Observa-se a melhora no desempenho global da turbina quando a operação acontece a relações de pressão maiores que a relação de pressão de projeto (aumento do rendimento térmico do ciclo). A explicação é baseada principalmente no aumento da eficiência da turbina de potência. Embora o rendimento do compressor mostre uma queda, o aumento na eficiência da turbina geradora de gases compensou este fato. Outro resultado importante foi a redução do consumo de combustível com o aumento da relação de pressão, o que resultou em diminuição significativa do consumo específico e aumento significativo da potência específica.

A rotação do compressor também foi influenciada: menores relações de pressão no compressor requerem menores rotações. Para reduções da relação de pressão, o comportamento foi inverso ao descrito acima.

Nota-se ainda que nenhum dos pontos de operação simulados está fora da região útil do mapa de desempenho do compressor. Para relação de pressão mínima avaliada, o fluxo corrido na turbina geradora de gases está acima do fluxo de choque na turbina, o que descarta a operação da máquina para esta condição de entrada. Os fluxos corrigidos calculados para a turbina de potência não ultrapassaram o fluxo de choque. É importante observar que nos pontos de operação onde a eficiência da turbina de potência está abaixo de 65%, os cálculos feitos não podem ser considerados como satisfatórios, pois a eficiência calculada não traduz a realidade de operação da máquina.

Tabela 5.6 – Resultados para Variação da Relação de Pressão no Compressor

Resultados Variação da Relação de Pressão no Compressor $\overline{r_{PC}}$ (adimensional)	Off-Design						Design	Off-Design					
	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	1,05	1,10	1,15	1,20	1,25	1,30
Fluxo Mássico no Compressor (kg/s)	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
Fluxo Mássico de Combustível (kg/s)	0,55	0,54	0,54	0,53	0,53	0,52	0,52	0,51	0,51	0,50	0,49	0,48	0,47
Eficiência do Compressor	78,58%	79,33%	80,13%	80,97%	81,87%	82,82%	83,84%	83,22%	82,19%	81,04%	79,76%	78,36%	76,88%
Eficiência na Turbina Geradora de Gases	79,20%	80,99%	82,60%	84,04%	85,31%	86,40%	87,32%	88,93%	90,51%	91,90%	93,09%	94,28%	95,54%
Eficiência na Turbina de Potência	42,33%	51,99%	60,99%	69,17%	76,40%	82,57%	87,59%	90,19%	91,71%	92,55%	92,86%	92,88%	92,74%
Eficiência Térmica do Ciclo	8,93%	11,80%	14,76%	17,72%	20,60%	23,32%	25,79%	27,37%	28,52%	29,34%	29,86%	30,20%	30,45%
Velocidade do Eixo do Compressor (RPM)	3.363	3.396	3.431	3.468	3.507	3.548	3.593	3.633	3.676	3.724	3.778	3.836	3.898
Relação de Pressão na Turbina Geradora de Gases	2,10	2,15	2,19	2,23	2,26	2,29	2,32	2,38	2,44	2,51	2,60	2,69	2,79
Relação de Pressão na Turbina de Potência	1,91	2,01	2,10	2,20	2,30	2,40	2,50	2,57	2,62	2,67	2,69	2,71	2,72
Potência do Compressor (kW)	5.598	5.873	6.124	6.354	6.562	6.750	6.919	7.215	7.543	7.884	8.242	8.617	9.008
Potência Líquida (kW)	2.276	2.974	3.681	4.378	5.044	5.662	6.217	6.514	6.687	6.774	6.781	6.739	6.669
Consumo Específico de Combustível (kg/s / kW)	2,42E-04	1,83E-04	1,46E-04	1,22E-04	1,05E-04	9,26E-05	8,37E-05	7,89E-05	7,57E-05	7,36E-05	7,23E-05	7,15E-05	7,09E-05
Potência Específica (kW / kg/s)	4.135	5.465	6.837	8.210	9.544	10.802	11.947	12.682	13.212	13.593	13.834	13.993	14.109
Ponto de Operação do Compressor	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Choque na Turbina Geradora de Gases	NOK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Choque na Turbina de Potência	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK

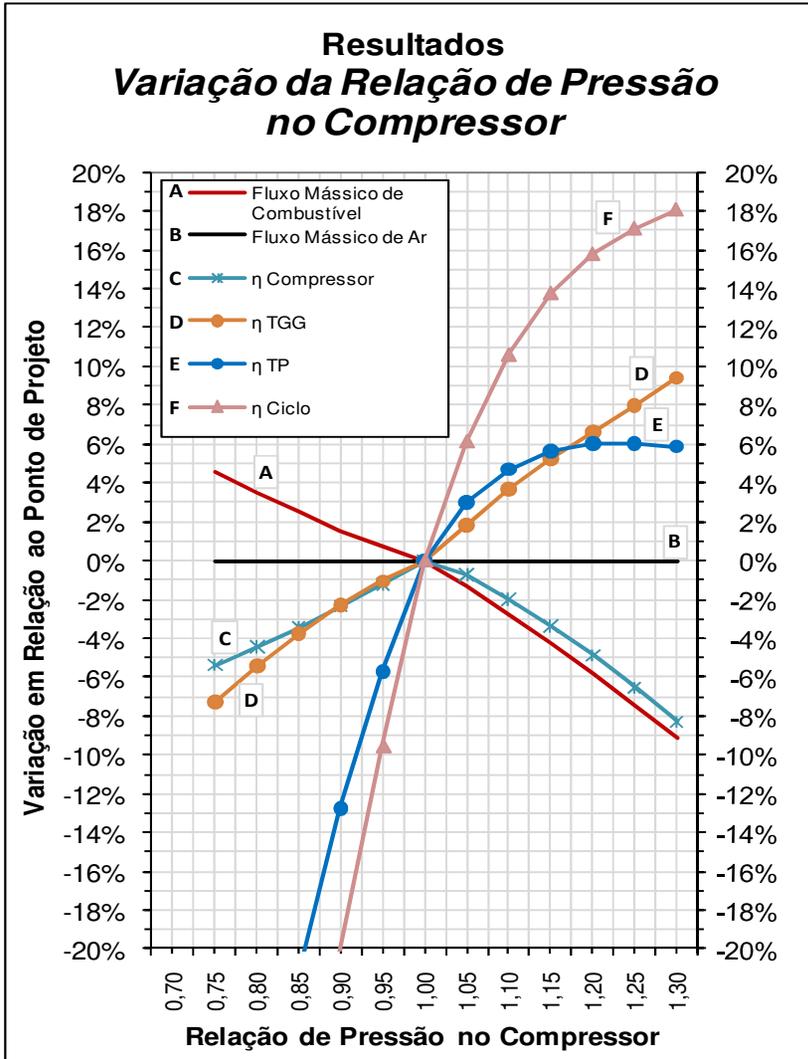


Figura 5.7 – Gráfico 1 para Variação Percentual de Variáveis em Relação à Operação Nominal, em Função da Variação da Relação de Pressão no Compressor

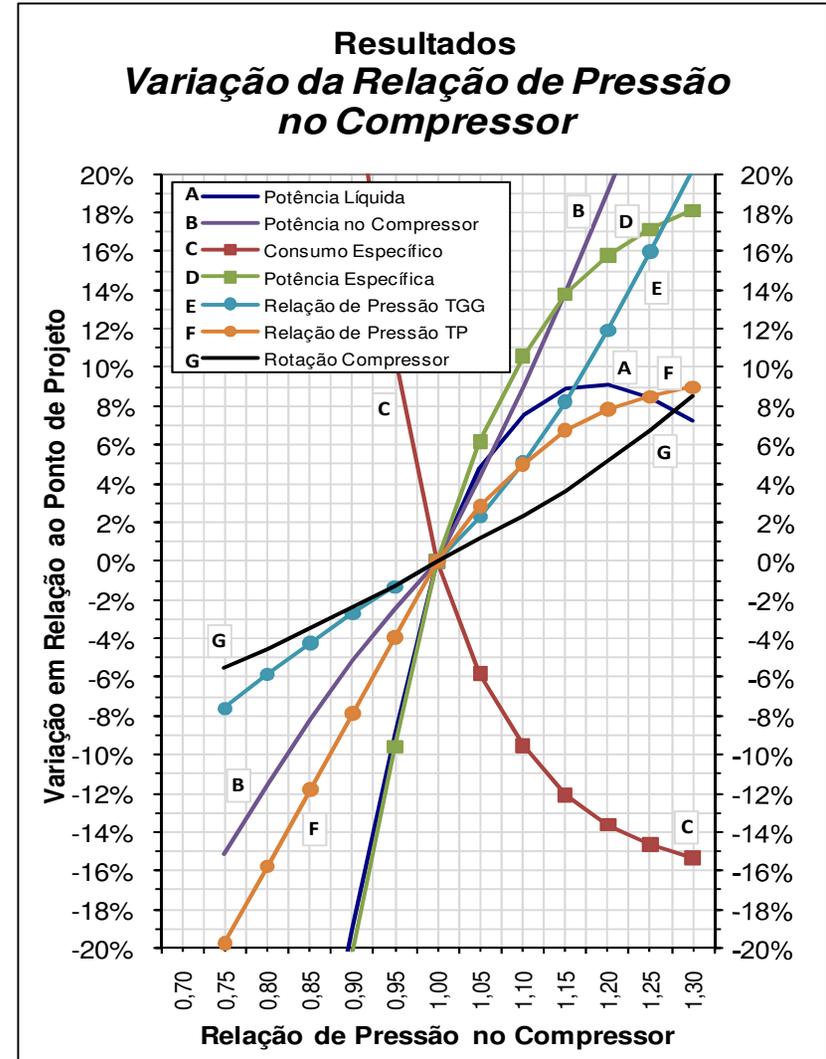


Figura 5.8 – Gráfico 2 para Variação Percentual de Variáveis em Relação à Operação Nominal, em Função da Variação da Relação de Pressão no Compressor

5.8.3 *Variação da Temperatura na Entrada da Turbina Geradora de Gases*

Esta simulação consistiu em variar somente a temperatura de entrada ‘off-design’ da turbina de potência, mantendo os demais dados de entrada ‘off-design’ iguais aos dados nominais de operação apresentados no item 5.5.

A tabela 5.7 apresenta resultados obtidos na operação ‘off-design’ para diferentes valores de temperatura na entrada da turbina geradora de gases (valores entre 1.100K e 1.800K), incluindo ainda resultados obtidos para operação nas condições de projeto. As figuras 5.9 e 5.10 ilustram graficamente os resultados dados na tabela 5.7, representando-os como variação percentual em relação ao resultado para operação nominal.

Observa-se a melhora no desempenho global da turbina quando a operação acontece com o aumento da temperatura até 1500 K. A partir de 1500 K, o rendimento térmico do ciclo diminui com o aumento da temperatura. Isso acontece pelo fato de que a partir desta temperatura a eficiência da turbina geradora de gases continua decrescendo, enquanto que a eficiência da turbina de potência se estabiliza. O aumento da temperatura também leva ao aumento do consumo de combustível. O comportamento do consumo específico é próximo ao comportamento da eficiência térmica. Diminui até a temperatura de 1300 K e volta a crescer a partir daí. O comportamento da potência específica é inverso ao comportamento do consumo específico.

Dada a manutenção das condições de entrada no compressor, seu fluxo mássico, sua eficiência e sua rotação permanecem constantes e aproximadamente iguais aos de projeto.

A relação de pressão nas turbinas acompanha a tendência de evolução das eficiências. Para a turbina geradora de gases, a relação de pressão decresce com o aumento de temperatura. Para a turbina de potência, a relação de pressão aumenta com o aumento de temperatura. Para reduções de temperatura, o comportamento foi inverso ao descrito acima.

Nota-se ainda que nenhum dos pontos de operação simulados está fora da região útil do mapa de desempenho do compressor, nem resulta em fluxo corrido acima do fluxo de choque nas turbinas.

Tabela 5.7 – Resultados para Variação da Temperatura na Entrada da Turbina Geradora de Gases

Resultados Variação da Temperatura na Entrada da Turbina Geradora de Gases T_3 (K)	Off-Design		Design	Off-Design											
	1.100	1.150	1.200	1.250	1.300	1.350	1.400	1.450	1.500	1.550	1.600	1.650	1.700	1.750	1.800
Fluxo Mássico no Compressor (kg/s)	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
Fluxo Mássico de Combustível (kg/s)	0,44	0,48	0,52	0,56	0,61	0,65	0,70	0,74	0,79	0,84	0,88	0,93	0,98	1,03	1,08
Eficiência do Compressor	83,84%	83,84%	83,84%	83,84%	83,84%	83,84%	83,84%	83,84%	83,84%	83,84%	83,84%	83,84%	83,84%	83,84%	83,84%
Eficiência na Turbina Geradora de Gases	91,63%	89,48%	87,32%	85,20%	83,15%	81,16%	79,25%	77,41%	75,65%	73,96%	72,33%	70,77%	69,28%	67,84%	66,45%
Eficiência na Turbina de Potência	76,62%	82,63%	87,59%	90,58%	92,71%	94,23%	95,31%	96,07%	96,59%	96,58%	96,44%	96,21%	95,90%	95,51%	95,06%
Eficiência Térmica do Ciclo	23,02%	24,58%	25,79%	26,40%	26,75%	26,92%	26,97%	26,93%	26,83%	26,59%	26,33%	26,04%	25,74%	25,43%	25,11%
Velocidade do Eixo do Compressor (RPM)	3.593	3.593	3.593	3.593	3.593	3.593	3.593	3.593	3.593	3.593	3.593	3.593	3.593	3.593	3.593
Relação de Pressão na Turbina Geradora de Gases	2,42	2,37	2,32	2,28	2,25	2,22	2,19	2,17	2,14	2,12	2,10	2,08	2,07	2,05	2,04
Relação de Pressão na Turbina de Potência	2,40	2,45	2,50	2,54	2,58	2,62	2,65	2,68	2,71	2,74	2,76	2,79	2,81	2,83	2,85
Potência do Compressor (kW)	6.919	6.919	6.919	6.919	6.919	6.919	6.919	6.919	6.919	6.919	6.919	6.919	6.919	6.919	6.919
Potência Líquida (kW)	4.654	5.443	6.217	6.889	7.522	8.124	8.702	9.261	9.805	10.299	10.782	11.253	11.714	12.164	12.605
Consumo Específico de Combustível (kg/s / kW)	9,38E-05	8,78E-05	8,37E-05	8,18E-05	8,07E-05	8,02E-05	8,00E-05	8,02E-05	8,04E-05	8,12E-05	8,20E-05	8,29E-05	8,38E-05	8,49E-05	8,60E-05
Potência Específica (kW / kg/s)	10.663	11.387	11.947	12.230	12.392	12.472	12.494	12.477	12.431	12.320	12.197	12.066	11.927	11.783	11.635
Ponto de Operação do Compressor	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Choque na Turbina Geradora de Gases	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Choque na Turbina de Potência	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK

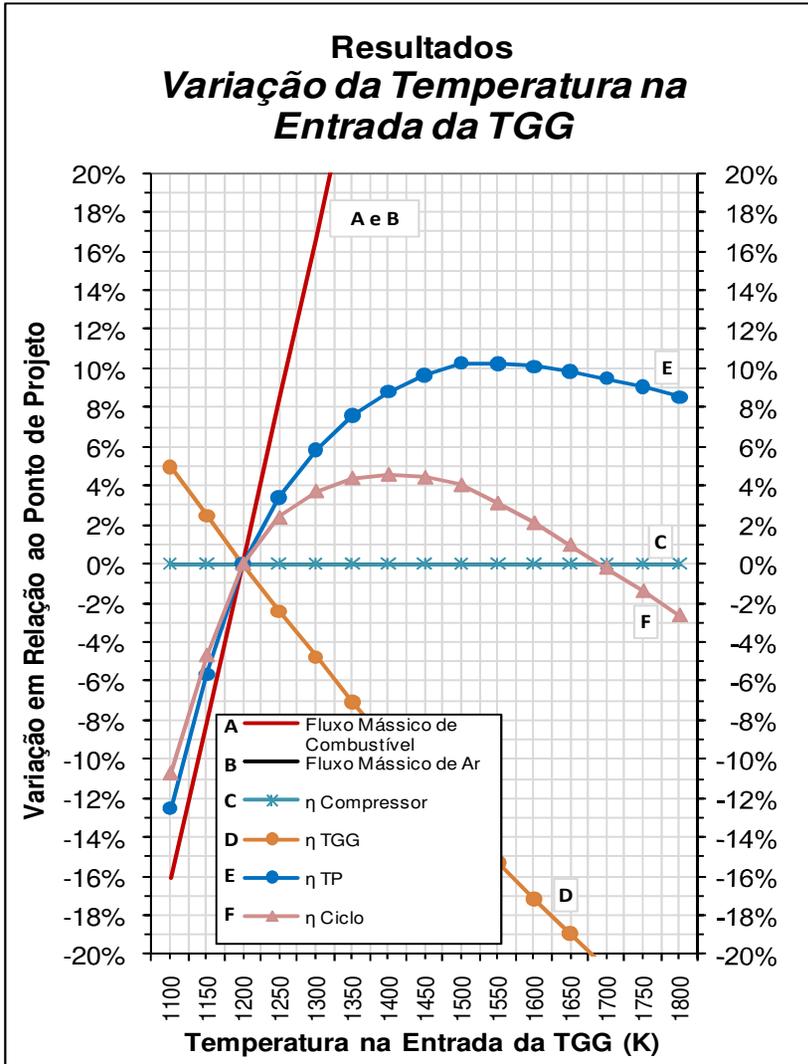


Figura 5.9 – Gráfico 1 para Variação Percentual de Variáveis em Relação à Operação Nominal, em Função da Variação da Temperatura na Entrada da Turbina Geradora de Gases (TGG)

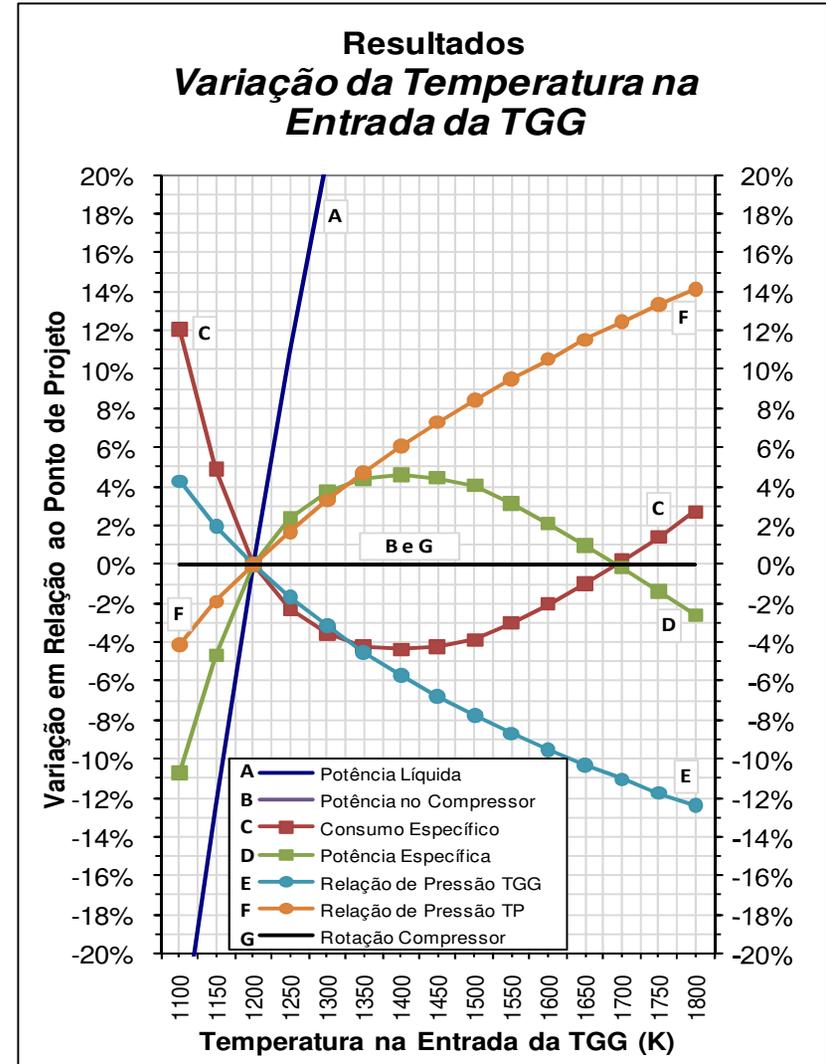


Figura 5.10 – Gráfico 2 para Variação Percentual de Variáveis em Relação à Operação Nominal, em Função da Temperatura na Entrada da Turbina Geradora de Gases (TGG)

5.8.4 *Variação do Fluxo Corrigido na Entrada do Compressor*

Esta simulação consistiu em variar somente o fluxo corrigido ‘off-design’ na entrada do compressor, relativo fluxo corrigido de projeto, mantendo os demais dados de entrada ‘off-design’ iguais aos dados nominais de operação apresentados no item 5.5.

A tabela 5.8 apresenta resultados obtidos na operação ‘off-design’ para diferentes valores de fluxo corrigido na entrada do compressor (valores entre 0,7 e 1,3), relativos fluxo corrigido de projeto, incluindo ainda resultados obtidos para operação nas condições de projeto. As figuras 5.11 e 5.12 ilustram graficamente os resultados dados na tabela 5.8, representando-os como variação percentual em relação ao resultado para operação nominal.

Observa-se a melhora no desempenho global da turbina quando há diminuição do fluxo corrigido na entrada do compressor (aumento do rendimento térmico do ciclo). A explicação é baseada principalmente no aumento das eficiências do compressor e da turbina de potência. A eficiência da turbina geradora de gases manteve-se praticamente estável. Conseqüentemente, houve decréscimos na potência do compressor e acréscimos na potência líquida.

Houve ainda redução do consumo de combustível e do fluxo mássico no compressor. O decréscimo também foi observado na velocidade de rotação do compressor. A relação de pressão na turbina de potência apresentou pequenos acréscimos. O inverso foi observado para a relação de pressão na turbina geradora de gases.

Por fim, o consumo específico de combustível decresceu com a diminuição do fluxo corrigido, enquanto que a potência específica registrou acréscimos.

Para incrementos no fluxo corrigido na entrada do compressor, o comportamento foi aproximadamente inverso ao descrito acima.

Nota-se ainda que alguns dos pontos simulados foram desconsiderados, pois estão fora da região útil do mapa de desempenho do compressor (fluxo corrigido inferior a 0,8 e superior a 1,15).

Os fluxos corrigidos calculados para as turbinas geradoras de gases e de potência não ultrapassaram os fluxos de choque, para pontos diferentes dos desconsiderados.

Tabela 5.8 – Resultados para Variação do Fluxo Corrigido na Entrada do Compressor

Resultados Variação do Fluxo Corrigido na Entrada do Compressor \bar{f}_{c_c} (adimensional)	Off-Design						Design	Off-Design					
	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	1,05	1,10	1,15	1,20	1,25	1,30
Fluxo Mássico no Compressor (kg/s)	21,00	22,50	24,00	25,50	27,00	28,50	30,00	31,50	33,00	34,50	36,00	37,50	39,00
Fluxo Mássico de Combustível (kg/s)	0,36	0,39	0,42	0,44	0,47	0,49	0,52	0,53	0,56	0,59	0,62	0,65	0,68
Eficiência do Compressor	84,00%	84,00%	86,26%	84,16%	83,78%	83,62%	83,84%	77,54%	78,06%	80,06%	84,00%	84,00%	84,00%
Eficiência na Turbina Geradora de Gases	87,00%	87,00%	87,89%	88,73%	88,52%	88,07%	87,32%	90,09%	88,75%	86,48%	87,00%	87,00%	87,00%
Eficiência na Turbina de Potência	87,00%	87,00%	91,09%	89,64%	88,94%	88,21%	87,59%	80,73%	79,57%	79,76%	87,00%	87,00%	87,00%
Eficiência Térmica do Ciclo	25,57%	25,57%	27,58%	26,85%	26,49%	26,12%	25,79%	22,89%	22,35%	22,34%	25,57%	25,57%	25,57%
Velocidade do Eixo do Compressor (RPM)	3.240	3.240	3.332	3.369	3.425	3.500	3.593	3.680	3.775	3.880	3.240	3.240	3.240
Relação de Pressão na Turbina Geradora de Gases	2,33	2,33	2,25	2,28	2,30	2,31	2,32	2,43	2,45	2,45	2,33	2,33	2,33
Relação de Pressão na Turbina de Potência	2,49	2,49	2,58	2,54	2,53	2,51	2,50	2,39	2,37	2,37	2,49	2,49	2,49
Potência do Compressor (kW)	4.834	5.180	5.380	5.859	6.232	6.590	6.919	7.856	8.175	8.333	8.287	8.633	8.978
Potência Líquida (kW)	4.317	4.626	5.364	5.509	5.746	5.977	6.217	5.650	5.793	6.103	7.401	7.710	8.018
Consumo Específico de Combustível (kg/s / kW)	8,44E-05	8,44E-05	7,83E-05	8,04E-05	8,15E-05	8,27E-05	8,37E-05	9,43E-05	9,66E-05	9,66E-05	8,44E-05	8,44E-05	8,44E-05
Potência Específica (kW / kg/s)	11.846	11.846	12.777	12.440	12.273	12.100	11.947	10.603	10.353	10.347	11.846	11.846	11.846
Ponto de Operação do Compressor	NOK	NOK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	NOK	NOK	NOK
Choque na Turbina Geradora de Gases	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Choque na Turbina de Potência	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK

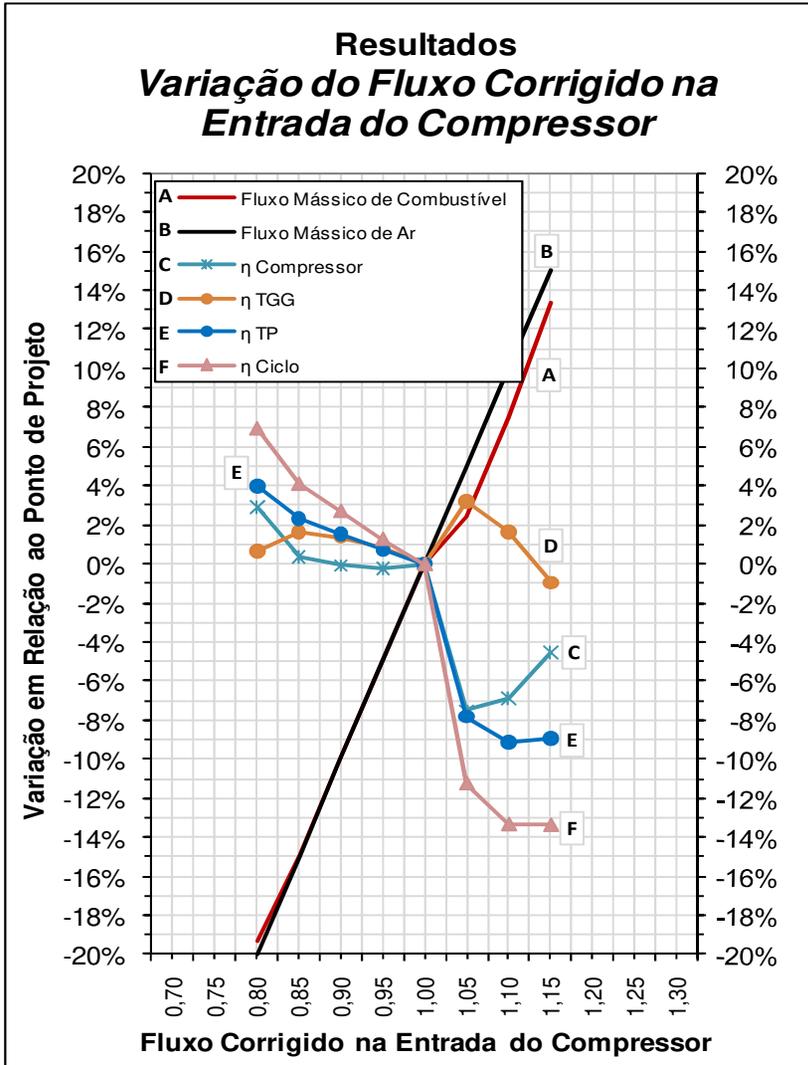


Figura 5.11 – Gráfico 1 para Variação Percentual de Variáveis em Relação à Operação Nominal, em Função da Variação do Fluxo Corrigido na Entrada do Compressor

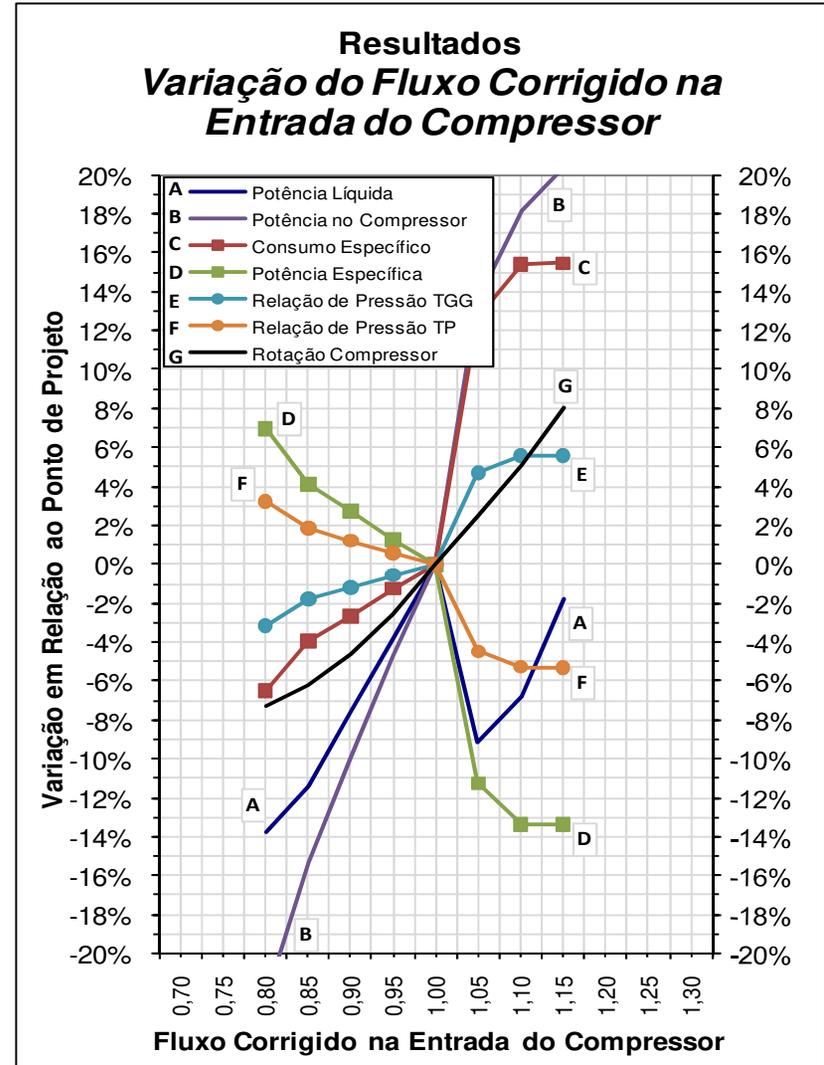


Figura 5.12 – Gráfico 2 para Variação Percentual de Variáveis em Relação à Operação Nominal, em Função da Variação do Fluxo Corrigido na Entrada do Compressor

5.8.5 *Variação da Pressão na Entrada do Compressor*

Esta simulação consistiu em variar somente a pressão ‘off-design’ na entrada do compressor, mantendo os demais dados de entrada ‘off-design’ iguais aos dados nominais de operação apresentados no item 5.5.

A tabela 5.9 apresenta resultados obtidos na operação ‘off-design’ para diferentes valores de pressão na entrada do compressor (valores entre 0,85 e 1,15 bar), incluindo ainda resultados obtidos para operação nas condições de projeto. As figuras 5.13 e 5.14 ilustram graficamente os resultados dados na tabela 5.9, representando-os como variação percentual em relação ao resultado para operação nominal.

Observa-se que o desempenho global da turbina apresenta pequena variação, independente da variação na pressão na entrada do compressor (manutenção do rendimento térmico do ciclo). O pequeno aumento registrado para a eficiência do ciclo, com o aumento da pressão de entrada, acompanha a pequena tendência de aumento da eficiência da turbina geradora de gases.

Para a eficiência do compressor, eficiência da turbina geradora de gases, velocidade de rotação do compressor e relações de pressão nas turbinas, o resultado mantém-se constante. A tendência do consumo específico de combustível e potência específica é a mesma observada para a eficiência do ciclo. Foram constatadas grandes diferenças nos resultados do fluxo de ar no compressor, no fluxo de combustível e potências no compressor e na turbina de potência, os quais aumentaram proporcionalmente com o aumento da pressão de entrada no compressor, ou diminuição para relação inversa.

Nota-se ainda que nenhum dos pontos de operação simulados está fora da região útil do mapa de desempenho do compressor, nem resulta em fluxo corrigido acima do fluxo de choque nas turbinas.

Tabela 5.9 – Resultados para Variação da Pressão na Entrada do Compressor

Resultados Variação da Pressão de Entrada do Compressor P ₁ (bar)	Off-Design						Design	Off-Design					
	0,850	0,875	0,900	0,925	0,950	0,975	1,000	1,025	1,050	1,075	1,100	1,125	1,150
Fluxo Mássico no Compressor (kg/s)	25,25	25,99	26,73	27,48	28,22	28,96	29,70	30,45	31,19	31,93	32,67	33,42	34,16
Fluxo Mássico de Combustível (kg/s)	0,44	0,45	0,46	0,48	0,49	0,50	0,52	0,53	0,54	0,55	0,57	0,58	0,59
Eficiência do Compressor	83,84%	83,84%	83,84%	83,84%	83,84%	83,84%	83,84%	83,84%	83,84%	83,84%	83,84%	83,84%	83,84%
Eficiência na Turbina Geradora de Gases	87,32%	87,32%	87,32%	87,32%	87,32%	87,32%	87,32%	87,32%	87,32%	87,32%	87,32%	87,32%	87,32%
Eficiência na Turbina de Potência	86,82%	86,96%	87,09%	87,22%	87,34%	87,45%	87,55%	87,65%	87,74%	87,83%	87,91%	87,99%	88,07%
Eficiência Térmica do Ciclo	25,40%	25,47%	25,54%	25,60%	25,66%	25,72%	25,77%	25,82%	25,87%	25,91%	25,95%	25,99%	26,03%
Velocidade do Eixo do Compressor (RPM)	3.593	3.593	3.593	3.593	3.593	3.593	3.593	3.593	3.593	3.593	3.593	3.593	3.593
Relação de Pressão na Turbina Geradora de Gases	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32	2,32
Relação de Pressão na Turbina de Potência	2,48	2,48	2,49	2,49	2,49	2,49	2,50	2,50	2,50	2,50	2,51	2,51	2,51
Potência do Compressor (kW)	5.823	5.995	6.166	6.337	6.508	6.680	6.851	7.022	7.194	7.365	7.536	7.707	7.879
Potência Líquida (kW)	5.154	5.320	5.486	5.652	5.818	5.984	6.150	6.316	6.482	6.648	6.814	6.980	7.146
Consumo Específico de Combustível (kg/s / kW)	8,50E-05	8,47E-05	8,45E-05	8,43E-05	8,41E-05	8,39E-05	8,38E-05	8,36E-05	8,35E-05	8,33E-05	8,32E-05	8,30E-05	8,29E-05
Potência Específica (kW / kg/s)	11.769	11.801	11.832	11.861	11.888	11.914	11.938	11.961	11.983	12.004	12.024	12.043	12.061
Ponto de Operação do Compressor	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Choque na Turbina Geradora de Gases	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Choque na Turbina de Potência	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK

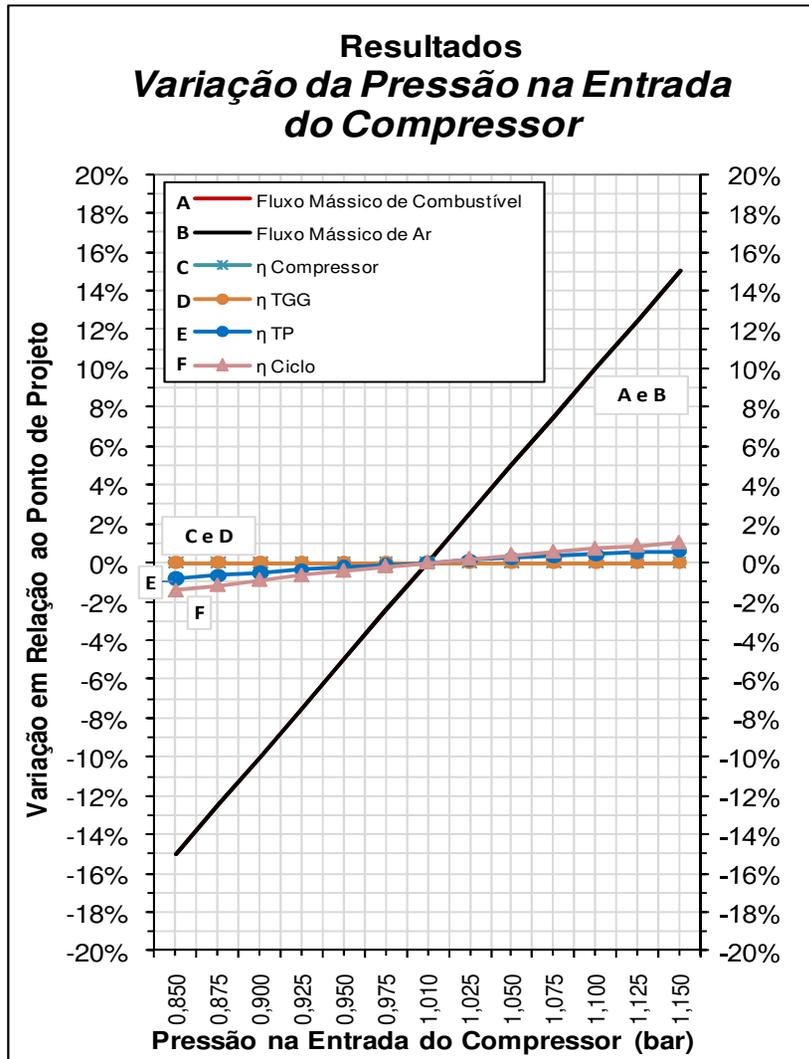


Figura 5.13 – Gráfico 1 para Variação Percentual de Variáveis em Relação à Operação Nominal, em Função da Variação de Pressão na Entrada do Compressor

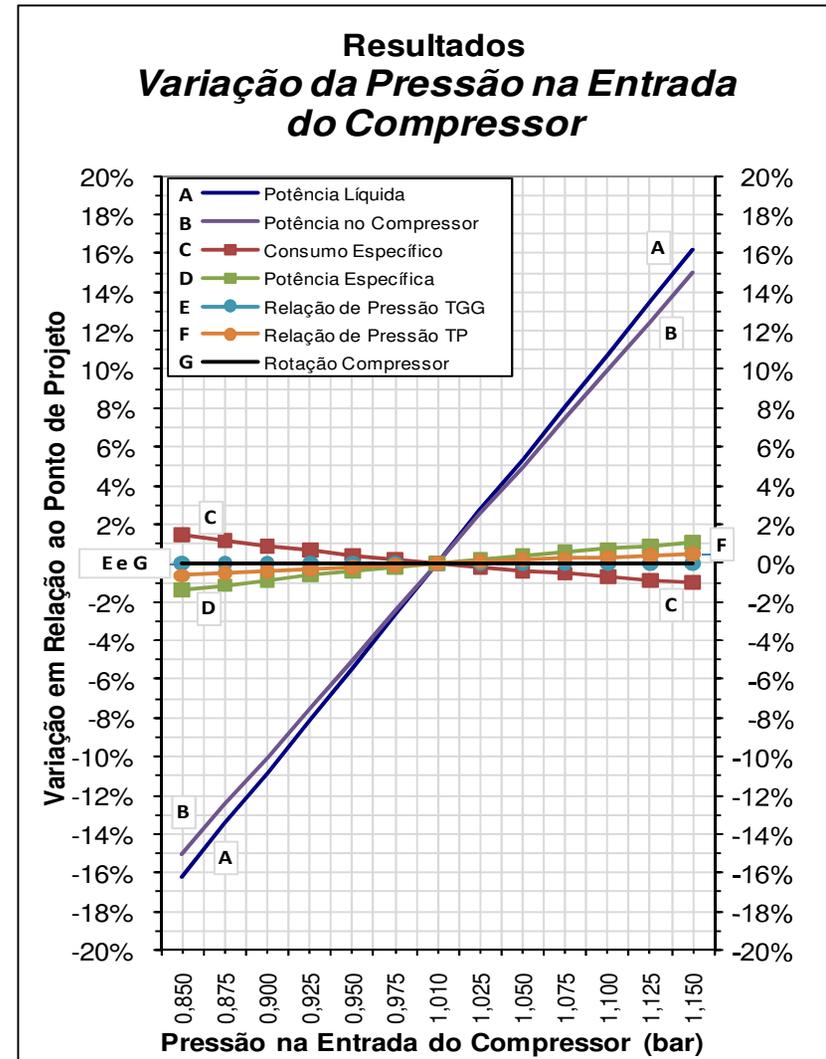


Figura 5.14 – Gráfico 2 para Variação Percentual de Variáveis em Relação à Operação Nominal, em Função da Variação de Pressão na Entrada do Compressor

Capítulo 6

Conclusão

Estimativas de desempenho são de grande importância tanto nos projetos de máquinas quanto na verificação de desempenho de máquinas em operação.

A metodologia utilizada para estimativa de velocidade e desempenho de compressores e turbinas, a partir de poucos pontos disponibilizados de seus respectivos mapas de desempenho, foi o ponto central no desenvolvimento proposto.

O programa desenvolvido e estudado mostrou-se bastante versátil e útil, pois permite que sejam simuladas performances de desempenho de turbinas a gás para geração de potência, submetidas a condições de operação diferentes das condições de projeto, ou 'off-design'.

A metodologia exposta neste trabalho permite a variação de diferentes dados de entrada, individualmente, ou ao mesmo tempo. Muitos parâmetros de entrada influenciam o desempenho de turbinas a gás, e todos eles, descritos em capítulos anteriores, podem ser variados. Também permite que mapas de desempenho de turbinas axiais possam ser gerados a partir de informações de desempenho de alguns pontos principais lidos a partir de mapas disponibilizados pelos fabricantes ou informados pelos mesmos. Permite ainda a geração de curvas genéricas de desempenho, as quais possibilitam o estudo aprofundado de máquinas hipotéticas ou a utilização como ferramenta de otimização de projetos de turbina a gás.

Pelo fato de gerar mapas genéricos relativos aos pontos de projeto, o programa se estende a máquinas de todas as faixas operativas para razão de pressão, fluxo e velocidade de rotação, tornando-o bastante abrangente.

O trabalho desenvolvido buscou, sobretudo, dar uma importante contribuição para o enriquecimento da literatura disponível que trata de desempenho de turbinas em condições ‘off-design’, além de possibilitar a continuidade de pesquisas acadêmicas na área.

Trabalhos futuros relacionados ao assunto do trabalho poderão ser desenvolvidos dentro das seguintes abordagens:

- Geração de curvas de contornos de eficiência nos mapas de desempenho fluxo corrigido X razão de pressão, para compressores e turbinas;
- Geração de curvas de eficiência de câmaras de combustão;
- Geração de curvas de eficiência de demais componentes acoplados às turbinas axiais, como resfriadores entre estágios de compressão, regeneradores e sistemas de refrigeração das pás da turbina;
- Estudo da influência de parâmetros geométricos de turbinas na geração de curvas de desempenho;
- Estudo da influência do controle de poluentes formados na câmara de combustão sobre a eficiência de turbinas a gás;
- Simulações de programas, desenvolvidos por pesquisas anteriores ou aperfeiçoados, em máquinas reais, cujos mapas de desempenho ou dados de operação ‘off-design’ tenham sido fornecidos por algum fabricante.

Referências Bibliográficas

ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. Brasília, 2008, 3ª edição, 236 p.

AUTOCAD. www.autodesk.com, 2007.

BOYCE, M. P. **Gas Turbine Engineering Handbook**. Houston: Gulf Professional Publishing, 2001, 2nd edition, 799p.

BRINGHENTI, C. **Análise de Desempenho de Turbina a Gás em Regime Permanente**. 1999. 228p. Dissertação (Mestrado) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos.

BRUN, K.; KURZ, R. **The Compressor Operating Range: Surge, Stall and Choke**. Mechanical Engineering, ABI/INFORM Global, v. 131, p. 52, 2009.

COHEN, H.; ROGERS, G. F. C.; SARAVANAMUTTOO. H. I. H. **Gas Turbine Theory**. London: Longman Group Limited, 1996, 4th edition. 441p.

EES, **Engineering Equation Solver Manual**. www.fchart.com, 2008.

GREITZER, E. M. **Reviex – Axial Compressor Stall Phenomena**. ASME Journal of Fluids Engineering, v. 102, p. 134-151, 1980.

GUIDORIZZI, L. H. **Um Curso de Cálculo**. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora, 1987, 2ª edição. 579p.

HESS, R. **Estudo Comparativo de Métodos de Análise de Turbinas Axiais**. 2006. 105p. Dissertação (Mestrado) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos.

INCROPERA, F. P.; DeWitt, D. P. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora, 1998, 4ª edição. 494p.

KIM, J. H.; KIM, T. S.; SOHN, J. L.; RO, S. T. **Comparative Analysis of Off-Design Performance Characteristics of Single and Two-Shaft Industrial Gas Turbine**. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, v. 125, p. 954-960, 2003.

KORAKIANITIS, T.; SVENSSON, K. **Off-Design Performance of Various Gas-Turbine Cycle and Shaft Configurations**. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, v. 121, p. 649-655, 1999.

KURZKE, J. **How to Get Component Maps for Aircraft Gas Turbine Performance Calculations**. ASME Paper 96-GT-164, Engine Performance Department, MTU München GmbH, Germany, 1996.

KURZKE, J. **Smooth C 8: Preparing Compressor Maps for Performance Computer Programs**. www.gasturb.de, 2002.

KURZKE, J. **Smooth T 8: Preparing Turbine Maps for Performance Computer Programs**. www.gasturb.de, 2003.

MICROSOFT EXCEL. www.microsoft.com, 2007.

MME (Ministério de Minas e Energia), **Plano Decenal de Expansão de Energia 2008-2017**. EPE (Empresa de Pesquisa Energética), Brasília, 2008, cap. 3, 80p.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. **Fundamentals of Engineering Thermodynamics**. Chichester: John Wiley and Sons, 2006, 5th edition, 912p.

AL-HAMDAN, Q. Z.; EBAID, M. S. Y. **Modeling and Simulation of a Gas Turbine Engine for Power Generation**. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, v. 128, p. 302-311, 2006.

WANKAT, P. C. **Rate-Controlled Separations**. School of Chemical Engineering, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA, 1994.

WILSON, D. G.; KORAKIANITIS, T. **The Design of High-Efficiency Turbomachinery and Gas Turbines**. Cambridge: The MIT Press, 1998, 593p.

WALSH, P. P.; FLETCHER, P. **Gas Turbine Performance**. London: Blackwell Science Ltd, 2000, 628p.

WALTER, A. **Simulation of Gas Turbines Operating in Off-Design Condition**. ECOS 2000, Holland, 2000.

Anexos

- Anexo I: Programa para Geração de Funções para as Curvas dos Mapas de Desempenho de Compressores;
- Anexo II: Programa para Geração de Funções para as Curvas dos Mapas de Desempenho de Turbinas;
- Anexo III: Programa Computacional de Análise de Desempenho de Turbinas a Gás para Geração de Potência.

Anexo I – Programa para Geração de Funções para as Curvas dos Mapas de Desempenho de Compressores

A seguir é apresentado o arquivo fonte do programa desenvolvido para geração de funções para as curvas dos mapas de desempenho de compressores:

```

{
Geração de Funções para as Curvas dos Mapas de
Desempenho de Compressores
Referência Cohen, Rogers e Saravanamuttoo, 1996
}

////////////////////////////////////
{Procedure Intervalo}

{Como entrada são fornecidos os vetores contendo os pontos
x e y da intersecção da curva que passa pelo ponto dado com
as curvas de velocidade, além do ponto x dado, e como saída
fornece os pontos da intersecção os quais vem antes e depois
do ponto dado}

procedure intervalo(z[1..6];z2[1..6];n[1..6]; xp : zinf;
zsup;z2inf; z2sup;ninf;nsup;iinf;isup)
  i:=1
  repeat
    kinf:=i
    if xp > z[i] then
      zinf:=z[i]
      zsup:=z[i+1]
      z2inf:=z2[i]
      z2sup:=z2[i+1]
      ninf:=n[i]
      nsup:=n[i+1]
      iinf:=i
      isup:=i+1
      i:=i+1
    endif
  until i = 6
end

procedure isolando(z[1..6];i1;i2 : ye1;ye2)
ye1:=z[i1]
ye2:=z[i2]
end

////////////////////////////////////
{Programa Principal para Cálculo dos Coeficientes das
Curvas}

// Mapa Razão de Pressão x Fluxo Corrigido
{
Observações:
1- Os valores de fluxo corrigido do gráfico da referência são
relativos ao valor de projeto. Os valores de Razão de Pressão
foram normalizados em relação à razão de pressão de projeto.

```

```

A função de referência para fluxo mássico está corrigida e
normalizada em relação ao valor de projeto e relação de
pressão foi normalizada em relação à condição de projeto.
Nela, a relação de pressão é de 2,63. Considerou-se fluxo
corrigido e velocidade corrigida de projeto igual a 0,8.
2- Para as curvas de velocidade: uso de funções de grau 3,
considerando ainda derivada primeira igual a zero no ponto de
cruzamento com a linha surge.
3- Para a curva da linha surge e limite inferior: uso de função
de grau 3.
Observação: as curvas dadas ao longo do programa com
subscritos 0,5, 0,6, 0,7, 0,8, 0,9 e 1, passam a representar as
velocidades corrigidas relativas de 0,625, 0,75, 0,875, 1, 1,125
e 1,25, respectivamente.
}

{Curvas de Velocidade}
y1_0.5=a_0.5*x1_0.5^3+b_0.5*x1_0.5^2+c_0.5*x1_0.5+d_0.5
y2_0.5=a_0.5*x2_0.5^3+b_0.5*x2_0.5^2+c_0.5*x2_0.5+d_0.5
y3_0.5=a_0.5*x3_0.5^3+b_0.5*x3_0.5^2+c_0.5*x3_0.5+d_0.5
0=6*a_0.5*x1_0.5+2*b_0.5

y1_0.6=a_0.6*x1_0.6^3+b_0.6*x1_0.6^2+c_0.6*x1_0.6+d_0.6
y2_0.6=a_0.6*x2_0.6^3+b_0.6*x2_0.6^2+c_0.6*x2_0.6+d_0.6
y3_0.6=a_0.6*x3_0.6^3+b_0.6*x3_0.6^2+c_0.6*x3_0.6+d_0.6
0=6*a_0.6*x1_0.6+2*b_0.6

y1_0.7=a_0.7*x1_0.7^3+b_0.7*x1_0.7^2+c_0.7*x1_0.7+d_0.7
y2_0.7=a_0.7*x2_0.7^3+b_0.7*x2_0.7^2+c_0.7*x2_0.7+d_0.7
y3_0.7=a_0.7*x3_0.7^3+b_0.7*x3_0.7^2+c_0.7*x3_0.7+d_0.7
0=6*a_0.7*x1_0.7+2*b_0.7

y1_0.8=a_0.8*x1_0.8^3+b_0.8*x1_0.8^2+c_0.8*x1_0.8+d_0.8
y2_0.8=a_0.8*x2_0.8^3+b_0.8*x2_0.8^2+c_0.8*x2_0.8+d_0.8
y3_0.8=a_0.8*x3_0.8^3+b_0.8*x3_0.8^2+c_0.8*x3_0.8+d_0.8
0=6*a_0.8*x1_0.8+2*b_0.8

y1_0.9=a_0.9*x1_0.9^3+b_0.9*x1_0.9^2+c_0.9*x1_0.9+d_0.9
y2_0.9=a_0.9*x2_0.9^3+b_0.9*x2_0.9^2+c_0.9*x2_0.9+d_0.9
y3_0.9=a_0.9*x3_0.9^3+b_0.9*x3_0.9^2+c_0.9*x3_0.9+d_0.9
0=6*a_0.9*x1_0.9+2*b_0.9

y1_1=a_1*x1_1^3+b_1*x1_1^2+c_1*x1_1+d_1
y2_1=a_1*x2_1^3+b_1*x2_1^2+c_1*x2_1+d_1
y3_1=a_1*x3_1^3+b_1*x3_1^2+c_1*x3_1+d_1
0=6*a_1*x1_1+2*b_1

{Curva Surge}
y1_surge=a_surge*x1_surge^3+b_surge*x1_surge^2+c_surge
*x1_surge+d_surge
y2_surge=a_surge*x2_surge^3+b_surge*x2_surge^2+c_surge
*x2_surge+d_surge

```

$y3_surge = a_surge * x3_surge^3 + b_surge * x3_surge^2 + c_surge * x3_surge + d_surge$
 $y4_surge = a_surge * x4_surge^3 + b_surge * x4_surge^2 + c_surge * x4_surge + d_surge$

{Curva Limite Inferior}

$y1_lim = a_lim * x1_lim^3 + b_lim * x1_lim^2 + c_lim * x1_lim + d_lim$
 $y2_lim = a_lim * x2_lim^3 + b_lim * x2_lim^2 + c_lim * x2_lim + d_lim$
 $y3_lim = a_lim * x3_lim^3 + b_lim * x3_lim^2 + c_lim * x3_lim + d_lim$
 $y4_lim = a_lim * x4_lim^3 + b_lim * x4_lim^2 + c_lim * x4_lim + d_lim$

{Pontos dados para as curvas de velocidade, pontos dados para curva da função surge e pontos dados para curva da função limite inferior - mapa Fluxo Corrigido X Relação de Pressão}

$x1_0.5 = 0,430410669483692$
 $x2_0.5 = 0,521523834675822$
 $x3_0.5 = 0,64729961706061$
 $x1_0.6 = 0,563911263699987$
 $x2_0.6 = 0,703354020863594$
 $x3_0.6 = 0,798230555922355$
 $x1_0.7 = 0,71206919318632$
 $x2_0.7 = 0,849729301465733$
 $x3_0.7 = 0,935296447907038$
 $x1_0.8 = 0,879242044104054$
 $x2_0.8 = 1$
 $x3_0.8 = 1,04621682292354$

$x1_0.9 = 1,055526211541$
 $x2_0.9 = 1,14366829525947$
 $x3_0.9 = 1,17991548923808$
 $x1_1 = 1,21239931335006$
 $x2_1 = 1,24250627228311$
 $x3_1 = 1,27697081737753$
 $x1_surge = 0,0814076323781857$
 $x2_surge = 0,563911263699987$
 $x3_surge = 1,055526211541$
 $x4_surge = 1,29895682028258$
 $x1_lim = 0,64729961706061$
 $x2_lim = 0,798230555922355$
 $x3_lim = 1,19576125709758$
 $x4_lim = 1,28271490822659$

$y1_0.5 = 0,631867658467082$
 $y2_0.5 = 0,58813093068481$
 $y3_0.5 = 0,405106515776112$
 $y1_0.6 = 0,753227227448521$
 $y2_0.6 = 0,668117919331668$
 $y3_0.6 = 0,48351740612451$
 $y1_0.7 = 0,920490659372616$
 $y2_0.7 = 0,829865007211151$
 $y3_0.7 = 0,609408257714023$
 $y1_0.8 = 1,13582508939975$
 $y2_0.8 = 1$
 $y3_0.8 = 0,818241282260007$

$y1_0.9 = 1,38740978029147$
 $y2_0.9 = 1,28259924344386$
 $y3_0.9 = 1,18034986633125$
 $y119_0.9 = 1,06076340793558$
 $y1_1 = 1,63722136059742$
 $y2_1 = 1,58658920275938$
 $y3_1 = 1,42523613945451$
 $y1_surge = 0,42362567078302$
 $y2_surge = 0,753227227448521$
 $y3_surge = 1,38740978029147$
 $y4_surge = 1,77966124432076$

$y1_lim = 0,405106515776112$
 $y2_lim = 0,48351740612451$
 $y3_lim = 1,06076340793558$
 $y4_lim = 1,30387657047307$

// Mapa Razão de Pressão x Eficiência

{

Observações:

1- Os valores de fluxo corrigido do gráfico da referência são relativos ao valor de projeto. Os valores de Eficiência foram normalizados em relação à Eficiência de projeto (89,30%).
 2- As curvas foram aproximadas para funções de grau 4 com derivada segunda igual a zero no ponto de máximo. Com isso, são necessários 4 pontos por curva.

Observação: as curvas dadas ao longo do programa com subscritos 0,5, 0,6, 0,7, 0,8, 0,9 e 1, passam a representar as velocidades corrigidas relativas de 0,625, 0,75, 0,875, 1, 1,125 e 1,25, respectivamente.

}

{Curvas de Velocidade}

$yy1_0.5 = ee_0.5 * xx1_0.5^4 + aa_0.5 * xx1_0.5^3 + bb_0.5 * xx1_0.5^2 + cc_0.5 * xx1_0.5 + dd_0.5$
 $yy2_0.5 = ee_0.5 * xx2_0.5^4 + aa_0.5 * xx2_0.5^3 + bb_0.5 * xx2_0.5^2 + cc_0.5 * xx2_0.5 + dd_0.5$
 $yy3_0.5 = ee_0.5 * xx3_0.5^4 + aa_0.5 * xx3_0.5^3 + bb_0.5 * xx3_0.5^2 + cc_0.5 * xx3_0.5 + dd_0.5$
 $yy4_0.5 = ee_0.5 * xx4_0.5^4 + aa_0.5 * xx4_0.5^3 + bb_0.5 * xx4_0.5^2 + cc_0.5 * xx4_0.5 + dd_0.5$
 $0 = 4 * ee_0.5 * xx2_0.5^3 + 3 * aa_0.5 * xx2_0.5^2 + 2 * bb_0.5 * xx2_0.5 + cc_0.5$

$yy1_0.6 = ee_0.6 * xx1_0.6^4 + aa_0.6 * xx1_0.6^3 + bb_0.6 * xx1_0.6^2 + cc_0.6 * xx1_0.6 + dd_0.6$
 $yy2_0.6 = ee_0.6 * xx2_0.6^4 + aa_0.6 * xx2_0.6^3 + bb_0.6 * xx2_0.6^2 + cc_0.6 * xx2_0.6 + dd_0.6$
 $yy3_0.6 = ee_0.6 * xx3_0.6^4 + aa_0.6 * xx3_0.6^3 + bb_0.6 * xx3_0.6^2 + cc_0.6 * xx3_0.6 + dd_0.6$
 $yy4_0.6 = ee_0.6 * xx4_0.6^4 + aa_0.6 * xx4_0.6^3 + bb_0.6 * xx4_0.6^2 + cc_0.6 * xx4_0.6 + dd_0.6$
 $0 = 4 * ee_0.6 * xx2_0.6^3 + 3 * aa_0.6 * xx2_0.6^2 + 2 * bb_0.6 * xx2_0.6 + cc_0.6$

$yy1_0.7 = ee_0.7 * xx1_0.7^4 + aa_0.7 * xx1_0.7^3 + bb_0.7 * xx1_0.7^2 + cc_0.7 * xx1_0.7 + dd_0.7$
 $yy2_0.7 = ee_0.7 * xx2_0.7^4 + aa_0.7 * xx2_0.7^3 + bb_0.7 * xx2_0.7^2 + cc_0.7 * xx2_0.7 + dd_0.7$
 $yy3_0.7 = ee_0.7 * xx3_0.7^4 + aa_0.7 * xx3_0.7^3 + bb_0.7 * xx3_0.7^2 + cc_0.7 * xx3_0.7 + dd_0.7$
 $yy4_0.7 = ee_0.7 * xx4_0.7^4 + aa_0.7 * xx4_0.7^3 + bb_0.7 * xx4_0.7^2 + cc_0.7 * xx4_0.7 + dd_0.7$
 $0 = 4 * ee_0.7 * xx2_0.7^3 + 3 * aa_0.7 * xx2_0.7^2 + 2 * bb_0.7 * xx2_0.7 + cc_0.7$

$yy1_0.8 = ee_0.8 * xx1_0.8^4 + aa_0.8 * xx1_0.8^3 + bb_0.8 * xx1_0.8^2 + cc_0.8 * xx1_0.8 + dd_0.8$
 $yy2_0.8 = ee_0.8 * xx2_0.8^4 + aa_0.8 * xx2_0.8^3 + bb_0.8 * xx2_0.8^2 + cc_0.8 * xx2_0.8 + dd_0.8$
 $yy3_0.8 = ee_0.8 * xx3_0.8^4 + aa_0.8 * xx3_0.8^3 + bb_0.8 * xx3_0.8^2 + cc_0.8 * xx3_0.8 + dd_0.8$
 $yy4_0.8 = ee_0.8 * xx4_0.8^4 + aa_0.8 * xx4_0.8^3 + bb_0.8 * xx4_0.8^2 + cc_0.8 * xx4_0.8 + dd_0.8$
 $0 = 4 * ee_0.8 * xx2_0.8^3 + 3 * aa_0.8 * xx2_0.8^2 + 2 * bb_0.8 * xx2_0.8 + cc_0.8$

$yy1_0.9 = ee_0.9 * xx1_0.9^4 + aa_0.9 * xx1_0.9^3 + bb_0.9 * xx1_0.9^2 + cc_0.9 * xx1_0.9 + dd_0.9$
 $yy2_0.9 = ee_0.9 * xx2_0.9^4 + aa_0.9 * xx2_0.9^3 + bb_0.9 * xx2_0.9^2 + cc_0.9 * xx2_0.9 + dd_0.9$

$yy3_{0.9} = ee_{0.9} \cdot xx3_{0.9}^4 + aa_{0.9} \cdot xx3_{0.9}^3 + bb_{0.9} \cdot xx3_{0.9}^2 + cc_{0.9} \cdot xx3_{0.9} + dd_{0.9}$
 $yy4_{0.9} = ee_{0.9} \cdot xx4_{0.9}^4 + aa_{0.9} \cdot xx4_{0.9}^3 + bb_{0.9} \cdot xx4_{0.9}^2 + cc_{0.9} \cdot xx4_{0.9} + dd_{0.9}$
 $0 = 4 \cdot ee_{0.9} \cdot xx2_{0.9}^3 + 3 \cdot aa_{0.9} \cdot xx2_{0.9}^2 + 2 \cdot bb_{0.9} \cdot xx2_{0.9} + cc_{0.9}$

$yy1_1 = ee_1 \cdot xx1_1^4 + aa_1 \cdot xx1_1^3 + bb_1 \cdot xx1_1^2 + cc_1 \cdot xx1_1 + dd_1$
 $yy2_1 = ee_1 \cdot xx2_1^4 + aa_1 \cdot xx2_1^3 + bb_1 \cdot xx2_1^2 + cc_1 \cdot xx2_1 + dd_1$
 $yy3_1 = ee_1 \cdot xx3_1^4 + aa_1 \cdot xx3_1^3 + bb_1 \cdot xx3_1^2 + cc_1 \cdot xx3_1 + dd_1$
 $yy4_1 = ee_1 \cdot xx4_1^4 + aa_1 \cdot xx4_1^3 + bb_1 \cdot xx4_1^2 + cc_1 \cdot xx4_1 + dd_1$
 $0 = 4 \cdot ee_1 \cdot xx1_1^3 + 3 \cdot aa_1 \cdot xx1_1^2 + 2 \cdot bb_1 \cdot xx1_1 + cc_1$

{Pontos dados para as curvas de velocidade - mapa Fluxo Corrigido X Eficiência}

$xx1_{0.5} = 0,462894493595669$
 $xx2_{0.5} = 0,525683348738941$
 $xx3_{0.5} = 0,583916545622607$
 $xx4_{0.5} = 0,636207579558959$
 $xx1_{0.6} = 0,5698534266473$
 $xx2_{0.6} = 0,679189224877855$
 $xx3_{0.6} = 0,732668691403671$
 $xx4_{0.6} = 0,807143800343325$
 $xx1_{0.7} = 0,707117390730226$
 $xx2_{0.7} = 0,816453188960782$
 $xx3_{0.7} = 0,883995774461904$
 $xx4_{0.7} = 0,951340287864783$
 $xx1_{0.8} = 0,869932655486597$
 $xx2_{0.8} = 0,951340287864783$
 $xx3_{0.8} = 1$
 $xx4_{0.8} = 1,06542981645319$
 $xx1_{0.9} = 1,05374356265681$
 $xx2_{0.9} = 1,10722302918262$
 $xx3_{0.9} = 1,16307936088736$

$xx4_{0.9} = 1,19794005017826$
 $xx1_1 = 1,19556318499934$
 $xx2_1 = 1,23755446982702$
 $xx3_1 = 1,25379638188301$
 $xx4_1 = 1,28865707117391$

$yy1_{0.5} = 0,951431623216907$
 $yy2_{0.5} = 0,998104746749745$
 $yy3_{0.5} = 0,970567603865371$
 $yy4_{0.5} = 0,820046780471967$
 $yy1_{0.6} = 0,951431623216907$
 $yy2_{0.6} = 1,02540852401646$
 $yy3_{0.6} = 1,00067176854405$
 $yy4_{0.6} = 0,825414189678244$
 $yy1_{0.7} = 0,981535787895587$
 $yy2_{0.7} = 1,02820891142843$
 $yy3_{0.7} = 1,00067176854405$
 $yy4_{0.7} = 0,877454722417358$
 $yy1_{0.8} = 0,987136562719528$
 $yy2_{0.8} = 1,02820891142843$
 $yy3_{0.8} = 1$
 $yy4_{0.8} = 0,872087313211082$
 $yy1_{0.9} = 0,989703584513834$
 $yy2_{0.9} = 1,01980774919251$
 $yy3_{0.9} = 0,984336175307558$
 $yy4_{0.9} = 0,872087313211082$
 $yy1_1 = 0,973367991277341$
 $yy2_1 = 0,963566635335445$
 $yy3_1 = 0,949097967040265$
 $yy4_1 = 0,803711187235474$

{Valores das Velocidades Consideradas}

$\eta[1] = 0,5$
 $\eta[2] = 0,6$
 $\eta[3] = 0,7$
 $\eta[4] = 0,8$
 $\eta[5] = 0,9$
 $\eta[6] = 1$

Anexo II – Programa para Geração de Funções para as Curvas dos Mapas de Desempenho de Turbinas

A seguir é apresentado o arquivo fonte do programa desenvolvido para geração de funções para as curvas dos mapas de desempenho de turbinas:

```

{
Geração de Funções para as Curvas dos Mapas de
Desempenho de Turbina
Referência Kurzke, 2003
}

////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
Mapa Razão de Pressão x Fluxo Corrigido

{
Observações:
1 - Os pontos selecionados do mapa da referência foram
normalizados em relação ao valor para o ponto, para n=0,8.
Para este ponto, a razão de pressão é de 1,31 e o fluxo
corrigido, 80%. Portanto, os valores lidos para os demais
pontos foram divididos por estes valores de referência.
2- Teste com função polinomial de erf (deixando coeficientes
'a' e 'e' sem calcular). Logo a expressão utilizada assume a
forma:
y=tendência-
(a+0,2784*ABS(e+x)+0,2314*ABS(e+x)^2+0,0781*ABS(e+x)^4
)^(-4)
Onde, 'tendência' (yy) é o valor do fluxo corrigido na condição
de choque.
Observação: as curvas dadas ao longo do programa com
subscritos 0,6, 0,7, 0,8, 0,9 e 1, passam a representar as
velocidades corrigidas relativas de 0,75, 0,875, 1, 1,125 e
1,25, respectivamente.
}

b=0,2784
c=0,2314
d=0,0781
f=-4

y1_1=yyy_1-
(aa_1+b*ABS(ee_1+x1_1)+c*ABS(ee_1+x1_1)^2+d*ABS(ee_1
+x1_1)^4)^f
y2_1=yyy_1-
(aa_1+b*ABS(ee_1+x2_1)+c*ABS(ee_1+x2_1)^2+d*ABS(ee_1
+x2_1)^4)^f
yyy_1=y3_1

y1_0.9=yyy_0.9-
(aa_0.9+b*ABS(ee_0.9+x1_0.9)+c*ABS(ee_0.9+x1_0.9)^2+d*
ABS(ee_0.9+x1_0.9)^4)^f
y2_0.9=yyy_0.9-
(aa_0.9+b*ABS(ee_0.9+x2_0.9)+c*ABS(ee_0.9+x2_0.9)^2+d*
ABS(ee_0.9+x2_0.9)^4)^f
yyy_0.9=y3_0.9

y1_0.8=yyy_0.8-
(aa_0.8+b*ABS(ee_0.8+x1_0.8)+c*ABS(ee_0.8+x1_0.8)^2+d*
ABS(ee_0.8+x1_0.8)^4)^f
y2_0.8=yyy_0.8-
(aa_0.8+b*ABS(ee_0.8+x2_0.8)+c*ABS(ee_0.8+x2_0.8)^2+d*
ABS(ee_0.8+x2_0.8)^4)^f
yyy_0.8=y3_0.8

////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
Mapa Razão de Pressão x Fluxo Corrigido

{
Observações:
1 - Os pontos selecionados do mapa da referência foram
normalizados em relação ao valor para o ponto, para n=0,8.
Para este ponto, a razão de pressão é de 1,31 e o fluxo
corrigido, 80%. Portanto, os valores lidos para os demais
pontos foram divididos por estes valores de referência.
2- Teste com função polinomial de erf (deixando coeficientes
'a' e 'e' sem calcular). Logo a expressão utilizada assume a
forma:
y=tendência-
(a+0,2784*ABS(e+x)+0,2314*ABS(e+x)^2+0,0781*ABS(e+x)^4
)^(-4)
Onde, 'tendência' (yy) é o valor do fluxo corrigido na condição
de choque.
Observação: as curvas dadas ao longo do programa com
subscritos 0,6, 0,7, 0,8, 0,9 e 1, passam a representar as
velocidades corrigidas relativas de 0,75, 0,875, 1, 1,125 e
1,25, respectivamente.
}

b=0,2784
c=0,2314
d=0,0781
f=-4

y1_0.7=yyy_0.7-
(aa_0.7+b*ABS(ee_0.7+x1_0.7)+c*ABS(ee_0.7+x1_0.7)^2+d*
ABS(ee_0.7+x1_0.7)^4)^f
y2_0.7=yyy_0.7-
(aa_0.7+b*ABS(ee_0.7+x2_0.7)+c*ABS(ee_0.7+x2_0.7)^2+d*
ABS(ee_0.7+x2_0.7)^4)^f
yyy_0.7=y3_0.7

y1_0.6=yyy_0.6-
(aa_0.6+b*ABS(ee_0.6+x1_0.6)+c*ABS(ee_0.6+x1_0.6)^2+d*
ABS(ee_0.6+x1_0.6)^4)^f
y2_0.6=yyy_0.6-
(aa_0.6+b*ABS(ee_0.6+x2_0.6)+c*ABS(ee_0.6+x2_0.6)^2+d*
ABS(ee_0.6+x2_0.6)^4)^f
yyy_0.6=y3_0.6

// Pontos para a curva rp x fluxo corrigido

x1_0.6=0,945671740444728
x2_0.6=1,21961543017347
x105_0.6=1,29953031122345
x3_0.6=1,8890027610164
x1_0.7=0,954191180077971
x2_0.7=1,30008377506479
x3_0.7=2,20057641549405
x1_0.8=0,969757873408817
x2_0.8=1,3026308240273
x3_0.8=2,44779351755974
x1_0.9=1,02247263284782
x2_0.9=1,30112648874499
x3_0.9=2,66956704104357
x1_1=1,07866625925361
x2_1=1,37975602742355
x3_1=2,38694086804544

y1_0.6=0,938846745748947
y2_0.6=1,28034625823246
y3_0.6=1,40120683798834
y1_0.7=0,936872386682624
y2_0.7=1,30175582203455
y3_0.7=1,40331902316749
y1_0.8=0,948202554570647
y2_0.8=1,29143609183623
y3_0.8=1,40146870760272
y1_0.9=1,00662484285354

```

$y2_{0.9}=1,27452318633567$
 $y3_{0.9}=1,39659231175321$
 $y1_1=1,07608207127355$
 $y2_1=1,29404522330254$
 $y3_1=1,395$

// Mapa Razão de Pressão x Eficiência

{
 Observações:

1- Os pontos selecionados do mapa da referência foram normalizados em relação ao valor para o ponto para $n=0,8$. Para este ponto, a razão de pressão é de 1,31 e a eficiência, 0,822. Portanto, os valores lidos para os demais pontos foram divididos por estes valores de referência.

2- Foram escolhidas três funções distintas, todas de grau 2 para três trechos consecutivos da curva, escolhidos de forma a manterem a tendência da curva Não utilizou-se a igualdade das derivadas primeiras nos pontos em comum entre as funções. Com isso foram selecionados 7 pontos distintos em cada curva de velocidade.

Observação: as curvas dadas ao longo do programa com subscritos 0,6, 0,7, 0,8, 0,9 e 1, passam a representar as velocidades corrigidas relativas de 0,75, 0,875, 1, 1,125 e 1,25, respectivamente.

}

// Função 1 de grau 2

$ye1_1=sa1_1*xe1_1^2+sb1_1*xe1_1+sc1_1$
 $ye2_1=sa1_1*xe2_1^2+sb1_1*xe2_1+sc1_1$
 $ye3_1=sa1_1*xe3_1^2+sb1_1*xe3_1+sc1_1$

$ye1_{0.9}=sa1_{0.9}*xe1_{0.9}^2+sb1_{0.9}*xe1_{0.9}+sc1_{0.9}$
 $ye2_{0.9}=sa1_{0.9}*xe2_{0.9}^2+sb1_{0.9}*xe2_{0.9}+sc1_{0.9}$
 $ye3_{0.9}=sa1_{0.9}*xe3_{0.9}^2+sb1_{0.9}*xe3_{0.9}+sc1_{0.9}$

$ye1_{0.8}=sa1_{0.8}*xe1_{0.8}^2+sb1_{0.8}*xe1_{0.8}+sc1_{0.8}$
 $ye2_{0.8}=sa1_{0.8}*xe2_{0.8}^2+sb1_{0.8}*xe2_{0.8}+sc1_{0.8}$
 $ye3_{0.8}=sa1_{0.8}*xe3_{0.8}^2+sb1_{0.8}*xe3_{0.8}+sc1_{0.8}$

$ye1_{0.7}=sa1_{0.7}*xe1_{0.7}^2+sb1_{0.7}*xe1_{0.7}+sc1_{0.7}$
 $ye2_{0.7}=sa1_{0.7}*xe2_{0.7}^2+sb1_{0.7}*xe2_{0.7}+sc1_{0.7}$
 $ye3_{0.7}=sa1_{0.7}*xe3_{0.7}^2+sb1_{0.7}*xe3_{0.7}+sc1_{0.7}$

$ye1_{0.6}=sa1_{0.6}*xe1_{0.6}^2+sb1_{0.6}*xe1_{0.6}+sc1_{0.6}$
 $ye2_{0.6}=sa1_{0.6}*xe2_{0.6}^2+sb1_{0.6}*xe2_{0.6}+sc1_{0.6}$
 $ye3_{0.6}=sa1_{0.6}*xe3_{0.6}^2+sb1_{0.6}*xe3_{0.6}+sc1_{0.6}$

// Função 2 de grau 2

$ye3_1=sa2_1*xe3_1^2+sb2_1*xe3_1+sc2_1$
 $ye4_1=sa2_1*xe4_1^2+sb2_1*xe4_1+sc2_1$
 $ye5_1=sa2_1*xe5_1^2+sb2_1*xe5_1+sc2_1$

$ye3_{0.9}=sa2_{0.9}*xe3_{0.9}^2+sb2_{0.9}*xe3_{0.9}+sc2_{0.9}$
 $ye4_{0.9}=sa2_{0.9}*xe4_{0.9}^2+sb2_{0.9}*xe4_{0.9}+sc2_{0.9}$
 $ye5_{0.9}=sa2_{0.9}*xe5_{0.9}^2+sb2_{0.9}*xe5_{0.9}+sc2_{0.9}$

$ye3_{0.8}=sa2_{0.8}*xe3_{0.8}^2+sb2_{0.8}*xe3_{0.8}+sc2_{0.8}$
 $ye4_{0.8}=sa2_{0.8}*xe4_{0.8}^2+sb2_{0.8}*xe4_{0.8}+sc2_{0.8}$
 $ye5_{0.8}=sa2_{0.8}*xe5_{0.8}^2+sb2_{0.8}*xe5_{0.8}+sc2_{0.8}$

$ye3_{0.7}=sa2_{0.7}*xe3_{0.7}^2+sb2_{0.7}*xe3_{0.7}+sc2_{0.7}$
 $ye4_{0.7}=sa2_{0.7}*xe4_{0.7}^2+sb2_{0.7}*xe4_{0.7}+sc2_{0.7}$
 $ye5_{0.7}=sa2_{0.7}*xe5_{0.7}^2+sb2_{0.7}*xe5_{0.7}+sc2_{0.7}$

$ye3_{0.6}=sa2_{0.6}*xe3_{0.6}^2+sb2_{0.6}*xe3_{0.6}+sc2_{0.6}$

$ye4_{0.6}=sa2_{0.6}*xe4_{0.6}^2+sb2_{0.6}*xe4_{0.6}+sc2_{0.6}$
 $ye5_{0.6}=sa2_{0.6}*xe5_{0.6}^2+sb2_{0.6}*xe5_{0.6}+sc2_{0.6}$

// Função 3 de grau 2

$ye5_1=sa3_1*xe5_1^2+sb3_1*xe5_1+sc3_1$
 $ye6_1=sa3_1*xe6_1^2+sb3_1*xe6_1+sc3_1$
 $ye7_1=sa3_1*xe7_1^2+sb3_1*xe7_1+sc3_1$

$ye5_{0.9}=sa3_{0.9}*xe5_{0.9}^2+sb3_{0.9}*xe5_{0.9}+sc3_{0.9}$
 $ye6_{0.9}=sa3_{0.9}*xe6_{0.9}^2+sb3_{0.9}*xe6_{0.9}+sc3_{0.9}$
 $ye7_{0.9}=sa3_{0.9}*xe7_{0.9}^2+sb3_{0.9}*xe7_{0.9}+sc3_{0.9}$

$ye5_{0.8}=sa3_{0.8}*xe5_{0.8}^2+sb3_{0.8}*xe5_{0.8}+sc3_{0.8}$
 $ye6_{0.8}=sa3_{0.8}*xe6_{0.8}^2+sb3_{0.8}*xe6_{0.8}+sc3_{0.8}$
 $ye7_{0.8}=sa3_{0.8}*xe7_{0.8}^2+sb3_{0.8}*xe7_{0.8}+sc3_{0.8}$

$ye5_{0.7}=sa3_{0.7}*xe5_{0.7}^2+sb3_{0.7}*xe5_{0.7}+sc3_{0.7}$
 $ye6_{0.7}=sa3_{0.7}*xe6_{0.7}^2+sb3_{0.7}*xe6_{0.7}+sc3_{0.7}$
 $ye7_{0.7}=sa3_{0.7}*xe7_{0.7}^2+sb3_{0.7}*xe7_{0.7}+sc3_{0.7}$

$ye5_{0.6}=sa3_{0.6}*xe5_{0.6}^2+sb3_{0.6}*xe5_{0.6}+sc3_{0.6}$
 $ye6_{0.6}=sa3_{0.6}*xe6_{0.6}^2+sb3_{0.6}*xe6_{0.6}+sc3_{0.6}$
 $ye7_{0.6}=sa3_{0.6}*xe7_{0.6}^2+sb3_{0.6}*xe7_{0.6}+sc3_{0.6}$

// Pontos para a curva rp x eficiência

$xe1_{0.6}=0,931222278035178$
 $xe2_{0.6}=0,978590329725457$
 $xe3_{0.6}=1,02826919663059$
 $xe4_{0.6}=1,08141428635799$
 $xe5_{0.6}=1,16382766868787$
 $xe6_{0.6}=1,37038453513935$
 $xe7_{0.6}=1,8892284347286$
 $xe1_{0.7}=0,938340174531188$
 $xe2_{0.7}=0,967862241983014$
 $xe3_{0.7}=1,00624202773464$
 $xe4_{0.7}=1,13614302875112$
 $xe5_{0.7}=1,22077572094151$
 $xe6_{0.7}=1,52682940934185$
 $xe7_{0.7}=2,20490970647656$
 $xe1_{0.8}=0,962808706280842$
 $xe2_{0.8}=1,04170340271862$
 $xe3_{0.8}=1,12357629342221$
 $xe4_{0.8}=1,27894872487188$
 $xe5_{0.8}=1,37496224299897$
 $xe6_{0.8}=1,84470924973667$
 $xe7_{0.8}=2,46759351713544$
 $xe1_{0.9}=1,01067281583961$
 $xe2_{0.9}=1,13319746316174$
 $xe3_{0.9}=1,27025745835681$
 $xe4_{0.9}=1,37818585308008$
 $xe5_{0.9}=1,53191982209516$
 $xe6_{0.9}=2,02824461450704$
 $xe7_{0.9}=2,66370712333513$
 $xe1_1=1,06718370081193$
 $xe2_1=1,24103537086365$
 $xe3_1=1,34223466344103$
 $xe4_1=1,48494835733588$
 $xe5_1=1,70999653999024$
 $xe6_1=2,24717622254469$
 $xe7_1=2,7910693460298$

$ye1_{0.6}=1,0804141150451$
 $ye2_{0.6}=1,10384880833887$
 $ye3_{0.6}=1,10932403517493$
 $ye4_{0.6}=1,10220596242827$
 $ye5_{0.6}=1,0745005644164$

ye6_0.6=1,01196752774941
ye7_0.6=0,915429317356727
ye1_0.7=1,01972328867616
ye2_0.7=1,04910557042087
ye3_0.7=1,08716298161777
ye4_0.7=1,11486629568134
ye5_0.7=1,10563197343506
ye6_0.7=1,04770654646149
ye7_0.7=0,961551608478358
ye1_0.8=0,947812831979542
ye2_0.8=1,0532116432232
ye3_0.8=1,10104346660105
ye4_0.8=1,12405998093576
ye5_0.8=1,1183454473698
ye6_0.8=1,06709768540195
ye7_0.8=1,01002424595876
ye1_0.9=0,888244908700144
ye2_0.9=1,03956680735502
ye3_0.9=1,1139362400997
ye4_0.9=1,1257955770402

ye5_0.9=1,13046297326494
ye6_0.9=1,1015414068505
ye7_0.9=1,05609310727081
ye1_1=0,841735147990727
ye2_1=1,03855646965929
ye3_1=1,09147225659901
ye4_1=1,12309296702906
ye5_1=1,13685946800755
ye6_1=1,12210862429977
ye7_1=1,09093676029029

{Valores das Velocidades Consideradas}

n[1]=0,5
n[2]=0,6
n[3]=0,7
n[4]=0,8
n[5]=0,9
n[6]=1

Anexo III – Programa Computacional de Análise de Desempenho de Turbinas a Gás para Geração de Potência

A seguir é apresentado o arquivo fonte do programa desenvolvido para análise de desempenho de turbinas a gás para geração de potência:

```
{
Modelagem Computacional para Análise de Desempenho de
Turbinas a Gás para Geração de Potência
Programa Principal e Conjunto de Sub-Rotinas nele utilizadas
}

////////////////////////////////////////////////////////////////
{Procedure YY
Utilizada na Procedure MapaCompressor no cálculo dos
coeficientes da curva que passa pelo ponto dado.}

{
Dados de Entrada da procedure:
gru[5..12] - coeficientes da linha surge e limite inferior do mapa
de desempenho do compressor
x_pv - fluxo corrigido 'off-design' relativo ao de projeto
lambda - fração, número entre 0 e 1, que indica a proximidade
da curva em relação à curva limite inferior

Dados de Saída da procedure:
fru[1..4] - coeficientes da curva Beta (que passa pelo ponto
dado)
y_pv - valor da razão de pressão relativa à de projeto,
calculada pela função da linha Beta
}

procedure YY(gru[5..12]; x_pv ; lambda : fru[1..4]; y_pv )

fru[1]:=gru[5]*(1-lambda) + gru[9]*lambda
fru[2]:=gru[6]*(1-lambda) + gru[10]*lambda
fru[3]:=gru[7]*(1-lambda) + gru[11]*lambda
fru[4]:=gru[8]*(1-lambda) + gru[12]*lambda
y_pv:=fru[1]*x_pv^3+fru[2]*x_pv^2+fru[3]*x_pv+fru[4]

end {procedure YY}

////////////////////////////////////////////////////////////////
{Procedure Intervalo
Utilizada na Procedure MapaCompressor para indicar entre
quais intervalos de velocidade encontra-se o ponto dado,
incluindo a indicação dos pontos de intersecção da curva que
passa pelo ponto dado com as curvas de velocidade dos
intervalos indicados.}

{
Dados de entrada da procedure:
n[1..6] - velocidades do mapa do compressor
coordenadas z2[1..6] e z[1..6] - pontos de intersecção da curva
Beta com as linhas de velocidade
xp - fluxo corrigido 'off-design' relativo ao de projeto

Dados de Saída da procedure:
}
```

```
zsup e zinf - pontos de intersecção da curva Beta com as linhas
de velocidade superior e inferior ao ponto dado
nsup e ninf - velocidades superior e inferior ao ponto dado
isup e iinf - índices para velocidade superior e inferior
}

procedure intervalo(z[1..6];z2[1..6];n[1..6]; xp;zinf; zsup;z2inf;
z2sup;ninf;nsup;iinf;isup)

i=1
repeat
kinf:=i
if xp > z[i] then
zinf:=z[i]
zsup:=z[i+1]
z2inf:=z2[i]
z2sup:=z2[i+1]
ninf:=n[i]
nsup:=n[i+1]
iinf:=i
isup:=i+1
i:=i+1
endif
if xp < z[i] then i=6
until i = 6

end {procedure Intervalo}

////////////////////////////////////////////////////////////////
{Procedure Isolando
Utilizada na Procedure MapaCompressor para indicar (isolar)
as eficiências dos pontos de intersecção do fluxo corrigido 'off-
design' relativo ao de projeto com as curvas de velocidade
(para velocidade acima e abaixo da velocidade no ponto
dado).}

{
Dados de entrada da procedure:
ez[1..6] - eficiências da intersecção do fluxo corrigido 'off-
design' relativo ao de projeto com as curvas de velocidade
com as linhas velocidades dadas no mapa do compressor
i2 e i1 - índices das curvas de velocidade superior e inferior

Dados de Saída:
ye1 e ye2 - eficiências da intersecção do fluxo corrigido 'off-
design' relativo ao de projeto com as curvas de velocidade
com as linhas velocidades superior e inferior
}

procedure isolando(ez[1..6];i1;i2 : ye1;ye2)

ye1:=ez[i1]
```

```

ye2:=ez[i2]

end {procedure isolando}

////////////////////////////////////

{Procedure MapaCompressor}

procedure MapaCompressor(x_p; y_p : n_ponto ;
eta_ponto;fator;ezsup;ezinf;efi_ponto;fator_rp;fator_eficiencia;t
este)

{
Dados de Entrada da procedure:
Ponto escolhido (ponto dado) do mapa de desempenho do
compressor (mapa fluxo corrigido relativo x razão de pressão
relativa). O mapa poderá ser ou não apresentado ao usuário.
Caso o ponto escolhido esteja fora da região útil do mapa, nos
resultados finais do programa aparecerá uma mensagem
solicitando a escolha de novo ponto.
x_p - fluxo corrigido relativo ao fluxo corrigido nominal
y_p - razão de compressão relativa à razão de compressão
nominal

Dados de Saída calculados:
Observações: O ponto dado está localizado entre duas curvas
de velocidade, denominadas curva de velocidade superior e
inferior
n_ponto - velocidade (normalizada e relativa à de projeto) do
compressor off_design, no ponto dado;
eta_ponto - eficiência no ponto dado (relativa à de projeto)
calculada com base na restrição de eficiência máxima e
mínima das curvas de velocidade superior e inferior à
velocidade (normalizada e relativa à de projeto)calculada;
fator - fração que indica a proximidade do ponto dado em
relação ao ponto de intersecção da curva que passa pelo
ponto dado com a curva de velocidade superior;
ezsup e ezinf - eficiências (relativa à de projeto) para os
pontos de intersecção com as curvas de velocidade superior e
inferior (normalizada e relativa à de projeto), considerando a
restrição de eficiência máxima e mínima (relativa à de projeto);
efi_ponto - eficiência no ponto dado (relativa à de projeto)
calculada sem as restrições consideradas no cálculo de
eta_ponto;
fator_rp - igual a y_p;
fator_eficiencia - igual a eta_ponto;
teste - quando o resultado é igual a 0 indica a necessidade de
escolha de um novo ponto (novo x_p e y_p), quando igual a 1,
o pondo escolhido está dentro da região útil do mapa;

As curvas de desempenho do compressor (fluxo corrigido
relativo x razão de pressão relativa e fluxo corrigido relativo x
eficiência relativa) tiveram seus coeficientes calculados pelo
outro programa desenvolvido. Nesta procedure, os
coeficientes foram inseridos.

Observação: os subscritos 0,5, 0,6, 0,7, 0,8, 0,9 e 1, passam a
representar as velocidades corrigidas relativas de 0,625, 0,75,
0,875, 1, 1,125 e 1,25, respectivamente, dada a relativização
feita para n=0,8 das curvas da referência consideradas.
}

{Valores das velocidades consideradas}

n[1]=0,625
n[2]=0,75
n[3]=0,875
n[4]=1
n[5]=1,125
n[6]=1,25

```

{Valores máximos e mínimos para o ponto dado - Fluxo Corrigido e Relação de Pressão, relativos aos valores nominais}

```

xp_max=1,28271490822659
xp_min=0,430410669483692
yp_max=1,63722136059742
yp_min=0,405106515776112
yp_xpmax=1,30387657047307
yp_xpmin=0,631867658467082
xp_ypmax=1,21239931335006
xp_ypmin=0,64729961706061

```

{Valores para eficiências mínimas de cada velocidade considerada}

```

eta_min[1]=0,820046780471967
eta_min[2]=0,825414189678244
eta_min[3]=0,877454722417358
eta_min[4]=0,872087313211082
eta_min[5]=0,872087313211082
eta_min[6]=0,803711187235474

```

```

{
Coeficientes das Curvas:
coeficientes para curva da função limite inferior - a_lim, b_lim,
c_lim, d_lim
coeficientes para curva surge - a_surge, b_surge, c_surge,
d_surge
coeficientes para curvas de velocidade no gráfico fluxo corrido
x razão de pressão - a_0.5, b_0.5, c_0.5, d_0.5
coeficientes para curvas de eficiência - aa_0.5, bb_0.5, cc_0.5,
dd_0.5, ee_0.5
Os valores dos coeficientes utilizados devem ter o máximo
possível de casas decimais.
}

```

//Coeficiente do mapa Fluxo Corrigido x Razão de Pressão

```

a_0.5=-1,459737796E+01
a_0.6=-1,524713584E+01
a_0.7=-2,380947852E+01
a_0.8=-3,809743710E+01
a_0.9=-6,172430040E+01
a_1=-4,907098646E+02
a_lim=1,689247966E+00
a_surge=-1,526286258E-01
b_0.5=1,884860167E+01
b_0.6=2,579409493E+01
b_0.7=5,086198848E+01
b_0.8=1,004906054E+02
b_0.9=1,954548509E+02
b_1=1,784808909E+03
b_lim=-2,761469384E+00
b_surge=8,826138171E-01
c_0.5=-8,471483980E+00
c_0.6=-1,485946406E+01
c_0.7=-3,642438729E+01
c_0.8=-8,886077921E+01
c_0.9=-2,070172893E+02
c_1=-2,165138045E+03
c_lim=1,854346468E+00
c_surge=1,700929729E-01
d_0.5=1,950240419E+00
d_0.6=3,664368536E+00

```

```

d_0.7=9,664380315E+00
d_0.8=2,747533967E+01
d_0.9=7,472411534E+01
d_1=8,776409665E+02
d_lim=-9,631628434E-02
d_surge=4,040118879E-01

```

```
//Coeficientes do mapa Fluxo Corrigido x Eficiência Isentrópica
```

```

aa_0.5=1,897323890E+03
aa_0.6=3,523809722E+02
aa_0.7=2,697880081E+02
aa_0.8=-8,682929230E+02
aa_0.9=5,556080917E+03
aa_1=2,453686770E+04
bb_0.5=-1,523774681E+03
bb_0.6=-3,427764006E+02
bb_0.7=-3,157450355E+02
bb_0.8=1,280925027E+03
bb_0.9=-9,227058029E+03
bb_1=-4,474723871E+04
cc_0.5=5,460513636E+02
cc_0.6=1,510453378E+02
cc_0.7=1,663728503E+02
cc_0.8=-8,321983584E+02
cc_0.9=6,815749533E+03
cc_1=3,626954393E+04
dd_0.5=-7,265279772E+01
dd_0.6=-2,445583153E+01
dd_0.7=-3,231901009E+01
dd_0.8=2,020585362E+02
dd_0.9=-1,888418622E+03
dd_1=-1,102350142E+04
ee_0.5=-8,896292044E+02
ee_0.6=-1,381091680E+02
ee_0.7=-8,741912591E+01
ee_0.8=2,185077180E+02
ee_0.9=-1,255576749E+03
ee_1=-5,045650944E+03

```

```
{Início dos cálculos da Procedure}
```

```
teste=0
```

```
{1a. Condição}
```

```
{Inserção de condição para garantir que o ponto dado se encontra entre os máximos e mínimos dados}
```

```
if (x_p > xp_min) and (x_p < xp_max) and (y_p > yp_min) and (y_p < yp_max) then
```

```
{2a. condição}
```

```
{inserção da condição para que y_p não esteja acima da linha surge nem abaixo da curva limite}
{inserção da condição para que x_p não esteja entre as linhas de velocidade 0,5 e 1}
```

```
y_sup=a_surge*x_p^3+b_surge*x_p^2+c_surge*x_p+d_surge
y_inf=a_lim*x_p^3+b_lim*x_p^2+c_lim*x_p+d_lim
```

```
{para verificar se o ponto encontra-se antes da curva n=0,5}
```

```
p=0
```

```
delta1=(xp_ypmin-xp_min)/(yp_ypmin-yp_min)
delta2=(xp_max-xp_ypmax)/(yp_max-yp_ypmax)
```

```

varx1=delta1/5000
vary1=varx1/delta1
varx2=delta2/5000
vary2=varx2/delta2

```

```

///
if (y_p < yp_xpmin) and (y_p > yp_min) then

```

```

x_sup=x_p+0,001
p=1
x_inf=xp_min

```

```

repeat
x_inf=x_inf+varx1
finf=a_0.5*x_inf^3+b_0.5*x_inf^2+c_0.5*x_inf+d_0.5

```

```
until abs(finf-y_p) < vary1
```

```
endif {fim da condição depois da curva n=0,5}
```

```
///
```

```
{para verificar se o ponto encontra-se depois da curva n=1}
```

```
///
```

```
if (y_p < yp_max) and (y_p > yp_xpmax) then
```

```

x_inf=x_p-0,001
p=1
x_sup=xp_max

```

```

repeat
x_sup=x_sup-varx2
fsup=a_1*x_sup^3+b_1*x_sup^2+c_1*x_sup+d_1

```

```
until abs(fsup-y_p) < vary2
```

```
endif {fim da condição depois da curva n=1}
```

```
///
```

```
///
```

```

if p=0 then
x_sup=x_p+0,001
x_inf=x_p-0,001
endif

```

```
///
```

```
{2a. condição propriamente}
```

```
if (y_p < y_sup) and (y_p > y_inf) and (x_p < x_sup) and (x_p > x_inf) then {}
```

```
teste=1
```

```
{Cálculo da Curva que passa pelo ponto dado}
```

```

gru[5]=a_surge
gru[6]=b_surge
gru[7]=c_surge
gru[8]=d_surge
gru[9]=a_lim
gru[10]=b_lim
gru[11]=c_lim
gru[12]=d_lim

```

```
tol=1e-10 {tolerância para critério de parada dos próximos loopings}
```

```
////////////////////////////////////
```

```

lambda0:=0,52
lambda1:=0,50

```

```

repeat
call YY(gru[5..12]; x_p ; lambda0 : fru[1..4]; y_pv0)
call YY(gru[5..12]; x_p ; lambda1 : fru[1..4]; y_pv1)

deriv1:=(y_pv1 - y_pv0)/(lambda1 - lambda0) {+0,1e-10}
lambda2:=- (y_pv1-y_p)/deriv1 + lambda1
call YY(gru[5..12]; x_p ; lambda2 : fru[1..4]; y_pv2)

lambda0:=lambda1
lambda1:=lambda2

until abs(y_pv2 - y_p) <= tol
////////////////////////////////////

{Coeficientes da Curva que passa pelo ponto dado}
a_p = fru[1]
b_p = fru[2]
c_p = fru[3]
d_p = fru[4]

{Cálculo dos pontos da intersecção da curva que passa pelo
ponto dado com as curvas de velocidade no gráfico fluxo
corrigido x razão de pressão}

//Intersecção com a curva n=0,5
xx0:=0,52
xx1:=0,50

repeat

yyv=a_0.5*xx0^3+b_0.5*xx0^2+c_0.5*xx0+d_0.5
yyb=a_p*xx0^3+b_p*xx0^2+c_p*xx0+d_p
ff0 = yyv-yyb

yyv=a_0.5*xx1^3+b_0.5*xx1^2+c_0.5*xx1+d_0.5
yyb=a_p*xx1^3+b_p*xx1^2+c_p*xx1+d_p
ff1 = yyv-yyb

derivf:=(ff1 - ff0)/(xx1 - xx0)
xx2:=- (ff1)/derivf + xx1

yyv=a_0.5*xx2^3+b_0.5*xx2^2+c_0.5*xx2+d_0.5
yyb=a_p*xx2^3+b_p*xx2^2+c_p*xx2+d_p
ff2 = yyv-yyb

xx0=xx1
xx1=xx2

until abs(ff2) <= tol
xxi_0.5=xx2
yyi_0.5=yyb {fim do cálculo do ponto de intersecção com a
curva n=0,5}

//Intersecção com a curva n=0,6
xx0:=0,52
xx1:=0,50

repeat

yyv=a_0.6*xx0^3+b_0.6*xx0^2+c_0.6*xx0+d_0.6
yyb=a_p*xx0^3+b_p*xx0^2+c_p*xx0+d_p
ff0 = yyv-yyb

yyv=a_0.6*xx1^3+b_0.6*xx1^2+c_0.6*xx1+d_0.6
yyb=a_p*xx1^3+b_p*xx1^2+c_p*xx1+d_p
ff1 = yyv-yyb

derivf:=(ff1 - ff0)/(xx1 - xx0)
xx2:=- (ff1)/derivf + xx1

yyv=a_0.6*xx2^3+b_0.6*xx2^2+c_0.6*xx2+d_0.6
yyb=a_p*xx2^3+b_p*xx2^2+c_p*xx2+d_p
ff2 = yyv-yyb

xx0=xx1
xx1=xx2

until abs(ff2) <= tol
xxi_0.6=xx2
yyi_0.6=yyb {fim do cálculo do ponto de intersecção com a
curva n=0,6}

//Intersecção com a curva n=0,7
xx0:=0,52
xx1:=0,50

repeat

yyv=a_0.7*xx0^3+b_0.7*xx0^2+c_0.7*xx0+d_0.7
yyb=a_p*xx0^3+b_p*xx0^2+c_p*xx0+d_p
ff0 = yyv-yyb

yyv=a_0.7*xx1^3+b_0.7*xx1^2+c_0.7*xx1+d_0.7
yyb=a_p*xx1^3+b_p*xx1^2+c_p*xx1+d_p
ff1 = yyv-yyb

derivf:=(ff1 - ff0)/(xx1 - xx0)
xx2:=- (ff1)/derivf + xx1

yyv=a_0.7*xx2^3+b_0.7*xx2^2+c_0.7*xx2+d_0.7
yyb=a_p*xx2^3+b_p*xx2^2+c_p*xx2+d_p
ff2 = yyv-yyb

xx0=xx1
xx1=xx2

until abs(ff2) <= tol
xxi_0.7=xx2
yyi_0.7=yyb {fim do cálculo do ponto de intersecção com a
curva n=0,7}

//Intersecção com a curva n=0,8
xx0:=0,52
xx1:=0,50

repeat

yyv=a_0.8*xx0^3+b_0.8*xx0^2+c_0.8*xx0+d_0.8
yyb=a_p*xx0^3+b_p*xx0^2+c_p*xx0+d_p
ff0 = yyv-yyb

yyv=a_0.8*xx1^3+b_0.8*xx1^2+c_0.8*xx1+d_0.8
yyb=a_p*xx1^3+b_p*xx1^2+c_p*xx1+d_p
ff1 = yyv-yyb

derivf:=(ff1 - ff0)/(xx1 - xx0)
xx2:=- (ff1)/derivf + xx1

yyv=a_0.8*xx2^3+b_0.8*xx2^2+c_0.8*xx2+d_0.8
yyb=a_p*xx2^3+b_p*xx2^2+c_p*xx2+d_p
ff2 = yyv-yyb

xx0=xx1
xx1=xx2

until abs(ff2) <= tol
xxi_0.8=xx2
yyi_0.8=yyb {fim do cálculo do ponto de intersecção com a
curva n=0,8}

```

```

until abs(ff2) <= tol
xxi_0.8=xx2
yyi_0.8=yyb {fim do cálculo do ponto de intersecção com a
curva n=0,8}

```

```

//Intersecção com a curva n=0,9
xx0:=0,52
xx1:=0,50

```

```

repeat
yyv=a_0.9*xx0^3+b_0.9*xx0^2+c_0.9*xx0+d_0.9
yyb=a_p*xx0^3+b_p*xx0^2+c_p*xx0+d_p
ff0 = yyv-yyb

yyv=a_0.9*xx1^3+b_0.9*xx1^2+c_0.9*xx1+d_0.9
yyb=a_p*xx1^3+b_p*xx1^2+c_p*xx1+d_p
ff1 = yyv-yyb

```

```

derivf:=(ff1 - ff0)/(xx1 - xx0)
xx2:= -(ff1)/derivf + xx1

```

```

yyv=a_0.9*xx2^3+b_0.9*xx2^2+c_0.9*xx2+d_0.9
yyb=a_p*xx2^3+b_p*xx2^2+c_p*xx2+d_p
ff2 = yyv-yyb

```

```

xx0=xx1
xx1=xx2

```

```

until abs(ff2) <= tol
xxi_0.9=xx2
yyi_0.9=yyb {fim do cálculo do ponto de intersecção com a
curva n=0,9}

```

```

//Intersecção com a curva n=1
xx0:=0,52
xx1:=0,50

```

```

repeat
yyv=a_1*xx0^3+b_1*xx0^2+c_1*xx0+d_1
yyb=a_p*xx0^3+b_p*xx0^2+c_p*xx0+d_p
ff0 = yyv-yyb

```

```

yyv=a_1*xx1^3+b_1*xx1^2+c_1*xx1+d_1
yyb=a_p*xx1^3+b_p*xx1^2+c_p*xx1+d_p
ff1 = yyv-yyb

```

```

derivf:=(ff1 - ff0)/(xx1 - xx0)
xx2:= -(ff1)/derivf + xx1

```

```

yyv=a_1*xx2^3+b_1*xx2^2+c_1*xx2+d_1
yyb=a_p*xx2^3+b_p*xx2^2+c_p*xx2+d_p
ff2 = yyv-yyb

```

```

xx0=xx1
xx1=xx2

```

```

until abs(ff2) <= tol
xxi_1=xx2
yyi_1=yyb {fim do cálculo do ponto de intersecção com a
curva n=1}

```

```

/////////////////////////////////////////////////////////////////

```

```

{pontos da inteseção considerados para o cálculo das
distâncias}

```

```

{aplicação da Procedure Intervalo}

```

```

xz[1]=xxi_0.5
xz[2]=xxi_0.6
xz[3]=xxi_0.7
xz[4]=xxi_0.8
xz[5]=xxi_0.9
xz[6]=xxi_1

```

```

yz[1]=yyi_0.5
yz[2]=yyi_0.6
yz[3]=yyi_0.7
yz[4]=yyi_0.8
yz[5]=yyi_0.9
yz[6]=yyi_1

```

```

call intervalo(xz[1..6];yz[1..6]; n[1..6];x_p : xzinf; xzsup; yzinf;
yzsup;ninf;nsup;iinf;isup)

```

```

{Cálculo das Distâncias}
{pontos de interesse para o cálculo das distâncias separados
pela aplicação da procedure intervalo}

```

```

dist_1=abs(( (x_p-xzinf)^2 + (y_p-yzinf)^2 )^0,5 )
dist_2=abs(( (x_p-xzsup)^2 + (y_p-yzsup)^2 )^0,5 )
fator=dist_1/(dist_1+dist_2)
n_ponto=fator*nsup+(1-fator)*ninf

```

```

{Cálculo da intersecção com as Curvas de Eficiência}

```

```

aa[1]=aa_0.5
aa[2]=aa_0.6
aa[3]=aa_0.7
aa[4]=aa_0.8
aa[5]=aa_0.9
aa[6]=aa_1

```

```

bb[1]=bb_0.5
bb[2]=bb_0.6
bb[3]=bb_0.7
bb[4]=bb_0.8
bb[5]=bb_0.9
bb[6]=bb_1

```

```

cc[1]=cc_0.5
cc[2]=cc_0.6
cc[3]=cc_0.7
cc[4]=cc_0.8
cc[5]=cc_0.9
cc[6]=cc_1

```

```

dd[1]=dd_0.5
dd[2]=dd_0.6
dd[3]=dd_0.7
dd[4]=dd_0.8
dd[5]=dd_0.9
dd[6]=dd_1

```

```

ee[1]=ee_0.5
ee[2]=ee_0.6
ee[3]=ee_0.7
ee[4]=ee_0.8
ee[5]=ee_0.9
ee[6]=ee_1

```

```

{Coeficientes para Curva de Eficiência para a velocidade
calculada no ponto}

```

```

aa_ponto=aa[iinf]*(1-fator)+aa[isup]*fator
bb_ponto=bb[iinf]*(1-fator)+bb[isup]*fator

```

```

cc_ponto=cc[iinf]*(1-fator)+cc[isup]*fator
dd_ponto=dd[iinf]*(1-fator)+dd[isup]*fator
ee_ponto=ee[iinf]*(1-fator)+ee[isup]*fator

efi_ponto=ee_ponto*x_p^4+aa_ponto*x_p^3+bb_ponto*x_p^2+
cc_ponto*x_p+dd_ponto {fim do cálculo da curva de eficiência
intermediária efi_ponto}

ei_0.5=ee_0.5*x_p^4+aa_0.5*x_p^3+bb_0.5*x_p^2+cc_0.5*x_
p+dd_0.5
ei_0.6=ee_0.6*x_p^4+aa_0.6*x_p^3+bb_0.6*x_p^2+cc_0.6*x_
p+dd_0.6
ei_0.7=ee_0.7*x_p^4+aa_0.7*x_p^3+bb_0.7*x_p^2+cc_0.7*x_
p+dd_0.7
ei_0.8=ee_0.8*x_p^4+aa_0.8*x_p^3+bb_0.8*x_p^2+cc_0.8*x_
p+dd_0.8
ei_0.9=ee_0.9*x_p^4+aa_0.9*x_p^3+bb_0.9*x_p^2+cc_0.9*x_
p+dd_0.9
ei_1=ee_1*x_p^4+aa_1*x_p^3+bb_1*x_p^2+cc_1*x_p+dd_1

ez[1]=ei_0.5
ez[2]=ei_0.6
ez[3]=ei_0.7
ez[4]=ei_0.8
ez[5]=ei_0.9
ez[6]=ei_1

{aplicação da Procedure Isolando}
call isolando(ez[1..6];iinf;isup : ezinf;ezsup)

{condição para que, quando a eficiência superior ou inferior
calculada forem inferiores à eficiência mínima lida no mapa, o
valor calculado seja substituído pelo valor mínimo}

if ezsupsup<eta_min[isup] then
ezsup=eta_min[isup]
endif

if ezinf<eta_min[iinf] then
ezinf=eta_min[iinf]
endif

{continuação do procedimento Mapa Compressor}

eta_ponto=ezsup*fator+ezinf*(1-fator)

fator_rp=y_p
fator_eficiencia=eta_ponto

else {da 2a. condição}

{valores de saída para quando o ponto dado está fora da
região útil do mapa, o que permitirá a continuidade dos
cálculos do programa, embora haja posterior necessidade de
mudança na escolha do ponto dado}
n_ponto=0,9
eta_ponto=1
fator=0,9
ezsup=0,9
ezinf=0,8
efi_ponto=0,9
fator_rp=0,9
fator_eficiencia=0,9
x_min=1
x_max=1

endif {fim da 2a. condição}

else {da 1a. condição}

```

```

{mesma observação feita anteriormente}
n_ponto=0,9
eta_ponto=1
fator=0,9
ezsup=0,9
ezinf=0,8
efi_ponto=0,9
fator_rp=0,9
fator_eficiencia=0,9
x_min=1
x_max=1

endif {fim da 1a. condição}

end { Procedure Mapa Compressor }

/////////////////////////////////////////////////////////////////
{Procedure Compressor
Utilizada para efetuar cálculos termodinâmicos no compressor,
considerando seus dados nominais.}

Procedure Compressor(P1; T1; rp; nc; mc : P2; T2; fcc;
deltaTc; W_c; H2_compressor)

{
Dados de Entrada:
P1 - pressão de entrada (bar);
T1 - temperatura de entrada (K);
rp - relação de compressão;
nc - eficiência isentrópica do compressor;
mc - fluxo mássico (kg/s).
Dados de saída:
P2 - pressão de saída (bar);
T2 - temperatura de saída (K);
fcc - fluxo corrigido na entrada (kg*K^0,5/bar);
deltaTc - variação de temperatura no compressor (K);
W_c - potência do compressor (kW);
H2_compressor - entalpia na saída do compressor (kW).
}

P2 = rp*P1
H1 = ENTHALPY(Air;T=T1)
S1 = ENTROPY(Air;T=T1;P=P1)
S2s = S1
H2s = ENTHALPY(Air; P=P2; S=S2s)
T2s = temperature(Air; H=H2s)
H2 = H1 - (H1- H2s)/nc
T2 = temperature(Air; H=H2)
deltaTc = T2-T1
fcc = mc*(T1)^0,5/P1
W_c=mc*(H2-H1)

//cálculo H2_compressor
H2_compressor=mc*H2

end {fim da Procedure Compressor}

/////////////////////////////////////////////////////////////////
{Function Combustor
Utilizada para calcular a pressão na saída da câmara da
combustão}

Function Combustor (P2; deltaC)

{
Dados de Entrada:
P2 - pressão de entrada no combustor (bar);
deltaC - queda de pressão no combustor (bar).
Dados de Saída:
Resultado da Function - pressão de saída no combustor.
}

```

```

}

Combustor = P2 - deltaC
end {fim function Combustor}

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
{Subprogram Combustao
Utilizada para o equacionamento da combustão na câmara de
combustão, tanto para operação nominal quanto para
operação off-design.}

Subprogram Combustao (eficomb;T_comb; T2; T3; m; P2; P3;
n2; o2; co2; arg; ch4; c2h6; c3h8; co2_comb; n2_comb;
m_comb; W_comb;exc;ACmolar;ACmass)

{
Dados de Entrada:
eficomb - eficiência da câmara da combustão
T_comb - temperatura do combustível na entrada da câmara
de combustão (K);
T2 - temperatura do ar após a compressão ou na entrada da
câmara de combustão (K);
T3 - temperatura dos gases após a combustão (K);
m - vazão mássica de ar na entrada da câmara de combustão
(kg/s);
P2 - pressão de entrada no combustor (bar);
P3 - pressão na saída do combustor (bar);
n2 - composição do ar: fração volumétrica de Nitrogênio;
o2 - composição do ar: fração volumétrica de Oxigênio;
co2 - composição do ar: fração volumétrica de Gás Carbônico;
arg - composição do ar: fração volumétrica de Argônio;
ch4 - composição do combustível: fração volumétrica de
Metano;
c2h6 - composição do combustível: fração volumétrica de
Etano;
c3h8 - composição do combustível: fração volumétrica de
Propano;
co2_comb - composição do combustível: fração volumétrica de
Gás Carbônico;
n2_comb - composição do combustível: fração volumétrica de
Nitrogênio.
Dados de Saída:
m_comb - fluxo de massa dos gases de combustão (kg/s).
W_comb - potência térmica adicionada
exc - excesso de ar
ACmolar - relação ar/combustível (molar)
ACmássica - relação ar/combustível (mássica)
}

//Entalpias de formação (em kJ/kmol) da referência Moran and
Shapiro, 2006
Hform_O2=0
Hform_N2=0
Hform_Arg=0
Hform_H2O=-241820 {estado gasoso}
Hform_CO2=-393520
Hform_CH4=-74850
Hform_C2H6=-84680
Hform_C3H8=-103850

//Poder Calorífico (em kJ/kg) da referência Moran and Shapiro,
1999
//Superior
PCI_CH4=55510
PCI_C2H6=51870
PCI_C3H8=50350
PCI_CO2=0
PCI_N2=0
//Inferior
PCS_CH4=50020

```

```

PCS_C2H6=47480
PCS_C3H8=46360
PCS_CO2=0
PCS_N2=0

// Massa molar dos componentes do ar
MM_n2=MolarMass(Nitrogen)
MM_o2=MolarMass(O2)
MM_co2=MolarMass(CO2)
MM_arg=MolarMass(Argon)
MM_h2o=MolarMass(H2O)

MM_ar=n2*MM_n2+o2*MM_o2+co2*MM_co2+arg*MM_arg

// fração mássica dos componentes do ar
mn2=n2*MM_n2/MM_ar
mo2=o2*MM_o2/MM_ar
mco2=co2*MM_co2/MM_ar
marg=arg*MM_arg/MM_ar

// Massa molar dos componentes do combustível
MM_ch4=MolarMass(CH4)
MM_c2h6=MolarMass(C2H6)
MM_c3h8=MolarMass(C3H8)

MM_comb=ch4*MM_ch4+c2h6*MM_c2h6+c3h8*MM_c3h8+co
2_comb*MM_co2+n2_comb*MM_n2

// fração mássica dos componentes do combustível
mch4=ch4*MM_ch4/MM_comb
mc2h6=c2h6*MM_c2h6/MM_comb
mc3h8=c3h8*MM_c3h8/MM_comb
mco2_comb=co2_comb*MM_co2/MM_comb
mn2_comb=n2_comb*MM_n2/MM_comb

N_ar=m/MM_ar
N_comb=m_comb/MM_comb

// Entalpias dos componentes do Ar antes da combustão
H_2n2=mn2*Enthalpy(N2;T=T2)
H_2o2=mo2*Enthalpy(O2;T=T2)
H_2co2=mco2*Enthalpy(CO2;T=T2)
H_2arg=marg*Enthalpy(Argon;T=T2;P=P2)

H_2ar=m*(H_2n2+H_2o2+H_2co2+H_2arg)

// Entalpias dos componentes do combustível antes da
combustão
H_2ch4=mch4*Enthalpy(CH4;T=T_comb)
H_2c2h6=mc2h6*Enthalpy(C2H6;T=T_comb)
H_2c3h8=mc3h8*Enthalpy(C3H8;T=T_comb)
H_2co2_comb=mco2_comb*Enthalpy(CO2;T=T_comb)
H_2n2_comb=mn2_comb*Enthalpy(N2;T=T_comb)

H_2comb=(m_comb)*(ch4*H_2ch4+c2h6*H_2c2h6+c3h8*H_2
c3h8+co2_comb*H_2co2_comb+n2_comb*H_2n2_comb)

// Entalpia antes da combustão (ar + combustível)
H_2=H_2ar+H_2comb

// Entalpias dos componentes dos gases após a combustão
// T33 é a temperatura a qual os gases de combustão estarão
caso a eficiência de combustão seja 100%

H_33co2=a*Enthalpy(CO2;T=T33)*MM_co2
H_33h2o=b*Enthalpy(H2O;T=T33)*MM_h2o
H_33arg=c*Enthalpy(Argon;T=T_comb;P=P3)*MM_arg
H_33n2=d*Enthalpy(N2;T=T33)*MM_n2
H_33o2=e*Enthalpy(O2;T=T33)*MM_o2

```

```

c=N_ar*arg
d=N_ar*n2+N_comb*n2_comb
a=N_ar*co2+N_comb*(ch4+2*c2h6+3*c3h8+co2_comb)
2*b=N_comb*(4*ch4+6*c2h6+8*c3h8)
e=(N_ar*(2*o2+2*co2)+N_comb*(2*co2_comb)-2*a-b)/2

exc=e/(N_ar*o2-e)
ACmolar=N_ar/N_comb
ACmass=ACmolar*(MM_ar/MM_comb)

// Entalpia após a combustão
H_33=H_33co2+H_33h2o+H_33arg+H_33n2+H_33o2

// Igualdade de Entalpias (antes da combustão e após a
combustão)
// Esta igualdade permite o cálculo da massa de combustível
necessária
H_2=H_33

// Condição imposta para a igualdade de entalpias:
consideração da eficiência de combustão

H_3co2=a*Enthalpy(CO2;T=T3)*MM_co2
H_3h2o=b*Enthalpy(H2O;T=T3)*MM_h2o
H_3arg=c*Enthalpy(Argon;T=T_comb;P=P3)*MM_arg
H_3n2=d*Enthalpy(N2;T=T3)*MM_n2
H_3o2=e*Enthalpy(O2;T=T3)*MM_o2

H_3=H_3co2+H_3h2o+H_3arg+H_3n2+H_3o2

(1-eficomb)*m_comb*PCS_comb=H_33-H_3

//Cálculo do Poder Calorífico do Combustível

PCS_comb=(PCS_CH4*mch4+PCS_C2H6*mc2h6+PCS_C3H
8*mc3h8+PCS_CO2*mco2_comb+PCS_N2*mn2_comb)
PCI_comb=(PCI_CH4*mch4+PCI_C2H6*mc2h6+PCI_C3H8*m
c3h8+PCI_CO2*mco2_comb+PCI_N2*mn2_comb)

// Potência térmica disponibilizada ao sistema
W_comb=m_comb*PCS_comb

end {fim do subprogram Combustao}

////////////////////////////////////
{Procedure TurbinaGG
Utilizada para efetuar cálculos termodinâmicos na turbina
geradora de gases, considerando seus dados nominais.}

Procedure TurbinaGG (T3; P3; P4; mgg; ntgg; nm: T4; rpgg;
deltaTgg; fctgg; W_tgg; H4;H3_tgg)

{
Dados de Entrada:
T3 - temperatura de entrada na turbina (K);
P3 - pressão de entrada na turbina (bar);
P4 - pressão na saída da turbina (bar);
mgg - fluxo máxico na turbina (kg/s);
ntgg - eficiência isentrópica da turbina;
nm - eficiência mecânica de transmissão compressor-turbina
geradora de gases.
Dados de Saída:
T4 - temperatura de saída da turbina (K);
rpgg - relação de pressão na turbina;
deltaTgg - variação de temperatura na turbina (K);
fctgg - fluxo corrigido na entrada da turbina (kg*K^m0,5/bar);
W_tgg - potência na turbina (kW);
H4 - entalpia na saída da turbina (kJ/kg);

```

```

H3_tgg - entalpia na saída da turbina (kW).
}

{ P4, embora seja um dado de entrada, é calculado a partir da
equação colocada após a chamada da 'procedure' no
programa principal }

H3 = ENTHALPY(Air;T=T3)
S3 = ENTROPY(Air;T=T3;P=P3)
S4s = S3
H4s = ENTHALPY(Air; P=P4; S=S4s)
T4s = temperature(Air; H=H4s)
H4 = H3 - ntgg*(H3 - H4s)
T4 = temperature(Air; H=H4)
fctgg = mgg*(T3)^0,5/P3
rpgg = P3/P4
deltaTgg = T3 - T4
W_tgg=mgg*(H3-H4)*nm

//cálculo H3_tgg
H3_tgg=mgg*H3

end {fim da procedure Turbina GG}

////////////////////////////////////
{Procedure TurbinaP
Utilizada para efetuar cálculos termodinâmicos na turbina de
potência, considerando seus dados nominais. A diferença das
procedures TurbinaGG e TurbinaP é que a primeira dá como
dado de saída H4, enquanto que a segunda utiliza H4 como
dado de entrada.}

Procedure TurbinaP (T4; P4; P5; mp; ntp; nmp; H4: T5; rptp;
deltaTtp; fctp; W)

{
Dados de Entrada:
T4 - temperatura de entrada na turbina (K);
P4 - pressão de entrada na turbina (bar);
P5 - pressão na saída da turbina (bar);
mp - fluxo máxico na turbina (kg/s);
ntp - eficiência isentrópica da turbina;
nmp - eficiência mecânica de transmissão turbina de potência-
gerador.
H4 - entalpia na entrada da turbina (kJ/kg)
Dados de Saída:
T5 - temperatura de saída da turbina (K);
rptp - relação de pressão na turbina;
deltaTtp - variação de temperatura na turbina (K);
fctp - fluxo corrigido na entrada da turbina;
W - potência na turbina (kW);
}

S4 = ENTROPY(Air;T=T4;P=P4)
S5s = S4
H5s = ENTHALPY(Air; P=P5; S=S5s)
T5s = temperature(Air; H=H5s)
H5 = H4 - ntp*(H4 - H5s)
T5 = temperature(Air; H=H5)
fctp = mp*(T4)^0,5/P4
rptp = P4/P5
deltaTtp = T4 - T5
W=mp*(H4-H5)*nmp

end {fim procedure TurbinaP}

////////////////////////////////////
{Procedure CompressorOff

```

Utilizada para efetuar cálculos termodinâmicos no compressor off-design, considerando dados off-design de entrada. A diferença em relação à procedure Compressor é que o fluxo corrigido não é calculado.)

Procedure CompressorOff(P1_off; T1_off; rp_off; nc_off;
mc_off : P2_off; T2_off; deltaTc_off; W_c_off;
H2_compressoroff)

```
{
Dados de Entrada:
P1_off - pressão off-design de entrada (bar);
T1_off - temperatura off-design de entrada (K);
rp_off - relação de compressão off-design;
nc_off - eficiência isentrópica do compressor off-design;
mc_off - fluxo mássico off-design (kg/s).
Dados de saída:
P2_off - pressão na saída do compressor off-design (bar);
T2_off - temperatura na saída do compressor off-design (K);
deltaTc_off - variação de temperatura no compressor off-design (K);
W_c_off - potência no compressor off design (kW);
H2_compressoroff - entalpia na saída do compressor off-design (kJ/kg).
}
```

```
P2_off = rp_off*P1_off
H1_off= ENTHALPY(Air;T=T1_off)
S1_off= ENTROPY(Air;T=T1_off;P=P1_off)
S2s_off= S1_off
H2s_off = ENTHALPY(Air; P=P2_off; S=S2s_off)
T2s_off = temperature(Air; H=H2s_off)
H2_off = H1_off - (H1_off- H2s_off)/nc_off
T2_off = temperature(Air; H=H2_off)
deltaTc_off = T2_off-T1_off
```

W_c_off=mc_off*(H2_off-H1_off)

```
//cálculo H2_compressoroff
H2_compressoroff=mc_off*H2_off
```

end {fim da procedure CompressorOff}

```
////////////////////////////////////
{Procedure TurbinaGGOff
Utilizada para efetuar cálculos termodinâmicos na turbina off-design geradora de gases, considerando os dados off-design de entrada. As diferenças em relação à procedure TurbinaGG são: o fluxo corrigido não é calculado; o trabalho na turbina é dado de entrada; entalpias na turbina são dados de saída; a eficiência isentrópica da turbina não é dado de entrada.}
```

Procedure TurbinaGGOff (T3_off; P3_off; P4_off; mgg_off;
nm_off; W_tgg_off; T4_off; deltaTgg_off;
H4_off;H3_off;H4s_off; H3_tggoft)

```
{
Dados de Entrada:
T3_off - temperatura off-design de entrada na turbina (K);
P3_off - pressão off-design de entrada na turbina (bar);
P4_off - pressão off-design na saída da turbina (bar);
mgg_off - fluxo mássico off-design na turbina (kg/s);
nm_off - eficiência mecânica de transmissão compressor off-design-turbina off-design geradora de gases.
W_tgg_off - potência da turbina off-design (kW)
Dados de Saída:
T4_off - temperatura de saída da turbina geradora de gases de operação off-design (K);
```

deltaTgg_off - variação de temperatura na turbina de geradora de gases de operação off-design (K);

H4_off - entalpia na saída da turbina geradora de gases de operação off-design (kJ/kg)

H3_off - entalpia na entrada da turbina de geradora de gases de operação off-design (kJ/kg)

H4s_off - entalpia isoentrópica na saída da turbina geradora de gases de operação off-design (kJ/kg)

H3_tggoft - entalpia na entrada da turbina geradora de gases para operação off-design (kJ/kg).

```
{ P4_off, embora seja um dado de entrada, é calculado a partir da equação colocada após a chamada da 'procedure' no programa principal }
```

```
H3_off = ENTHALPY(Air;T=T3_off)
H4_off=(-W_tgg_off/(mgg_off*nm_off))+H3_off
T4_off = temperature(Air; H=H4_off)
deltaTgg_off = T3_off - T4_off
```

```
//para checagem (4 próximas equações)
S3_off = ENTROPY(Air;T=T3_off;P=P3_off)
S4s_off = S3_off
H4s_off = ENTHALPY(Air; P=P4_off; S=S4s_off)
T4s_off = temperature(Air; H=H4s_off)
```

```
//cálculo H3_tggoft
H3_tggoft=mgg_off*H3_off
```

end {fim da procedure Turbina GGOff}

```
////////////////////////////////////
{Procedure TurbinaPOff
Utilizada para efetuar cálculos termodinâmicos na turbina off-design de potência, considerando dados off-design de entrada. A diferença em relação à procedure TurbinaGGOff é que o fluxo corrigido não é calculado. Além disso a relação de pressão não é dado de saída.}
```

Procedure TurbinaPOff (T4_off; P4_off; P5_off; mp_off;
ntp_off; nmp_off; H4_off; T5_off;deltaTtp_off; W_off)

```
{
Dados de Entrada:
T4_off - temperatura off-design de entrada na turbina (K);
P4_off - pressão off-design de entrada na turbina (bar);
P5_off - pressão off-design na saída da turbina (bar);
mp_off - fluxo mássico na turbina off-design (kg/s);
ntp - eficiência isentrópica da turbina off-design;
nmp - eficiência mecânica de transmissão turbina de potência off-design-gerador off-design.
H4_off - entalpia off-design na entrada da turbina de potência de operação off-design (kJ/kg)
Dados de Saída:
T5_off - temperatura de saída da turbina de operação off-design (K);
deltaTtp_off - variação de temperatura na turbina de operação off-design (K);
W_off - potência líquida na turbina off-design ou potência na turbina de potência de operação off-design (kW);
}
```

```
S4_off = ENTROPY(Air;T=T4_off;P=P4_off)
S5s_off = S4_off
H5s_off = ENTHALPY(Air; P=P5_off; S=S5s_off)
T5s_off = temperature(Air; H=H5s_off)
H5_off = H4_off - ntp_off*(H4_off - H5s_off)
T5_off = temperature(Air; H=H5_off)
```

```

deltaTtp_off = T4_off - T5_off
W_off=mp_off*(H4_off-H5_off)*nmp_off

end {fim da procedure TurbinaPOff}

/////////////////////////////////////////////////////////////////
{Procedure Choque
Calcula o valor do fluxo de choque correspondente à
velocidade normalizada da turbina relativa à velocidade de
projeto}

{
Dados de Entrada:
n_off - velocidade normalizada da turbina off-design, relativa à
velocidade de projeto
Dados de Saída:
chock - fluxo de choque (normalizado relativo ao fluxo
normalizado de projeto) calculado para n_off

Observação: os subscritos 0,5, 0,6, 0,7, 0,8, 0,9 e 1, passam a
representar as velocidades corrigidas relativas de 0,625, 0,75,
0,875, 1, 1,125 e 1,25, respectivamente, dada a relativização
feita para n=0,8 das curvas da referência consideradas.
}

Procedure Choque (n_off: chock)

{fluxo normalizado de choque para as velocidades
(normalizadas relativas à de projeto) do mapa de desempenho
gerado}
yyy_0.5=0
yyy_0.6=1,401206838
yyy_0.7=1,403319023
yyy_0.8=1,401468708
yyy_0.9=1,396592312
yyy_1=1,395000000

{velocidades (normalizadas relativas à de projeto) do mapa de
desempenho gerado}
n[1]=0,625
n[2]=0,75
n[3]=0,875
n[4]=1
n[5]=1,125
n[6]=1,25

{início da procedure}
yyy[1]=yyy_0.5
yyy[2]=yyy_0.6
yyy[3]=yyy_0.7
yyy[4]=yyy_0.8
yyy[5]=yyy_0.9
yyy[6]=yyy_1

i=1
repeat
if (n[i]<n_off) and (n[i+1]<n_off) then
i=i+1
endif
until (n[i]<n_off) and (n[i+1]>n_off)

fator=(n_off-n[i])/(n[i+1]-n[i])
chock=(fator*yyy[i+1]+(1-fator)*yyy[i])

end {fim da Procedure Choque}

/////////////////////////////////////////////////////////////////
{Procedure RPxEFI

```

Utilizada para calcular as eficiências isentrópicas nas turbinas geradora de gases e de potência. Esta procedure contém o mapa normalizado (relativo aos valores de projeto) de turbina para η x eficiência, conforme programa de Kurzke (referência utilizada). Os coeficientes das curvas foram calculados pelo outro programa desenvolvido. Neste procedure, tais coeficientes foram inseridos.

Observação: os subscritos 0,5, 0,6, 0,7, 0,8, 0,9 e 1, passam a representar as velocidades corrigidas relativas de 0,625, 0,75, 0,875, 1, 1,125 e 1,25, respectivamente, dada a relativização feita para n=0,8 das curvas da referência consideradas.

```

Procedure RPxEFI(teste;n_off;rp;rp_off;nt;nt_off)

{
Dados de Entrada:
teste - resultado vindo da procedure MapaCompressor.
Quando igual a 1 indica que o ponto escolhido no mapa fluxo
corrigido x rp (do compressor) está na região útil deste mapa.
Quando o valor é 0, indica que o ponto está fora da região útil;
n_off - velocidade normalizada relativa à de projeto para
condição off-design
rp - relação de pressão na turbina;
rp_off - relação de pressão na turbina, para condição off-
design;
nt - eficiência da turbina para condição nominal de operação;
Dados de Saída:
nt_off - eficiência da turbina para condição off-design de
operação;
}

```

//Coeficientes das funções polinômiais utilizadas

```

sa1_0.6=-3,962247205
sa1_0.7=-0,053969541
sa1_0.8=-4,675833088
sa1_0.9=-2,667443460
sa1_1=-2,214990227
sa2_0.6=-1,491897589
sa2_0.7=-1,502679601
sa2_0.8=-0,826043420
sa2_0.9=-0,303908109
sa2_1=-0,436141203
sa3_0.6=0,160843473
sa3_0.7=0,063211355
sa3_0.8=0,015987861
sa3_0.9=-0,011705893
sa3_1=-0,027613946
sb1_0.6=8,061885943
sb1_0.7=1,098141909
sb1_0.8=10,708706970
sb1_0.9=6,953685069
sb1_1=6,244804808
sb2_0.6=3,013495099
sb2_0.7=3,432583145
sb2_0.8=2,132727680
sb2_0.9=0,914764926
sb2_1=1,454618462
sb3_0.6=-0,710351544
sb3_0.7=-0,362945417
sb3_0.8=-0,160572176
sb3_0.9=-0,016596550
sb3_1=0,081813360

sc1_0.6=-2,991032231
sc1_0.7=0,036811842
sc1_0.8=-5,028123370
sc1_0.9=-3,414969989

```

sc1_1=-3,300008359
sc2_0.6=-0,411920821
sc2_0.7=-0,845348757
sc2_0.8=-0,252422016
sc2_0.9=0,442321418
sc2_1=-0,075217737
sc3_0.6=1,683365692
sc3_0.7=1,454503465
sc3_0.8=1,308900737
sc3_0.9=1,183358692
sc3_1=1,077704518

xe3_0.6=1,02826919663059
xe3_0.7=1,00624202773464
xe3_0.8=1,12357629342221
xe3_0.9=1,27025745835681
xe3_1=1,34223466344103
xe5_0.6=1,16382766868787
xe5_0.7=1,22077572094151
xe5_0.8=1,37496224299897
xe5_0.9=1,53191982209516
xe5_1=1,70999653999024

xe1_0.6=0,931222278035178
xe7_0.6=1,8892284347286
xe1_0.7=0,938340174531188
xe7_0.7=2,20490970647656
xe1_0.8=0,962808706280842
xe7_0.8=2,46759351713544
xe1_0.9=1,01067281583961
xe7_0.9=2,66370712333513
xe1_1=1,06718370081193
xe7_1=2,7910693460298

xe1_0.5=0
xe3_0.5=0
xe5_0.5=0
xe7_0.5=0

sa1_0.5=0
sa2_0.5=0
sa3_0.5=0
sb1_0.5=0
sb2_0.5=0
sb3_0.5=0
sc1_0.5=0
sc2_0.5=0
sc3_0.5=0

//velocidades do mapa e coeficientes inseridos

n[1]=0,625
n[2]=0,75
n[3]=0,875
n[4]=1
n[5]=1,125
n[6]=1,25

sa1[1]=sa1_0.5
sa1[2]=sa1_0.6
sa1[3]=sa1_0.7
sa1[4]=sa1_0.8
sa1[5]=sa1_0.9
sa1[6]=sa1_1
sa2[1]=sa1_0.5
sa2[2]=sa2_0.6
sa2[3]=sa2_0.7
sa2[4]=sa2_0.8
sa2[5]=sa2_0.9

sa2[6]=sa2_1
sa3[1]=sa3_0.5
sa3[2]=sa3_0.6
sa3[3]=sa3_0.7
sa3[4]=sa3_0.8
sa3[5]=sa3_0.9
sa3[6]=sa3_1
sb1[1]=sb1_0.5
sb1[2]=sb1_0.6
sb1[3]=sb1_0.7
sb1[4]=sb1_0.8
sb1[5]=sb1_0.9
sb1[6]=sb1_1
sb2[1]=sb2_0.5
sb2[2]=sb2_0.6
sb2[3]=sb2_0.7
sb2[4]=sb2_0.8
sb2[5]=sb2_0.9
sb3[6]=sb2_1
sb3[1]=sb3_0.5
sb3[2]=sb3_0.6
sb3[3]=sb3_0.7
sb3[4]=sb3_0.8
sb3[5]=sb3_0.9
sb3[6]=sb3_1
sc1[1]=sc1_0.5
sc1[2]=sc1_0.6
sc1[3]=sc1_0.7
sc1[4]=sc1_0.8
sc1[5]=sc1_0.9
sc1[6]=sc1_1
sc2[1]=sc2_0.5
sc2[2]=sc2_0.6
sc2[3]=sc2_0.7
sc2[4]=sc2_0.8
sc2[5]=sc2_0.9
sc2[6]=sc2_1
sc3[1]=sc3_0.5
sc3[2]=sc3_0.6
sc3[3]=sc3_0.7
sc3[4]=sc3_0.8
sc3[5]=sc3_0.9
sc3[6]=sc3_1

xe3[1]=xe3_0.5
xe3[2]=xe3_0.6
xe3[3]=xe3_0.7
xe3[4]=xe3_0.8
xe3[5]=xe3_0.9
xe3[6]=xe3_1
xe5[1]=xe5_0.5
xe5[2]=xe5_0.6
xe5[3]=xe5_0.7
xe5[4]=xe5_0.8
xe5[5]=xe5_0.9
xe5[6]=xe5_1

xe1[1]=xe1_0.5
xe7[1]=xe7_0.5
xe1[2]=xe1_0.6
xe7[2]=xe7_0.6
xe1[3]=xe1_0.7
xe7[3]=xe7_0.7
xe1[4]=xe1_0.8
xe7[4]=xe7_0.8
xe1[5]=xe1_0.9
xe7[5]=xe7_0.9
xe1[6]=xe1_1
xe7[6]=xe7_1

```

{Início dos cálculos da Procedure}

x_off=rp_off/rp

{1a. condição
condição para início dos cálculos caso o ponto escolhido no
mapa do compressor esteja na região útil deste mapa.
}
if teste=1 then

// encontrando o intervalo de velocidade
i=1
repeat
if (n[i]<n_off) and (n[i+1]<n_off) then
i=i+1
endif
until (n[i]<n_off) and (n[i+1]>n_off)

fator=(n_off-n[i])/(n[i+1]-n[i])

if x_off<xe3[i] then
y_off[i]=sa1[i]*x_off^2+sb1[i]*x_off+sc1[i]
endif

if x_off<xe3[i+1] then
y_off[i+1]=sa1[i+1]*x_off^2+sb1[i+1]*x_off+sc1[i+1]
endif

if (x_off>xe3[i]) and (x_off<xe5[i]) then
y_off[i]=sa2[i]*x_off^2+sb2[i]*x_off+sc2[i]
endif

if (x_off>xe3[i+1]) and (x_off<xe5[i+1]) then
y_off[i+1]=sa2[i+1]*x_off^2+sb2[i+1]*x_off+sc2[i+1]
endif

if (x_off=xe3[i]) or (x_off=xe5[i]) then
y_off[i]=sa2[i]*x_off^2+sb2[i]*x_off+sc2[i]
endif

if (x_off=xe3[i+1]) or (x_off=xe5[i+1]) then
y_off[i+1]=sa2[i+1]*x_off^2+sb2[i+1]*x_off+sc2[i+1]
endif

if x_off>=xe5[i] then
y_off[i]=sa3[i]*x_off^2+sb3[i]*x_off+sc3[i]
endif

if x_off>=xe5[i+1] then
y_off[i+1]=sa3[i+1]*x_off^2+sb3[i+1]*x_off+sc3[i+1]
endif

yy_off=fator*y_off[i+1]+(1-fator)*y_off[i]
nt_off=nt*yy_off

else
nt_off=nt

endif {da 1a. condição}

end {fim da Procedure RPxEF1}

////////////////////////////////////
{Procedure Tricolor
Retorna a mensagem informando se o fluxo off-design
calculado encontra-se abaixo, acima ou igual ao fluxo de
choque da turbina

```

```

}

Procedure Tricolor (y_off;chock:msn)

if y_off>chock then msn=2
if y_off=chock then msn=1
if y_off<chock then msn=0

end {procedure tricolor}

////////////////////////////////////
{Function test$
Retorna mensagem a região do mapa do compressor em que
se encontra o ponto escolhido.
Retorna a mensagem de que o ponto escolhido está na região
útil do mapa ou a mensagem de que o ponto está fora da
região útil do mapa. Neste último caso, deve ser escolhido um
novo ponto.
}

Function test$(test)

test$=""
if test=1 then
test$='ponto escolhido está na região útil do mapa do
compressor'
endif

if test=0 then
test$='ponto escolhido não está na região útil do mapa do
compressor, escolher novo ponto'
endif

end {fim da Function test$}

////////////////////////////////////
{Function tgg_off$
Retorna mensagem sobre o fluxo corrigido relativo ao fluxo
corrigido de projeto para a turbina geradora de gases.
Indica a necessidade de modificação no valor de x_p dado
(diminuição). Caso a diminuição no valor de x_p não resulte
em fluxo corrigido relativo ao fluxo corrigido de projeto menor
que 1 (causando mensagem de ponto escolhido fora da região
útil do mapa do compressor), deverá ser alterado o valor da
razão de pressão relativa à razão de pressão de projeto.
}

Function tgg_off$(tgg_off)

tgg_off$=""
if tgg_off>1 then
tgg_off$='fluxo na turbina geradora de gases acima do fluxo de
choque, diminuir valor de x_p'
endif

if tgg_off<1 then
tgg_off$='fluxo na turbina geradora de gases abaixo do fluxo
de choque'
endif

if tgg_off=1 then
tgg_off$='fluxo na turbina geradora de gases igual ao fluxo de
choque'
endif

end {function tgg_off$}

////////////////////////////////////
{Function tp_off$

```

Retorna mensagem sobre o fluxo corrigido relativo ao fluxo corrigido de projeto para a turbina de potência.
Indica a necessidade de modificação no valor de x_p dado (diminuição). Caso a diminuição no valor de x_p não resulte em fluxo corrigido relativo ao fluxo corrigido de projeto menor que 1 (causando mensagem de ponto escolhido fora da região útil do mapa do compressor), deverá ser alterado o valor da razão de pressão relativa à razão de pressão de projeto

Function tp_off\$(tp_off)

```
tp_off$=""
if tp_off>1 then
tp_off$='fluxo na turbina de potência acima do fluxo de
choque, diminuir valor de x_p'
endif

if tp_off<1 then
tp_off$='fluxo na turbina de potência abaixo do fluxo de
choque'
endif

if tp_off=1 then
tgg_off$='fluxo na turbina de potência igual ao fluxo de choque'
endif

end {fim da Function tp_off$}
```

//

{PROGRAMA PRINCIPAL}

{Baseado no exemplo 8.2 (Cohen, Rogers e Saravanamuttoo, 1996) - cálculos em turbina axial composta por turbina geradora de gases e turbina de potência}

```
{
Sistema de Unidades:
Sistema de Unidades: SI
Propriedades Específicas: base mássica
Unidades de Temperatura: Kelvin
Unidades de Pressão: bar
Unidades de Energia: kJ
Funções Trigonômicas: Grau
}
```

```
{
Procedures e Funções Relacionadas:
Procedure YY
Procedure Intervalo
Procedure Isolando
Procedure MapaCompressor
Procedure Compressor
Function Combustor
Procedure Combustor
Procedure TurbinaGG
Procedure TurbinaP
Procedure CompressorOff
Procedure TurbinaGGOff
Procedure TurbinaPOff
Procedure RPxEF1
Procedure Choque
Procedure Tricolor
Function Test$
Function Tp_off$
Function Tgg_off$
}
```

{Dados do Problema}

{Condições de PROJETO - DESING}

```
P1= 1,01 {pressão do ar ambiente - bar}
T1= 288 {temperatura do ar ambiente - Kelvin}
mc = 30 {vazão mássica no compressor - kg/s}
rp = 6 {relação de pressões no compressor}
nc = 0,84 {eficiência isentrópica do compressor}
```

```
deltaC = 0,2 {queda de pressão no combustor - bar}
eficomb=0,99 {eficiência do combustor}
```

```
T3 =1200 {temperatura de entrada na turbina - Kelvin}
ntgg= 0,87 {eficiência da turbina geradora de gases}
nm =0,99 {eficiência mecânica da transmissão c-tgg}
```

```
P5 = P1 {pressão de saída da turbina de potência}
ntp = ntgg {eficiência da turbina de potência}
nmp=0,99 {eficiência mecânica da tp-gerador}
```

```
N=3600 {rotação do compressor e da turbina geradora
de gases - RPM}
Np=3600 {rotação da turbina de potência - RPM}
```

```
T_comb=298 {temperatura de entrada do combustível -
Kelvin}
```

```
{composição do ar - fração volumétrica ou molar}
n2=0,79 {fração volumétrica de Nitrogênio}
o2=0,21 {fração volumétrica de Oxigênio}
co2=0 {fração volumétrica de Gás Carbônico}
arg=0 {fração volumétrica de Argônio}
```

```
{composição do combustível - fração volumétrica ou molar}
ch4=0,86 {fração volumétrica de Metano}
c2h6=0,08 {fração volumétrica de Etano}
c3h8=0,03 {fração volumétrica de Propano}
co2_comb=+0,02 {fração volumétrica de Gás Carbônico}
n2_comb=0+0,01 {fração volumétrica de Nitrogênio}
```

{Condições OFF-DESING}

{Dados Principais de entrada off-design, também variados para construção de tabelas: T1_off; y_p; T3_off; x_p; P1_off}

```
T1_off = 288 {temperatura ambiente off-design - Kelvin}
P1_off = P1 {pressão ambiente off-design - bar}
x_p=1 {relação}
(mc_off*T1_off^0,5/P1_off)/(mc*T1^0,5/P1)}
y_p=1 {relação rp_off/rp}
T3_off=1200
```

{Demais dados de entrada off-design}

```
deltaC_off = deltaC {queda de pressão no combustor off-
desing - bar}
eficomb_off=eficomb {eficiência do combustor off-design}
```

```
nm_off= nm {eficiência mecânica da transmissão c-gg off-
desing}
```

```
P5_off = P1_off {pressão de saída da turbina de potência off-
design}
nmp_off=nmp {eficiência mecânica da tp off-desing}
```

Np_off=3600 {rotação da turbina de potência off-design - RPM}

T_comboff=298 {temperatura de entrada do combustível na condição off-design - Kelvin}

{composição do ar - fração volumétrica ou molar - operação off-design}

n2_off=0,79 {fração volumétrica de Nitrogênio}
o2_off=0,21 {fração volumétrica de Oxigênio}
co2_off=0 {fração volumétrica de Gás Carbônico}
arg_off=0 {fração volumétrica de Argônio}

{composição do combustível - fração volumétrica ou molar - operação off-design}

ch4_off=0,86 {fração volumétrica de Metano}
c2h6_off=0,08 {fração volumétrica de Etano}
c3h8_off=0,03 {fração volumétrica de Propano}
co2_comboff=+0,02 {fração volumétrica de Gás Carbônico}
n2_comboff=0+0,01 {fração volumétrica de Nitrogênio}

{Dados de Saída - PROJETO}

{
P2 - pressão de saída do compressor (bar);
T2 - temperatura na saída do compressor (K);
fcc - fluxo corrigido na entrada do compressor (kg*K^{0,5}/bar);
deltaTc - variação de temperatura no compressor (K);
W_c - potência no compressor (kW);
H2_compressor - entalpia na saída do compressor (kW);

P3 - pressão de saída da câmara de combustão (bar);
m_comb - fluxo máximo de combustível (kg/s);

ac - percentual de massa de combustível em relação à massa de ar no compressor (%);

mgg - fluxo máximo de gases na turbina geradora de gases (kg/s);
T4 - temperatura de saída da turbina geradora de gases (K);
rpgg - relação de pressão na turbina geradora de gases;
deltaTgg - variação de temperatura na turbina geradora de gases (K);
fctgg - fluxo corrigido na entrada da turbina geradora de gases (kg*K^{m0,5}/bar);
W_tgg - potência na turbina geradora de gases (kW);
H4 - entalpia na saída da turbina geradora de gases (kJ/kg);
H3_tgg - entalpia na saída da turbina geradora de gases (kW);

P4 - pressão na saída da turbina geradora de gases (bar);

mp - fluxo máximo de gases na turbina de potência (kg/s);
T5 - temperatura de saída da turbina de potência (K);
rptp - relação de pressão na turbina de potência;
deltaTtp - variação de temperatura na turbina de potência (K);
fctp - fluxo corrigido na entrada da turbina de potência (kg*K^{m0,5}/bar);
W - potência na turbina de potência ou potência líquida (kW);

W_comb - potência disponibilizada ao ciclo após a queima de combustível (kW);
eta_ciclo - eficiência térmica do ciclo;
cesp - consumo específico de combustível (kg/s de combustível / kW de potência líquida gerada);
pesp - potência específica da turbina (kW de potência líquida / kg/s de combustível).

exc - excesso de ar (fração)
ACmolar - relação ar/combustível molar
ACmass - relação ar/combustível mássica

}

{Dados de Saída - Off-Design}

{
rp_off - razão de pressão no compressor off-design;

n_ponto - velocidade (normalizada e relativa à de projeto) do compressor off_design, no ponto dado;
eta_ponto - eficiência no ponto dado (relativa à de projeto) calculada com base na restrição de eficiência máxima e mínima das curvas de velocidade superior e inferior à velocidade (normalizada e relativa à de projeto) calculada;
fator - fração que indica a proximidade do ponto dado em relação ao ponto de intersecção da curva que passa pelo ponto dado com a curva de velocidade superior;
ezsup e ezinf - eficiências (relativa à de projeto) para os pontos de intersecção com as curvas de velocidade superior e inferior (normalizada e relativa à de projeto), considerando a restrição de eficiência máxima e mínima (relativa à de projeto);
efi_ponto - eficiência no ponto dado (relativa à de projeto) calculada sem as restrições consideradas no cálculo de eta_ponto;
fator_rp - igual a y_p;
fator_eficiência - igual a eta_ponto;
teste - quando o resultado é igual a 0 indica a necessidade de escolha de um novo ponto (novo x_p e y_p), quando igual a 1, o ponto escolhido está dentro da região útil do mapa;

N_off - velocidade do compressor off-design (RPM);
teste\$ - mensagem que indica se o ponto escolhido está na região útil do mapa do compressor ou fora

nc_off - eficiência o compressor off-design;

fcc_off - fluxo corrigido na entrada do compressor off-design (kg*K^{0,5}/bar);
mc_off - Fluxo máximo de ar na entrada do compressor off-design (kg/s);

P2_off - pressão na saída do compressor off-design (bar);
T2_off - temperatura na saída do compressor off-design (K);
deltaTc_off - variação de temperatura no compressor off-design (K);
W_c_off - potência no compressor off design (kW);
H2_compressoroff - entalpia na saída do compressor off-design (kW);

P3_off - pressão na saída da câmara de combustão de operação off-design (bar);
m_comboff - fluxo máximo de combustível na operação off-design (kg/s);

ac_off - percentual de massa de combustível em relação à massa de ar no compressor (%), para operação off-design;

mgg_off - fluxo máximo de gases na turbina geradora de gases de operação off-design (kg/s);
fctgg_off - fluxo corrigido na entrada da turbina geradora de gases de operação off-design (kg*K^{m0,5}/bar);

chock_tgg - fluxo corrigido de choque, relativo fluxo corrigido de projeto para turbina geradora de gases;
y_tgg_off - fluxo corrigido na operação off-design, relativo ao fluxo corrigido de projeto, para turbina geradora de gases;

rptgg_offrelativo - relação de pressão off-desig, relativa à relação de pressão de projeto, para turbina geradora de gases;

n_pontotgg - velocidade (normalizada e relativa à de projeto) da turbina de geradora de gases de operação off-design (entrada da turbina);
msn_tgg - número obtido da comparação de chock_tgg e ytgg_off;
msn_tgg\$ - mensagem que indica se a turbina geradora de gases de operação off-design encontra-se abaixo, acima ou igual ao fluxo de choque;

rptgg_off - relação de pressão na turbina geradora de gases de operação off-design;
P4_off - pressão na saída da turbina geradora de gases de operação off-design (bar);

T4_off - temperatura de saída da turbina geradora de gases de operação off-design (K);
deltaTgg_off - variação de temperatura na turbina de geradora de gases de operação off-design (K);
H4_off - entalpia na saída da turbina geradora de gases de operação off-design (kJ/kg)
H3_off - entalpia na entrada da turbina de geradora de gases de operação off-design (kJ/kg)
H4s_off - entalpia isoentrópica na saída da turbina geradora de gases de operação off-design (kJ/kg);
H3_tggoff - entalpia na entrada da turbina geradora de gases para operação off-design (kW);

ntgg_off - eficiência da turbina geradora de gases para condição off-design de operação;

T5_off - temperatura de saída da turbina de operação off-design (K);
deltaTtp_off - variação de temperatura na turbina de operação off-design (K);
W_off - potência líquida na turbina off-design ou potência na turbina de potência de operação off-design (kW);

mp_off - fluxo máximo de gases na turbina de potência de operação off-design (kg/s);
fctp_off - fluxo corrigido na entrada da turbina de potência de operação off-design (kg*K^{0,5}/bar);

n_pontopt - velocidade (normalizada e relativa à de projeto) da turbina de potência de operação off-design (entrada da turbina);
rtp_off - relação de pressão na turbina de potência de operação off-design;

chock_tp - fluxo corrigido de choque, relativo fluxo corrigido de projeto, para turbina de potência;
ytp_off - fluxo corrigido na operação off-design, relativo ao fluxo corrigido de projeto, para turbina de potência;
rtp_offrelativo - relação de pressão off-desig, relativa à relação de pressão de projeto, para turbina de potência;

msn_tp - número obtido da comparação de chock_tp e ytp_off;
msn_tp\$ - mensagem que indica se a turbina de potência de operação off-design encontra-se abaixo, acima ou igual ao fluxo de choque;

ntp_off - eficiência da turbina de potência para condição off-design de operação;

W_comboff - potência disponibilizada ao ciclo após a queima de combustível (kW), para operação off-design;
eta_ciclooff - eficiência térmica do ciclo para operação off-design;

cesp_off - consumo específico de combustível (kg/s de combustível / kW de potência líquida gerada), para operação off-design;
pesp_off - potência específica da turbina (kW de potência líquida / kg/s de combustível), para operação off-design;

rel_pesp - relação percentual de variação da potência específica de operação off-design menos a potência específica de projeto, em relação à potência específica de projeto.

exc_off - excesso de ar (fração) para operação off-design
ACmolar_off - relação ar/combustível molar para operação off-design
ACmass_off - relação ar/combustível mássica para operação off-design
}

////////////////////
{1a. Parte para operação DESING}

{Design - para o compressor}
Call Compressor(P1; T1; rp; nc; mc : P2; T2; fcc; deltaTc; W_c;
H2_compressor)
P3 = Combustor(P2; deltaC)
Call Combustao (eficomb; T_comb; T2; T3; mc; P2; P3; n2; o2;
co2; arg; ch4; c2h6; c3h8; co2_comb; n2_comb: m_comb;
W_comb;exc;ACmolar;ACmass)
ac=(m_comb/mc)*100

{Design - para a turbina de geração de gases}
mgg=mc+m_comb
{acrécimo de fluxo na turbina em função do acréscimo de combustível}
Call TurbinaGG (T3; P3; P4; mgg; ntgg; nm: T4; rpgg;
deltaTgg; fctgg; W_tgg; H4; H3_tgg)
W_c=W_tgg
{equação para determinar P4}

{Design - para a turbina de potência}
mp=mgg
Call TurbinaP (T4; P4; P5; mp; ntp; nmp; H4: T5; rtp;
deltaTtp; fctp; W)

{Cálculo da Eficiência do Ciclo}
//W_comb=H3_tgg-H2_compressor
eta_ciclo=W/W_comb

{Consumo e Potência específicos - consumo de combustível/potência líquida e potência líquida/consumo de combustível}
cesp=m_comb/W
pesp=W/m_comb

////////////////////
{2a. parte para operação OFF-DESING}

rp_off=rp*y_p

call MapaCompressor(x_p ; y_p : n_ponto;
eta_ponto;fator;ezsup;ezinf;efi_ponto;fator_rp;fator_eficiencia;t
este)

n_ponto=(N_off/T1_off^{0,5})/(N/T1^{0,5}) {cálculo de N_off - velocidade do compressor off-design}
teste\$=test\$(teste) {mensagem a respeito da escolha do ponto off-desig no mapa do compressor}
nc_off=nc*eta_ponto

fcc_off = x_p * fcc

```

mc_off=fcc_off / ((T1_off)^0,5/P1_off)

{Operação Off-Design no Compressor}
Call CompressorOff(P1_off; T1_off; rp_off; nc_off; mc_off :
P2_off; T2_off; deltaTc_off; W_c_off; H2_compressoroff)

{Combustor}
P3_off = Combustor(P2_off; deltaC_off)
Call Combustao (eficomb_off;T_comboff; T2_off; T3_off;
mc_off; P2_off; P3_off; n2_off; o2_off; co2_off; arg_off;
ch4_off; c2h6_off; c3h8_off; co2_comboff; n2_comboff:
m_comboff; W_comboff;exc_off;ACmolar_off;ACmass_off)
ac_off=(m_comboff/mc_off)*100

{Operação Off-Design na turbina geradora de gases}
mgg_off = mc_off+m_comboff
fctgg_off = mgg_off * ( T3_off)^0,5 /P3_off {calcula T3_OFF}

Call Choque (n_ponto: chock_tgg)

ytgg_off=fctgg_off/fctgg

n_pontotgg=(N_off/T3_off^0,5)/(N/T3^0,5)

Call Tricolor (ytgg_off;chock_tgg:msn_tgg)
msn_tgg$=tgg_off$(msn_tgg)

H4_off = H3_off - ntgg_off*(H3_off - H4s_off)

Call RPxEFI(teste;n_ponto; rpgg;rpgg_off;ntgg:ntgg_off) {para
encontrar a eficiência da turbina de geração de gases na
condição off-design}

rptgg_offrelativo=rpgg_off/rpgg

P3_off=rpgg_off*P4_off
W_c_off=W_tgg_off {equação para determinar P4_off com
a igualdade de trabalhos}

Call TurbinaGGOff (T3_off; P3_off; P4_off; mgg_off; nm_off;
W_tgg_off; T4_off; deltaTgg_off;
H4_off;H3_off;H4s_off;H3_tggoff)

{Operação Off-Design na turbina de potência}
mp_off = mgg_off

fctp_off = mp_off * (T4_off)^0,5 /P4_off
n_pontopt=(Np_off/T4_off^0,5)/(Np/T4^0,5)

Call Choque (n_pontopt: chock_tp)

ytp_off=fctp_off/fctp

Call Tricolor (ytp_off;chock_tp:msn_tp)
msn_tp$=tp_off$(msn_tp)

rptp_off=P4_off/P5_off

Call RPxEFI(teste;n_pontopt;rptp;rptp_off;ntp:ntp_off)
{para encontrar a eficiência da turbina de potência na condição
off-design}

rptp_offrelativo=rptp_off/rptp

Call TurbinaPOff (T4_off; P4_off; P5_off; mp_off; ntp_off;
nmp_off; H4_off; T5_off; deltaTtp_off; W_off)

{Cálculo da Eficiência do Ciclo Off-design}
//W_comboff=H3_tggoff-H2_compressoroff
eta_ciclooff=W_off/W_comboff

```

```

{Consumo e Potência específicos - consumo de
combustível/potência líquida e potência líquida/consumo de
combustível - operação off-design}
cesp_off=m_comboff/W_off
pesp_off=W_off/m_comboff
rel_pesp=-100*(-pesp_off+pesp)/pesp

```

```
{fim do PROGRAMA PRINCIPAL}
```

```
////////////////////////////////////
```