

2 Revisão Bibliográfica

Neste Capítulo é apresentada a revisão bibliográfica referente ao estado da arte das metodologias de manipulação dos mapas de características de compressores axiais, visando à obtenção de pontos de operação fora do ponto de projeto (*off-design*). As informações colocadas neste capítulo e no próximo foram levantadas a partir de dissertações e teses sobre o tema, assim como trabalhos publicados em renomadas base de dados (ASME, Science Direct, Elsevier, etc.) e livros.

2.1 Considerações Iniciais

A simulação fora do ponto de projeto da turbina a gás requer um modelo para o comportamento de cada equipamento em sua faixa de operação [4]. No caso do compressor axial, uma modelagem precisa pode ser obtida a partir da manipulação de seus mapas de características, levando diversos autores a estudar metodologias para obtenção e manipulação desses mapas.

Os mapas de características são de propriedade dos fabricantes e muitas vezes não estão disponíveis a consulta pública. A obtenção destes mapas não é discutida neste trabalho, porém, as metodologias referentes às técnicas de escalonamento, por exemplo, são propostas e discutidas detalhadamente nos trabalhos desenvolvidos por Kurzke e Riegler [5], Lazzareto e Toffolo [6], e Kong et al. [7]. O escalonamento consiste em obter mapas do compressor ou da turbina, a partir daqueles disponíveis com características de projeto semelhantes aos que se pretende modelar.

A metodologia de manipulação, objeto desta dissertação, é necessária para se localizar o ponto de operação nos mapas de características do compressor em qualquer faixa de operação no *off-design*. Dentre as referências analisadas, apenas uma pequena quantidade contém informações sobre essa metodologia, sendo que a maior parte dos trabalhos segue a metodologia descrita por Kurzke [8].

2.2 Manipulação de Mapas de Características de Compressores Axiais

MacMillan [9] desenvolveu uma ferramenta computacional para o cálculo do desempenho da turbina a gás operando fora do ponto de projeto (*off-design*). Nesta ferramenta, os mapas de características do compressor, utilizados para o cálculo do desempenho deste componente, são apresentados em função da razão de pressão, vazão mássica corrigida, rotação corrigida e eficiência isentrópica. A manipulação dos mapas é realizada a partir de um método denominado pelo autor de “*Search Method*” que define o parâmetro z como uma relação entre as razões de pressão ao longo de uma linha de rotação constante, equação (2.1):

$$z = \frac{RP_{OD} - RP_{menor}}{RP_{maior} - RP_{menor}} \quad (2.1)$$

O parâmetro z também é chamado de Beta por alguns fabricantes, e pode indicar a proximidade do ponto de operação à linha de *surge*. Dessa forma, o modelo utilizado por MacMillan [9] determina a vazão mássica corrigida e eficiência isentrópica em função da rotação corrigida, razão de pressão e ao parâmetro z correspondentes.

Kurzke [8] desenvolveu uma ferramenta computacional capaz mostrar graficamente os mapas de características do compressor a partir de dados reais medidos ou dados provenientes de mapas publicados na literatura, permitindo que o usuário ajuste os mapas de acordo com seu interesse e obtenha os mapas formatados em um arquivo dados para que possa utilizá-los em ferramentas de simulação de turbinas a gás, por exemplo.

Na ferramenta de Kurzke [8], as linhas de rotação que não estão definidas nos mapas, são obtidas a partir da interpolação entre duas linhas conhecidas, sendo utilizada a extrapolação, no caso de linhas de baixa rotação. Assim, o ponto de operação pode ser localizado através da interpolação linear entre os parâmetros que compõem a linha de rotação. Esse processo pode ser prejudicado caso haja colinearidade entre duas variáveis, sendo então utilizadas as linhas Beta, β . As linhas Beta são linhas aleatórias, normalmente paralelas, que interceptam cada linha de rotação do mapa de características do compressor em apenas um ponto.

As linhas Beta utilizadas por Kurzke [8], são parábolas ou retas igualmente espaçadas, sendo que as linhas $\beta = 0$ e $\beta = 1$ representam os limites deste conjunto de linhas que cobre todo o mapa de características, Figura 2.1.

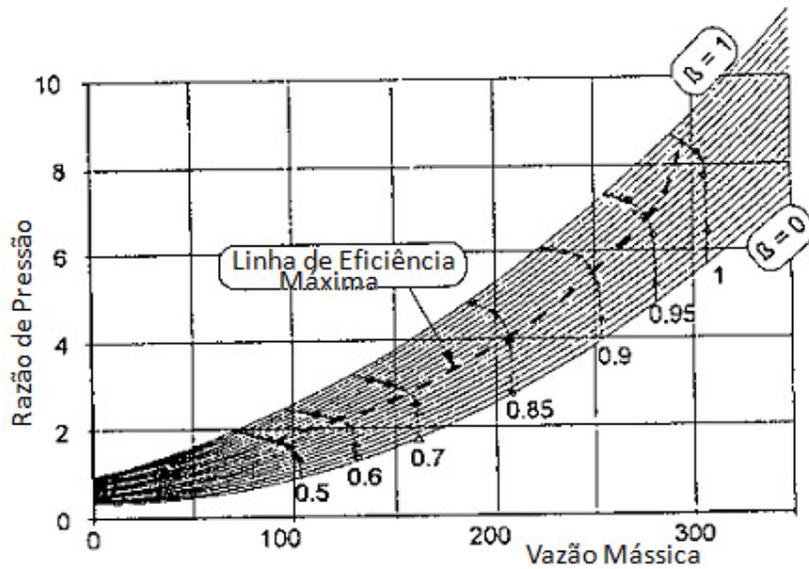


Figura 2.1 – Linhas Beta utilizadas na ferramenta computacional desenvolvida por Kurzke [8].

A utilização das linhas Beta permite que os parâmetros que compõem os mapas de características do compressor (razão de pressão, vazão mássica e eficiência isentrópica) sejam tabulados em função da rotação corrigida e de Beta, como mostra a Figura 2.2.

		Linhas Beta →				
		Beta_1	Beta_2	Beta_3	Beta_4	Beta_i
Rotação Corrigida (N _{cor}) ↓	Ncor_1					
	Ncor_2	Parâmetros (Vazão Mássica Corrigida, Razão de Pressão e Eficiência)				
	Ncor_3					
	Ncor_4					
	Ncor_i					

Figura 2.2 – Parâmetros tabelados em função das linhas Beta e Rotação Corrigida, [10] (modificado).

Assim, qualquer ponto de operação pode ser determinado sem problemas de colinearidade a partir da interpolação bidimensional dos parâmetros tabulados em função da velocidade de rotação constante e de Beta.

A metodologia utilizada por Kurzke [8], é encontrada em diversos trabalhos que envolvem a modelagem *off-design* do compressor axial da turbina a gás. A utilização das linhas Beta para evitar problemas de colinearidade e configurar numericamente os parâmetros dos mapas em tabelas, favorecendo o processo de interpolação, é vista como a principal contribuição desta ferramenta.

Walsh e Fletcher [11] utilizam linhas Beta traçadas arbitrariamente paralelas à linha de *surge*, no mapa de razão de pressão, e os pontos de intercessão destas com as linhas de rotação são apresentadas em matrizes onde os parâmetros do compressor são determinados a partir da β e da linha de rotação.

Al-Hamdan e Ehaid [10] utilizaram os mapas de características do compressor axial para a simulação em *off-design* da turbina a gás. As linhas Beta, descritas por Kurzke [8] são utilizadas, e os mapas são representados numericamente por três tabelas onde cada parâmetro (vazão mássica corrigida, razão de pressão e eficiência isentrópica) é apresentado em função de Beta e da velocidade de rotação. Assim, a partir da Beta e da linha de rotação, é possível determinar utilizando estas tabelas, os parâmetros que compõem o ponto de operação. Para valores intermediários, a ferramenta utiliza técnicas de interpolação linear para estimá-los. O programa desenvolvido apresentou resultados satisfatórios na simulação de todos os equipamentos modelados.

Lazzareto e Teoffolo [6], apresentam uma metodologia de modelagem do *design point* e *off-design* da turbina a gás, a partir de mapas de características escalonados. A metodologia de manipulação de mapas apresentada por Kurzke [8] é também utilizada no modelo desenvolvido, que traçam linhas Beta equidistantes, na faixa $0 < \beta < 1$, de forma que para cada valor de Beta e de rotação corrigida tem-se um valor de vazão mássica corrigida, razão de pressão e eficiência isentrópica. Assim, os mapas de características do compressor são representados por seus parâmetros tabulados em função das rotações corrigidas e das linhas Beta, e os valores intermediários entre duas rotações e duas linhas Beta são obtidos através da interpolação linear bidimensional. Os mapas de características escalonados a partir dos mapas da turbina a gás GE LM 2500, foram utilizados no modelo de simulação em *off-design* desenvolvido, e os resultados foram comparados com dados reais ao longo da linha de operação, apresentando desvios irrelevantes.

Geoff Jones e Curnock [12] investigaram e compararam métodos de modelagem do compressor capazes de resolver problemas de colinearidade que ocorrem normalmente em baixas rotações, onde a linha de rotação apresenta-se

paralela ao eixo x resultando no mesmo valor de razão de pressão para diferentes valores de vazão mássica. Para avaliar a eficácia da metodologia das linhas Beta utilizadas por Kurzke [8] na solução deste problema, os autores traçaram Beta arbitrárias, considerando $\beta = 1$ sendo a linha de *surge*, e os outros valores de β representados por linhas paralelas a esta até $\beta = 0$, Figura 2.3.

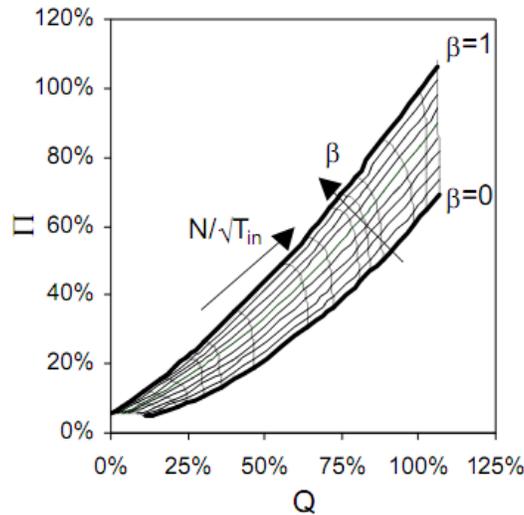


Figura 2.3 –Linhas Beta definidas por Geoff Jones e Curnock [12] utilizando a metodologia apresentada por Kurzke [8].

Assim, considerando os mapas de características típicos, os parâmetros de vazão mássica corrigida, razão de pressão e eficiência isentrópica podem ser determinados ao longo da faixa de operação a partir de Beta e da rotação corrigida, sem que ocorra colinearidade.

Os autores também analisaram a sugestão de Crainic et al., citado em [12] para eliminar os problemas de colinearidade utilizando a função de vazão mássica na entrada do compressor, Q_E . Neste caso, a determinação do ponto de operação requer apenas a determinação de dois parâmetros ao invés de três, uma vez que a razão de pressão já é considerada implicitamente na função de vazão mássica, como mostra a equação (2.2),

$$Q_E = \frac{W_{in} \sqrt{RT_{in}}}{A_{in} \cdot P_{out} \sqrt{\gamma}} = \frac{W_{in} \sqrt{RT_{in}}}{A_{in} \cdot P_{in} \sqrt{\gamma}} \cdot \frac{P_{in}}{P_{out}} \quad (2.2)$$

Por outro lado, a função de vazão mássica depende do parâmetro de temperatura, o que não acontece com as linhas Beta, e pode ser um motivo relevante para a escolha da metodologia utilizada por Kurzke [8].

Carvalho [13] desenvolveu um modelo matemático para obter os mapas de características do compressor e da turbina. Os mapas do compressor foram modelados a partir da equação da elipse (2.3):

$$\left(\frac{x}{a}\right)^z + \left(\frac{y}{b}\right)^z = c \quad (2.3)$$

Onde o parâmetro a corresponde à vazão mássica corrigida quando a razão de pressão é unitária (onde a curva corta o eixo das ordenadas, x). O parâmetro b representa a razão de pressão quando a vazão mássica é nula (onde a curva corta o eixo das abcissas, y). O parâmetro c é uma constante arbitrária e o parâmetro z representa a curvatura da linha. As linhas de rotação são obtidas variando-se estes parâmetros.

A partir das linhas já modeladas pela equação (2.3) novas linhas de rotação são obtidas, definindo os parâmetros a , c , z , x e y da equação da elipse a partir da equação (2.4) e o parâmetro b pela equação (2.5), como mostra a Figura 2.4.

$$\chi = \chi_m + \left(\frac{\chi_M - \chi_m}{10}\right) \cdot N \quad (2.4)$$

Onde χ é o parâmetro (a , c , z , x ou y) da linha de rotação escolhida, que está entre duas rotações conhecidas, sendo M o índice que indica o parâmetro correspondente à linha de maior rotação e m à linha de menor rotação. O N varia de 0 a 10, sendo 0 para a menor rotação e 10 para a maior rotação.

$$b = \left[\frac{y^2}{c - \left(\frac{x}{a}\right)^z} \right]^{\frac{1}{z}} \quad (2.5)$$

Onde b corresponde ao valor de razão de pressão que compõe o ponto da nova linha de rotação quando a vazão mássica é nula, e a , c , z , x e y são parâmetros determinados pela equação (2.4), para definir a equação da elipse que modela a nova linha de rotação. Esta metodologia permite uma flexibilidade na faixa da velocidade de rotação na operação fora do ponto de projeto.

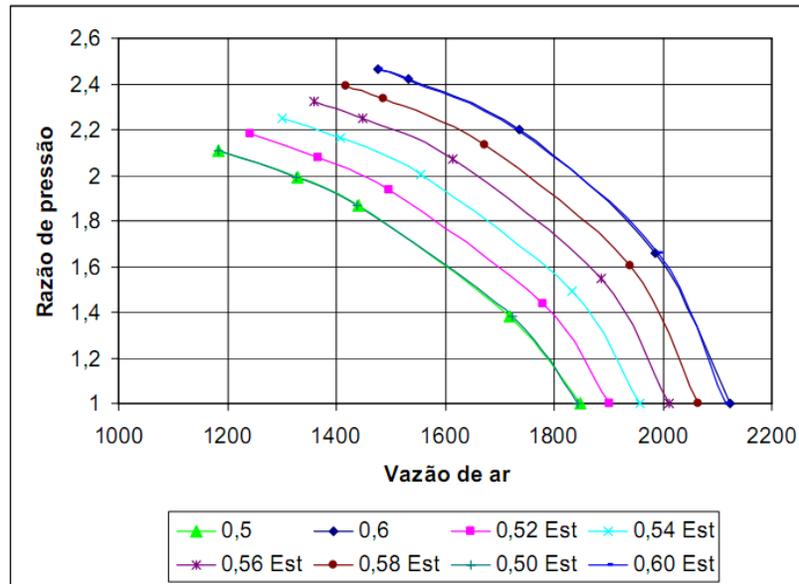


Figura 2.4 – Novas linhas de rotação constante determinadas a partir da metodologia desenvolvida por Carvalho [13].

A utilização de equações de elipse que definem as linhas de rotação para determinar os pontos de operação da simulação em *off-design* apresentou resultados semelhantes àqueles obtidos utilizando o parâmetro z , de MacMillan, equação (2.1), o que segundo Carvalho [13] validou o conceito de formulação do mapa apresentado. Essa metodologia não foi validada pelo autor para compressores diferentes daquele utilizado em seu trabalho.

As novas linhas de rotação são obtidas por Carvalho [13] a partir de duas linhas adjacentes conhecidas modeladas por suas respectivas equações de elipse, definidas pelo autor com desvios inferiores a 2% no mapa de características de razão de pressão em função da vazão mássica e inferiores a 5% para o caso da eficiência isentrópica em função da razão de pressão do compressor analisado. Assim, os desvios obtidos na modelagem das linhas de rotação do mapa, apesar de pequenos, podem ser propagados para as novas linhas de rotação.

A diferença do método de Carvalho [13] para obter uma nova linha de rotação e os outros autores citados consiste no fato de o primeiro interpolar os parâmetros que compõem a equação da elipse, a fim de determinar uma nova equação que irá representar a linha em questão, enquanto nos outros trabalhos estudados, os parâmetros (vazão mássica corrigida, razão de pressão e eficiência isentrópica) que caracterizam duas linhas adjacentes a que se quer determinar são interpolados a fim de determinar esta nova linha de rotação.

Ferreira [14] desenvolveu um programa computacional, denominado TURGAS, para simular e analisar o desempenho térmico de turbinas a gás industriais de ciclo simples, de um e dois eixos, nas condições de projeto (*design point*) e fora destas (*off-design*).

Para a modelagem da operação fora do ponto de projeto Ferreira [14] utiliza os mapas de características do compressor e da turbina. O ponto de operação para as condições *off-design* do compressor axial é obtido pela manipulação dos mapas de características a partir da interpolação linear para determinar os parâmetros de vazão mássica corrigida, razão de pressão e eficiência isentrópica, para dada rotação corrigida e o parâmetro Beta apresentado por MacMillan [9].

O trabalho desenvolvido por Ferreira [14] foi utilizado como base para o desenvolvimento de uma nova ferramenta computacional denominado NGGT (*Natural Gas & Gas Turbine*) que vem sendo constantemente atualizada e validada a partir de projetos de pesquisa e desenvolvimento. O NGGT é capaz de simular o desempenho de turbinas a gás de um eixo, utilizando compressor com geometria fixa ou variável, a fim de identificar possíveis falhas na operação do equipamento. Para o cálculo do ponto de operação fora do ponto de projeto do compressor, esta ferramenta utiliza a metodologia de manipulação de mapas de características de compressor axial proposta nesta dissertação.

Atualmente esta ferramenta encontra-se instalada em uma planta termelétrica auxiliando os operadores no monitoramento e diagnóstico de falhas da operação em regime permanente das turbinas a gás que a compõem. Devido à razões de contrato, a termelétrica em questão não pode ser nomeada.