

## **2** **Fundamentos Teóricos**

### **2.1.** **Introdução**

O escopo desta dissertação abrange diversos campos do conhecimento que não se restringem apenas às Termociências. Para que todos os assuntos envolvidos no trabalho sejam entendidos, é feita uma revisão da Termodinâmica elementar de turbinas a gás e alguns tópicos de modelagem destes equipamentos. Além disto, são apresentados elementos de Lógica *Fuzzy* que permitem compreender a nomenclatura utilizada do texto e a forma de construção do sistema de diagnóstico.

Este capítulo, através da revisão da teoria, permite identificar uma série de termos utilizados ao longo dos capítulos, muitos dos quais constituem siglas e estrangeirismos comuns à literatura específica.

## 2.2. Turbinas a Gás

### 2.2.1. Introdução

As turbinas a gás são turbomáquinas térmicas que atuam como elementos motores, aplicados na geração elétrica e na propulsão aeronáutica, naval e automotiva. Estes equipamentos se destacam, principalmente, pela independência de fontes de água, pela baixa razão volume versus potência e pela inexistência de fluidos de trabalho intermediários.

Seu desenvolvimento esteve diretamente relacionado à evolução das turbinas a vapor, que atingiram elevado grau tecnológico no século XX. Mas além destas máquinas necessitarem de um fluido intermediário para gerar o vapor, necessitam também de instalações extremamente robustas para resistir aos níveis de pressão adotados. A turbina a gás possui um elemento expensor similar ao da turbina a vapor, mas seu fluido de trabalho é gerado pela combinação de dois outros componentes, no processo de combustão: o combustível, que fornece a energia e o compressor, que fornece o fluido pressurizado, o qual transporta o oxidante do combustível. Em turbinas a gás de circuito fechado, o fluido de trabalho não se altera ao longo do percurso do gás.

As turbinas a gás possuem variadas configurações por tipos de aplicação, um esquema com a configuração básica da máquina utilizada como referência neste trabalho é mostrada na Figura 1, a Figura 2 indica os componentes em uma turbina real.

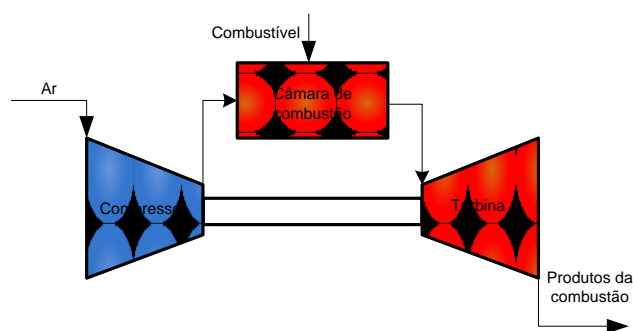


Figura 1: Esquema básico de uma turbina a gás de ciclo simples.

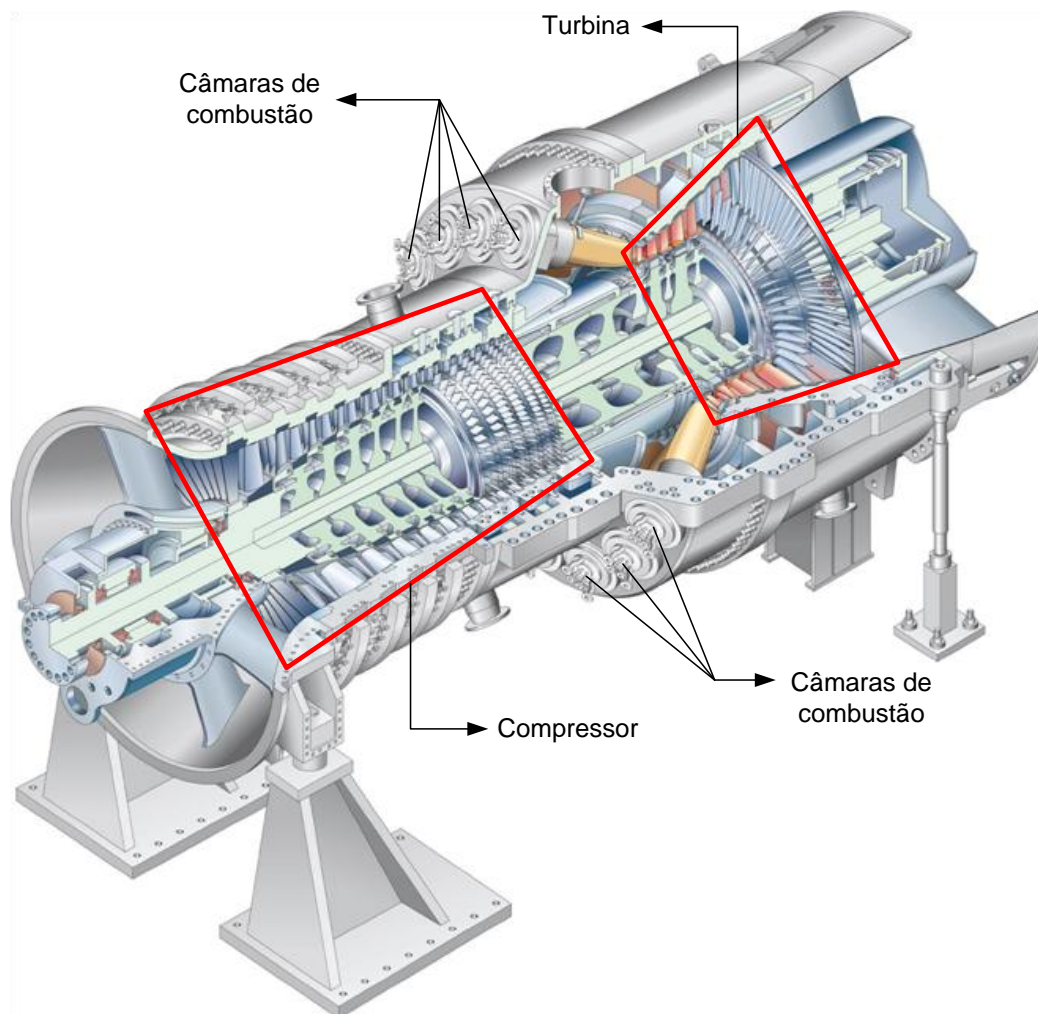


Figura 2: Esquema básico Turbina a gás industrial Siemens SGT5-4000F [3].

As turbinas a gás industriais podem ser divididas em dois subgrupos: as aeroderivativas e as *heavy duty*. As turbinas aeroderivativas são adaptações de modelos aeronáuticos, caracterizam-se pelos reduzidos volume e massa, podendo atingir potências de até 50 MW. As turbinas industriais caracterizam-se pela sua robustez, baixo custo, alta confiabilidade e maior flexibilidade de combustível, podendo atingir potências de 340 MW [4].

As turbinas aeroderivativas possuem, normalmente, uma turbina livre, desacoplada mecanicamente do conjunto compressor-turbina. Esta turbina é comumente denominada turbina de potência (PT) e o conjunto à montante é denominado gerador de gás. Além disto, podem haver vários conjuntos compressor-turbina, também chamados de rotores, desacoplados mecanicamente, conforme mostra a Figura 3.

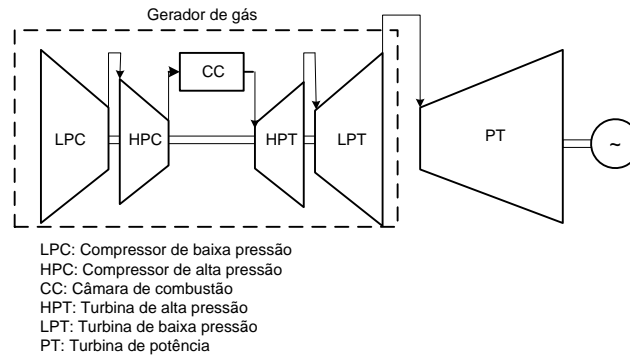


Figura 3: Esquema de uma turbina multi-eixo com turbina de potência.

### 2.2.2. Análise Termodinâmica da Turbina a Gás

O ciclo termodinâmico proposto por Brayton é o ciclo ideal aplicado às turbinas a gás. A análise teórica deste ciclo pode ser conduzida admitindo-se: (i) que o fluido de trabalho é o ar; (ii) o mesmo é um gás ideal, (iii) a variação de energia cinética entre a entrada e a saída de cada componente é desprezível e (iv) o fornecimento e rejeição de calor no ciclo são dados por transferência de calor; o que simplifica a análise e evita, a priori, uma discussão mais complexa sobre o processo de combustão. Além disso, as perdas de pressão ao longo do ciclo são desprezadas [5, 6]. Um esquema desse modelo idealizado de ciclo de turbina a gás é mostrado na Figura 4.

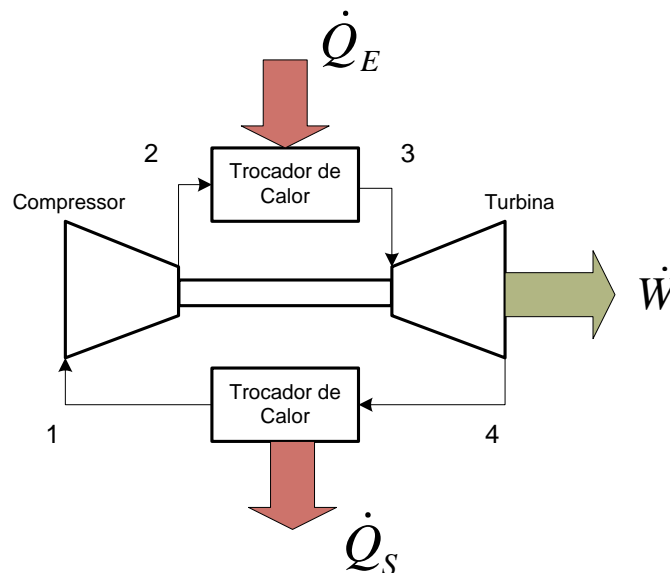


Figura 4: Esquema da turbina a gás idealizada para o Ciclo Brayton.

Uma vez apresentado o esquema da Figura 4, pode-se fazer uma análise do balanço de energia e eficiência do ciclo. Aplicando-se a Primeira Lei da Termodinâmica aos volumes de controle definidos em torno da turbina e do compressor, tem-se,

$$\frac{\dot{W}_t}{\dot{m}} = h_3 - h_4 \text{ e} \quad (1)$$

$$\frac{\dot{W}_c}{\dot{m}} = h_2 - h_1. \quad (2)$$

De maneira análoga, para os trocadores de calor, obtém-se,

$$\frac{\dot{Q}_E}{\dot{m}} = h_3 - h_2 \text{ e} \quad (3)$$

$$\frac{\dot{Q}_S}{\dot{m}} = h_4 - h_1 \text{ .} \quad (4)$$

Pode-se, então, definir a eficiência do ciclo com base na eficiência térmica de uma Máquina Térmica Motora, mostrada na Figura 5.

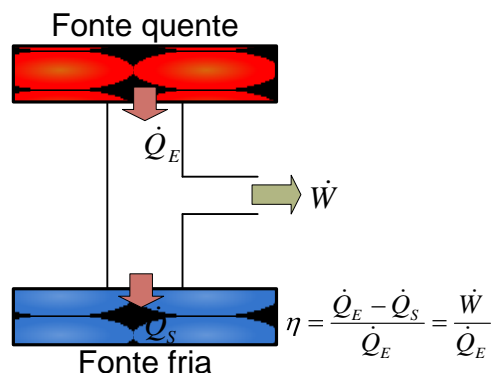


Figura 5: Diagrama básico de uma Máquina Térmica Motora.

Este resultado proporciona um primeiro parâmetro de desempenho do motor, uma vez que ele correlaciona as potências consumida e produzida no ciclo. Uma boa fração da potência produzida, de 40 a 80%, é consumida pelo compressor. A título de comparação, em um ciclo a vapor, em que a compressão da água é realizada no estado líquido, a relação de consumo de potência é de 1 a 2 % porque a variação do volume específico do gás a ser comprimido é muito maior que o da água líquida [5]. Pode-se, a partir do cálculo da eficiência da máquina térmica, definir a relação da eficiência da turbina a gás, mostrada na equação (5).

$$\eta_{TG} = \frac{\frac{\dot{W}_t}{\dot{m}} - \frac{\dot{W}_c}{\dot{m}}}{\frac{\dot{Q}_E}{\dot{m}}} = \frac{\dot{W}_{TG}}{\dot{Q}_E} \quad (5)$$

A eficiência pode ainda ser escrita em termos de temperatura e pressão. Considerando-se o balanço de massa e substituindo-se as equações (1), (2) e (3) em (5), obtém-se a equação (6), dada em função das entalpias específicas entre os componentes.

$$\eta_{TG} = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{(h_3 - h_2)} \quad (6)$$

Os diagramas T – s e p – v do ciclo ideal são mostrados na Figura 6. Neles observa-se que são desprezadas todas as irreversibilidades e os processos de expansão e compressão são considerados adiabáticos.

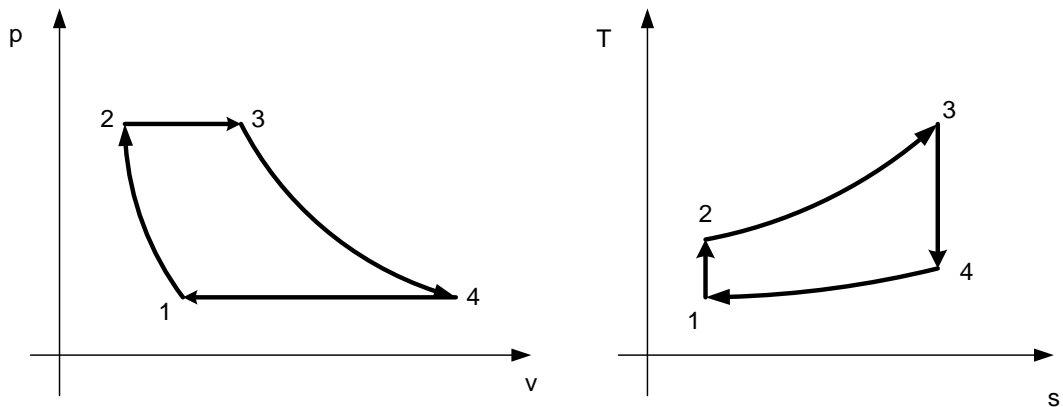


Figura 6: Diagramas p - v e T - s do Ciclo Brayton ideal.

Como os processos 1-2 e 3-4 são isentrópicos, pode-se escrever:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad \text{e} \quad (7)$$

$$\frac{T_4}{T_3} = \left( \frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (8)$$

Como  $p_1 = p_4$  e  $p_2 = p_3$  e desprezando-se as perdas de pressão e irreversibilidades, pode-se, ainda, escrever que,

$$\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2} \quad (9)$$

Pela hipótese de que o ar é um gás ideal o  $c_p$  é constante, logo, obtém-se a equação (10), através da qual pode-se relacionar diretamente a eficiência da turbina a gás com a razão de pressão do compressor.

$$\eta_{TG} = \frac{c_p(T_3 - T_4) - c_p(T_2 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} =$$

$$1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \left( \frac{T_4/T_1 - 1}{T_3/T_2 - 1} \right) = 1 - \frac{T_1}{T_2} \therefore$$

$$\eta_{TG} = 1 - \frac{1}{\left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \quad (10)$$

Pode-se estender a análise apresentada até agora através da introdução do conceito de propriedades de estagnação [6]. Define-se propriedade de estagnação como sendo a propriedade que o fluido teria se desacelerado adiabaticamente até a velocidade nula. Este conceito é aplicado para que se considere na análise a contribuição da energia cinética.

Os fundamentos termodinâmicos da operação de uma turbina a gás que foram lançados até aqui desprezaram todas as irreversibilidades e perdas. Serão apresentadas agora as correções que devem fazer parte dos cálculos reais da máquina.

As principais causas de perdas e irreversibilidades são listadas abaixo [5, 6]:

- Perdas de carga nos trocadores de calor ou câmaras de combustão e dutos de admissão e exaustão;
- Em decorrência das altas velocidades no interior dos componentes, a compressão e expansão ocorrem por processos irreversíveis;
- Mancais, geradores e outros componentes auxiliares causam perdas mecânicas;
- Os valores de  $c_p$  e  $\gamma$  variam significativamente com a temperatura e, no caso de combustão, com a composição química.

Uma vez considerados esses efeitos, pode-se propor um diagrama T – s da forma mostrada na Figura 7.

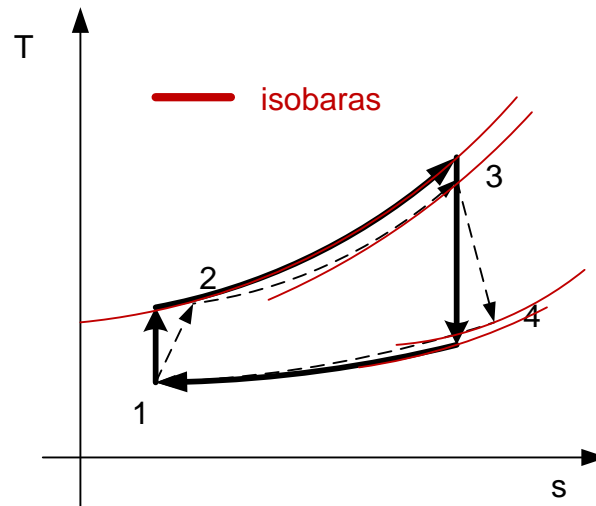


Figura 7: Diagrama T – s do Ciclo Brayton com perdas.

### 2.2.3. Modelagem *off-design* de turbinas a gás

O texto clássico para a modelagem fora do ponto de projeto (*off-design*) de turbinas a gás é o de Cohen *et al.* [6] segundo o qual é necessário a compatibilização entre as faixas de operação dos diversos componentes da turbina, referentes à vazão mássica, potência e rotação. Bathie [7] apresenta as principais formas de compatibilização que podem ser adotadas no cálculo de turbinas a gás. As faixas de operação podem ser determinadas pelos mapas de desempenho, ou de características, que reúnem os parâmetros adimensionais e semi-dimensionais responsáveis pela sua caracterização; de forma que fixada a sua geometria o mapa seja único [8]. Detalhes do estado da arte na modelagem dos componentes serão abordados separadamente nos parágrafos que se seguem.

#### Compressor:

O compressor é o responsável no ciclo pelo aumento da pressão total do ar, com o uso mínimo de potência. Estes equipamentos se dividem em compressores axiais, nos quais o escoamento é paralelo ao eixo do rotor e centrífugos, nos quais a velocidade do fluido na saída do compressor pertence um plano ortogonal ao eixo do rotor. Neste trabalho somente serão abordados os compressores axiais, comuns em turbinas a gás de grande porte.



Um exemplo de mapa de compressor é apresentado na Figura 8. A razão de pressão  $PR$  e a eficiência  $\eta$  são mostradas como função da vazão mássica semi-dimensional  $\frac{\dot{m} \sqrt{T}}{p}$  e referenciadas a rotações características,  $\frac{N}{\sqrt{T}}$ .

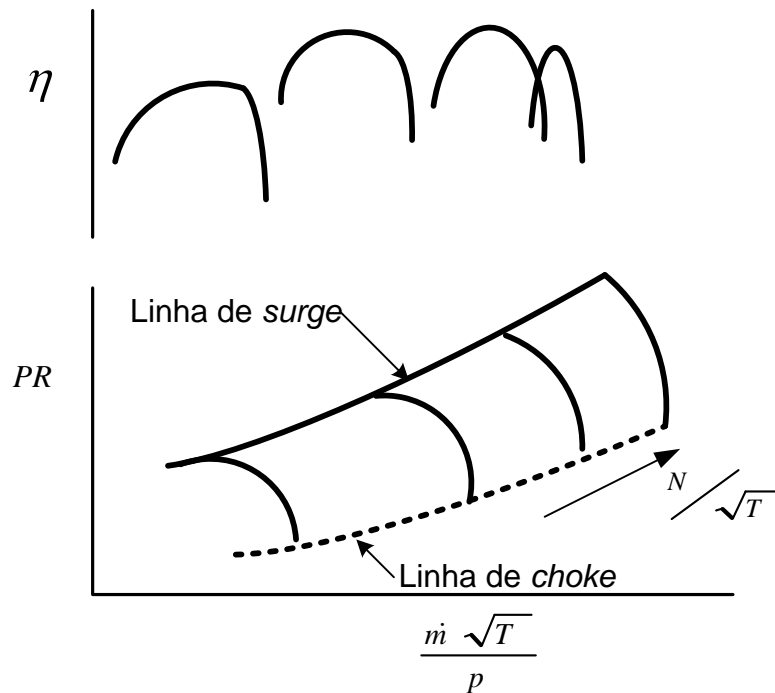


Figura 8: Mapa de compressor típico [8].

Estão indicadas na Figura 8 duas regiões em que ocorrem fenômenos que devem ser evitados na operação do compressor: *surge* (bombeamento) e *choke* (entupimento), ambos de natureza aerodinâmica. O *surge* ocorre quando o escoamento atinge tal combinação de razão de pressão e vazão mássica que as palhetas do compressor operem em estol aerodinâmico, ou seja, ocorre o descolamento do escoamento por gradiente de pressão adverso, o que pode resultar em escoamento em sentido contrário ao desejado e causar severos danos. O *choke* ocorre quando o escoamento atinge Mach unitário entre as palhetas, de forma que o compressor não consiga mais impelir o fluido.

Qualquer modelagem de compressor deve restringir seus pontos de operação ao interior da zona permitida do mapa, o qual representa, graficamente, o regime de operação aerodinâmica permissível. Uma técnica usual de navegação pelo mapa é o uso das linhas beta, as quais constituem um recurso computacional que discretiza o mapa através do traçado de curvas. O número de curvas e a forma de construção são arbitrários, variando conforme o tipo de compressor. Esta técnica também minimiza a instabilidade do método numérico nas regiões em que as

linhas de rotação tendem a uma assíntota vertical. A Figura 9 mostra o uso de curvas beta sobre um mapa de compressor típico.

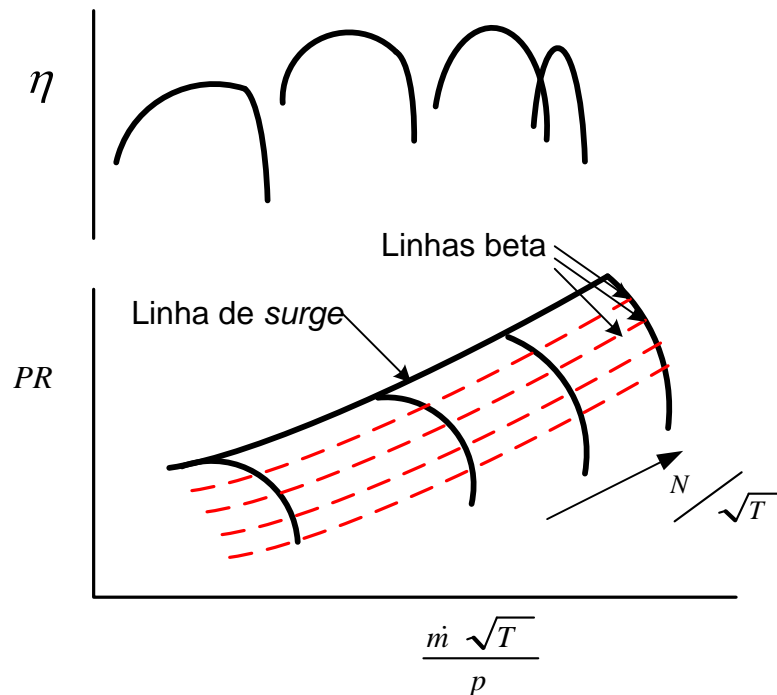


Figura 9: Mapa de compressor e linhas beta [8].

O mapa de compressor é único para uma geometria fixa, mas uma boa parte dos mesmos possui elementos de geometria variável, os IGVs (*Inlet Guide Vanes*) e VSVs (*Variable Stator Vanes*). Esses componentes móveis atuam no escoamento de forma a evitar os fenômenos de *surge* e de *choke*, o que é observado na prática pelo deslocamento do mapa de forma a levar o ponto de operação para a zona permitida.

Nas diversas abordagens da modelagem de turbinas a gás publicadas recentemente, os estudos são limitados pela falta de material publicado pelos fabricantes, o que torna complexa a modelagem principalmente pela falta de mapas adequados de componentes. Uma maneira de contornar a ausência de mapas de compressor é a utilização de mapas de turbinas a gás com potência e razão de pressão similares à modelada [9, 10].

Um grande empecilho à modelagem é a deformação do mapa que ocorre com a atuação dos elementos de geometria variável, pois não existem referências muito claras na literatura para a solução do problema. Alguns trabalhos [10, 11] utilizam algoritmos genéticos para determinar fatores de deslocamento do mapa, como função do ângulo das IGVs.

### Turbinas:

A turbina expande o gás, transformando energia térmica em energia mecânica. De maneira análoga ao compressor, o comportamento *off-design* da turbina pode ser descrito por mapas de desempenho. Entretanto, para grande parte das turbinas a gás operando em regime permanente, seja ou não em ponto de projeto, o bocal de entrada de gás na turbina encontra-se em *choke* [6, 8], o que mantém o escoamento no interior da mesma limitado. Desta forma, fixadas as condições termodinâmicas na entrada do expensor, sua eficiência pode ser considerada constante. Essa hipótese vale, também, para o caso de turbinas dotadas de bocais de geometria variável (*nozzle guide vanes* – NGV), embora, para este caso, exista um novo valor de eficiência para cada geometria, o que implica em técnicas mais apuradas de adaptação de mapas de características.

### Câmara de combustão:

Como na prática a combustão ocorre de maneira quase isobárica [6,8], as perdas de pressão entre o compressor e a turbina são consideradas constantes e são ajustadas para cada equipamento.

Alguns autores [9, 12, 13] utilizam um equacionamento simples, baseado em conservação de massa e energia, para obter os parâmetros termodinâmicos da combustão. Em [14] é proposto um método que considera o combustível e o ar substâncias multi-elementares e conduz a combustão de forma estequiométrica levando em conta a formação das espécies químicas mais importantes, bem como determina diretamente o poder calorífico inferior do combustível e sua exergia química. Este tipo de abordagem permite uma análise muito mais detalhada dos produtos de combustão e a possibilidade de configurar o modelo para queima de virtualmente qualquer combustível.

Além das questões inerentes ao projeto dos componentes da turbina a gás, outros aspectos são fundamentais para a sua importância e devem ser considerados na modelagem [12, 15]:

- Temperatura ambiente
- Umidade relativa do ar

- Pressão atmosférica ou altitude
- Perdas de pressão na tomada de ar ou na exaustão de gases
- Composição do combustível
- Injeção de água ou vapor no fluido de trabalho

Tais influências podem ser contabilizadas por modelos matemáticos ou por curvas de correção que transladem as condições de operação real para um sistema de referência padrão.

## 2.3. Lógica *Fuzzy*

### 2.3.1. Introdução

A lógica nebulosa, ou *fuzzy*, surgiu como ferramenta de redução da complexidade da análise de sistemas, observada na análise matemática tradicional [16]. Ela se baseia no funcionamento do pensamento humano, que caracteriza as situações quantitativas de maneira linguística e não numérica. Esta característica tem feito com que a lógica *fuzzy* seja aplicada com sucesso em diversas áreas relacionadas à tecnologia [16, 17, 18, 19].

Um sistema *fuzzy* calcula o grau de compatibilidade de um evento a uma determinada classificação linguística, como, por exemplo; frio, morno e quente. Embora este tipo de classificação esteja carregado de incerteza e ambiguidade, é comum no pensamento humano estabelecerem-se ações do tipo: “se a água está quente, diminua a vazão de gás”; observa-se que “quente” e “diminua” são classificações ambíguas e imprecisas, porém, o resultado prático pode fazer sentido se as regras que caracterizam o evento são suficientes para descrevê-lo.

Pode-se associar a classificação nebulosa da frase acima a valores numéricos de acordo com o mostrado na Figura 10, na qual a classificação “quente” é função de um valor de temperatura, de forma que seja avaliada a compatibilidade deste valor a esta classificação semântica.

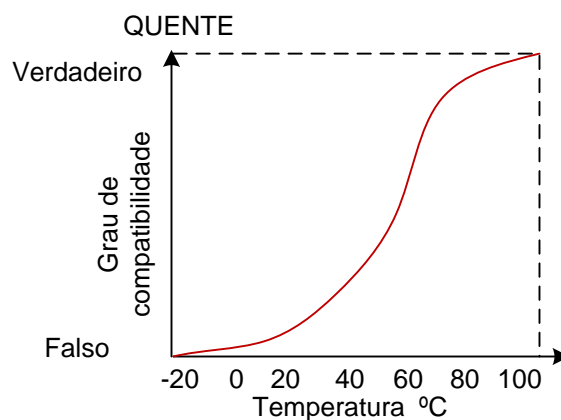


Figura 10: Associação de classificação *fuzzy* a valores numéricos.

Ao longo deste texto serão utilizados alguns termos em língua inglesa que foram adotados na literatura nacional e que são amplamente difundidos. Nas próximas sub-seções serão mostrados os conceitos da álgebra *fuzzy* e os fundamentos teóricos básicos para a construção de um sistema *fuzzy*.

**2.3.2. Conjuntos Fuzzy**

A teoria clássica dos conjuntos, definida a partir da lógica booleana, propõe que um determinado elemento pertence ou não a um determinado conjunto (conjuntos ou sistemas booleanos são comumente denominados *crisp*). A lógica *fuzzy* estabelece que um elemento pertence com um certo grau a um determinado conjunto [17], como mostra a Figura 11.

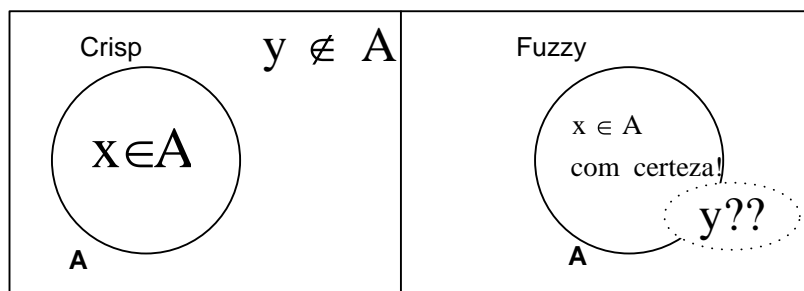


Figura 11: Representação de pertinência segundo as lógicas booleana e *fuzzy*.

Essa incerteza de pertinência pode ser eliminada pela definição matemática: seja *A* um conjunto *fuzzy* definido em um espaço de discurso *X* pelo conjunto de pares ordenados  $A = \{(\mu_A(x), x)\}, \forall x \in X$ , onde  $\mu_A(x)$  é a função de pertinência do conjunto *fuzzy* e  $\mu_A(x) \in [0,1]$ . Isto faz com que, na verdade, cada conjunto *fuzzy* seja uma função [20] e, em termos computacionais, pode ser implementado como tal [16]. Existem diversos tipos de funções de pertinência, que variam conforme a aplicação do sistema *fuzzy*. Em geral, são utilizadas funções triangulares, trapezoidais ou gaussianas [21].

A função de pertinência indica, em uma escala de zero a um, o quanto determinado evento é verdadeiro ou falso. Desta forma, pode-se refazer a Figura 10 de acordo com o indicado na Figura 12. Essa atribuição de funções de pertinência aos elementos semânticos é denominada fuzziificação.

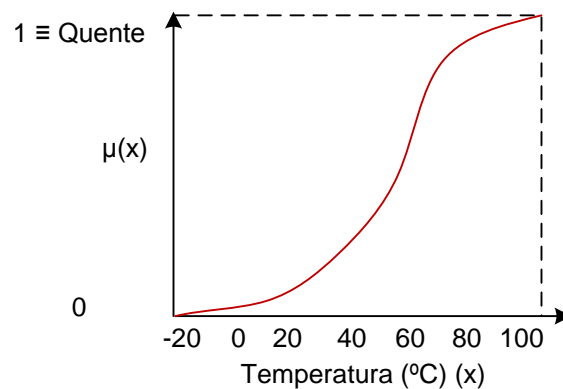


Figura 12: Função de pertinência referente ao conjunto “quente”.

### 2.3.3. Operadores *Fuzzy*

Como foi visto, a lógica *fuzzy* é uma generalização da lógica booleana. As operações com conjuntos *fuzzy* se estabelecem com operadores análogos aos operadores *crisp*, embora elas sejam descritas em termos das funções de pertinência [18, 22]. Existem outras definições além destas aqui apresentadas, mas que não são tratadas no trabalho.

Sejam  $A$  e  $B$  conjuntos *fuzzy*, são apresentadas a seguir as principais operações entre eles:

- Interseção:  $A \cap B = \min[\mu_A(x), \mu_B(y)]$ ;
- União:  $A \cup B = \max[\mu_A(x), \mu_B(y)]$ ;
- Complemento:  $\sim A = 1 - \mu_A(x)$ .

### 2.3.4. Regras *Fuzzy* e Sistema de Inferência

As regras *fuzzy*, que estabelecem as relações entre os conjuntos das variáveis de entrada e as saídas com as classificações semânticas, são construídas a partir da álgebra *fuzzy* e de regras SE-ENTÃO, como pode-se observar de maneira simplificada no exemplo [23]: “se  $z$  pertence ao conjunto *fuzzy*  $A$ , então  $x$  pertence ao conjunto *fuzzy*  $B$ ”, onde a primeira oração representa o antecedente e a segunda o conseqüente. A inferência de cada regra envolve três fases:

(i) fuzzificação das entradas, formando o antecedente com grau de pertinência entre 0 a 1;

(ii) aplicação dos operadores *fuzzy* para antecedentes com múltiplas partes;

(iii) aplicação do resultado ao conseqüente.

A arquitetura completa dos sistemas de inferência *fuzzy*, mostrada na Figura 13, é constituída de três partes [23]. A primeira é a identificação, por parte do especialista, das variáveis de entrada, normalmente parâmetros medidos, e da variável de saída. A segunda é a aplicação das regras *fuzzy* para a geração dos conjuntos de saída a partir dos parâmetros de entrada e o cálculo dos efeitos superpostos pelo sistema de inferência. A terceira é a defuzzificação das variáveis, que transforma a saída *fuzzy*, resultante do processo de inferência de todas as regras, em uma resposta *crisp*.

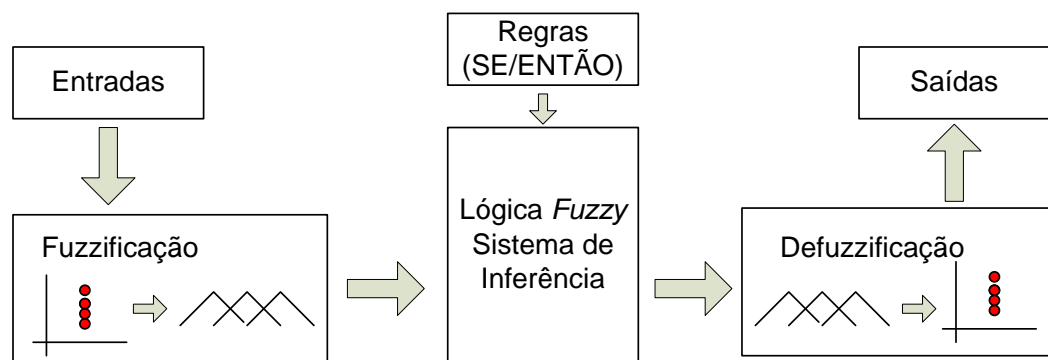


Figura 13: Arquitetura de um Sistema *Fuzzy* [23].