

3

Revisão Bibliográfica

3.1.

Introdução

Dado o carácter multidisciplinar deste trabalho, são apresentados ao longo de todos os capítulos técnicas, soluções e aspectos teóricos retiradas de publicações recentes. Assim, os trabalhos apresentados neste capítulo tratam unicamente de sistemas de diagnóstico de falhas em turbinas a gás, os quais utilizaram, de alguma forma, a lógica *fuzzy*.

Cabe ressaltar que, por ser um assunto recente, não existem muitas publicações a respeito do mesmo. Assim, foram selecionados para serem aqui discutidos trabalhos que apresentaram metodologias compatíveis com o sistema de diagnóstico desenvolvido.

3.2. Revisão Bibliográfica

No trabalho de Martis [24] foi desenvolvido um sistema *fuzzy* aplicado a um sistema GPA (*Gas Path Analysis*) calculado pelo Método de Newton para diagnóstico de falhas em turbinas a gás. Define-se o vetor $\delta\mathbf{p}$, de dimensão m , cujos componentes são as diferenças entre os parâmetros de máquina saudável e os parâmetros medidos. São denominadas “parâmetros” quaisquer variáveis de desempenho relevantes para a análise. Quando o modelo de máquina saudável está calibrado com determinada turbina a gás, alguns parâmetros são característicos daquela operação, como eficiências, razão de pressão, fração dos *bleeds*, etc. Estes parâmetros constituem o vetor \mathbf{x}_0 . Quando há qualquer alteração nos parâmetros, um novo vetor \mathbf{x} é definido pelo realinhamento do modelo, logo, o vetor de distorções funcionais pode ser calculado por,

$$\delta x_i = x_i - x_{0i}, \quad (11)$$

onde $i = 1, \dots, n$ e n é o número de distorções relevantes.

O vetor $\delta\mathbf{x}$ é obtido pela aplicação do Método de Newton na solução do sistema,

$$\mathbf{W} \cdot \delta\mathbf{x} = \delta\mathbf{p}, \quad (12)$$

quando $n = m$ e a matriz \mathbf{W} é a matriz Jacobiana definida por,

$$w_j = \frac{\delta p_j}{\delta x_i}, \quad (13)$$

o processo iterativo, com erro de parada ε_0 , evolui até que a inequação (14) seja obedecida.

$$\delta\mathbf{x}_{k+1} - \delta\mathbf{x}_k \leq \varepsilon_0 \quad (14)$$

Este método, por ser iterativo, sofre grande influência dos erros de medição e incertezas associadas às falhas, daí a necessidade de um método adequado, que utilize lógica *fuzzy*.

Observa-se que, na realidade, a matriz $\mathbf{W}(\mathbf{x})$ é retangular, ou seja, $m > n$. À primeira vista, o sistema definido na equação (12) não teria solução; entretanto, pode-se definir uma classe de soluções que não o resolva mas que esteja

localizada na vizinhança da solução exata. A lógica *fuzzy* é aplicada para minimizar as incertezas e ruídos do método, através da adição de mais uma dimensão ao sistema ($n + 1$) que é a dimensão nebulosa. O sistema é montado segundo quatro passos, definidos a seguir.

Fuzzificação:

Introduz-se a dimensão extra (nebulosa) que guarda a qualidade da medição, a qual será utilizada para o expurgo de ruídos, através de uma distribuição de probabilidade em torno do parâmetro δp_j . No caso, a critério do autor, foi adotada a distribuição Gaussiana mostrada na Figura 14, definida pela equação (15) ,

$$\rho(t_j, \mu_j, \sigma_j) = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t_j - \mu_j}{\sigma_j} \right)^2}, \quad (15)$$

onde:

t_j : abscissa do parâmetro

σ : desvio padrão

μ_j : valor médio, $\mu_j = \delta p_j$

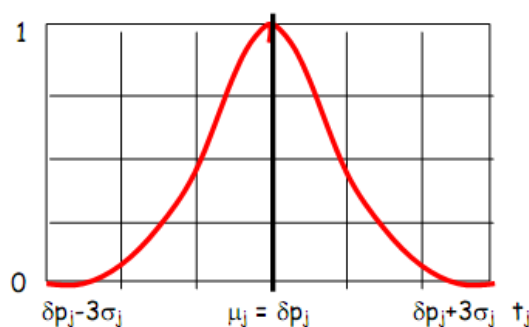


Figura 14: Distribuição gaussiana aplicado à medida p_j [24].

Inferência:

Introduz o termo *fuzzy* δp_j a cada equação do sistema, criando um conjunto de soluções parcialmente verdadeiras em torno das mesmas. Uma vez inserida a dimensão nebulosa, pode-se modificar o sistema definido na equação (12), através das regras definidas, de forma que haja uma região do espaço em que o mesmo seja parcialmente verdadeiro. Um exemplo para um sistema de duas equações é mostrado na Figura 15.

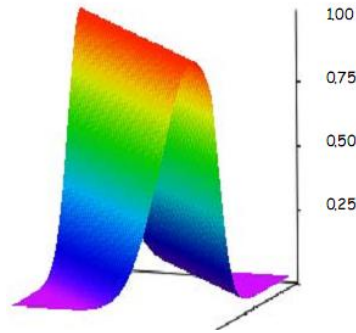


Figura 15: Domínio *fuzzy* para duas variáveis e distribuição normal [24].

Composição:

Calcula-se o domínio *fuzzy* resultante de possíveis soluções, assumindo que o domínio comum é dado pela interseção de probabilidades para cada equação do sistema. A Figura 16 mostra um domínio para o caso de $m = 3$ e $n = 2$, onde observa-se que cada reta possui paralelas referentes à faixa de incerteza. A interseção entre elas gera o triângulo destacado.

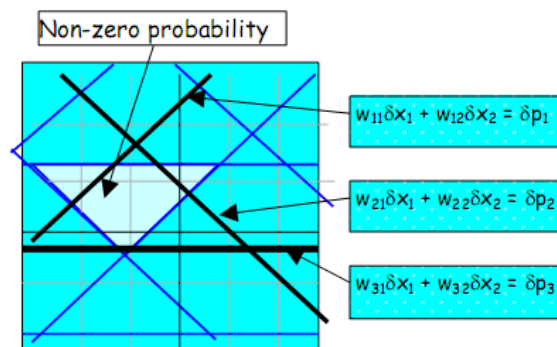


Figura 16: Interseção de domínios de incerteza [24].

Defuzzificação:

Calcula uma solução única, definida entre a mais provável no domínio *fuzzy* resultante. Existem diversos métodos de defuzzificação, o adotado no trabalho foi o do centróide, o qual, segundo o autor, é o mais adequado para modelagem de turbinas a gás dada a natureza dos sinais e da instrumentação. A Figura 17 mostra um exemplo de localização de centróide.

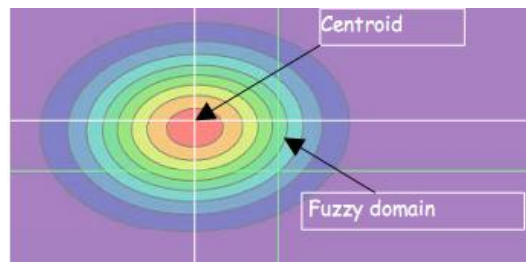


Figura 17: Representação escalar da solução [24].

Este método foi aplicado à identificação de sujeira no compressor para uma turbina a gás aeroderivativa e obteve resultados mais confiáveis do que métodos tradicionais.

O autor desvia-se do padrão habitual dos textos de diagnóstico, pois seu sistema foi desenvolvido para minimizar a influência do ruído de medição na análise de falhas. No entanto, o autor aproxima de forma didática a matemática típica da análise GPA e os fundamentos da lógica *fuzzy* à física das turbinas a gás, o que permite entender a análise de sensibilidade que deve ser realizada em um trabalho como o desenvolvido nesta dissertação.

No trabalho de Ganguli [22] é apresentada uma metodologia de identificação do componente da turbina a gás defeituoso a partir do deslocamento de grandezas medidas com relação ao comportamento previsto para a máquina saudável. Como o trabalho trata de turbinas aeronáuticas, o autor menciona o fornecimento de gráficos de assinatura pelos fabricantes de motores – dispositivos que associam a uma determinada falha as variações nas variáveis das quais se depreendem os sintomas. Estes gráficos permitem um diagnóstico não automático e pouco eficiente caso sejam interpretados de maneira *crisp*.

A técnica apresentada no trabalho é aplicada às turbinas antigas e pouco instrumentadas, assim, são definidos quatro parâmetros básicos normalmente disponíveis nestes equipamentos: temperatura dos gases de exaustão (EGT), velocidade de rotação do rotor de baixa pressão (N1), velocidade de rotação do rotor de alta pressão (N2) e vazão de combustível (WF). A Figura 18 mostra os gráficos de assinatura referentes aos parâmetros WF e EGT. Os módulos em que a turbina se divide são: turbina de alta pressão (HPT), compressor de baixa pressão (LPC), turbina de baixa pressão (LPT), *fan* (FAN) e compressor de alta pressão (HPC).

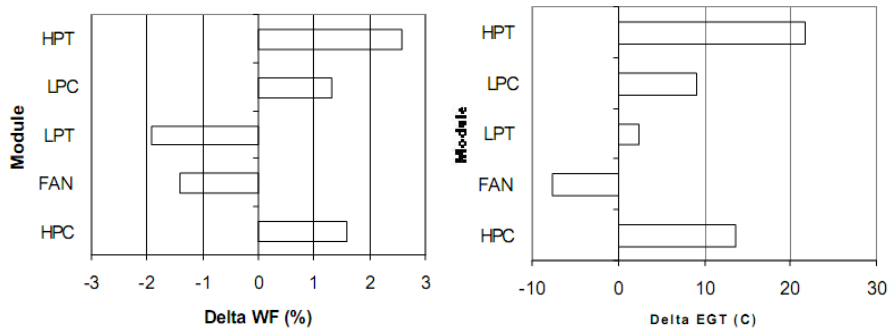


Figura 18: Gráficos de assinatura de WF (vazão mássica de combustível) e EGT (temperatura dos gases de exaustão) para uma queda de eficiência de 2% no módulo [22].

O objetivo do trabalho é automatizar os gráficos de assinatura usando um sistema especialista baseado em lógica *fuzzy*, para um motor aeronáutico. Os gráficos de assinatura são criados a partir de coeficientes de influência associados a cada módulo.

As entradas do sistema *fuzzy* são os desvios entre os valores medidos e os de referência para uma máquina nova para os quatro parâmetros básicos, que constituem o conjunto $z = \{\Delta EGT, \Delta WF, \Delta N1, \Delta N2\}$ e as saídas são os módulos com falha, definidos no conjunto $x = \{FAN, LPC, HPC, HPT, LPT\}$.

Estabelecidas as variáveis, foram seguidos os passos comuns a sistemas *fuzzy*: fuzzificação, inferência e defuzzificação.

Para a fuzzificação, cada componente de x constitui um conjunto *fuzzy* e cada componente de z é tratado como variável nebulosa, sendo atribuídas classificações lingüísticas às mesmas da forma: $T(\Delta EGT) = \{\text{Muito alto-}, \text{Alto-}, \text{Médio-}, \text{Baixo-}, \text{Desprezível}, \text{Baixo+}, \text{Médio+}, \text{Alto+}, \text{Muito alto+}\}$, onde cada termo de $T(\Delta EGT)$ é um conjunto *fuzzy* definido no universo $U(\Delta EGT) = [-25^\circ\text{C}, +25^\circ\text{C}]$, que engloba os valores máximo e mínimo vistos na Figura 18 para ΔEGT . Foram construídos conjuntos análogos para as outras três variáveis, considerando-se, ainda, que desvios que não estivessem contidos nos domínios definidos indicariam diretamente uma falha catastrófica.

A função de pertinência escolhida para os conjuntos nebulosos foi a Gaussiana, definida por,

$$\mu(x) = e^{-0.5\left(\frac{x-m}{\sigma}\right)^2}, \tag{16}$$

onde,

m : ponto médio do conjunto *fuzzy*;

σ : desvio padrão (incerteza).

Os pontos médios de $T(\Delta EGT)$ são dados na Tabela 1.

Tabela 1: Conjuntos *fuzzy* gaussianos e pontos médios de ΔEGT [22].

Medida Linguística	Pontos Médios (°C)
Muito Alto-	-20
Alto-	-15
Médio-	-10
Baixo-	-5
Desprezível	0
Baixo+	5
Médio+	10
Alto+	15
Muito Alto+	20

As regras para a identificação de falhas foram definidas a partir da fuzzificação dos valores numéricos nos gráficos de assinatura; um exemplo de algoritmo de identificação de falhas é mostrado a seguir:

SE

ΔEGT é Médio- E ΔWF é Médio- E $\Delta N2$ é Baixo- E $\Delta N1$ é Alto+

ENTÃO

O módulo FAN está defeituoso

O sistema desenvolvido foi testado utilizando dados de entrada criados pelo autor de forma a simular desvios das variáveis correspondentes a falhas, mas que também armazenassem ruídos de medição fictícios. Esses níveis de ruído são variados para testar o comportamento do sistema. Verificou-se que o aumento do nível de ruído mascara as falhas e induz o sistema a interpretações confusas.

O autor demonstra que, mesmo um equipamento mal instrumentado é passível de análise por meio de um sistema de diagnóstico *fuzzy*. A estrutura deste sistema, bem como as dos dois próximos trabalhos apresentados, serviram de base na construção do sistema da dissertação.

Ogaji *et al.* [25] também propõem uma metodologia de análise de falhas para um motor aeronáutico. O modelo desenvolvido isola o módulo defeituoso e quantifica a variação de dois parâmetros: eficiência e coeficiente de vazão, os quais, segundo o autor, se alteram para uma grande gama de falhas. O programa Turbomatch é utilizado para a geração das variáveis para teste, tanto referentes ao motor saudável quanto para o equipamento com falhas.

O sistema *fuzzy* necessita de 9 entradas, obtidas do sistema de medição, e gera 12 saídas, referentes a dois parâmetros indicadores das condições de cada um dos 6 componentes do equipamento (*fan*, compressores IP e HP, combustor e turbinas HP, IP e LP). Cada variável de entrada foi transformada em variável nebulosa, com funções de pertinência Gaussianas. Este sistema foi implementado com o uso da ferramenta de lógica *fuzzy* do Matlab de forma bastante similar ao realizado no trabalho de Ganguli [22].

O trabalho de Eustace [26] apresenta uma profunda análise experimental de falhas em turbinas aeronáuticas. É descrito o processo pré-manutenção adotado para motores, que foram retirados das aeronaves e instalados em células de testes, onde tinham vários parâmetros de desempenho medidos. Posteriormente, eram abertos para inspeção. Ao identificar determinada falha durante a inspeção podia-se então analisar os dados medidos e observar comportamentos anômalos. Isto permitiu ao autor montar um banco de informações com os testes de dezenas de motores, com o qual foi possível diferenciar claramente comportamentos anômalos de comportamentos saudáveis. A Tabela 2 mostra as grandezas medidas que servem de base para a análise.

Tabela 2: Parâmetros medidos da turbina a gás indicadores de desempenho.

Símbolo	Descrição
N1	rotação do conjunto de baixa pressão
N2	rotação do conjunto de alta pressão
TIT	temperatura de entrada na turbina
Ps3	pressão estática na saída do compressor de baixa pressão
Ps4	pressão estática na saída do compressor de alta pressão
Pt2	pressão total na entrada do fan

Para cada falha identificada neste processo foram estabelecidos coeficientes de influência, que atribuem variações específicas de cada variável de desempenho

a uma falha, constituindo uma assinatura, tal qual mencionado anteriormente. Exemplificando: uma falha F1 pode ser caracterizada por um desvio de 2% da grandeza A, genérica, e de -1,5% da grandeza B, genérica, com relação à referência. Se as variações fossem de 1% e 0,5% respectivamente, esta falha não se caracterizaria.

Além da riqueza de informações experimentais, o trabalho difere dos apresentados anteriormente na identificação de falhas. O sistema compara os sinais medidos do motor com os sinais de referência, os desvios são tratados em um método de mínimos quadrados para eliminar padrões que não se enquadrem nas assinaturas de falha. Se um determinado padrão se enquadra na assinatura de uma falha, o sistema *fuzzy* entra em ação para calcular a probabilidade de que uma determinada falha ocorra e a severidade desta falha.

Esta metodologia serviu de referência para o trabalho desenvolvido na dissertação, a qual foi aplicada em uma turbina a gás industrial operando em uma termelétrica. Foi utilizado o conceito de assinatura de falha, que também fora utilizado por Ganguli [22], mas com um sistema de identificação de falhas e não de módulo. A idéia lançada por Ogaji [25], de utilizar um programa para simular parâmetros de uma turbina defeituosa, também foi utilizado.

É importante ressaltar que trabalhos desta natureza não são comuns na literatura aberta, estes aqui apresentados constituem aqueles cuja metodologia foi melhor explicitada e que serviram com mais propriedade à base do trabalho proposto na dissertação.