

## 4 Sistema de diagnóstico de falhas em turbinas a gás

### 4.1. Introdução

A construção do sistema de diagnóstico de turbinas a gás baseado em lógica *fuzzy* seguiu um modelo clássico de sistemas de diagnóstico de falhas [25, 26, 27], representado na Figura 19. As variáveis medidas no processo, oriundas do sistema supervisorio da usina ou da instrumentação própria acoplada ao sistema, são comparadas com suas contrapartes calculadas por um modelo computacional que representa o equipamento avaliado em seu estado saudável. Os desvios entre os sinais obtidos do processo e do modelo são utilizados como entradas do sistema *fuzzy*.

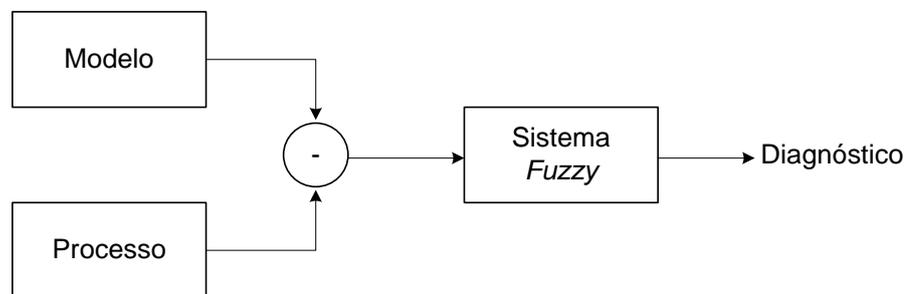


Figura 19: Diagrama de um sistema de diagnóstico *fuzzy* [26].

O objetivo do sistema desenvolvido é de detectar falhas consistentes e não apenas parâmetros de desempenho. Para isto, foram utilizados os padrões de falha sugeridos por Boyce [29], indicados na Tabela 3. Eles caracterizam a falha de acordo com a variação, dentro de um determinado padrão, das variáveis, tal como o apresentado anteriormente [22, 26]. Isto significa que, por exemplo, a falha “filtro sujo” só se caracteriza se eficiência e vazão mássica sofrem redução simultânea com relação à referência. Embora o autor indique outras variáveis, de

natureza mecânica, estas não foram consideradas uma vez que este trabalho trata de diagnóstico termodinâmico.

Tabela 3: Padrões termodinâmicos de falha do compressor [29]. Os símbolos ↑ e ↓ indicam, respectivamente, aumento e redução de determinada variável com relação à referência.

Falha	Eficiência (ETA)	Razão de Pressão (PR)	Razão de Temperatura (TR)	Vazão de Ar (M1)
Filtro sujo		↓		↓
<i>Surge</i>	↑	Varia		↓
<i>Fouling</i>	↓	↓	↑	↓
Dano nas palhetas	↓	↓	↑	↓

Em geral, turbinas a gás industriais possuem filtros de ar a montante da entrada do compressor, que minimizam a entrada de detritos sólidos no equipamento. Quando o filtro torna-se muito sujo o desempenho da turbina a gás é prejudicado.

Conforme discutido na seção de modelagem de turbinas a gás, o problema do *surge* é um evento que confere instabilidade à operação da máquina e deve ser corrigido rapidamente. A reversão no sentido do escoamento no compressor de forma abrupta leva a danos mecânicos nas palhetas.

O acúmulo de depósitos sobre as palhetas é conhecido como *fouling*, que causa redução na área de escoamento, mudança no perfil aerodinâmico e desbalanceamento do rotor, refletindo consideravelmente no desempenho do equipamento.

Os danos nas palhetas são causados pela colisão com corpos rígidos, pela erosão e pela corrosão, acarretando em efeitos similares ao *fouling*, pelos mesmos motivos mencionados.

Este sistema foi calibrado segundo informações disponibilizadas por uma usina termelétrica real, a AES Uruguaiana. Esta usina conta com duas turbinas a gás Siemens W501F e opera em ciclo combinado, tendo uma caldeira de recuperação acoplada a cada turbina a gás e uma turbina a vapor alimentada por estas caldeiras; a potência gerada é de 639 MW [30].

Os detalhes do modelo computacional, do simulador do processo real e do sistema *fuzzy* serão discutidos a seguir.

## 4.2.

### O Modelo de referência

O modelo computacional utilizado como referência foi uma versão atualizada do NGGT (*Natural Gas and Gas Turbine*) [10, 14] calibrada para o modelo de turbina a gás utilizada na AES Uruguaiana, a Siemens W501F. A Tabela 4 mostra as informações técnicas de projeto deste equipamento, dadas a partir das condições ISO.

Tabela 4: Informações de desempenho em ponto de projeto da Siemens W501F [31].

GRANDEZA	VALOR	UNIDADE
Potência	186,5	MW
<i>Heat rate</i>	9626	kJ/kWh
Rotação	3600	RPM
Razão de pressão	15,0	-
N° de combustores	16	-
Vazão mássica na exaustão	460	kg/s
Temperatura na exaustão	590	°C

Este programa já fora utilizado em um sistema de diagnóstico de uma turbina W501F [10], de modelo diferente da turbina gás analisada neste trabalho. Assim, foi necessário efetuar atualizações com respeito às características intrínsecas de cada equipamento, que foram:

- Controle do ângulo de IGV, alterado conforme preconizam as rotinas de controle da usina;
- Cálculo da potência normalizada – parâmetro de controle da turbina a gás. A versão anterior não dispunha desta funcionalidade;
- Alteração dos coeficientes de deslocamento dos mapas do compressor.

Estas alterações e a análise decorrente das mesmas estão esclarecidas na seção de resultados. A Figura 20 mostra um esquema do funcionamento do NGGT.

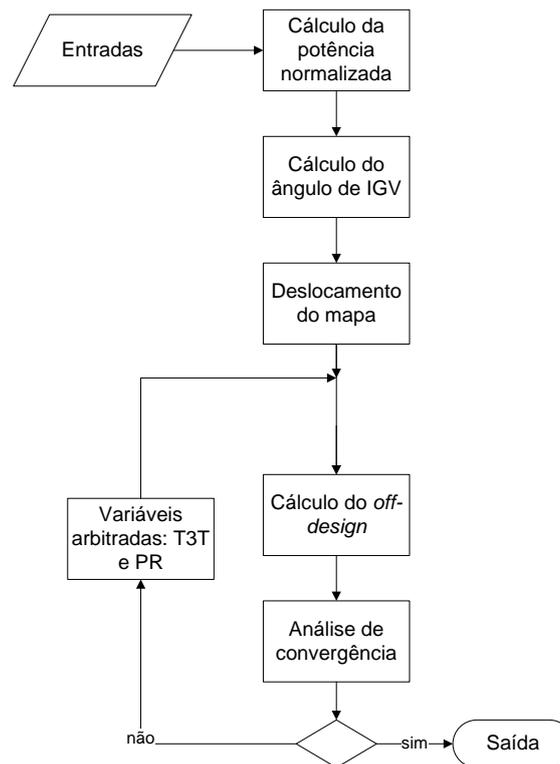


Figura 20: Diagrama esquemático do funcionamento do NGGT.

O programa tem como entradas as condições ambiente (pressão, temperatura e umidade relativa do ar), fatores que alteram essas condições (resfriador evaporativo ligado, perdas de carga a montante e a jusante), a potência ativa, temperatura de exaustão da turbina e frequência de rotação do eixo. As saídas são temperatura, pressão e vazão a montante e a jusante de cada componente e entre os estágios do compressor e da turbina. O mapa do compressor utilizado está disponibilizado no Apêndice.

Os parâmetros de convergência são a potência ativa e a temperatura de exaustão, que são a resposta da solução de um sistema via Método de Newton a duas variáveis, sendo arbitrados a razão de pressão e a temperatura na entrada da turbina.

### 4.3. O Processo – Simulador da turbina real

Inicialmente o trabalho se propunha a aplicar o sistema de diagnóstico a uma turbina a gás real, utilizando dados de operação reais de uma usina termelétrica como entrada. Como posteriormente estes dados não puderam ser fornecidos, utilizou-se o *software* GSP (*Gas turbine Simulation Program*) [32]

como simulador da máquina real. Este programa foi escolhido porque permite a simulação de falhas em turbinas a gás, a qual, atualmente, o NGGT não permite.

A configuração da turbina a gás é feita por blocos, que representam os componentes ou módulos de controle e configuração. A simulação *off-design* demanda do usuário o valor do ângulo de IGV, da temperatura de entrada na turbina, da potência mecânica e das condições ambiente. Este programa permite escolher diversos parâmetros de saída e foram escolhidas aquelas que possam ser comparadas às do NGGT. A Figura 21 mostra o modelo feito no GSP para a simulação da W501F, na qual se observa os módulos:

- (1) tomada de ar;
- (2) duto de entrada, para a configuração da perda de carga;
- (3) controle do ângulo de IGV;
- (4) compressor;
- (5) controle da temperatura na entrada da turbina;
- (6) combustor;
- (7) turbina;
- (8) duto de saída, para a configuração da contrapressão;
- (9) exaustão.

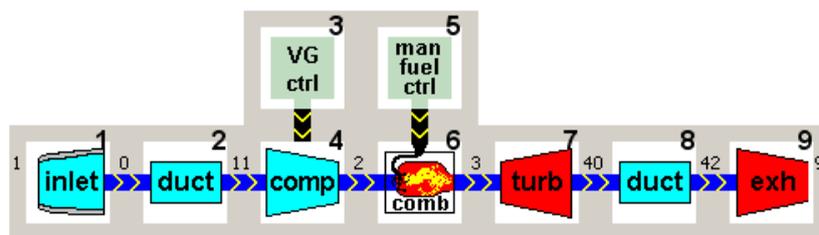


Figura 21: Configuração do modelo da W501F no GSP.

Inicialmente o programa foi calibrado de acordo com os dados de operação da usina real e, posteriormente, comparado ao NGGT. Foi utilizado o mesmo mapa de compressor deste programa [10], que foi desnormalizado conforme o padrão aceito pelo GSP e possui um padrão idêntico ao do GasTurb [33], o qual é um programa comercial de simulação de turbinas a gás.

A simulação de falhas no GSP é feita através da degeneração dos mapas de componentes da turbina a gás simulada. Como apenas o compressor, neste caso, possuía mapas de características, foram analisadas apenas as falhas deste componente.

#### 4.4. Sistema *Fuzzy*

O sistema fuzzy foi implementado para analisar, a priori, qualquer tipo de falha em turbina a gás, embora, neste caso, só tenham sido configuradas as falhas no compressor. A Figura 22 mostra o esquema geral do algoritmo do programa.

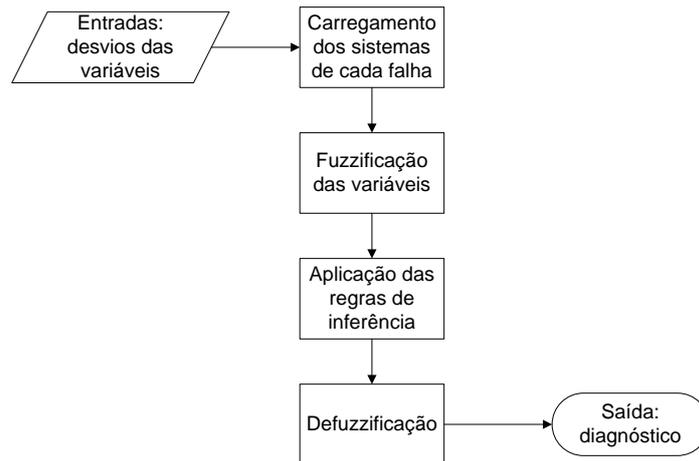


Figura 22: Fluxograma indicativo do algoritmo de diagnóstico *fuzzy*.

Nas subseções a seguir serão discutidos em detalhes os módulos deste algoritmo, que foi implementado em Fortran 95/03.

##### 4.4.1. Entradas

As entradas do algoritmo são fornecidas *ad hoc* e constituem-se no desvio entre os dados medidos, calculados pelo GSP, e os valores de referência, calculados pelo NGGT. O desvio de um dado parâmetro  $\varphi$  é calculado pela equação (17),

$$d\varphi = \frac{\text{valor medido}}{\text{valor calculado}} - 1, \quad (17)$$

que permite a avaliação de tendências positivas ou negativas.

Uma vez que foram utilizadas apenas as falhas do compressor, as variáveis de entrada que têm os desvios calculados são: razão de pressão (PR), vazão de ar (M1), eficiência do compressor (ETA) e razão de temperatura (TR).

#### 4.4.2. Carregamento dos sistemas

Os conjuntos *fuzzy* das variáveis de entrada e de saída do sistema e o tipo de função de pertinência de cada um deles para as quatro falhas apresentadas na Tabela 3 são carregados neste módulo.

Na verdade, para cada uma das falhas foi criado um sistema *fuzzy* por definição, com seu próprio bloco fuzzificação – inferência – defuzzificação. Cada um deles é chamado com as respectivas variáveis de interesse.

#### 4.4.3. Fuzzificação

Para cada variável de entrada foram atribuídos cinco conjuntos *fuzzy* com funções triangulares, embora o programa permita a implementação de qualquer função e de quantos conjuntos se queira. A Figura 23 mostra uma representação genérica dos conjuntos *fuzzy* de uma variável, sendo que as classificações lingüísticas dadas para cada conjunto foram algarismos de 1 a 5, que indicam, na ordem crescente, o grau de afastamento do desvio saudável.

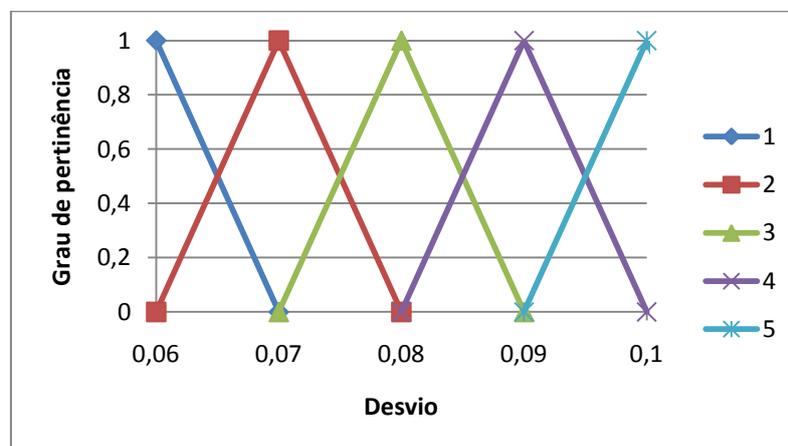


Figura 23: Representação *fuzzy* genérica de uma variável de entrada do sistema. O eixo das abscissas representa o desvio entre o valor de referência e o valor do processo de uma dada variável.

Neste módulo as variáveis de entrada têm seus desvios fuzzificados. Os conjuntos acionados e os valores de pertinência correspondentes são calculados.

#### 4.4.4. Inferência

Todas as falhas receberam, de forma análoga às variáveis de entrada, classificações semânticas com algarismos de 1 a 3. Esta classificação representa o grau de severidade da falha, ou seja, quanto maior o valor do número do conjunto, mais severa é a falha. As regras para cada sistema de falhas foram organizadas de forma matricial, conforme se observa na Tabela 5, para as falhas “filtro sujo” e “surge”. Haveria ainda uma terceira variável para a falha “surge”, que é a razão de pressão. Como a caracterização da falha está relacionada apenas a uma variação do valor e, pela variação dos outros dois, M1 e ETA, haverá necessariamente a variação de PR, ainda que mínima; não houve necessidade de implementação desta.

Tabela 5: Matrizes de regras para o “surge” e o “filtro sujo”.

FILTRO SUJO						SURGE							
	1	2	3	4	5	PR		1	2	3	4	5	ETA
1	1	1					1	1	2				
2	1	1	2				2	2	2	2			
3		2	2				3		2	3	3	3	
4				3	3		4			3	3	3	
5				3	3		5			3	3	3	
M1							M1						

No caso das falhas “fouling” e “palheta danificada”, que possuem quatro variáveis de entrada, foram construídos dois subsistemas de inferência, organizados da seguinte forma:

- Vazão e eficiência: são entradas de um subsistema que gera a variável “A”;
- Razão de pressão e razão de temperatura: entradas de um subsistema que gera a variável “B”.

As matrizes de regras de formação das variáveis A e B são mostradas na Tabela 6.

Tabela 6: Matrizes de regras para os subsistemas auxiliares das falhas “fouling” e “palheta danificada”.

		A					ETA
		1	2	3	4	5	
1	M1	1	1				
2		1	1	2			
3			2	2	2	2	
4			2	2	3	3	
5			2	2	3	3	

		B					PR
		1	2	3	4	5	
1	TR	1	2				
2		2	2	2			
3			2	3	3		
4				3	3	3	
5					3	3	

A Tabela 7 mostra a matriz de regras de inferência para a saída do sistema, cujas entradas são as variáveis A e B.

Tabela 7: Matrizes de regras para o subsistema de saída das falhas “fouling” e “palheta danificada”.

**FOULING - PALHETAS DANIFICADAS**

		1	2	3	B
1	A	1	2		
2		1	2	3	
3			2	3	

É importante ressaltar que estas matrizes foram ajustadas através da simulação da operação com falhas da turbina a gás W501F através do GSP. Como a simulação de falhas neste programa ocorre pela manipulação das variáveis do mapa do compressor, não foi possível gerar a variação da razão de temperatura conforme o padrão das falhas “fouling” e “palheta danificada”. Desta forma, estas falhas não tiveram seus conjuntos de entrada definidos, não sendo possível, assim, realizar testes visando a identificação das mesmas. No entanto, o sistema foi preparado para receber a calibração correta destes conjuntos e regras, sendo possível fazê-lo sem outros esforços de implementação.

#### 4.4.5. Defuzzificação

O método de defuzzificação implementado foi o método do centróide, que é citado por diversos autores [16, 18, 19] como o método mais utilizado. O programa permite a rápida implementação e uso de outro método, conforme a

necessidade. A saída do sistema de cada falha é composta por 3 conjuntos *fuzzy* que representam o grau de severidade da falha, como mostra a Figura 24.

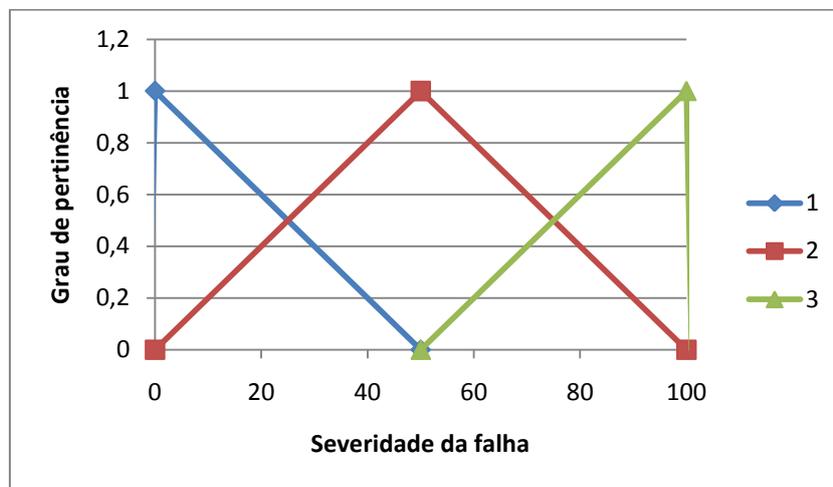


Figura 24: Caracterização da severidade da falha através de conjuntos fuzzy. Observa-se que, quanto maior o valor de saída, mais severa é a falha.

Observa-se que o valor *crisp* de saída é um valor percentual de gravidade da falha. Tendo em vista a natureza desta representação, todas as falhas possuem os mesmo conjuntos *fuzzy* de saída e o mesmo domínio, [0,100].

A Figura 25 descreve o funcionamento do programa de identificação de falhas quando da implementação das falhas apresentadas na Tabela 3. Nela estão resumidos os processos descritos nesta seção e a seqüência lógica de cálculo aplicada no modelo.

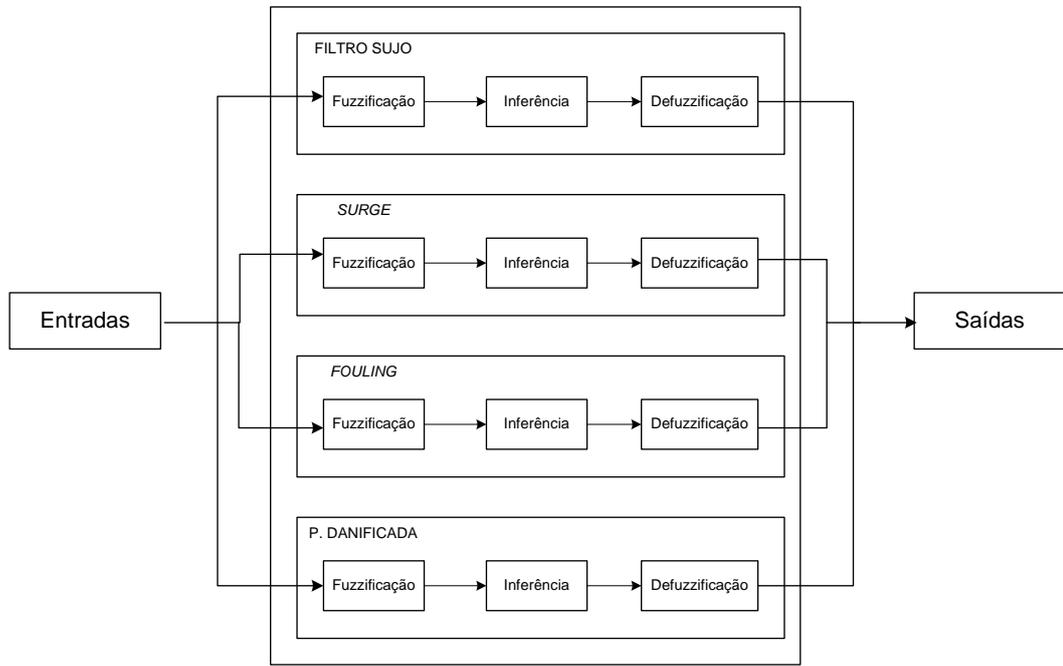


Figura 25: Representação esquemática do sistema desenvolvido.