



**Rafael Silverio Barbosa**

**Diagnóstico de Falhas de Turbinas a Gás  
com o Uso de Lógica *Fuzzy***

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Sergio Leal Braga  
Co-orientador: Dr. Sandro Barros Ferreira  
Co-orientadora: Prof.<sup>a</sup> Marley M. B. Rebuszi Vellasco

Rio de Janeiro  
Maio de 2010



**Rafael Silverio Barbosa**

**Diagnóstico de Falhas de Turbinas a Gás  
com o Uso de Lógica *Fuzzy***

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Sérgio Leal Braga**

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

**Dr. Sandro Barros Ferreira**

Co-orientador

GT2 Energia

**Prof.<sup>a</sup> Marley Maria Bernardes Rebuszi Vellasco**

Co-orientadora

Departamento de Engenharia Elétrica - PUC-Rio

**Prof. Marco Antônio Rosa do Nascimento**

IEM - UNIFEI

**Prof. Luis Fernando Figueira da Silva**

Departamento de Engenharia Mecânica PUC-Rio

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 18 de maio de 2010

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **Rafael Silverio Barbosa**

Graduou-se em Engenharia Mecânica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio (Rio de Janeiro, Brasil) em 2007.

#### Ficha Catalográfica

Barbosa, Rafael Silverio

Diagnóstico de falhas de turbinas a gás com o uso de lógica fuzzy / Rafael Silverio Barbosa ; orientador: Sergio Leal Braga ; co-orientador: Sandro Barros Ferreira ; co-orientadora: Marley M. B. Rebuszi Vellasco. – 2010.

84 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro, 2010.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Turbinas a gás. 3. Sistemas de diagnóstico. 4. Sistemas Fuzzy. I. Braga, Sergio Leal. II. Ferreira, Sandro Barros. III Marley, M. B. R. Vellasco. IV. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. V. Título.

CDD: 621

## Agradecimentos

À Andrea pelo apoio e paciência.

À minha família pelo incentivo permanente.

Aos meus orientadores pelos conhecimentos transmitidos e conselhos fornecidos.

A todos os amigos da GT2 Energia pela ajuda neste trabalho.

À PUC-Rio pelo auxílio concedido, permitindo a realização deste trabalho.

À AES Uruguaiana pelas informações fornecidas.

## Resumo

Barbosa, Rafael Silverio; Braga, Sergio Leal. **Diagnóstico de Falhas de Turbinas a Gás com o Uso de Lógica Fuzzy**. Rio de Janeiro, 2010. 84p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Turbinas a gás industriais modernas instaladas em usinas termelétricas têm seus parâmetros de desempenho monitorados em tempo real. Contudo, existem inúmeras falhas de operação que são impossíveis de serem detectadas pela simples visualização destes parâmetros, uma vez que a condição de operação do equipamento é influenciada por diversos fatores. Sistemas de diagnóstico são usualmente oferecidos pelos fabricantes destes equipamentos, mas não são divulgados na literatura aberta, que conta em geral com trabalhos aplicados a casos específicos e a turbinas aeronáuticas. Esta dissertação propõe um sistema de diagnóstico de falhas em turbinas a gás, o qual opera através da contínua comparação entre sinais medidos em campo, os quais são simulados por um programa computacional, e resultados gerados por um modelo de referência, simulador da turbina saudável. O sinal comparado serve de entrada para um sistema *fuzzy*, que identifica e quantifica a severidade das falhas. Foram testadas falhas fictícias no compressor e foi avaliada a influência da mudança de geometria na calibração do sistema. Os resultados mostraram a robustez do sistema e sua capacidade de aplicação em uma situação real.

## Palavras-chave

Turbinas a Gás; Sistemas de Diagnóstico; Sistemas *Fuzzy*

## Abstract

Barbosa, Rafael Silverio; Braga, Sergio Leal (Advisor). **Gas Turbine Fault Diagnosis using Fuzzy Logic**. Rio de Janeiro, 2010. 84p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Modern industrial gas turbines installed in thermal power plants have its performance parameters monitored in real time, however, there are innumerable operation faults that cannot be detected by a simple visual analysis of these parameters, once the equipment operating condition is influenced by several factors. Diagnosis systems are usually offered by the manufacturers of these equipments, but the methodologies are not published in the open literature, which is mostly dedicated to aircraft engines. This dissertation proposes a gas turbine diagnosis system that operates through the continuous comparison between the field measured signals, simulated by a software, and results generated by a reference numerical model, which represents the healthy gas turbine. The compared signal is used as input to a fuzzy system that identifies and quantifies the faults severity. Dummy compressor faults have been tested and the influence of the variable geometry has been analyzed during the system calibration. The results have shown the robustness of the system and its capability to be applied in a real world situation.

## Keywords

Gas Turbines; Fault Diagnosis; Fuzzy Systems

## Sumário

1 Introdução	16
1.1. Objetivos	16
1.2. Estrutura da dissertação	17
2 Fundamentos Teóricos	18
2.1. Introdução	18
2.2. Turbinas a Gás	19
2.2.1. Introdução	19
2.2.2. Análise Termodinâmica da Turbina a Gás	21
2.2.3. Modelagem <i>off-design</i> de turbinas a gás	25
2.3. Lógica <i>Fuzzy</i>	30
2.3.1. Introdução	30
2.3.2. Conjuntos <i>Fuzzy</i>	31
2.3.3. Operadores <i>Fuzzy</i>	32
2.3.4. Regras <i>Fuzzy</i> e Sistema de Inferência	32
3 Revisão Bibliográfica	34
3.1. Introdução	34
3.2. Revisão Bibliográfica	35
4 Sistema de diagnóstico de falhas em turbinas a gás	43
4.1. Introdução	43
4.2. O Modelo de referência	45
4.3. O Processo – Simulador da turbina real	46
4.4. Sistema <i>Fuzzy</i>	48
4.4.1. Entradas	48
4.4.2. Carregamento dos sistemas	49
4.4.3. Fuzzificação	49
4.4.4. Inferência	50
4.4.5. Defuzzificação	51

5 Resultados e Discussão	54
5.1. Introdução	54
5.2. Calibração do NGGT	55
5.2.1. <i>Design point</i>	55
5.2.2. Cálculo do ângulo de IGV	55
5.2.3. Cálculo dos coeficientes de deslocamento do mapa do compressor	59
5.2.4. Validação do NGGT	64
5.3. Calibração do GSP	65
5.4. Diagnóstico de falhas	66
5.4.1. Determinação dos pontos saudáveis	66
5.4.2. Montagem do sistema de diagnóstico de filtro de ar sujo	68
5.4.3. Montagem do sistema de diagnóstico de <i>surge</i>	72
5.4.4. Simulação de falhas	74
6 Conclusões e Perspectivas	77
7 Referências Bibliográficas	79
Apêndice	82



## Lista de figuras

Figura 1: Esquema básico de uma turbina a gás de ciclo simples.	19
Figura 2: Esquema básico Turbina a gás industrial Siemens SGT5-4000F [3].	20
Figura 3: Esquema de uma turbina multi-eixo com turbina de potência.	21
Figura 4: Esquema da turbina a gás idealizada para o Ciclo Brayton.	21
Figura 5: Diagrama básico de uma Máquina Térmica Motora.	22
Figura 6: Diagramas $p - v$ e $T - s$ do Ciclo Brayton ideal.	23
Figura 7: Diagrama $T - s$ do Ciclo Brayton com perdas.	25
Figura 8: Mapa de compressor típico [8].	26
Figura 9: Mapa de compressor e linhas beta [8].	27
Figura 10: Associação de classificação <i>fuzzy</i> a valores numéricos.	30
Figura 11: Representação de pertinência segundo as lógicas booleana e <i>fuzzy</i> .	31
Figura 12: Função de pertinência referente ao conjunto “quente”.	32
Figura 13: Arquitetura de um Sistema <i>Fuzzy</i> [23].	33
Figura 14: Distribuição gaussiana aplicado à medida $p_j$ [24].	36
Figura 15: Domínio <i>fuzzy</i> para duas variáveis e distribuição normal [24].	37
Figura 16: Interseção de domínios de incerteza [24].	37
Figura 17: Representação escalar da solução [24].	38
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].	39
Figura 19: Diagrama de um sistema de diagnóstico <i>fuzzy</i> [26].	43
Figura 20: Diagrama esquemático do funcionamento do NGGT.	46
Figura 21: Configuração do modelo da W501F no GSP.	47
Figura 22: Fluxograma indicativo do algoritmo de diagnóstico <i>fuzzy</i> .	48
Figura 23: Representação <i>fuzzy</i> genérica de uma variável de entrada do sistema. O eixo das abcissas representa o desvio	

entre o valor de referência e o valor do processo de uma dada variável.	49
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.	52
Figura 25: Representação esquemática do sistema desenvolvido.	53
Figura 26: Valores de potência normalizada reais.	56
Figura 27: Valores de ângulo de IGV reais.	56
Figura 28: Fluxograma ilustrativo do método de ajuste dos coeficientes dos polinômios de cálculo das correções da potência máxima.	58
Figura 29: Desvios percentuais com relação aos valores de operação de potência normalizada e ângulo de IGV obtidos via algoritmos genéticos.	58
Figura 30: Desvios percentuais com relação aos valores de operação de potência normalizada e ângulo de IGV obtidos a partir das malhas de controle.	59
Figura 31: Esquema de ajuste dos coeficientes de deslocamento dos mapas do compressor por meio de algoritmos genéticos.	60
Figura 32: Curva ajustada para o coeficiente “a” em função do ângulo de IGV.	61
Figura 33: Curva ajustada para o coeficiente “b” em função do ângulo de IGV.	61
Figura 34: Curva ajustada para o coeficiente “c” em função do ângulo de IGV.	62
Figura 35: Curva ajustada para o coeficiente “a” em função da potência normalizada.	62
Figura 36: Curva ajustada para o coeficiente “b” em função da potência normalizada.	63
Figura 37: Curva ajustada para o coeficiente “c” em função da potência normalizada.	63
Figura 38: Desvios percentuais entre parâmetros calculados e parâmetros medidos: MF – vazão mássica de combustível; T2 –	

temperatura de saída do compressor; IGV – ângulo de IGV; P2 – pressão de saída do compressor.	64
Figura 39: Desvios percentuais entre parâmetros calculados e parâmetros medidos: MF – vazão mássica de combustível; T2 – temperatura de saída do compressor; P2 – pressão de saída do compressor; T4 – temperatura de exaustão da turbina.	66
Figura 40: Desvio entre a razão de pressão saudável calculada no GSP e a calculada no NGGT.	67
Figura 41: Desvio entre a vazão mássica de ar saudável calculada no GSP e a calculada no NGGT.	67
Figura 42: Desvio entre a eficiência do compressor saudável calculada no GSP e a calculada no NGGT.	67
Figura 43: Desvio entre a razão de temperatura saudável calculada no GSP e a calculada no NGGT.	68
Figura 44: Comportamento do desvio da vazão mássica de ar em função da carga da turbina a gás e dos coeficientes de degradação.	69
Figura 45: Comportamento do desvio da razão de pressão em função da carga da turbina a gás e dos coeficientes de degradação.	70
Figura 46: Ilustração da convenção adotada na Tabela 11.	70
Figura 47: Comportamento do desvio da vazão mássica de ar em função da carga da turbina a gás e dos coeficientes de degradação.	72
Figura 48: Comportamento da eficiência do compressor em função da carga da turbina a gás e dos coeficientes de degradação.	72
Figura 49: Representação gráfica do mapa do compressor: Razão de pressão em função da vazão mássica.	84
Figura 50: Representação gráfica do mapa do compressor: Eficiência em função da vazão mássica.	84

## Lista de tabelas

Tabela 1: Conjuntos fuzzy gaussianos e pontos médios de $\Delta$ EGT [22].	40
Tabela 2: Parâmetros medidos da turbina a gás indicadores de desempenho.	41
Tabela 3: Padrões termodinâmicos de falha do compressor [29]. Os símbolos $\uparrow$ e $\downarrow$ indicam, respectivamente, aumento e redução de determinada variável com relação à referência.	44
Tabela 4: Informações de desempenho em ponto de projeto da Siemens W501F [31].	45
Tabela 5: Matrizes de regras para o “surge” e o “filtro sujo”.	50
Tabela 6: Matrizes de regras para os subsistemas auxiliares das falhas “fouling” e “palheta danificada”.	50
Tabela 7: Matrizes de regras para o subsistema de saída das falhas “fouling” e “palheta danificada”.	51
Tabela 8: Matrizes Desvios dos parâmetros de desempenho disponíveis para o design point da W501F.	55
Tabela 9: Configurações do algoritmo genético.	58
Tabela 10: Desvios percentuais dos parâmetros de desempenho disponíveis para o design point da W501F: comparação com o GSP.	65
Tabela 11: Parâmetros dos conjuntos fuzzy das variáveis de entrada dos sistemas “filtro sujo”.	71
Tabela 12: Parâmetros dos conjuntos fuzzy das variáveis de entrada dos sistemas “surge”.	73
Tabela 13: Entrada das variáveis do sistema de diagnóstico para a análise de filtro sujo.	74
Tabela 14: Resultado da análise de filtro sujo.	75
Tabela 15: Entrada das variáveis do sistema de diagnóstico para a análise de surge.	76
Tabela 16: Resultado da análise de surge.	76

Tabela 17: Características de desempenho da turbina a gás Siemens V84 [35].	82
Tabela 18: Mapa do compressor da V84.	83

## Lista de símbolos

$h$ : entalpia específica [kJ/kg]

$s$ : entropia específica [kJ/kg.K]

$v$ : volume específico [m<sup>3</sup>/ kg]

$\dot{m}$ : vazão mássica (derivada da massa com relação ao tempo) [kg/s]

$\dot{W}$ : potência (derivada do trabalho com relação ao tempo) [W]

$\dot{Q}$ : fluxo de calor (derivada do calor cedido ou recebido com relação ao tempo) [W]

$c_p$ : calor específico a pressão constante [kJ/kg.K]

$T$ : temperatura [K]

$T_{3T}$ : temperatura na entrada da turbina [K]

$p$ : pressão [Pa]

$N$ : velocidade de rotação do eixo [RPM]

$\eta$ : eficiência

$\phi$ : umidade relativa do ar

$f$ : fator de correção ambiental

$\gamma$ : razão entre o calor específico a pressão constante e a volume constante

$PR$ : *pressure ratio* - razão de pressão

$\mu$ : função de pertinência

$c$ : constante qualquer

### Subscritos

$t$ : turbina (expansor)

$c$ : compressor

$TG$ : turbina a gás

$E$ : entrada

$S$ : saída

$n$ : original

$ISO$ : condições de referência ISO: 15°C, 1 atm e 60% de umidade relativa do ar

