

## 5 Resultados e Discussão

### 5.1. Introdução

Para cada um dos componentes do sistema de diagnóstico, o NGGT (referência) o GSP (processo) e o Sistema *Fuzzy*, já apresentados no capítulo 4, foram realizados inúmeros aperfeiçoamentos durante o desenvolvimento do sistema de diagnóstico.

O NGGT é um programa que vem sendo desenvolvido ao longo dos anos, de acordo com as diferentes funções para as quais o mesmo foi aplicado. Neste trabalho o código foi parcialmente reescrito, de forma a torná-lo mais amigável e reconfigurável no caso de uma aplicação diferente de uma turbina industrial de um eixo. Foram feitas também contribuições a algumas metodologias de cálculo, visando a melhoria da acurácia e do desempenho.

O GSP é um programa comercial/educacional, que foi calibrado para a turbina a gás W501F simulada, utilizando-se de conhecimentos específicos do equipamento e da teoria de modelagem destes motores.

O sistema *fuzzy* foi inteiramente desenvolvido para este trabalho, sendo programado em linguagem Fortran e visando a rápida inserção de novos tipos de conjuntos *fuzzy*, regras de inferência e métodos de defuzzificação. Além disto, o programa foi desenvolvido de forma a permitir a integração com outras linguagens, de forma que ele possa ser facilmente acoplado a um sistema auxiliar e reconfigurado conforme a aplicação, seja ela voltada para o diagnóstico de turbina a gás ou para o diagnóstico de qualquer outro equipamento.

O desenvolvimento e a aplicação destes três componentes geraram uma série de resultados intermediários, os quais são apresentados e discutidos nas seções que se seguem.

## 5.2. Calibração do NGGT

### 5.2.1. *Design point*

O *design point* do modelo computacional foi estabelecido tendo como base as informações de projeto disponibilizadas pela AES Uruguaiana. Foi construído um modelo computacional nas seguintes condições ambientais: temperatura ambiente: 15 °C; umidade relativa do ar: 75 %; elevação: 67 m. São apresentados na Tabela 8 os desvios dos parâmetros calculados com relação àqueles disponíveis de projeto.

Tabela 8: Matrizes Desvios dos parâmetros de desempenho disponíveis para o *design point* da W501F.

Grandeza	Desvio (%)
Potência	0,007
T. exaustão	0,289
Vazão combustível	0,865

### 5.2.2. Cálculo do ângulo de IGv

O programa computacional NGGT, utilizado para a simulação da turbina a gás W501F da AES Uruguaiana, tinha inicialmente como parâmetro de entrada para o cálculo *off-design* a carga normalizada, utilizada para o cálculo do ângulo de IGv. Isto tornava o programa pouco genérico, dependente de um parâmetro diferente das condições ambientais e da potência ativa e incapaz de ser utilizado em uma situação fictícia, uma vez que a carga normalizada é obtida através de metodologias nem sempre fornecidas pelos fabricantes de turbinas a gás.

Para sanar esta deficiência, foi desenvolvida uma metodologia de cálculo da potência normalizada por meio de algoritmos genéticos, que parte dos principais parâmetros de influência no desempenho da turbina a gás descritos na literatura, [6, 12, 15] e da potência ativa.

Paralelamente a este desenvolvimento, foram implementadas as rotinas de cálculo da carga normalizada descritas na malha de controle da usina, que tornam o modelo computacional extremamente fiel à turbina real.

Para a validação destas duas metodologias foram utilizados dados reais de operação da usina, medidos em intervalos de 5 minutos. A Figura 26 e a Figura 27 apresentam os valores reais de potência normalizada e ângulo de IGV. O eixo das abscissas representa a contagem dos pontos de operação utilizados na análise.

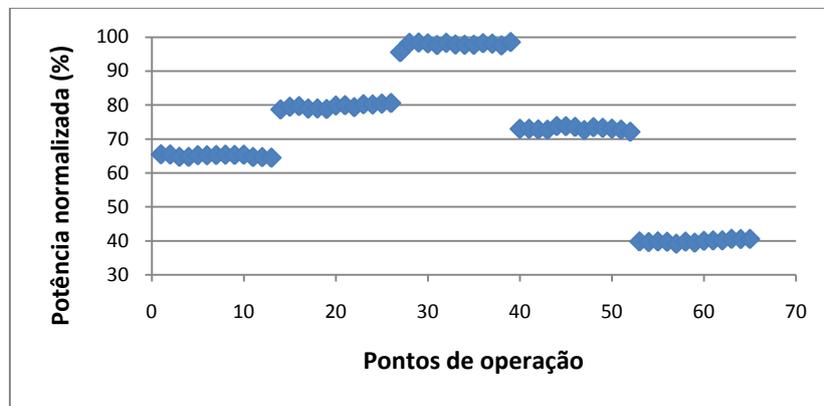


Figura 26: Valores de potência normalizada reais.

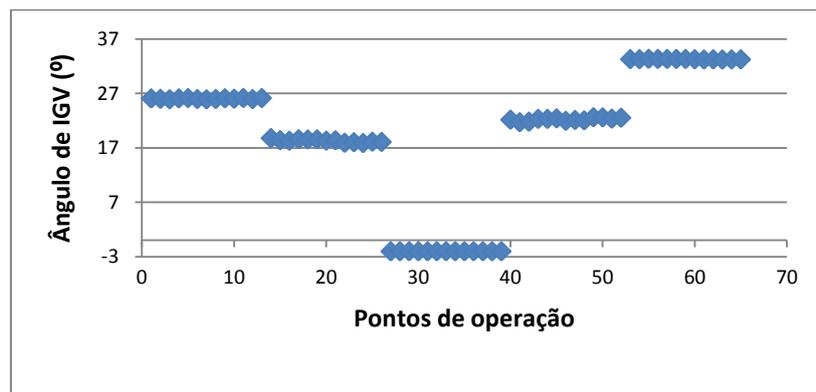


Figura 27: Valores de ângulo de IGV reais.

Serão apresentadas a seguir as duas metodologias desenvolvidas bem como os resultados obtidos na calibração, efetuada contra dados de operação.

### 5.2.2.1. Dedução por algoritmos genéticos

Algoritmos genéticos baseiam-se na teoria da seleção natural para a otimização numérica ou organizacional. No presente caso, esta técnica foi aplicada ao ajuste das funções de cálculo da carga normalizada.

Para esta aplicação, a potência ativa foi normalizada pela potência máxima da turbina a gás, dada pela razão:

$$\dot{W}_{Normalizada} = c \frac{\dot{W}_{Ativa}}{\dot{W}_{Máxima}} \quad (18)$$

A potência máxima é função das condições ambiente da usina, sendo calculada por

$$\dot{W}_{Máxima} = \dot{W}_{ISO} \prod_{i=1}^n f_i \quad (19)$$

que representa o máximo que a turbina a gás pode gerar sob uma dada condição ambiental. Os fatores  $f_i$  corrigem o valor original da potência ISO, transladando-o para a condição de operação desejada. Foram testados diversos fatores  $f$  e diversas ordens para os polinômios. Para este caso foram selecionados três parâmetros ambientais, mostrados abaixo com as respectivas ordens dos polinômios associados:

- Queda de pressão na entrada: 1ª ordem;
- Umidade relativa: 4ª ordem;
- Temperatura ambiente: 3ª ordem.

Os algoritmos genéticos foram empregados para ajustar os coeficientes destes polinômios de forma a minimizar o desvio entre a potência normalizada calculada e aquela fornecida pelos dados de operação, conforme ilustra a Figura 28. Para isso, utilizou-se a ferramenta de algoritmos genéticos do Matlab [34]. As configurações do algoritmo são mostradas na Tabela 9.

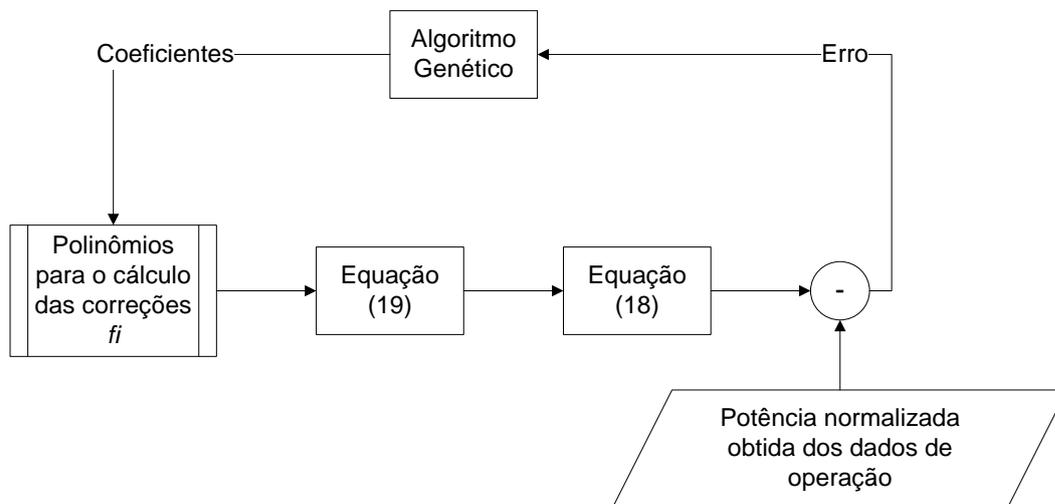


Figura 28: Fluxograma ilustrativo do método de ajuste dos coeficientes dos polinômios de cálculo das correções da potência máxima.

Tabela 9: Configurações do algoritmo genético.

Tipo de População	números reais
Tamanho da população	60
Gerações	5000
Tipo de seleção	roleta
Crossover	dois pontos
Taxa de mutação	1%

Uma vez calculada a potência normalizada, o ângulo de IGV é obtido através da curva de controle associada, a qual não pode ser aqui descrita por restrições de divulgação dadas pelo fabricante. A Figura 29 mostra os desvios da potência normalizada e do ângulo de IGV calculados pelo método que utilizou algoritmos genéticos. Dado que o desvio médio da carga normalizada é inferior a 2%, os resultados foram considerados satisfatórios para esta grandeza.

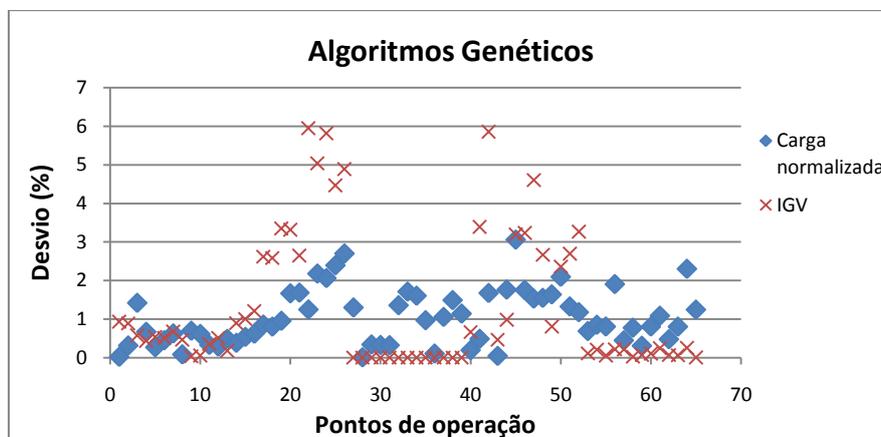


Figura 29: Desvios percentuais com relação aos valores de operação de potência normalizada e ângulo de IGV obtidos via algoritmos genéticos.

### 5.2.2.2. Algoritmos de controle

Para realizar a simulação da turbina a gás da AES Uruguaiana de maneira mais fiel, foram implementadas as rotinas descritas nas malhas de controle da usina para o cálculo da potência normalizada e do ângulo de IGV. Estas malhas utilizam apenas a temperatura na entrada do compressor para corrigir a potência

máxima. A potência normalizada é calculada de maneira análoga à apresentada nas equações (18) e (19). A Figura 30 mostra os desvios da potência normalizada e do ângulo de IGV calculados pelos algoritmos descritos na malha de controle da usina.

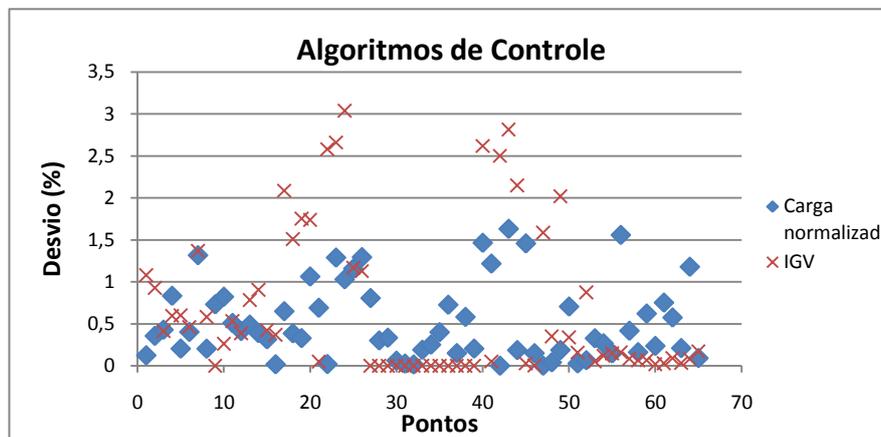


Figura 30: Desvios percentuais com relação aos valores de operação de potência normalizada e ângulo de IGV obtidos a partir das malhas de controle.

Observa-se que para ambas as metodologias há alguns valores obtidos para o ângulo de IGV com desvios muito superiores à média referentes ao mesmo instante medido, o que pode se justificar pela discrepância entre a lógica de controle fornecida pelo fabricante para o cálculo do ângulo e aquela realmente em operação na usina.

### 5.2.3. Cálculo dos coeficientes de deslocamento do mapa do compressor

Uma vez que, quando ocorre mudança de geometria do compressor os mapas de características de compressores se alteram, são apresentadas na literatura [10, 11] técnicas para a adequação de um dado mapa de uma geometria fixa para uma nova situação de arranjo de ângulo de IGV. Neste trabalho estas técnicas são apenas reproduzidas, maiores discussões sobre as mesmas podem ser encontradas nas referências supracitadas. A partir dos parâmetros semi-dimensionais de um mapa normalizado, utilizam-se os coeficientes  $a$ ,  $b$  e  $c$ . Estes coeficientes são dados em função do ângulo de IGV e pertencentes ao intervalo  $]0,1[$ ; de forma a corrigir os valores do mapa original para a nova geometria, como apresentado nas equações (20), (21) e (22).

$$\frac{\dot{m} \cdot \sqrt{T_E}}{P_E} = a \cdot \left( \frac{\dot{m} \cdot \sqrt{T_E}}{P_E} \right)_n \quad (20)$$

$$\frac{P_S}{P_E} = b \cdot \left( \frac{P_S}{P_E} \right)_n \quad (21)$$

$$\eta = c \cdot \eta_n \quad (22)$$

Neste trabalho foi empregada uma metodologia análoga, através da determinação, via *toolbox* de algoritmos genéticos do MatLab [34], de um trio destes coeficientes que permitisse a convergência do NGGT e minimizasse o erro do método numérico no cálculo do *off-design*. A Figura 31 mostra um esquema do ajuste feito para a obtenção dos coeficientes.

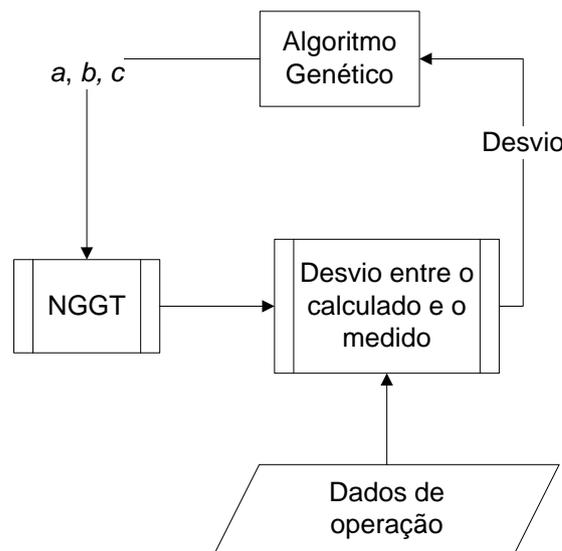


Figura 31: Esquema de ajuste dos coeficientes de deslocamento dos mapas do compressor por meio de algoritmos genéticos.

Com a determinação de trios referentes a geometrias de compressor distintas, foi possível construir as curvas de ajuste em função do ângulo de IGV mostradas na Figura 32, na Figura 33 e na Figura 34.

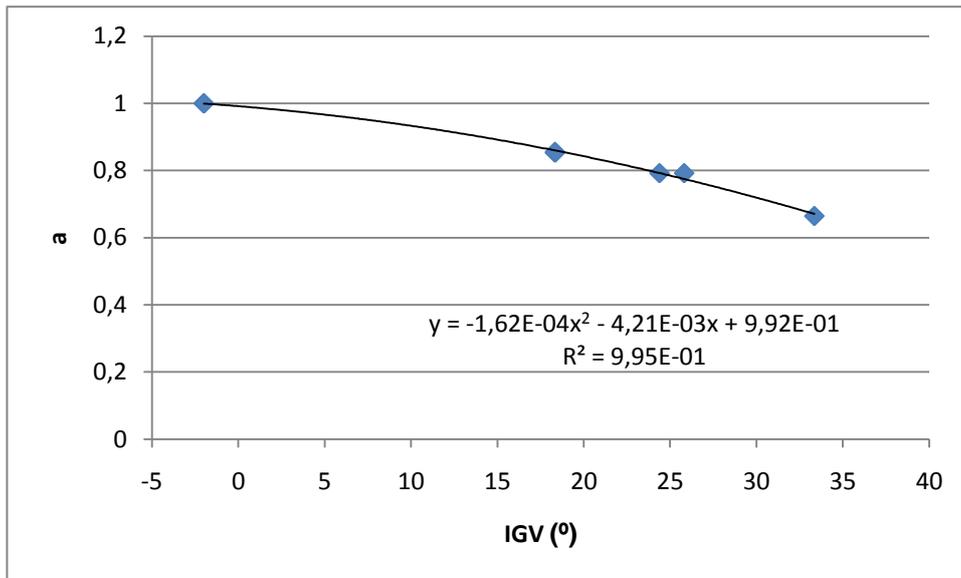


Figura 32: Curva ajustada para o coeficiente "a" em função do ângulo de IGV.

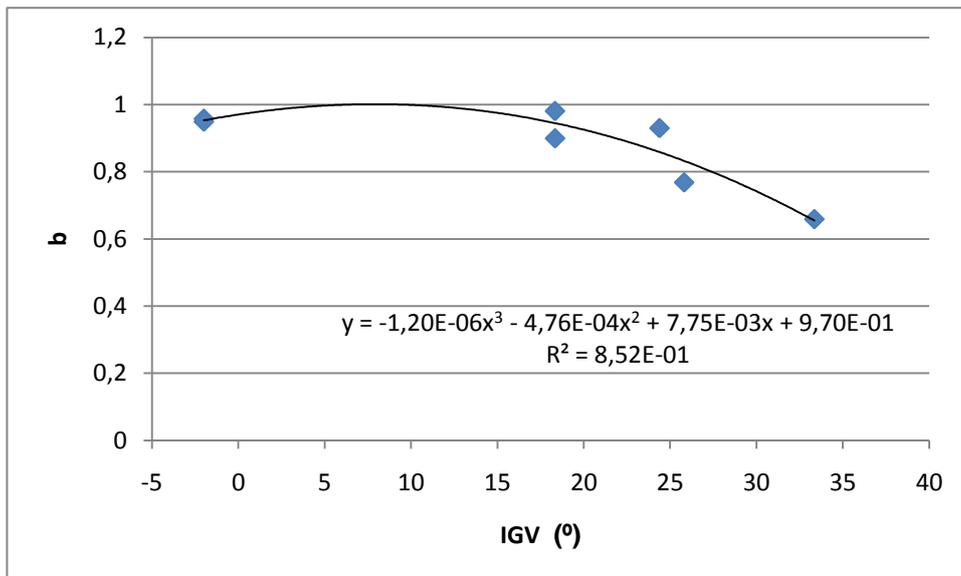


Figura 33: Curva ajustada para o coeficiente "b" em função do ângulo de IGV.

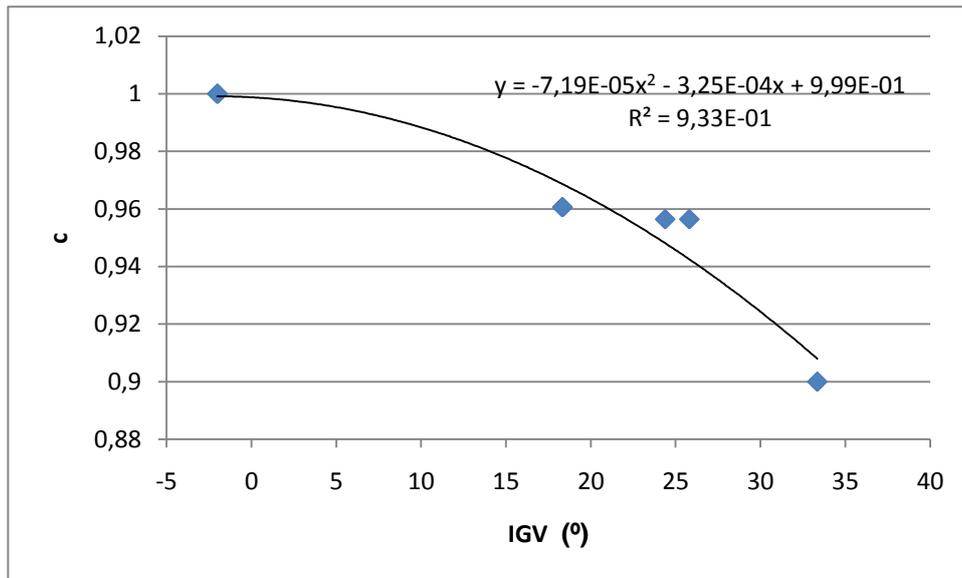


Figura 34: Curva ajustada para o coeficiente “c” em função do ângulo de IGV.

Uma vez que a potência normalizada está diretamente relacionada com o ângulo de IGV, foram também construídas curvas em função daquele parâmetro, mostradas na Figura 35, na Figura 36 e na Figura 37.

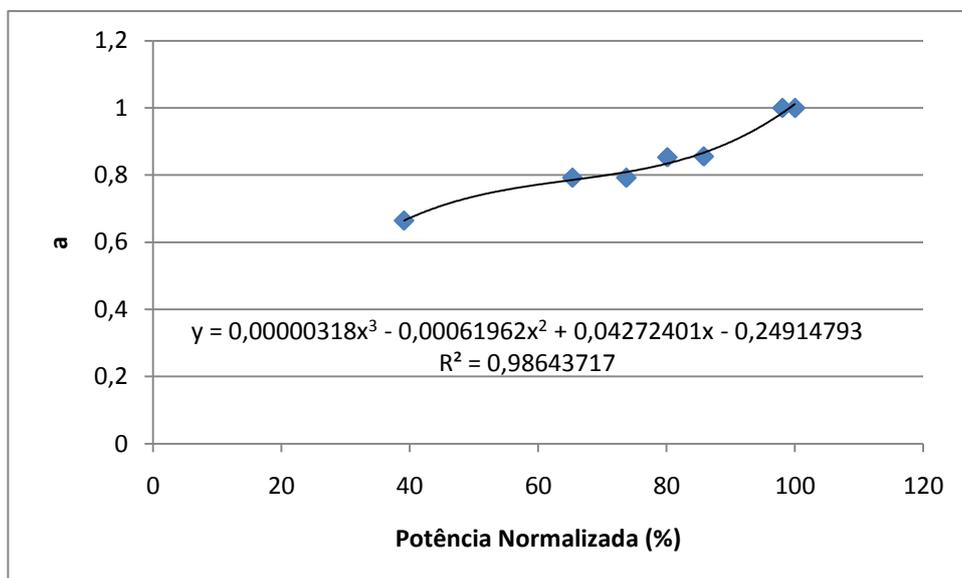


Figura 35: Curva ajustada para o coeficiente “a” em função da potência normalizada.

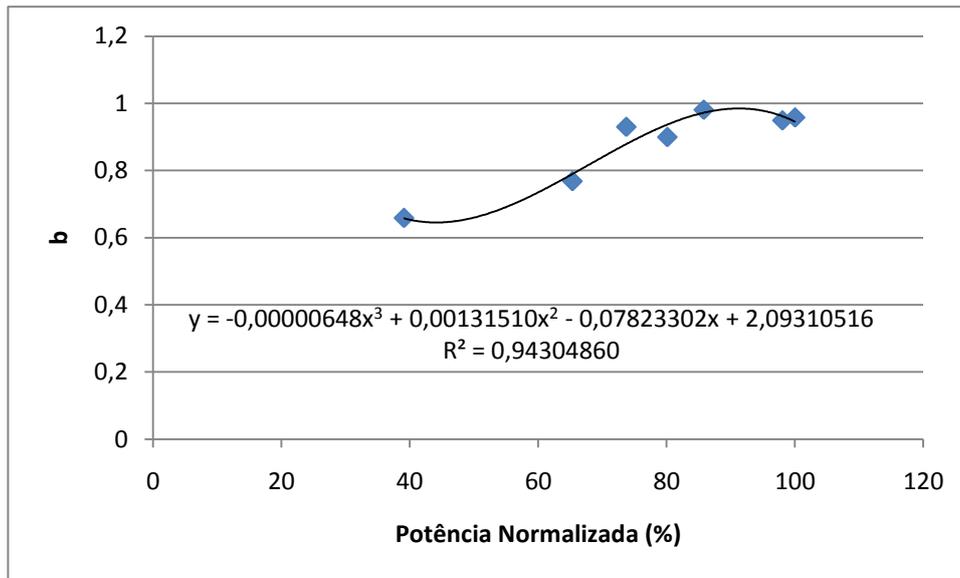


Figura 36: Curva ajustada para o coeficiente "b" em função da potência normalizada.

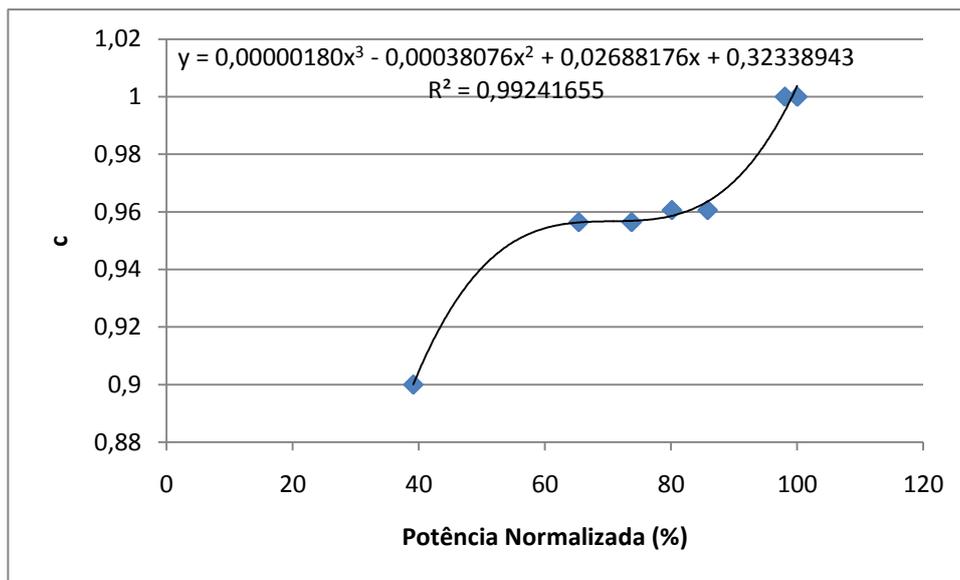


Figura 37: Curva ajustada para o coeficiente "c" em função da potência normalizada.

Os dois conjuntos de curvas foram implementados e testados contra dados medidos que refletiam distintos modos de operação. Uma vez que, para as curvas construídas em função da carga normalizada, o NGGT deixou de convergir para algumas condições de operação, foram adotadas na versão final aquelas construídas em função do ângulo de IGV.

#### 5.2.4. Validação do NGGT

Com a implementação das funções de deslocamento dos mapas do compressor em associação com as rotinas de cálculo do ângulo de IGV, foi validado o modelo computacional de simulação da turbina a gás W501F da AES Uruguaiana. Para este fim, foram utilizados os dados de operação em regime permanente, totalizando 64 casos de análise nas mais variadas cargas. Estes dados são de divulgação restrita, logo, são mostrados apenas valores normalizados e desvios entre os valores medidos e os calculados.

A Figura 38 mostra os resultados dos desvios percentuais de alguns parâmetros de desempenho calculados com relação aos medidos para diferentes cargas simuladas. Observa-se que, para diferentes condições de carga e de geometria do compressor a natureza dos desvios permanece aleatória. O modelo foi considerado capaz de reproduzir as condições operativas da turbina a gás porque os desvios obtidos, apesar de carregar incertezas propagadas de calibração e do próprio método numérico, são da ordem da incerteza de medição da instrumentação da usina.

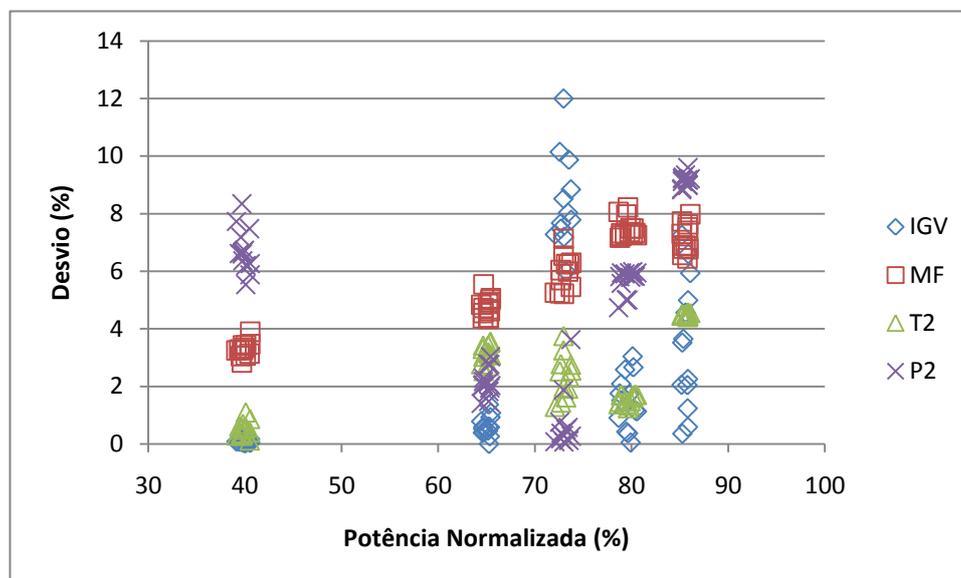


Figura 38: Desvios percentuais entre parâmetros calculados e parâmetros medidos: MF – vazão mássica de combustível; T2 – temperatura de saída do compressor; IGV – ângulo de IGV; P2 – pressão de saída do compressor.

Vale ressaltar que o NGGT possui rotinas de cálculo de propriedades do ar e dos produtos de combustão que o habilitam a reproduzir a operação em qualquer condição climática, não sendo necessária qualquer tipo de correção.

### 5.3. Calibração do GSP

Para que o GSP se caracterizasse como simulador da turbina a gás real era necessário comparar, inicialmente, seus resultados com os dados de operação. O programa teve o *design-point* configurado e os desvios dos seus resultados com relação aos dados disponibilizados pelo fabricante da turbina a gás são mostrados na Tabela 10. Dado que todos os desvios encontram-se abaixo de 1%, os resultados são considerados satisfatórios.

Tabela 10: Desvios percentuais dos parâmetros de desempenho disponíveis para o *design point* da W501F: comparação com o GSP.

Grandeza	Desvio (%)
Potência	0,047
T. exaustão	0,753
Vazão combustível	0,979

Posteriormente, de forma análoga ao realizado para a calibração do NGGT, foram tomados casos de operação real da usina, em diferentes condições de carga e de geometria do compressor, para serem simulados no GSP. Os desvios obtidos com relação a alguns parâmetros de operação medidos são mostrados na Figura 39. Embora o desvio médio dos parâmetros seja maior do que o verificado pelo NGGT, os valores absolutos ainda são baixos, pelos mesmos motivos apresentados anteriormente. O método de navegação de mapas do GSP pode levar a resultados menos fiéis à máquina real quando se utiliza um mapa do compressor que não corresponde ao utilizado pela mesma.

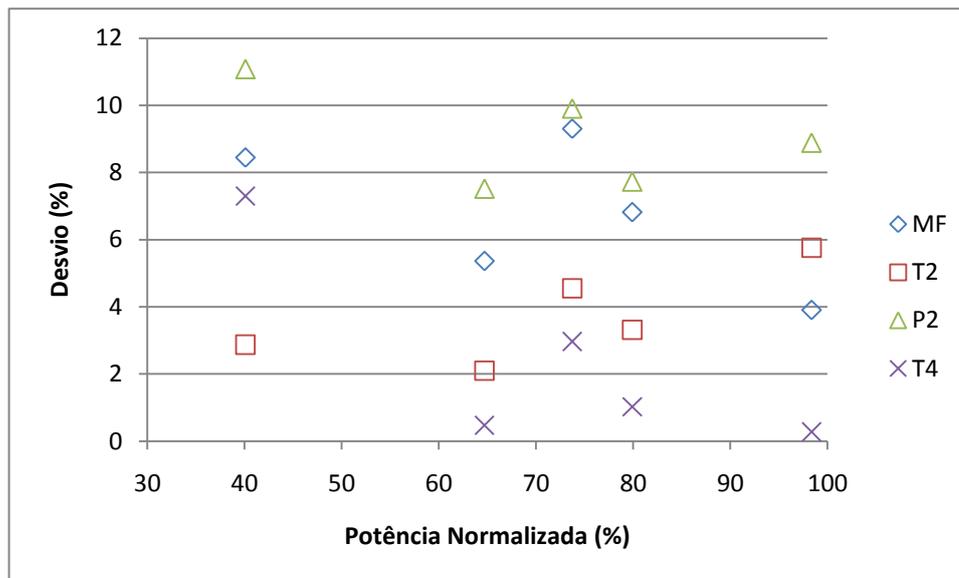


Figura 39: Desvios percentuais entre parâmetros calculados e parâmetros medidos: MF – vazão mássica de combustível; T2 – temperatura de saída do compressor; P2 – pressão de saída do compressor; T4 – temperatura de exaustão da turbina.

## 5.4. Diagnóstico de falhas

### 5.4.1. Determinação dos pontos saudáveis

Com a calibração do NGGT e do GSP por meio dos dados de operação reais, pôde-se utilizar estes programas, respectivamente, como modelo de referência e simulador de processo. Foi simulada a operação da turbina a gás W501F em cinco situações de carga normalizada pelo GSP e os resultados foram comparados com aqueles obtidos pelo NGGT. As condições ambiente foram mantidas iguais às de projeto da usina: 75% de umidade relativa e 15 °C de temperatura do ar. Com isto, pôde-se obter os desvios entre as variáveis de entrada, calculados de acordo com a equação (17), o sistema *fuzzy* na situação em que não há falhas associadas à turbina a gás.

São apresentados na Figura 40, na Figura 41, na Figura 42 e na Figura 43 estes desvios em função da potência normalizada da turbina a gás. Nota-se, novamente, a influência do método de deslocamento do mapa do compressor

utilizado na acurácia de alguns resultados, como pode-se observar com mais clareza na Figura 40, na qual o valor do desvio é mais significativo. Entretanto, os resultados obtidos estão na mesma faixa daqueles encontrados na calibração.

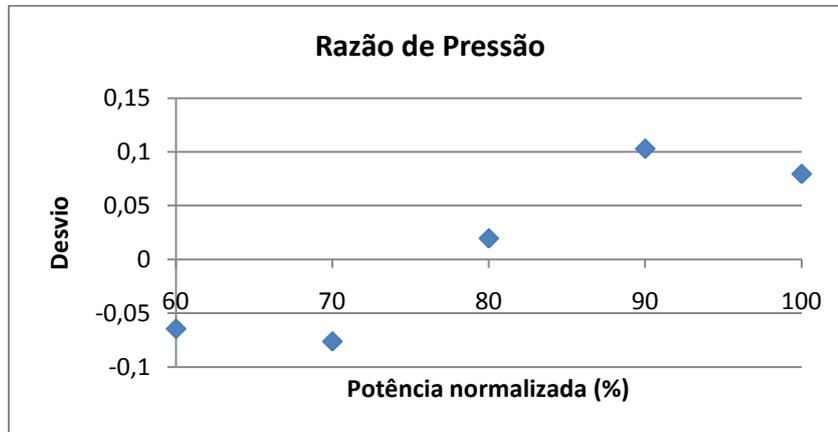


Figura 40: Desvio entre a razão de pressão saudável calculada no GSP e a calculada no NGGT.

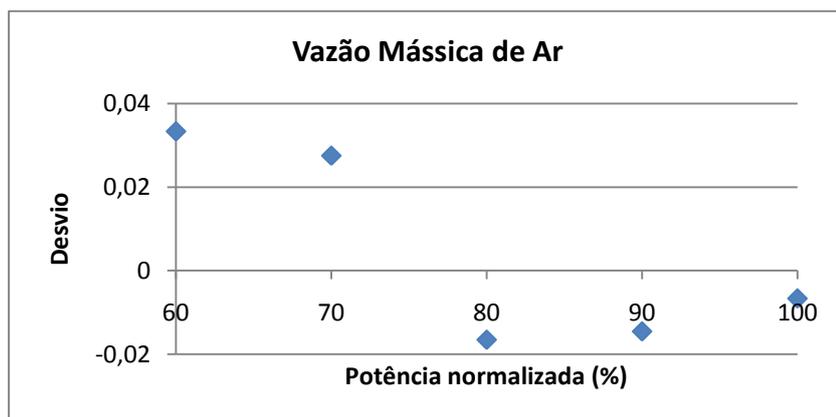


Figura 41: Desvio entre a vazão mássica de ar saudável calculada no GSP e a calculada no NGGT.

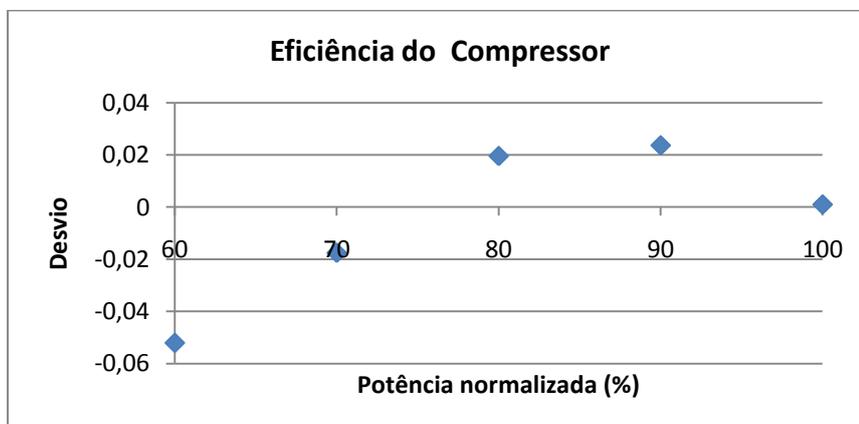


Figura 42: Desvio entre a eficiência do compressor saudável calculada no GSP e a calculada no NGGT.

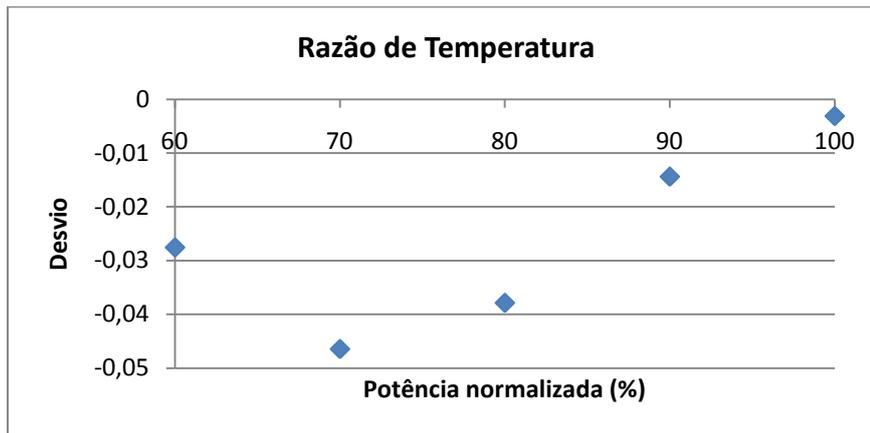


Figura 43: Desvio entre a razão de temperatura saudável calculada no GSP e a calculada no NGGT.

Nota-se que a variação dos desvios entre as cargas não apresenta um comportamento previsível. Se fosse fixado um valor padrão de desvio como referência saudável para uma das variáveis, por exemplo, o valor a 100% de carga, em uma situação de carga diferente o sistema de diagnóstico poderia indicar falha incorretamente, visto que o afastamento do desvio é natural.

Esta imprevisibilidade se justifica por: (i) a natureza aleatória da calibração dos modelos, baseada em dados operacionais carregados de ruídos e de incertezas; (ii) a alteração do ângulo de IGV altera a geometria do compressor, transformando-o, do ponto de vista da modelagem, em um novo equipamento.

A consequência disto é que um sistema de diagnóstico de turbinas a gás deve considerar que a alteração da geometria do equipamento implicará, também, na alteração da base de conhecimento embarcada no seu sistema de inteligência artificial. Este fato foi levado em conta na configuração do sistema para a detecção das falhas no compressor, cujos resultados para as simulações realizadas são mostrados nas próximas seções.

#### 5.4.2. Montagem do sistema de diagnóstico de filtro de ar sujo

A falha de compressor no GSP é simulada através da alteração das variáveis que podem ser manipuladas através do mapa do compressor: vazão mássica, eficiência e razão de pressão. A degradação do equipamento é obtida, então, pela

inserção de um valor de deslocamento de cada uma destas variáveis com relação ao valor saudável para a dada condição de operação.

A análise da falha “filtro sujo” baseia-se na variação da razão de pressão e da vazão mássica de ar. Neste caso, em que a falha se caracteriza pela redução das variáveis simultaneamente, foram realizadas simulações com reduções de 1, 3 e 5% de cada uma delas, representando 3 estágios de severidade da falha. A Figura 44 e a Figura 45 mostram o comportamento dos desvios de vazão e de razão de pressão entre os valores calculados pelo GSP e os calculados pelo NGGT.

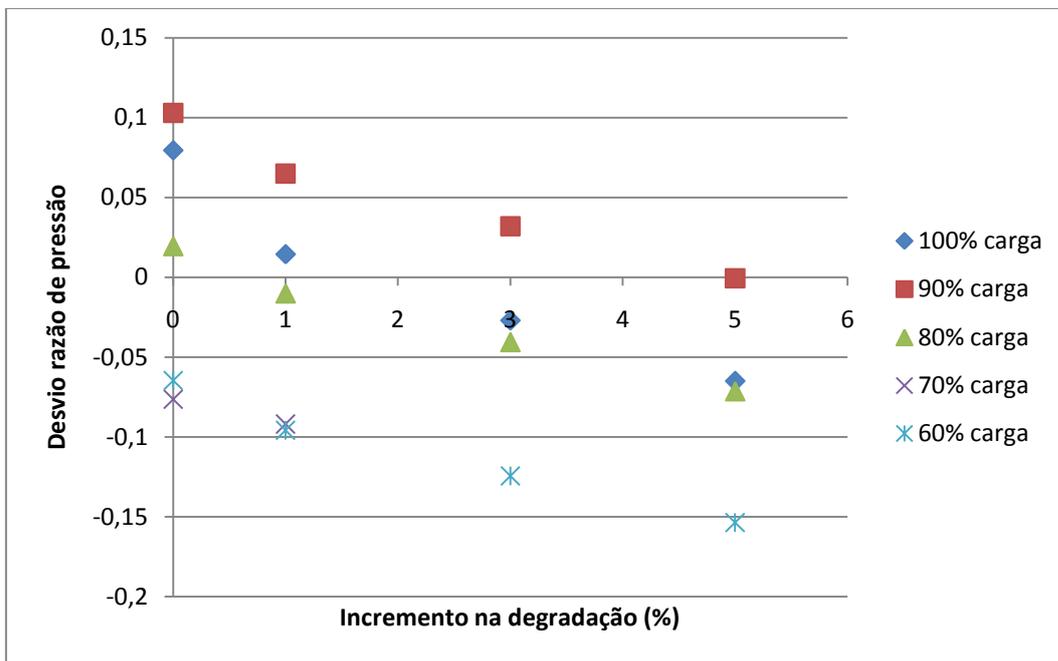


Figura 44: Comportamento do desvio da vazão mássica de ar em função da carga da turbina a gás e dos coeficientes de degradação.

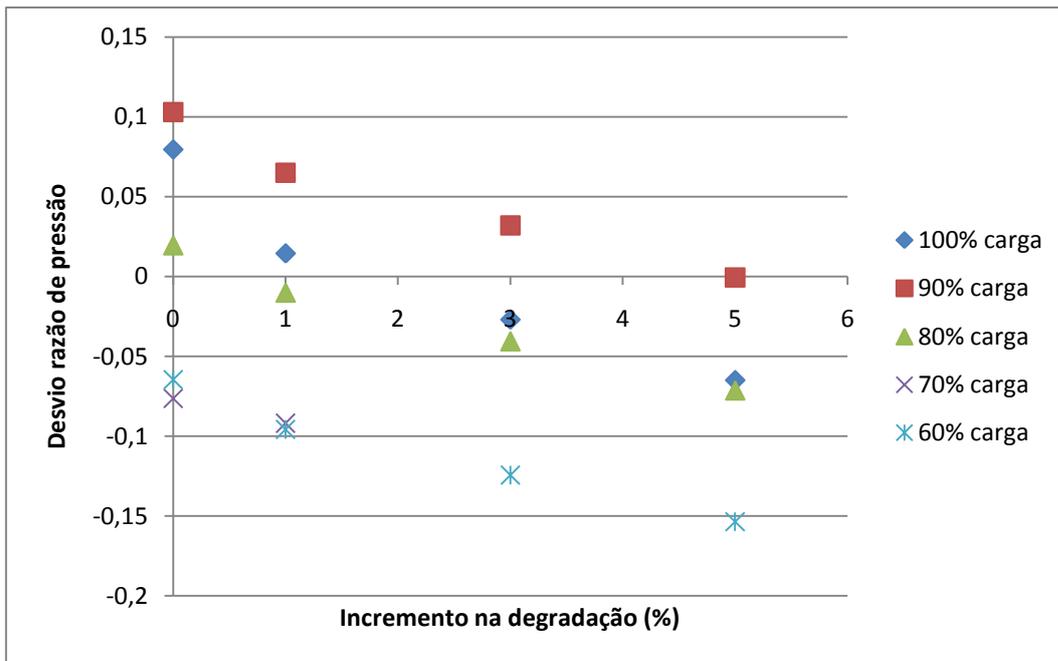


Figura 45: Comportamento do desvio da razão de pressão em função da carga da turbina a gás e dos coeficientes de degradação.

É perceptível que o comportamento dos desvios, embora imprevisível em cargas distintas, reflete a degradação a qual foram submetidos. A partir destes resultados, foram construídos os domínios *fuzzy* das variáveis e a configuração dos conjuntos *fuzzy* para cada situação de carga, os quais são mostrados na Tabela 11 e seguem o padrão indicado na Figura 46, a qual representa um conjunto *fuzzy* triangular genérico.

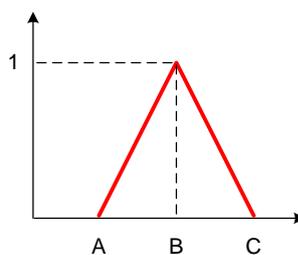


Figura 46: Ilustração da convenção adotada na Tabela 11.

Tabela 11: Parâmetros dos conjuntos *fuzzy* das variáveis de entrada dos sistemas “filtro sujo”.

100% DE CARGA						
CONJUNTO	PRESSURE RATIO			VAZÃO		
	A	B	C	A	B	C
1	0,056	0,079	0,119	-0,009	-0,007	-0,003
2	0,024	0,047	0,070	-0,013	-0,010	-0,008
3	-0,015	0,014	0,038	-0,027	-0,014	-0,011
4	-0,054	-0,027	0,003	-0,045	-0,032	-0,019
5	-0,700	-0,065	-0,038	-0,075	-0,050	-0,037
90% DE CARGA						
CONJUNTO	PRESSURE RATIO			VAZÃO		
	A	B	C	A	B	C
1	0,089	0,103	0,154	-0,018	-0,015	-0,007
2	0,070	0,084	0,097	-0,023	-0,020	-0,016
3	0,041	0,065	0,079	-0,039	-0,024	-0,021
4	0,009	0,032	0,056	-0,058	-0,044	-0,030
5	-0,700	-0,001	0,023	-0,095	-0,063	-0,050
80% DE CARGA						
CONJUNTO	PRESSURE RATIO			VAZÃO		
	A	B	C	A	B	C
1	0,009	0,020	0,029	-0,020	-0,017	-0,008
2	-0,006	0,005	0,015	-0,025	-0,022	-0,018
3	-0,032	-0,010	0,000	-0,041	-0,027	-0,023
4	-0,063	-0,041	-0,019	-0,061	-0,047	-0,032
5	-0,700	-0,071	-0,049	-0,100	-0,067	-0,052
70% DE CARGA						
CONJUNTO	PRESSURE RATIO			VAZÃO		
	A	B	C	A	B	C
1	-0,087	-0,076	-0,114	0,020	0,027	0,014
2	-0,026	-0,092	-0,081	0,005	0,018	0,025
60% DE CARGA						
CONJUNTO	PRESSURE RATIO			VAZÃO		
	A	B	C	A	B	C
1	-0,077	-0,065	-0,097	0,030	0,033	0,017
2	-0,095	-0,082	-0,070	0,026	0,029	0,032
3	-0,096	-0,100	-0,087	0,010	0,025	0,028
4	-0,124	-0,130	-0,109	-0,009	0,005	0,019
5	-0,154	-0,160	-0,139	-0,022	-0,015	-0,001

Na situação de 70% de carga o NGGT não convergiu para as condições mais severas de degradação. Isto pode indicar que, num sistema de diagnóstico acoplado a uma turbina a gás real, os pontos não convergidos possivelmente indicam alguma falha ou alguma medição espúria, porque se afastam de maneira significativa do comportamento ideal.

A análise aqui apresentada é inteiramente análoga à realizada nas próximas subseções.

### 5.4.3. Montagem do sistema de diagnóstico de surge

Para a simulação do compressor em “surge” pelo GSP, foram acrescentadas variações sobre as variáveis vazão mássica e eficiência do compressor, de forma análoga ao descrito na seção anterior. A Figura 47 e a Figura 48 mostram, respectivamente, o comportamento dos desvios da eficiência e da vazão quando se varia o valor da degradação aplicada ao mapa do compressor.

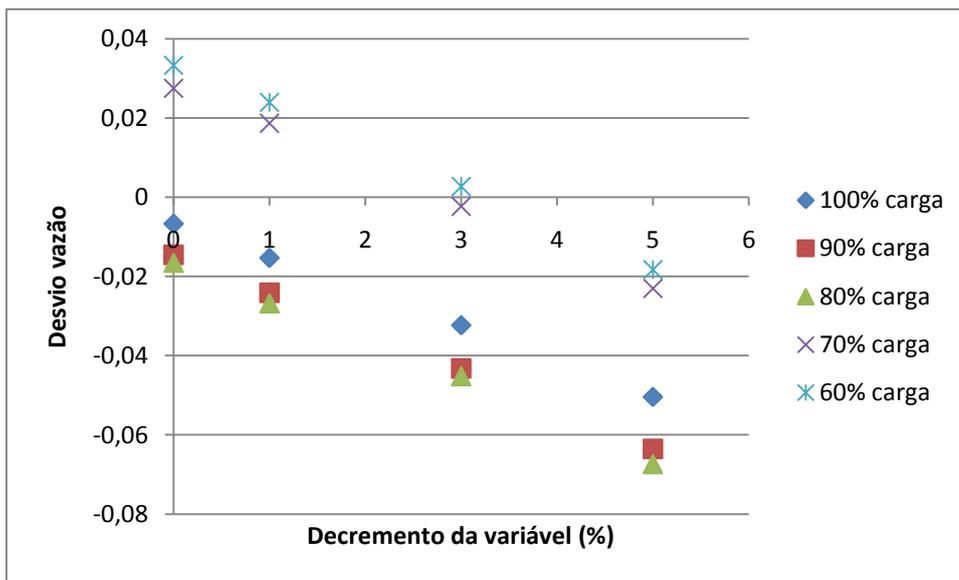


Figura 47: Comportamento do desvio da vazão mássica de ar em função da carga da turbina a gás e dos coeficientes de degradação.

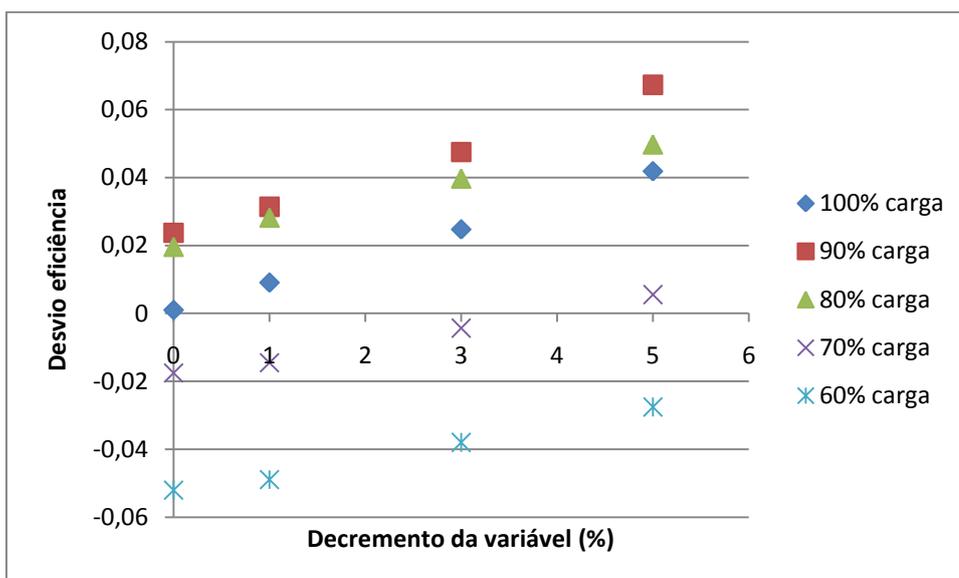


Figura 48: Comportamento da eficiência do compressor em função da carga da turbina a gás e dos coeficientes de degradação.

Os valores dos desvios apresentam variação similar quando submetidos à degradação, mais uma vez é notório que a diminuição do valor do desvio em módulo com a variação de carga não representa uma situação saudável.

Uma vez estabelecidos os diferentes níveis de intensidade de falha, foram configurados os conjuntos *fuzzy*, de acordo com o mostrado na Tabela 12.

Tabela 12: Parâmetros dos conjuntos *fuzzy* das variáveis de entrada dos sistemas “surge”.

100% DE CARGA								
CONJUNTO	EFICIÊNCIA			VAZÃO				
	A	B	C	A	B	C		
1	0,004	0,001	0,001	-0,010	-0,007	-0,003		
2	0,008	0,005	0,002	-0,014	-0,011	-0,008		
3	0,020	0,009	0,006	-0,027	-0,015	-0,012		
4	0,037	0,025	0,014	-0,045	-0,032	-0,020		
5	0,063	0,042	0,030	-0,076	-0,050	-0,037		
90% DE CARGA								
CONJUNTO	EFICIÊNCIA			VAZÃO				
	A	B	C	A	B	C		
1	0,026	0,024	0,012	-0,018	-0,015	-0,007		
2	0,030	0,028	0,025	-0,023	-0,019	-0,016		
3	0,043	0,031	0,029	-0,038	-0,024	-0,021		
4	0,062	0,048	0,036	-0,058	-0,043	-0,030		
5	0,101	0,067	0,053	-0,095	-0,064	-0,049		
80% DE CARGA								
CONJUNTO	EFICIÊNCIA			VAZÃO				
	A	B	C	A	B	C		
1	0,023	0,020	0,010	-0,020	-0,017	-0,008		
2	0,027	0,024	0,021	-0,025	-0,022	-0,018		
3	0,036	0,028	0,025	-0,040	-0,027	-0,023		
4	0,047	0,040	0,031	-0,061	-0,045	-0,032		
5	0,075	0,050	0,043	-0,101	-0,067	-0,052		
70% DE CARGA								
CONJUNTO	EFICIÊNCIA			VAZÃO				
	A	B	C	A	B	C		
1	-0,016	-0,018	-0,009	0,021	0,027	0,014		
2	-0,015	-0,016	-0,017	0,002	0,023	0,023		
3	-0,007	-0,015	-0,016	-0,026	0,019	0,004		
4	0,003	-0,004	-0,012	-0,015	-0,002	-0,017		
5	0,008	0,006	-0,001	-0,035	-0,023	-0,007		
60% DE CARGA								
CONJUNTO	EFICIÊNCIA			VAZÃO				
	A	B	C	A	B	C		
1	-0,059	-0,065	-0,032	0,030	0,033	0,017		
2	-0,051	-0,057	-0,062	0,025	0,029	0,032		
3	-0,096	-0,049	-0,055	0,009	0,024	0,027		
4	-0,124	-0,038	-0,046	-0,012	0,003	0,018		
5	-0,041	-0,028	-0,035	-0,027	-0,018	-0,003		

#### 5.4.4. Simulação de falhas

Para ilustrar o funcionamento do sistema de diagnóstico foram simuladas situações que acionam os conjuntos *fuzzy* de cada patamar de carga. A Tabela 13 mostra os valores de entrada para a análise de filtro sujo, referentes aos desvios de cada uma das quatro variáveis de entrada do sistema *fuzzy* e a Tabela 14 mostra o resultado da análise, que indica a existência de falha em uma intensidade dada em valores de 0 a 100. Foram realizadas combinações de variáveis de forma a simular padrões de falha e padrões saudáveis como o proposto por Ganguli [22].

Para cada situação de carga foram testadas 3 situações diversas, inseridas como o indicado abaixo:

- 100% de carga: detecção de falha nos três graus de severidade;
- 90% de carga: variáveis de entrada nos limites das assinaturas de falha, gerando saídas *crisp* baixas;
- 80% de carga: verificação de casos sem falha embora algum conjunto seja ativado em comparação com um caso de falha severa;
- 60% de carga: mais um caso de ativação de cada um dos conjuntos de saída.

As saídas são os valores *crisp* indicadores da severidade para cada uma das falhas.

Tabela 13: Entrada das variáveis do sistema de diagnóstico para a análise de filtro sujo.

CARGA	DESVIO			
	PR	M1	EF	TR
100%	0,08	-0,01	0	0
	0,01	-0,01	0	0
	-0,06	-0,05	0	0
90%	0,09	-0,02	0	0
	0,08	-0,02	0	0
	0,00	-0,06	0	0
80%	0,02	0,00	0	0
	-0,07	-0,05	0	0
	-0,03	0,00	0	0
60%	-0,07	-0,01	0	0
	-0,07	0,02	0	0
	-0,13	0,00	0	0

Tabela 14: Resultado da análise de filtro sujo.

CARGA	FILTRO SUJO	SURGE	FOULING	P. DANIFICADA
100%	0,00	0,00	0	0
	50,01	0,00	0	0
	94,23	0,00	0	0
90%	7,91	0,00	0	0
	5,38	0,00	0	0
	89,38	0,00	0	0
80%	0,00	0,00	0	0
	95,69	0,00	0	0
	0,00	0,00	0	0
60%	0,00	0,00	0	0
	50,00	0,00	0	0
	93,74	0,00	0	0

Foi realizada uma simulação análoga para a análise de *surge*. A Tabela 15 mostra o conjunto de dados de entrada do sistema e na Tabela 16 há a resposta, indicando os graus de severidade de falha. Para diferenciar estes testes dos já realizados para o filtro sujo, foram dadas entradas com o objetivo de validar as seguintes hipóteses:

- 100% de carga: falhas de alto grau de severidade;
- 90% de carga: variáveis de entrada ativando os conjuntos 4 e 5 com grau de pertinências distintos para cada uma das duas entradas;
- 80% de carga: variáveis de entrada ativando os conjuntos 1 e 2 com grau de pertinências distintos para cada uma das duas entradas ;
- 70% e 60% de carga: variáveis de entrada em três níveis de desvio.

Esta falha atinge graus de severidade altos para variações mais baixas dos parâmetros de entrada, conforme definido em suas regras *fuzzy*.

Tabela 15: Entrada das variáveis do sistema de diagnóstico para a análise de *surge*.

CARGA	DESVIOS			
	PR	M1	EF	TR
100%	0	-0,01	0,01	0
	0	-0,03	0,01	0
	0	-0,04	0,02	0
90%	0	-0,02	0,05	0
	0	-0,04	0,07	0
	0	-0,06	0,03	0
80%	0	-0,02	0,02	0
	0	-0,02	0,02	0
	0	-0,02	0,02	0
70%	0	0,02	-0,01	0
	0	0,00	0,00	0
	0	-0,02	0,01	0
60%	0	0,03	-0,05	0
	0	0,02	-0,05	0
	0	0,00	-0,04	0

Tabela 16: Resultado da análise de *surge*.

CARGA	FILTRO SUJO	SURGE	FOULING	P. DANIFICADA
100%	0	50,02	0,00	0
	0	96,44	0,00	0
	0	90,06	0,00	0
90%	0	98,12	0,00	0
	0	98,31	0,00	0
	0	99,02	0,00	0
80%	0	0,00	0,00	0
	0	50,02	0,00	0
	0	50,02	0,00	0
70%	0	50,02	0,00	0
	0	91,82	0,00	0
	0	99,59	0,00	0
60%	0	0,00	0,00	0
	0	91,26	0,00	0
	0	97,50	0,00	0

Para ambas as falhas os resultados mostraram-se perfeitamente adequados ao padrão das falhas, com a identificação de falhas isoladas e de seus graus de severidade. Isto mostra que com o conhecimento preciso obtido de um especialista pode-se obter diagnósticos precisos e descarte de falhas.