UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

BIANCA GOMES SILVA ALVES

ANÁLISE DE DESEMPENHO E DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM TURBINAS A GÁS OPERANDO EM UMA TERMOELÉTRICA SEGUNDO O MÉTODO DO *GAS PATH ANALYSIS*

JUIZ DE FORA
2014

BIANCA GOMES SILVA ALVES

ANÁLISE DE DESEMPENHO E DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM TURBINAS A GÁS OPERANDO EM UMA TERMOELÉTRICA SEGUNDO O MÉTODO DO *GAS PATH ANALYSIS*

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Marco Aurélio da Cunha Alves

Co-Orientador: Prof. Dr. Washington Orlando Irrazabal Bohorquez

JUIZ DE FORA

2014

BIANCA GOMES SILVA ALVES

ANÁLISE DE DESEMPENHO E DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM TURBINAS A GÁS OPERANDO EM UMA TERMOELÉTRICA SEGUNDO O MÉTODO DO *GAS PATH ANALYSIS*

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Aprovada em 11 de dezembro de 2014.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr., Marco Aurélio da Cunha Alves
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr., Washington Orlando Irrazabal Bohorquez
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr., Vitor Mainenti Leal Lopes
Universidade Federal de Juiz de Fora

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Tia Lydia, por tornar tudo possível e me ensinar o genuíno significado da generosidade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais Sérgio e Lídia, por serem sempre minhas motivações para seguir em frente e meu esteio moral. Agradeço minhas irmãs Carolina, Aline e Dayane, pelo companheirismo e pela força sempre presente. Ao meu namorado Fernando, por seu papel fundamental no meu desenvolvimento intelectual e seu apoio incondicional. Às minhas amigas, Bruna e Mayara, pela nossa sólida amizade que supera as distâncias. Agradeço a todo departamento de Engenharia de Produção e Mecânica, pela sólida formação proporcionada a mim, em especial, ao Prof. Dr. Marco Alves, por toda paciência e abnegação dispensada no meu processo de formação como engenheira mecânica.

"As atitudes inovadoras e consideradas inusitadas na vida dos grandes homens foram as que fizeram com que eles fossem denominados criaturas extraordinárias."

Hammed

RESUMO

O regime de chuvas atual do Brasil afeta de maneira nefasta a produção de energia elétrica a partir de usinas hidroelétricas, principal fonte do país. Diante disso, o uso intensivo das usinas termoelétricas assume um papel decisivo, garantindo o abastecimento da população. Esse novo cenário traz um grande desafio para os operadores do sistema, demandando das usinas uma operação eficiente e confiável. A aplicação do método *Gas Path Analysis* em uma turbina a gás, operando em uma central termoelétrica, possibilita verificar se ao longo de um determinado espaço temporal ocorreu alguma degradação que justifique alguma intervenção corretiva, ou seja, permite a análise do desempenho global da turbina a gás e individual dos módulos garantindo, assim, a confiabilidade da operação. O método é construído com base na determinação da matriz de inter-relação de parâmetros, que relaciona todas as variáveis dependentes e independentes do sistema. Utilizando informações obtidas dos dados de operação real da usina termoelétrica é possível determinar as variações ocorridas em diferentes componentes do motor predizendo, dessa forma, falhas e tendências não desejáveis. A utilização do programa DESTUR, software específico para cálculo de desempenho de turbinas a gás, se mostrou válida na construção da matriz de inter-relação de parâmetros, porém, a influência dos parâmetros independentes entre si, quando modificados ao mesmo tempo, inviabilizou a obtenção de resultados válidos na execução do método.

Palavras-chave: *Gas Path Analysis*, Turbinas a gás

ABSTRACT

The Brazil's current rainfall regime affects the production of electricity from hydroelectric power plants ominously, the main power supply of the country. Thus, the intensive use of power takes on a decisive role in ensuring supplying the population. This new scenario brings a great challenge for system operators, requiring the thermal power plants an efficient and reliable operation. The application of Gas Path Analysis method in a gas turbine operating in a thermal power plant allows to check if over a given timeline some degradation occurred that warrants some corrective action, i.e., it allows the analysis of the overall performance of gas turbine and of individual modules, thus ensuring reliable operation. The method is made based on the determination of the parameter interrelationship matrix, which lists all the system's dependent and independent variables. Using information obtained from real operation data of the power plant is possible to settle the variations in different engine components predicting undesirable faults and trends. The use of DESTUR program, specific software for gas turbine performance calculation, proved valid in the construction of parameters interrelationship matrix, however, the influence of each other independent parameters, when modified at the same time, prevented obtaining valid results in the execution of the method.

Keywords: Gas Path Analysis, Gas turbines

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Matriz Energética Nacional.....17
Figura 2 – Objetivo do Monitoramento de Motores.....27
Figura 3 – Abordagem de Isolamento de Múltiplas Falhas.....28
Figura 4 – Interface Gráfica para Exibição de Parâmetros.....31
Figura 5 – Interface Gráfica para Exibição de Diagnósticos.....32
Figura 6 – Turbina a Gás GT11N2.....33
Figura 7 – Especificações Técnicas GT11N2.....34

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Volume Útil dos Principais Reservatórios – Furnas.....18
Gráfico 2 – Volume Útil dos Principais Reservatórios – Três Marias.....18

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Típico motor de turbina a gás de eixo único – matriz de inter-relação de parâmetros.....38
Tabela 2 – Dados de operação de um motor simples turbojato eixo único.....40
Tabela 3 – Matriz de inter-relação de parâmetros de um motor simples turbojato eixo único.41
Tabela 4 – Variáveis dependentes selecionadas.....45
Tabela 5 – Variáveis independentes selecionadas.....46
Tabela 6 – Cálculo dos coeficientes para Pressão na Entrada do Compressor.....47
Tabela 7 – Cálculo dos coeficientes para Eficiência do Compressor.....48
Tabela 8 - Cálculo dos coeficientes para Eficiência da Combustão.....48
Tabela 9 - Cálculo dos coeficientes para Eficiência da Turbina.....49
Tabela 10 - Cálculo dos coeficientes para Contra Pressão na Saída do Motor.....49
Tabela 11 - Matriz de inter-relação de parâmetros.....50
Tabela 12 - Dados de referência coletados, dia 22/07/2013.....51
Tabela 13 - Dados de referência coletados, dia 30/04/2014.....52
Tabela 14 - Variação percentual dos parâmetros dependentes coletados.....52
Tabela 15 - Composição do motor no DESTUR.....59
Tabela 16 - Parâmetros de modelagem da entrada de ar.....59
Tabela 17 - Parâmetros de modelagem do compressor.....60
Tabela 18 - Parâmetros de modelagem da câmara de combustão.....60
Tabela 19 - Parâmetros de modelagem da câmara de combustão.....61
Tabela 20 - Parâmetros de modelagem do bocal.....61
Tabela 21 - Cálculo das diferenças percentuais para as variáveis dependentes com a variação na pressão de entrada do compressor.....62
Tabela 22 - Cálculo das diferenças percentuais para as variáveis dependentes com a variação na eficiência do compressor.....63
Tabela 23 - Cálculo das diferenças percentuais para as variáveis dependentes com a variação na eficiência da combustão.....63
Tabela 24 - Cálculo das diferenças percentuais para as variáveis dependentes com a variação na eficiência da turbina.....64
Tabela 25 - Cálculo das diferenças percentuais para as variáveis dependentes com a variação na contra pressão na saída do motor.....64

Tabela 26 - Cálculo das diferenças percentuais para as variáveis dependentes com a variação em todos os parâmetros independentes do motor.....65

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

GPA	*Gas Path Analysis*
BEN	Balanço Energético Nacional
ONS	Operador Nacional do Sistema
DETEM	*Deteriorated Turbine Engine Model*
GPAL	*Gas Path Analysis Ltd*
$\boldsymbol{A}$	Área efetiva do bocal
$\boldsymbol{C}$	Coeficiente
$\boldsymbol{\eta}$	Eficiência
$\boldsymbol{\tau}$	Capacidade de bombeamento da vazão de ar
$\boldsymbol{N}$	Velocidade do rotor em rpm
$\boldsymbol{P}$	Pressão
$\boldsymbol{SHP}$	Potência de saída do eixo em HP
$\boldsymbol{T}$	Temperatura
$\boldsymbol{WaBl}$	Sangria de ar do compressor
$\boldsymbol{Wf}$	Vazão de combustível
TAT	Temperatura dos gases de escape
P_{comp}	Pressão de saída do compressor
T_{comp}	Temperatura de saída do compressor
M_{comb}	Consumo de combustível
Pot	Potência
ΔP_{entr}	Variação de pressão na entrada do compressor
$\Delta\eta_{comp}$	Variação na eficiência do compressor
$\Delta\eta_{comb}$	Variação na eficiência da combustão
$\Delta\eta_{turb}$	Variação na eficiência da turbina
ΔP_{boca}	Variação de contra pressão na saída do motor
K	Kelvin
ATM	Atmosfera
Kg/s	Kilograma por segundo
W	Watt
T_{entr}	Temperatura Ambiente
P_{entr}	Pressão Ambiente

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO 16

1.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS 16
1.2 – MOTIVAÇÃO 16
1.3 – ESCOPO DO TRABALHO 19
1.4 – OBJETIVOS GERAIS DEFINIDOS 20
1.5 – METODOLOGIA DEFINIDA 21
1.6 – ESTRUTURA DO TRABALHO 21

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 22

2.1 – AS TURBINAS A GÁS 22
2.2 – O MÉTODO *GAS PATH ANALYSIS* (GPA) 25
2.3 – APLICAÇÕES DO MÉTODO GPA 29

CAPÍTULO 3 – ESTUDO DE CASO.....33

3.1 – TURBINA A GÁS ALSTON GT11N2 33
3.2 – ADAPTAÇÕES NECESSÁRIAS NA APLICAÇÃO DO MÉTODO 35
3.3 – CONSTRUÇÃO DO MODELO GPA.....36
3.4 – ANÁLISE DE INTEGRIDADE DO MOTOR UTILIZANDO O MODELO GPA 39
3.5 – DIAGNÓSTICO DE FALHAS 42
3.6 – ESTIMATIVA DE ERROS 44

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES 45

4.1 – MATRIZ DE INTER-RELAÇÃO DE PARÂMETROS 45
4.2 – DADOS DE OPERAÇÃO DO MOTOR 51
4.3 – RESULTADOS OBTIDOS 53
4.3 – ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS.....55

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO 57

5.2 – CONCLUSÕES.....57
5.1 – RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 57

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 58

ANEXO 1 – MODELAGEM DA TURBINA GT11NN2 UTILIZANDO O DESTUR 62

ANEXO 2 – VALIDAÇÃO DA MATRIZ DE INTER-RELAÇÃO DE PARÂMETROS 57

ANEXO 3 – TERMO DE AUTENTICIDADE 67

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Propõe-se explorar o conceito de monitoramento das condições de funcionamento de motores através da aplicação da técnica conhecida como *Gas Path Analysis* (GPA), para avaliação do desempenho de uma turbina a gás operando na geração de energia elétrica em uma usina termoelétrica. O método escolhido é amplamente utilizado para tal propósito, principalmente na indústria aeronáutica, pois, através do monitoramento de parâmetros de operação do motor, é possível, não apenas observar uma queda em seu rendimento, mas também, prever manutenções programadas em função das alterações ocorridas em cada módulo componente do motor que constitui a turbina. As perspectivas de resultados que serão alcançados preveem uma determinação quantitativa das mudanças ocorridas nos parâmetros de avaliação do equipamento, em um determinado intervalo de tempo, sendo possível a partir de então, prescrever medidas corretivas a serem executadas, de modo a reparar as perdas aferidas pelo método, ou seja, realizar o diagnóstico de falha.

1.2 – MOTIVAÇÃO

A sociedade atual tornou-se dependente da energia elétrica em praticamente todos os seus setores de atividade, tais como, industrial, comercial, hospitalar, doméstico e etc. Diante desse panorama, a garantia de geração desta forma de energia, em quantidade adequada para suprir as demandas, é um fator crítico em todo o mundo.

No Brasil a matriz enérgica encontra-se majoritariamente composta por fontes hidráulicas, como mostrado no gráfico a seguir fornecido pelo Balanço Energético Nacional (BEN) – 2013, tendo o ano de 2012 como base.

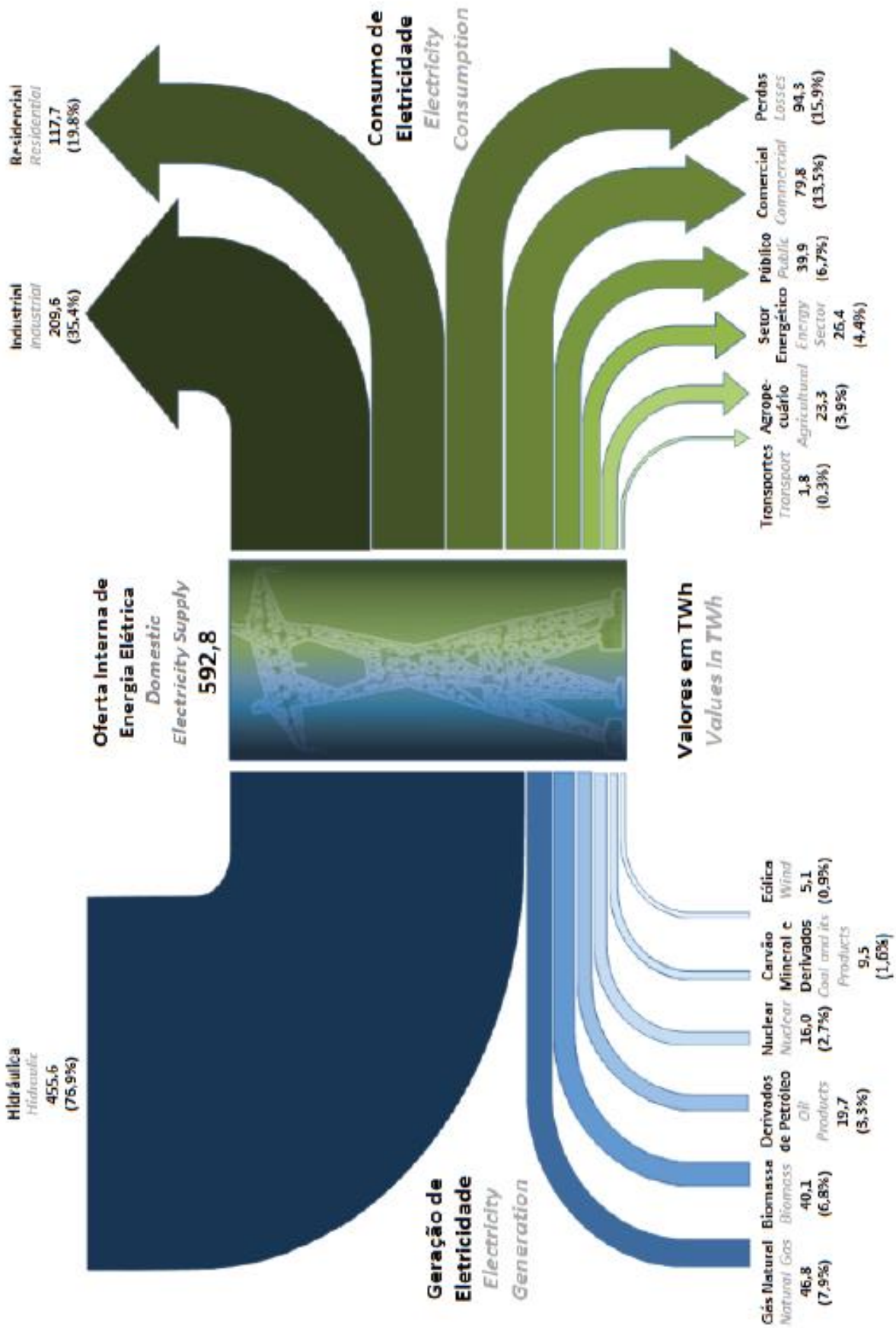

Figura 1: Matriz energética nacional
Fonte: (BEN, 2013)

A alteração ocorrida no regime de chuvas das regiões Sudeste e Centro-Oeste, responsáveis por cerca de 70% de toda a energia produzida no país, fez com que o nível dos reservatórios de suas usinas hidroelétricas atingisse cerca 40,57% de sua capacidade no final de janeiro de 2014, segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2014). Durante todo o ano de 2014 o volume de chuva manteve-se abaixo do esperado fazendo com que o volume útil dos principais reservatórios do país atingisse uma situação crítica, como mostrado nos gráficos abaixo.

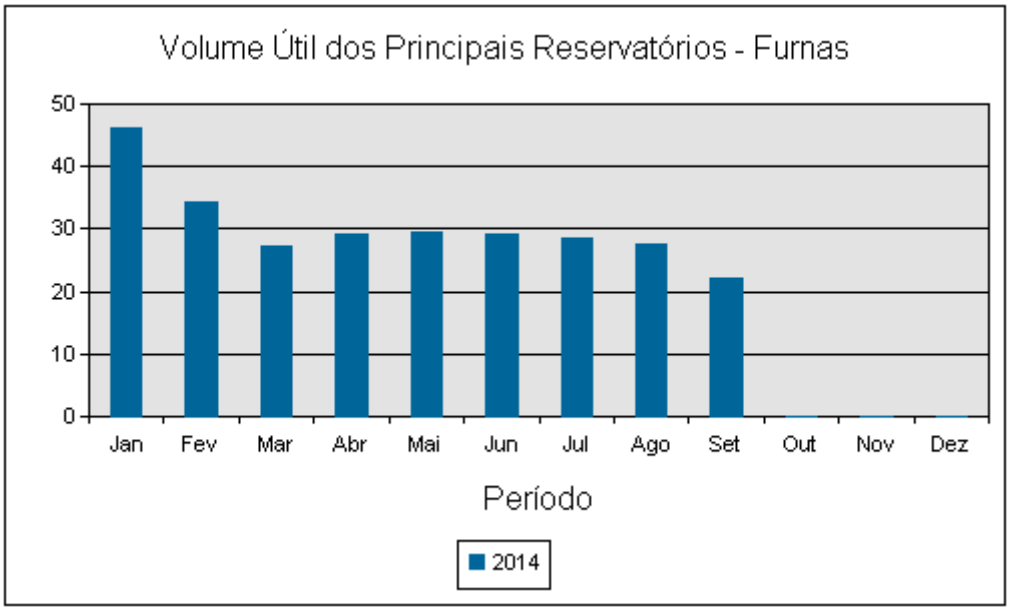

Gráfico 1: Volume Útil dos Principais Reservatórios – Furnas
Fonte: (ONS, 2014)

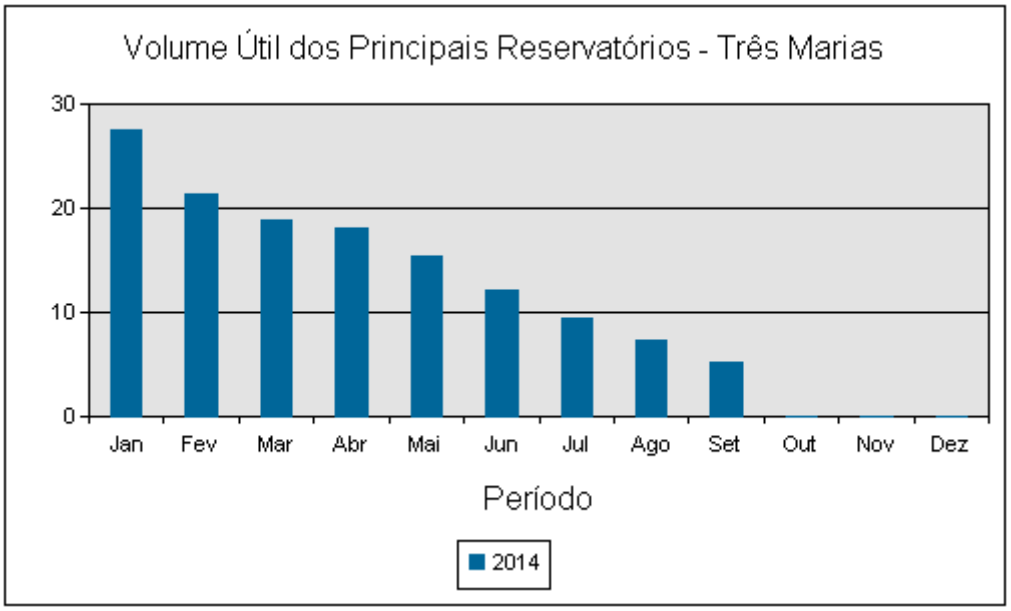

Gráfico 2: : Volume Útil dos Principais Reservatórios – Três Marias
Fonte: (ONS, 2014)

Somando-se esse fato, com o aumento da demanda de energia elétrica impulsionada pelas altas temperaturas registradas em janeiro deste ano, o abastecimento de energia elétrica no país pôde ser garantido com o acionamento das usinas termelétricas. Diante desse cenário, as usinas termelétricas assumiram um papel fundamental na matriz energética nacional, exigindo que suas atividades sejam operadas com confiabilidade e eficiência.

O uso intensivo das Térmicas traz um grande desafio para os operadores do sistema: as usinas devem operar eficientemente e com confiabilidade. Portanto as condições de operação das térmicas devem ser rigorosamente acompanhadas e, a predição de ineficiências e de mau funcionamento é de fundamental importância, para garantir a operação segura e economicamente eficiente do sistema. Em usinas termelétricas que utilizam turbinas a gás, este monitoramento é aplicado acompanhando-se o desempenho do motor por meio de diversas técnicas. A manutenção aplicada a equipamentos que não são monitorados constantemente limita-se as práticas preventivas e corretivas. Diante disso, o sistema encontra-se limitado a dois extremos, as práticas de reparos periódicos, sem a investigação da real necessidade, e aos reparos corretivos, motivados pela parada total do equipamento. Em ambos os casos, de um modo geral, estão presentes custos que transcendem a real necessidade do sistema e, para o caso da manutenção corretiva, existem os riscos inerentes às paradas bruscas durante a operação, o que torna a prática da manutenção preditiva uma atraente alternativa para a otimização das necessárias vistorias.

Através da aplicação de uma consolidada técnica GPA para monitoramento do desempenho da turbina a gás de uma central termelétrica, é possível a determinação quantitativa das variações ocorridas em diversos pontos do motor viabilizando, dessa forma, um otimizado programa de manutenção, pois, a detecção de falhas através do método antecipa o conhecimento de processos de degradação ao operador do sistema.

1.3 – ESCOPO DO TRABALHO

A deterioração de um motor composto por turbina a gás pode ser percebida pela redução no desempenho apresentado pelo motor. Vários efeitos, tanto microscópicos quanto macroscópicos, podem ser atribuídos a essa queda no desempenho, tais como: mudanças na área ou na vazão de ar, distribuição de combustível não uniforme, variação na eficiência do motor, etc. O método conhecido como *Gas Path Analysis* (GPA) é uma técnica utilizada,

desde a década de 70, com grande sucesso, principalmente no setor aeronáutico. Este método estabelece um modelo ideal de operação do sistema em análise e, por meio de desvios apresentados nas variáveis monitoradas ao longo da passagem do gás pelo sistema, consegue prever a deterioração de partes do equipamento.

O objetivo central do trabalho é a aplicação do método GPA em uma turbina a gás, operando em uma central termelétrica, para verificar se ao longo de um determinado espaço temporal ocorreu alguma degradação que justifique alguma intervenção corretiva, ou seja, analisar o desempenho global da turbina a gás e individual dos módulos, para garantir a confiabilidade da operação.

Muitas possibilidades estão presentes neste campo de trabalho como, por exemplo, o desenvolvimento de softwares comerciais para o constante monitoramento do sistema. Porém, esta proposta encontra-se fora do escopo aqui proposto, tendo em vista a complexidade e o tempo necessário para o desenvolvimento de um programa computacional. O resultado aqui esperado limita-se a um diagnóstico quantitativo do nível de degradação do sistema analisado, em um determinado espaço de tempo, utilizando-se para tal, ferramentas como, softwares para análise do desempenho de turbinas a gás e programas para cálculos matriciais, como será posteriormente detalhado. A criação de bibliotecas com informações referentes a todo histórico de operação do motor também é inviável, tendo em vista as limitações na disponibilidade de dados.

1.4 – OBJETIVOS GERAIS DEFINIDOS

A principal perspectiva é a obtenção de um diagnóstico quantitativo explicitando as variações no desempenho dos módulos investigados, de modo a permitir que sejam avaliadas as degradações ocorridas na turbina a gás. As mudanças mensuradas ao longo do motor proporcionam as condições adequadas à prescrição de medidas corretivas a serem tomadas, visando proporcionar os reparos necessários, de modo eficientemente econômico e operacional.

1.5 – METODOLOGIA DEFINIDA

A metodologia utilizada é de natureza fundamentalmente aplicada, objetivando aplicar uma técnica para obter modelos que possibilitem a observação dos fenômenos investigados. A abordagem será combinada, contendo tanto os valores quantitativos, obtidos a partir do modelamento matemático, quanto qualitativos, originados da análise e interpretação dos dados obtidos, relacionando, os valores matemáticos e os fenômenos físicos, com os padrões de falhas naturalmente observados em motores como turbinas a gás.

1.6 – ESTRUTURA DO TRABALHO

O desenvolvimento do trabalho será abordado ao longo de quatro capítulos, são eles: “Revisão Bibliográfica”, “Materiais e Métodos”, “Resultados e Discussões” e “Conclusão”. No capítulo dois, “Revisão Bibliográfica”, uma abordagem geral sobre turbinas a gás será oferecida, seguida da apresentação do método *Gas Path Analysis* e de exemplos de sua utilização desde o âmbito acadêmico até as aplicações comerciais. O terceiro capítulo, “Estudo de Caso”, possibilitará uma perfeita compreensão do processo de execução do método, bem como o conhecimento do objeto de estudo, a turbina a gás que será analisada. Em “Resultados e Discussões”, será apresentado o modelo para diagnóstico da integridade do motor, obtido a partir da aplicação da técnica detalhada do capítulo três, juntamente com uma criteriosa análise dos resultados obtidos. O desenvolvimento do trabalho é finalizado com as conclusões apresentadas no capítulo cinco, garantindo o perfeito entendimento do método utilizado.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente referencial teórico oferece uma visão ampla a respeito das turbinas a gás, possibilitando, tanto a compreensão de seu funcionamento, quanto o conhecimento a cerca da sua importância para os meios de transporte e geração de energia elétrica. Em seguida, o método *Gas Path Analysis* é apresentado, justificando toda a sua relevância no desenvolvimento de sistemas para monitoramento e diagnóstico da integridade de motores constituídos por turbinas a gás. As aplicações são mostradas ao final do capítulo, corroborando, com as perspectivas de identificação de falhas, propostas pelo autor do método.

2.1 – AS TURBINAS A GÁS

A melhor descrição do que seja uma turbina a gás, suas características e aplicações, pode ser encontrada em *Gas Turbine Theory* (SARAVANAMUTTOO, 2001).

Turbinas são equipamentos compostos por elementos rotativos – os rotores – acoplados a um eixo. Estes rotores são constituídos de inúmeras palhetas que realizarão trabalho com a sua movimentação provocada a partir da expansão de um fluido, essa expansão poderá ocorrer em diversos estágios da turbina, cada um sendo constituído de um estator e de um rotor. O termo turbina a gás é usado para fazer referência a todo motor composto por vários elementos, sendo os elementos mais importantes de composição desse motor, além da própria turbina, o compressor e a câmara de combustão. O compressor é um elemento de fundamental importância para a turbina a gás, através dele o ar é admitido no motor e comprimido sucessivas vezes ao longo de seus rotores, compondo assim, vários estágios de compressão. Os compressores podem ser do tipo: centrífugo, axial e axial-centrífugo. Depois de concluído todos os estágios de compressão, o ar a alta pressão é direcionado para a câmara de combustão, nesta câmara ocorrerá a queima da mistura composta por ar e combustível, visando adicionar ainda mais energia ao fluido de trabalho, através do aumento na temperatura. A câmara de combustão pode ser do tipo: caneca ou tubular, anular e tubo-anular.

Os principais fatores que afetam a desempenho da turbina a gás são: eficiência dos componentes e temperatura de trabalho da turbina. No estado atual a eficiência dos componentes gira em torno de 85 a 90%, as perdas aumentam o trabalho consumido pelo compressor e diminuem o trabalho fornecido pela turbina, sendo, a contribuição da

metalurgia, no desenvolvimento de materiais, de grande importância para que possam ser obtidas altas pressões e temperaturas.

Existem duas possibilidades de ciclos de operação nas turbinas a gás, os ciclos abertos e fechados. Nos ciclos abertos é utilizado o processo de combustão interna que foi anteriormente descrito. Neste, o ar que é admitido na entrada de ar é descarregado na atmosfera após o processo de expansão, necessitando de uma tomada contínua de ar para operar. A grande desvantagem desse ciclo é a erosão que ocorre nas palhetas da turbina. Já nos ciclos fechados o fluido de trabalho, normalmente o hélio, é recirculado da saída da turbina para a entrada do compressor utilizando trocadores de calor para adicionar calor ao fluido a caminho da turbina e para resfriá-lo na volta para o compressor. Esse ciclo não foi amplamente implementado em função do seu alto custo e baixa eficiência.

A configuração das turbinas a gás são extremamente flexíveis, podendo estas possuir: mais de um compressor; mais de uma turbina; interresfriador entre os compressores; re-aquecedor entre as turbinas; regenerador para aquecer o ar de saída do compressor com os gases de escape; etc, sendo que, os ciclos mais complexos aumentam a potência, a eficiência, a complexidade, o peso e o custo. Em turbinas de eixo duplo existem duas turbinas, uma de baixa e outra de alta pressão, que acionam dois compressores. A turbina de alta pressão aciona o compressor de alta pressão e a combinação atua como um gerador de gás para a turbina de força de baixa pressão que, por sua vez, aciona o compressor de baixa pressão. Esse arranjo é utilizado quando flexibilidade é um parâmetro de operação importante. Além disso, o eixo duplo tem a facilidade de partida comparada com o eixo simples, pois, o arranque precisa ser dimensionado apenas para dar partida no gerador de gás.

O maior impacto das turbinas a gás foi no setor de propulsão de aeronaves. O desenvolvimento de motores para aeronaves, que foi intensificado na segunda guerra mundial, era baseado somente em requisitos militares visando altas velocidades para os jatos. Rapidamente os motores com turbina a gás fizeram os motores aeronáuticos a pistão parecerem obsoletos, sendo estes, hoje em dia, usados apenas para o mercado de aviação leve. A mecânica dos turbojatos segue o esquema de turbinas a gás de ciclo aberto simples, onde a turbina produz apenas a potência necessária para acionar o compressor. Nesta configuração, gás deixa a turbina a alta pressão e temperatura e expande-se na atmosfera no bocal propulsor para produzir a alta velocidade do jato.

Em aplicações industriais são utilizadas turbinas aeronáuticas adaptadas, as chamadas turbinas aeroderivativas. Para fazer uso dessas turbinas em outras aplicações fazem-se necessárias modificações nos rolamentos, sistema de combustão para queima de outros

combustíveis, adição de uma turbina de potência, entre outras modificações. As turbinas a gás aeroderivativas também tem sido amplamente utilizadas em aplicações de bombeamento para transmissão de óleo e gás, picos de carga, geração de eletricidade de emergência, plataformas no mar e propulsão naval.

A geração de energia elétrica em termelétricas com o uso de turbinas aeroderivativas e turbinas *heavy duty*, também é observado. Em muitas plantas é utilizado o arranjo conhecido como cogeração, que utiliza turbinas a gás como fonte de energia térmica para caldeiras de recuperação de turbinas a vapor. Dessa forma, são produzidos concomitantemente energia elétrica e vapor para utilização em processos industriais, sendo essa junção de turbina a gás com turbina a vapor conhecida como ciclo combinado.

No transporte marítimo as turbinas a gás tem uma história de sucesso operando em navios, devido, ao seu tamanho compacto, alta densidade de força, baixo ruído e baixo volume ocupado, o que fez com que tomasse o lugar das turbinas a vapor nos navios de guerra. A maior desvantagem do uso de turbina a gás em navios é o seu pobre consumo específico de combustível a uma carga parcial, para superar esses problemas de eficiência são diversas combinações desta com outras formas de geração de energia como, por exemplo, motores a diesel.

Em aplicações automotivas, apesar dos esforços despendidos as turbinas a gás não conseguiram superar os motores Diesel e Otto, devido principalmente a três razões: baixa eficiência em carga parcial, longo tempo de aceleração da geradora de gases, de marcha lenta a plena carga e o enorme investimento de capital nas fábricas de turbinas a gás.

No que tange as questões ambientais as turbinas a gás apresentam fundamentalmente dois problemas, segundo Saravanamuttoo, (2001): alto ruído e emissão de óxidos de nitrogênio. A poluição sonora causada pela exaustão dos gases é um fator substancialmente incômodo em áreas com grande concentração de pessoas, como por exemplo, os aeroportos, o que motiva vários estudos, visando novos materiais e design de turbinas objetivando a redução desse incômodo. Já o aumento da temperatura de combustão, ao passo que aumenta a eficiência da turbina, também resulta em uma maior emissão de óxidos de nitrogênio, sendo uma solução para o problema, a utilização de injeção de água ou vapor na câmara de combustão.

A geração de energia mecânica é um processo realizado com sucesso em turbinas a gás, pois, a ausência de componentes alternativos e de fricção – como nos motores de combustão interna – atribui uma alta confiabilidade e disponibilidade ao equipamento, com grande densidade de potência e instalação rápida, (SARAVANAMUTTOO, 2001). Estações

de geração de energia com turbinas a gás são mais compactas do que estações com turbinas a vapor, pois esta última demanda a instalação de uma volumosa e cara estrutura necessária para a produção de vapor a uma alta pressão e temperatura. Em relação aos motores a diesel o custo de manutenção, o consumo de óleo e o nível de vibração de uma turbina a gás é, geralmente, menor.

Os projetos de turbinas a gás, segundo Saravanamuttoo, (2001) são caros e demorados fazendo com que várias empresas se juntem para realizá-los. Um motor de sucesso deve operar em várias aplicações e o seu ciclo de vida, desde a fase de projeto até o fim de seu uso, deve exceder 50 anos. Para simplificar e organizar melhor o processo de desenvolvimento do motor são propostos diversos setores que serão desenvolvidos inicialmente de forma separada e, ao final do projeto, englobados em um só, sendo necessário, em todas as etapas do projeto, a revisão e o acréscimo das demandas dos diferentes setores, assim como o usual em projetos de engenharia.

2.2 – O MÉTODO *GAS PATH ANALYSIS (GPA)*

O método conhecido como *Gas Path Analysis (GPA)* foi proposto por URBAN, (1973) com o intuito de fornecer um sistema prático e eficaz na detecção de problemas relacionados à operação de turbinas a gás. As motivações para a aplicação do método são inúmeras, abrangendo aspectos econômicos e operacionais. A ausência de um adequado sistema para monitoramento das condições de funcionamento do motor provoca inúmeras falhas na gestão da manutenção, sendo observado, desde interrupções na operação, para a realização de vistorias antes do momento ideal, até, falhas inesperadas em componentes principais, o que inviabiliza o funcionamento, gerando prejuízos econômicos imensuráveis.

Os sistemas de monitoramento que precedem ao GPA se limitam a fornecer variáveis de operação do motor, cabendo exclusivamente ao operador, receptor dos dados, a interpretação e tomada de decisão, baseado no histórico de operação da máquina e em sua experiência pessoal. Este sistema se mostra falho, evidentemente, devido às imprecisões inerentes a restrição do operador como o único responsável por diagnosticar a possível falha, tendo em vista a possibilidade estatística de múltiplas falhas ocorrerem ao mesmo tempo, podendo até mesmo, uma falha mascarar ou anular o efeito de outra, dificultando ainda mais a sua detecção. O método GPA avança nesse sentindo, pois, se propõem a fornecer, além do diagnóstico da falha, a medida corretiva a ser tomada e, tendo como base uma seleção

adequada de variáveis de operação a serem analisadas, múltiplas falhas ocorrendo simultaneamente serão identificadas e reportadas ao operador, se consolidando, dessa forma, como um método mais preciso e confiável.

Os êxitos logrados pelo dito método transcendem a proposta de melhoramento no monitoramento de parâmetros operativos de turbinas a gás e diagnóstico de suas falhas. Através do armazenamento dos valores coletados pelo sistema, referentes às variáveis dependentes predeterminadas, é possível criar uma base de dados que especificará as condições de operação ideal para aquele motor, a partir dessa biblioteca o computador poderá constatar desvios na operação da turbina a gás, partindo da comparação dos parâmetros de operação ideal com os produzidos ao longo da vida útil do motor. Além de fornecer a detecção de falhas, a partir dos desvios notados nos parâmetros de operação, o método poderá prever o momento ideal da realização de uma manutenção específica, pois, os dados coletados e processados são, posteriormente, colocados em gráficos em função do tempo com suas variáveis tendo limites de operação pré-determinados, permitindo assim, que sejam monitorados também, os danos cumulativos.

Em síntese, URBAN, (1973), propõe um método que ao coletar os dados de variáveis facilmente medidas pela instrumentação do motor, desencadeia uma série de processos que permite a detecção de alterações indesejadas tanto em variáveis independentes, quanto em variáveis que são difíceis de serem medidas como, por exemplo, temperatura de entrada na turbina, como mostra a figura 2. Após, a coleta dos dados eles são comparados com os dados de operação ideal do motor – que também são estabelecidos pelo método – e utilizados em uma matriz de inter-relação de parâmetros, que irá relacionar as variações aferidas com as possíveis alterações causadas. Posterior ao processamento de dados é realizado o armazenamento de informações e o aviso dos diagnósticos e medidas corretivas pertinentes.

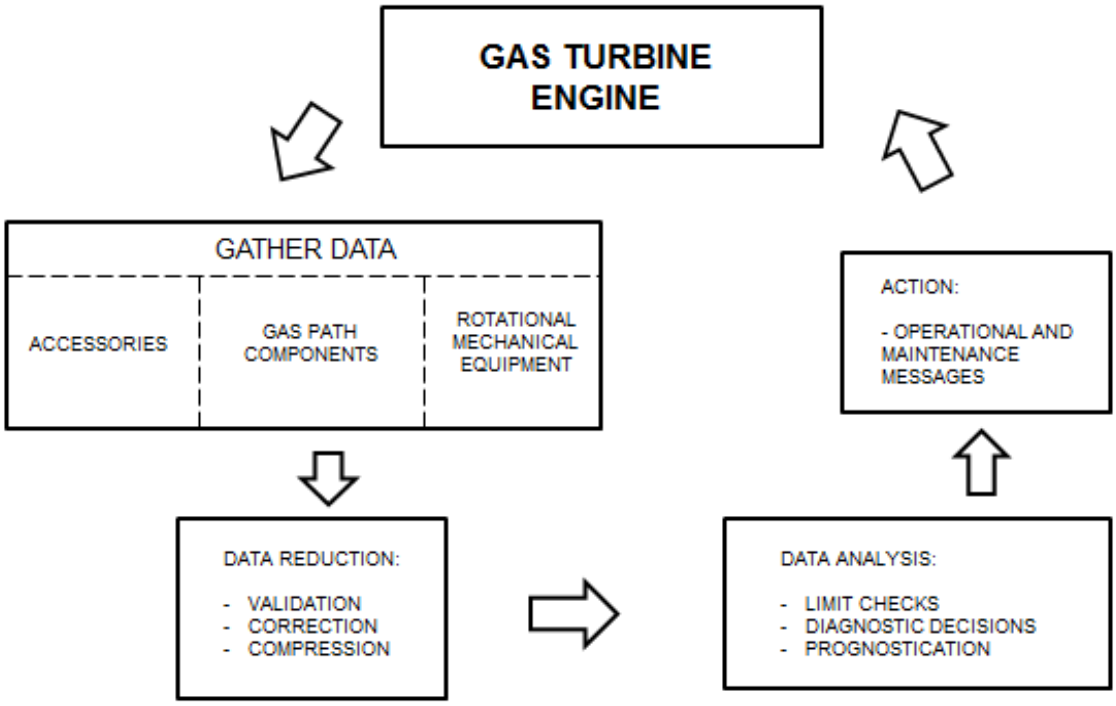

Figura 2: Objetivo do monitoramento de motores
Fonte: (URBAN, 1975)

A determinação da matriz de inter-relação de parâmetros é, indubitavelmente, o procedimento mais crítico do método, pois, será através desta que os parâmetros dependentes e independentes serão relacionados. Em concordância com (URBAN, 1975), para a determinação das possíveis falhas físicas do motor é necessário saber qual efeito mensurável está relacionado com o objeto de investigação. Quando ocorre algum dano estrutural no motor, os efeitos podem ser percebidos na degradação do desempenho de alguns componentes (variáveis independentes), porém, como a medida desta degradação é de difícil obtenção, esses efeitos serão relacionados às mudanças em parâmetros mensuráveis (variáveis dependentes), os quais podem ser obtidos através da instrumentação. Relacionando as variáveis dependentes com as variáveis independentes, através da matriz de inter-relação de parâmetros, os danos físicos poderão ser determinados, como mostra a figura 3.

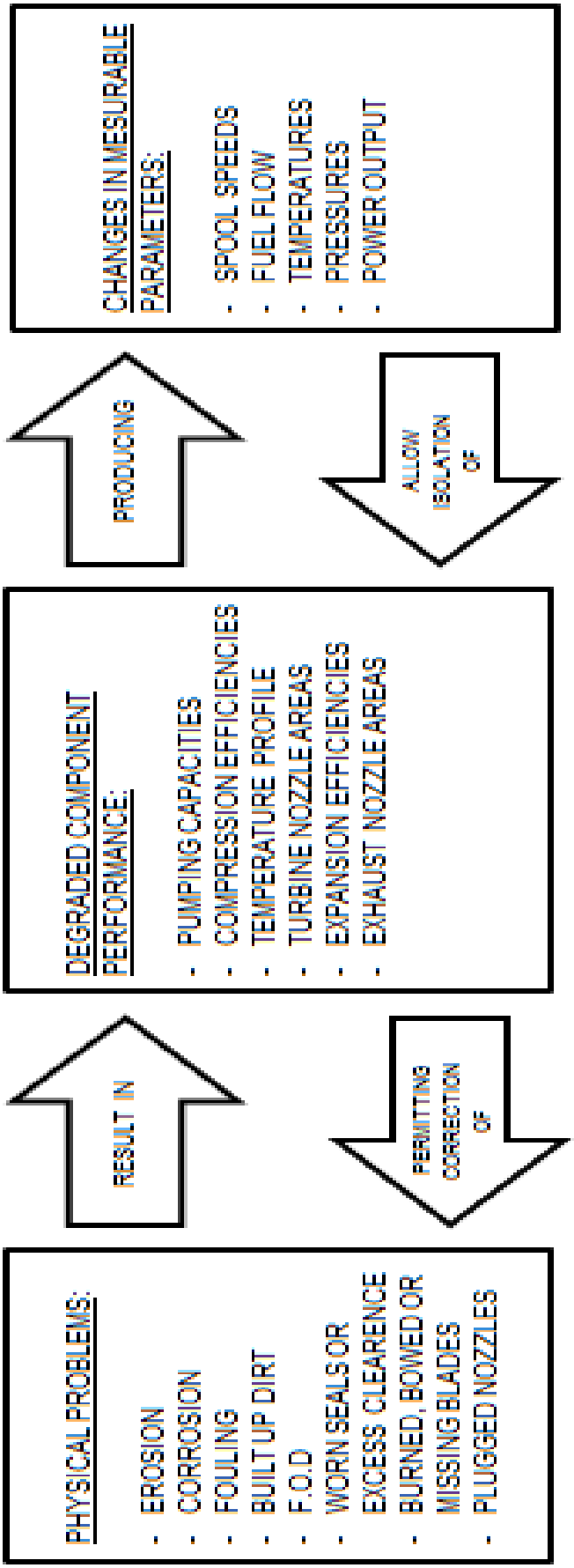

Figura 3: Abordagem de isolamento de múltiplas falhas
Fonte: (URBAN, 1973)

É de irrefragável relevância ressaltar a importância dos instrumentos de medição de parâmetros dependentes para o método. Essa ideia é destacada por (URBAN, 1975), quando este recobra que a necessidade de monitoramento e diagnósticos dos sistemas sempre se fez presente, estando esta, subordinada ao grau de evolução dos adequados mecanismos de aquisição e manipulação de dados. Embora os sistemas atuais para aferição de parâmetros encontrem-se substancialmente desenvolvidos, a determinação das margens de erros inerentes às medidas são de fundamental importância para assegurar a confiabilidade dos resultados determinados, o que também está previsto pelo método.

A versatilidade do método (GPA) também deve ser evidenciada, uma vez que, a matriz de inter-relação de parâmetros pode ser apropriadamente determinada para diversos tipos de motores, desde os mais simples, como as turbinas a gás de único eixo (single spool), até os mais complexos, como as turbinas a gás de eixo duplo (twin spool). As condições de operação de cada motor devem ser levadas em conta tanto no momento da determinação das variáveis a serem monitoradas quanto na adoção das suposições a cerca de sua condição de operação, de modo que as falhas investigadas possam ser adequadamente identificadas.

A análise termodinâmica proposta por (URBAN, 1973) permite a determinação de múltiplas falhas ocorrendo, ou não, concomitantemente no motor, de modo preciso e eficaz. Sua versatilidade e capacidade de prognosticar falhas faz do sistema um interessante instrumento de monitoramento que, atrelado a outros modos de diagnósticos como, por exemplo, análises vibracionais e mecânicas, proporciona um abrangente e essencial conhecimento da condição atual do motor.

2.3 – APLICAÇÕES DO MÉTODO GPA

O sucesso no método GPA é irrefragável tanto no ambiente acadêmico, sendo objeto de estudo de vários artigos, quanto no mercado comercial, sendo utilizado por grandes companhias aéreas como instrumento de monitoramento da saúde de motores. Um exemplo da abordagem acadêmica do programa é o artigo produzido por VOLPONI, (1982), o qual se propõe não apenas discorrer a respeito de problemas encontrados na aplicação do método, mas também, a sugerir soluções para contorná-los. Nesse artigo, é reforçado a necessidade de se construir um robusto sistema de diagnóstico utilizando uma combinação de ferramentas, as quais poderão fornecer análises de aspectos diversos, tais como: exames com boroscópio, radiografia, análises vibracionais, entre outras. Além disso, destaca-se a necessidade de

confiabilidade nas respostas obtidas, o que demanda um adequado método de tratamento dos erros encontrados nos parâmetros mensurados pelo método GPA.

Como dito anteriormente a respeito do método, a determinação das mudanças físicas ocorridas nos motores é resultante do tratamento matemático dado aos parâmetros mensuráveis, sendo assim, uma errônea aferição em alguma variável dependente pode implicar tanto em uma procrastinação inadequada na manutenção, quanto em uma intervenção desnecessária, gerando custos injustificáveis em ambos os casos. Para VOLPONI, (1982), a garantia da acurácia dos dados e a filtragem de ruídos de medição, são realizadas tendo a disposição ferramentas como: procedimentos para tratamentos de dados, algoritmos para isolamento de erros mensuráveis e softwares para interpretação de resultados fornecidos pelo sistema de diagnóstico. O tratamento dos erros pode ser realizado utilizando-se ferramentas de probabilidade, caso estejam disponíveis informações estatísticas a respeito da operação da máquina.

Os resultados satisfatórios alcançados utilizando-se o método GPA também motivou a aplicação da sua metodologia no desenvolvimento de programas computacionais. O programa DETEM (Deteriorated Turbine Engine Model), criado por GREWAL, (1988), traduz a aplicação da técnica ao calcular a degradação ocorrida nos módulos componentes do motor. Este programa prevê a exibição de gráficos, a entrada de dados pelo usuário e a possibilidade de comparação de dois diferentes tipos de operação ao mesmo tempo, o que o torna uma ferramenta atraente no diagnóstico de falhas em turbinas a gás. As operações podem ser simuladas no ponto de projeto, fora do ponto de projeto e em regime transiente, podendo ainda ser selecionada a condição do motor seja em operação ideal ou em estado de deterioração. A preocupação com a interferência dos erros nos resultados fornecidos também é tratada pelo autor, o qual incorpora ao programa, módulos sensores para que os sinais recebidos sejam filtrados de modo a garantir a acurácia nas informações, tornando-as condizentes com a situação real da turbina a gás.

Atualmente, os softwares existentes no mercado, que utilizam o método GPA, encontram-se no estado da arte, como ferramentas sofisticadas não só para determinação de falhas ocorridas nos motores como também para investigação das causas de tais falhas. O GPAL (RAZAK, 2013) é um desenvolvedor de softwares que oferece uma variedade de aplicativos voltados para o monitoramento das condições de operação dos sistemas. Os programas trazem soluções na redução de custos de operação de turbinas e gás e compressores, através do monitoramento de diversas variáveis como: desempenho de turbinas a gás, desempenho de compressores, sistemas de combustão, qualidade de combustível,

emissões das turbinas a gás e outros, sendo utilizados por empresas consagradas como, por exemplo, Rolls-Royce.

A figura 4 mostra a interface gráfica de um dos aplicativos comercialmente disponíveis na (RAZAK, 2013). Nela estão contidas informações referentes aos: valores de operação ideal da turbina (*Design Performace*) e valores de operação real da turbina (*Actual Performance*). A interface exibe ainda um esboço simplificado do motor com a numeração identificando os pontos onde os parâmetros estão sendo aferidos, permitindo assim, uma melhor compreensão das informações por parte do usuário do sistema.

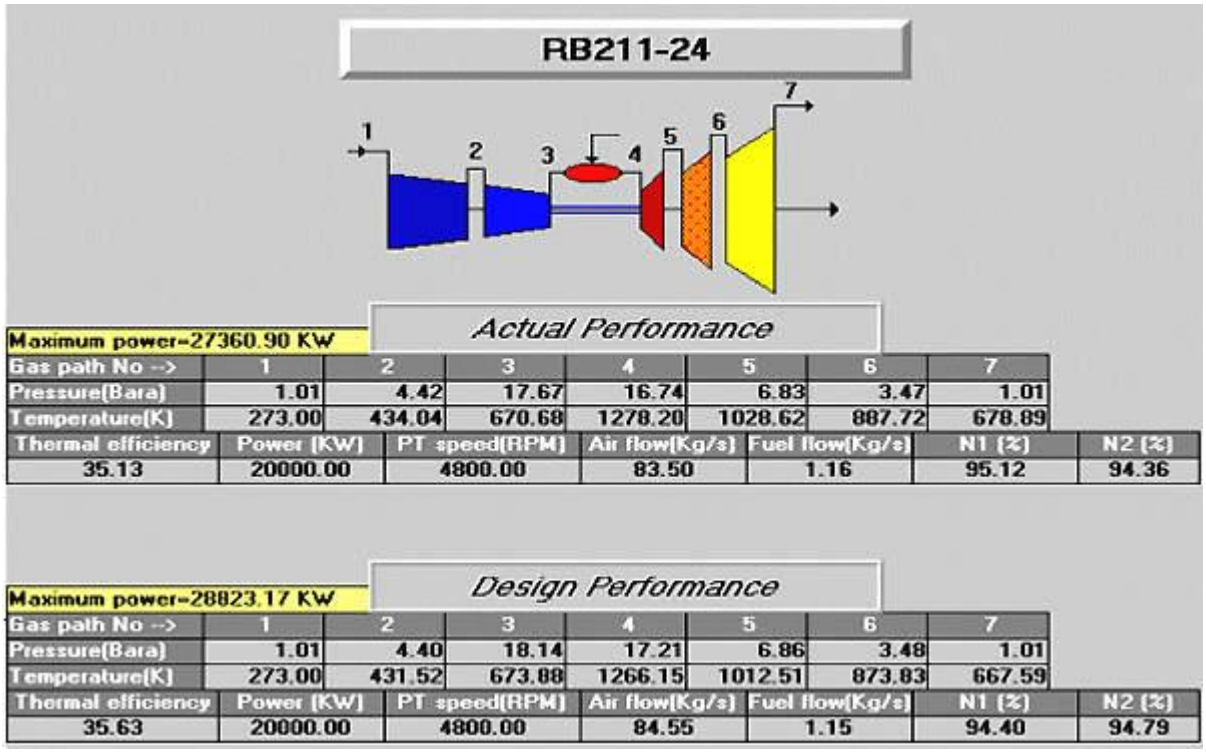

Figura 4: Interface gráfica para exibição de parâmetros, *XPGT3*
Fonte: (RAZAK, 2013)

O resultado do diagnóstico obtido a partir das informações exibidas na interface da figura 4 pode ser observado na figura 5. Nessa interface um esboço simplificado do motor é novamente exibido com setas na cor vermelha apontando para os módulos que apresentam desvios no seu desempenho. Os quadros à esquerda da figura trazem a identificação de cada módulo acompanhada da quantificação na queda do desempenho do respectivo módulo quando houver, como, por exemplo: mudança na eficiência do compressor de baixa pressão = - 1.2, ou seja, este módulo apresentou uma queda em sua eficiência em 1.2%. Os quadros representados na cor vermelha indicam componentes que apresentam variação em algum parâmetro e, portanto, demandam alguma ação corretiva do usuário, já os quadros na cor verde representam os componentes nos quais nenhuma modificação em relação à operação ideal foi modificada. As últimas duas linhas, (*Power loss e thermal efficieny loss*), trazem

informações referentes à operação global do sistema, ou seja, contabilizam as perdas ocorridas em todos os módulos. Por fim, o gráfico exibido no canto direito inferior representa graficamente os índices de degradação aferidos em cada módulo.

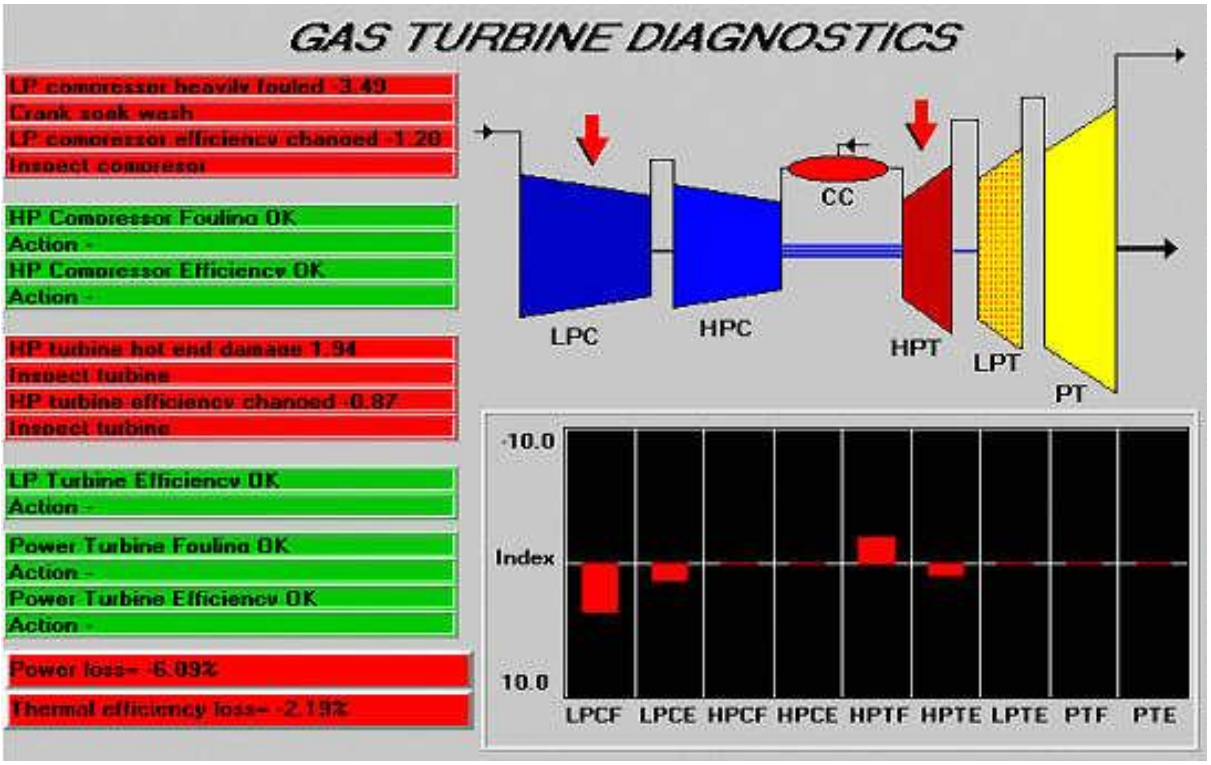

Figura 5: Interface gráfica para exibição de diagnósticos, *XPGT3*
Fonte: (RAZAK, 2013)

CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo oferece o completo entendimento da técnica a ser utilizada para obtenção dos resultados almejados, bem como, a apresentação detalhada do objeto de estudo definido, a turbina a gás.

3.1 – OBJETO DE ESTUDO: TURBINA A GÁS ALSTON GT11N2

As turbinas a gás GT11N2 fazem parte da família de turbinas a gás GT11N introduzidas no mercado em 1989 pelo grupo industrial francês Alstom. O número desses equipamentos operando atualmente ao redor do mundo soma-se em 60 unidades, sendo este modelo de turbina reconhecido por sua alta confiabilidade e disponibilidade, apto a operar em ambientes hostis, como por exemplo, ambientes com temperaturas que alcançam +50°C até ambientes com temperaturas de -40°C. As turbinas a gás GT11N2 são ainda conhecidas pela sua alta flexibilidade de operação devido a diversos fatores, são eles: flexibilidade na escolha do combustível a ser utilizado, sendo possível escolher entre três opções de sistemas de combustão, alta eficiência e baixa emissão de poluentes operando em cargas parciais e, excelentes condições para manutenção, sendo especialmente projetadas para facilitar inspeções por métodos como GPA, além de, uma construção robusta que aumenta os intervalos entre as vistorias periódicas.

Figura 6: Turbina a gás GT11N2
Fonte: (ALSTOM, 2007)

A turbina a gás que será o objeto de estudo opera em ciclo combinado, fornecendo gases de exaustão para a caldeira de recuperação que, por sua vez, alimenta a turbina a vapor e, cogeração, produzindo vapor e energia elétrica. Seu motor eixo único é composto por diversos módulos, sendo eles: um compressor com quatorze estágios de compressão, alcançando uma razão de pressões de 15,9:1, uma câmara de combustão modelo Dry Low NOx, alimentada com gás natural e, uma turbina composta por quatro estágios de expansão, cujas palhetas possuem, design especial para redução de perdas e refrigeração para as duas primeiras fases, conferindo uma alta eficiência. Abaixo encontra-se uma tabela fornecida pelo fabricante detalhando alguns dados de operação.

Fuel		Natural Gas
Frequency	Hz	60
Turbine speed	rpm	3,600
Gear		no
Gross electrical output	MW	115,4
Gross electrical efficiency	%	33.9
Gross heat rate	kJ/kWh	10,619
	Btu/kWh	10,066
Compressor pressure ratio		15.9 : 1
Exhaust gas flow	kg/s	400
	lb/s	882
Exhaust gas temperature	°C	526
	°F	979
Weight	tonnes	190
	lb	419,000
Dimensions (L x W x H)	m	9.4 x 5.5 x 10.1
	ft	31 x 18 x 33

Comments: Dual fuel burner option available, as well as combustor for low calorific gases (LBtu) such as blast furnace gases without need for enrichment.

Figura 7: Especificações técnicas GT11N2
Fonte: (ALSTOM, 2012)

3.2 – ADAPTAÇÕES NECESSÁRIAS NA APLICAÇÃO DO MÉTODO

Objetivando o maior esclarecimento possível em relação à técnica a ser utilizada no presente trabalho, para determinação de falhas ocorridas no motor anteriormente apresentado, é necessário que se faça algumas considerações.

O método *Gas Path Analysis*, idealizado por (URBAN, 1973), prevê a utilização de dispositivos eletrônicos para armazenamento de relações entre parâmetros termodinâmicos ao longo do tempo de operação da turbina a gás, visando à criação de uma biblioteca de dados que armazene informações que serão utilizadas para a realização do diagnóstico. Através da contínua aquisição de dados, realizada pelo sistema implementado, o algoritmo realizará uma comparação entre os parâmetros normais de operação, que estarão armazenados na biblioteca virtual, e os parâmetros calculados, aferindo, dentro de uma margem de erro, se a operação atende as expectativas ou não. Estando as variáveis atuando dentro da região esperada, nenhuma notificação é realizada e o programa armazenará está condição sem prescrever nenhum diagnóstico. Já a mensuração do comportamento anômalo de algum parâmetro, fará com que o sistema emita um alerta ao operador com recomendação de reparo em algum componente.

A criação de um algoritmo para processar o método aqui descrito, foge ao escopo do presente trabalho, sendo este processo demasiadamente complexo. Assim, é importante iterar que o objetivo desta obra limita-se apenas à aplicação da metodologia utilizada pela técnica para se verificar a degradação de uma turbina a gás em um determinado espaço de tempo. A criação de bibliotecas com modelos que representem a operação do motor investigado não está assim prevista, em função da ausência de dispositivos eletrônicos e algoritmos que executem esta operação.

Outra ressalva necessária concerne às limitações encontradas em relação aos dados de operação. O método proposto prevê a utilização dos dados do início de operação do motor como parâmetro ideal de funcionamento, utilizando também uma variável de referência para realizar a aquisição destes dados. Porém, os dados disponíveis não compreendem esta fase de operação e tampouco esclarecem sob qual variável termodinâmica de referência foram adquiridos, fazendo-se necessária uma adaptação. Sendo assim, a análise de desempenho será executada entre um determinado intervalo de tempo de acordo com os dados disponíveis, retratando dessa forma, a queda observada neste hiato.

É importante frisar a abordagem didática proposta pelo presente trabalho, cujo objetivo é o de possibilitar a aplicação de conceitos termodinâmicos na análise da operação real de um motor complexo como o de uma turbina a gás.

3.3 – ESTUDO DA TÉCNICA: CONSTRUÇÃO DO MODELO GPA

A aplicação do método GPA está sedimentada na utilização das relações existentes entre as diversas variáveis que descrevem as condições de operação de uma turbina a gás. Para entender melhor como o modelo é construído, e seu embasamento teórico, é necessário definir o conceito existente nas variáveis adotadas. Baseando-se nas definições efetuadas por (URBAN, 1973), entende-se por:

- Variável dependente: São os parâmetros físicos possíveis de serem mensurados. Seus valores absolutos ou mudanças estão relacionados com valores absolutos ou mudanças de variáveis independentes. Exemplos: potência de saída, temperaturas, pressões, taxa de vazão de combustível e velocidades do rotor.
- Variável independente: São parâmetros termodinâmicos, cujos valores absolutos ou mudanças estão relacionados com o projeto mecânico e construção do motor, ou alteração destes. Exemplos: taxa de vazão de ar, eficiência dos componentes, áreas efetivas dos bocais da turbina e áreas de exaustão do motor.

As relações existentes entre as variáveis dependentes e as variáveis independentes serão descritas por um conjunto de equações diferenciais, cujos coeficientes obtidos constituem a matriz de inter-relação de parâmetros, o principal instrumento de determinação de falhas. O primeiro passo na construção da matriz será a escolha das variáveis a serem analisadas. Esse procedimento deve levar em consideração as variáveis de operação que estão disponíveis para o uso, bem como os efeitos observados pela alteração desses variáveis, cujo conhecimento seja de interesse na operação de uma turbina a gás em uma usina termoelétrica. Com a seleção de parâmetros realizada, inicia-se a determinação da relação entre essas variáveis.

Os coeficientes que relacionam os parâmetros entre si são, segundo (URBAN, 1975), resultados da adequada manipulação de diferentes formas de equações termodinâmicas básicas, relativas a cada ciclo particular para cada motor específico. Ao utilizar essas relações devem ser considerados diversos fatores, como, conservação de massa e energia, balanço de forças entre componentes motrizes e movidos, elevações de pressão, falhas de continuidade, mapas de desempenho para o perfil específico de cada componente, coeficiente de vazão do bocal, entre outros. A complexidade inerente a essas equações fazem com que a análise dessas fuja do escopo desta obra, fazendo com que a determinação dos coeficientes da matriz seja adequadamente realizada utilizando-se o programa DESTUR, (ALVES, 2003), software específico para cálculo do desempenho de turbinas a gás, no ponto de projeto e fora do ponto de projeto. Através deste programa o motor da turbina a gás Alston GT11N2 será modelado em função dos seus parâmetros de operação, o que permitirá avaliar a relação entre as variáveis dependentes e as variáveis independentes. O procedimento utilizado no processo está descrito por (VOLPONI, 1982), o qual propõe a observação da variação percentual de um conjunto de variáveis em função de uma pré-determinada variação percentual em outra. Por exemplo, alterar em 1% o valor da eficiência de um ventilador e observar a variação percentual que esta alteração irá produzir na velocidade do ventilador, na vazão de combustível, na tração, entre outros. O resultado final obtido com esse procedimento é uma matriz que descreve o relacionamento entre todas as variáveis escolhidas, de acordo com os coeficientes que explicitam a porcentagem dessa variação. A tabela 1 é um exemplo de matriz de inter-relação de parâmetros de um típico motor de turbina a gás de eixo único livre.

Tabela 1: “Típico motor de turbina a gás de eixo único livre – matriz de inter-relação de parâmetros”

	ΔT_{5C1}	ΔN_{1C1}	W_{aB1}	$\Delta\tau_1$	$\Delta\eta_C$	ΔA_5	$\Delta\eta_t$	$\Delta\eta_{PT}$
ΔT_{5C1}	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ΔN_{1C1}	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$\Delta\tau_1^{Inlet}$	-0.04	3.24	-0.10	0.90	0.01	0.09	0.00	0.00
ΔT_{3C1}	0.13	1.09	0.29	0.29	-0.57	-0.26	0.00	0.00
$\Delta P_3/P_1$	0.41	3.30	0.92	0.92	-0.03	-0.82	0.00	0.00
ΔW_{fC1}	2.01	2.10	0.60	0.60	0.60	0.36	0.00	0.00
ΔT_{7C1}	1.32	-0.72	0.18	-0.19	0.38	0.17	0.00	0.00
$\Delta P_7/P_1$	2.11	-0.26	1.79	0.02	1.84	-0.08	1.81	0.00
ΔA_7	-1.53	3.15	-0.82	0.83	-1.67	0.26	-1.84	0.00
ΔSHP_{C1}	3.33	2.10	2.67	0.64	2.06	0.21	1.60	1.00
ΔT_{9C1}	0.91	-0.65	-0.16	-0.18	0.02	0.19	0.36	-0.23

Fonte: (URBAN, 1975)

Segue abaixo, para maior esclarecimento do leitor, a numeração que identifica cada estágio do motor:

1 – Entrada do compressor

3 – Saída do compressor

5 – Câmara de combustão

7 – Entrada da turbina

9 – Bocal de exaustão da turbina

Algumas observações são de extrema importância em relação à construção da matriz de inter-relação de parâmetros. Seja esta matriz a representação de um conjunto de equações diferenciais, através de seus coeficientes, é fundamental, para que esta seja possível e determinada, que o número de variáveis desconhecidas, objeto de investigação, seja o mesmo que o número de variáveis conhecidas. Assim sendo, as possibilidades de mensuração de danos no motor encontra-se diretamente limitada pela instrumentação utilizada neste para a aferição de parâmetros. Outra importante consideração faz-se em função da magnitude encontrada nos coeficientes que relacionam duas variáveis. Observando a tabela 1 é possível concluir que a maioria dos coeficientes calculados para esta matriz encontram-se em valores menores do que um, atingindo, no máximo valores em torno de três. Uma eficiente matriz de inter-relação de parâmetros está obrigatoriamente condicionada a relacionar as variáveis utilizadas através de baixos coeficientes, pois, sendo os parâmetros relacionados por

coeficientes altos, da ordem de dez por cento, por exemplo, infere-se que a sensibilidade entre os dois parâmetros é demasiadamente alta, não sendo, dessa forma, interessante mantê-los como um instrumento de investigação, sob pena das falhas serem excessivamente maximizadas.

3.4 – ANÁLISE DE INTEGRIDADE DO MOTOR UTILIZANDO O MODELO GPA

Com a matriz, anteriormente descrita determinada, o próximo procedimento a ser realizado será a solução do conjunto de equações composto por dados coletados e coeficientes da matriz.

O primeiro procedimento a ser feito nesta etapa será a coleta de dados referentes às variáveis dependentes do motor, ou seja, aquelas que podem ser aferidas por instrumentação adequada. No procedimento real, idealizado pelo autor, a primeira coleta de dados deve ser realizada nas primeiras horas de operação da turbina a gás, para que este seja considerado o conjunto ideal de parâmetros de operação. O segundo conjunto de dados, referentes às mesmas variáveis que o primeiro, é tomado após um determinado período de operação como, por exemplo, após mil horas. Esses dois conjuntos de dados serão utilizados para computar as variações ocorridas nestes parâmetros durante o período de operação determinado. Porém, como dito anteriormente, devido às impossibilidades de captação desses dados nas condições ideais, serão utilizados, na presente obra, os dados referentes a um período de operação que não terá relação com a instalação da turbina a gás. Sendo assim, a análise aqui executada será útil na avaliação da deterioração do motor apenas no intervalo de tempo relativo à tomada de dados como, por exemplo, seis meses. A tabela abaixo trás um exemplo disponibilizado por (URBAN, 1973), para ilustrar a tomada de dados de variáveis dependentes entre um determinado intervalo de tempo.

Tabela 2: Dados de operação de um motor simples turbojato eixo único

Dependent Variable	Newly Installed	After 1000 hours
$\boldsymbol{N/\sqrt{\theta_2}}$	100%	100%
$\boldsymbol{T_3/\theta_2}$	1075	1086
$\boldsymbol{P_3/P_2}$	10.00	9.81
$\boldsymbol{W_f/\delta 2\sqrt{\theta_2}}$	100%	105.3%
$\boldsymbol{T_5/\theta}$	1680	1764
$\boldsymbol{P_5/P_2}$	3.10	3.06

Fonte: (URBAN,1973)

As mudanças nas variáveis dependentes serão computadas pela seguinte expressão genérica utilizada por (URBAN, 1973):

$$Mudança\ na\ Variável\ Dependente = \frac{(Dado\ após\ referência - Dado\ de\ referência)}{Dado\ de\ referência} \quad (1)$$

Após o cálculo das mudanças ocorridas em todas as variáveis dependentes da matriz, ou seja, as variáveis da primeira coluna à esquerda, o conjunto de equações diferenciais poderá ser resolvido. Cada linha da matriz de inter-relação de parâmetros é uma equação diferencial, portanto, a estrutura de cada equação será dada pela soma aritmética dos produtos obtidos pela multiplicação dos coeficientes da matriz vezes as mudanças nas variáveis independentes, que se encontram na primeira linha da matriz. Para ilustrar esse procedimento observe abaixo a tabela de coeficientes disponibilizada por (URBAN,1973).

Tabela 3: Matriz de inter-relação de parâmetros de um motor simples turbojato eixo único

	$\frac{\partial T_4/\theta_2}{T_4/\theta_2}$	$\frac{\partial N/\sqrt{\theta_2}}{N/\sqrt{\theta_2}}$	$\frac{\partial W_{ac2}}{W_{ac2}}$	$\frac{\partial \eta_c}{\eta_c}$	$\frac{\partial A_4}{A_4}$	$\frac{\partial \eta_t}{\eta_t}$
$\frac{\partial T_3/\theta_2}{T_3/\theta_2}$	0.17	0.67	0.33	-0.55	-0.33	0.00
$\frac{\partial P_3/P_2}{P_3/P_2}$	0.50	2.00	1.00	0.00	-1.00	0.00
$\frac{\partial W_f/\partial_2\sqrt{\theta_2}}{W_f/\partial_2\sqrt{\theta_2}}$	1.81	1.36	0.68	0.53	0.32	0.00
$\frac{\partial T_5/\theta_2}{T_5/\theta_2}$	1.25	-0.43	-0.21	0.36	0.21	0.00
$\frac{\partial P_5/P_2}{P_5/P_2}$	1.50	0.28	0.14	1.43	-0.14	1.43
$\frac{\partial A_n}{A_n}$	-0.86	1.50	0.75	-1.25	0.25	-1.43

Fonte: (URBAN, 1973)

Esta tabela nos oferece os coeficientes que relacionam as variáveis dependentes e as variáveis independentes que foram selecionadas para analisar o estado de deterioração desta turbina a gás. Os dados relativos às variáveis dependentes foram exibidos na tabela 2 e, utilizando a expressão (1) para tratar estes dados, é possível computar as mudanças ocorridas nestas variáveis. O conjunto de equações diferenciais obtidos aplicando-se a técnica mencionada anteriormente será, de acordo com (URBAN,1973):

$$\frac{\partial T_3/\theta_2}{T_3/\theta_2} = 0.17\frac{\partial T_4/\theta_2}{T_4/\theta_2} + 0.67(0) + 0.33\frac{\partial W_{ac2}}{W_{ac2}} - 0.55\frac{\partial \eta_c}{\eta_c} - 0.33\frac{\partial A_4}{A_4} + 0\frac{\partial \eta_t}{\eta_t}$$
$$= +0.010 \quad (2)$$

$$\frac{\partial P_3/P_2}{P_3/P_2} = 0.50\frac{\partial T_4/\theta_2}{T_4/\theta_2} + 2.00(0) + 1.00\frac{\partial W_{ac2}}{W_{ac2}} + 0\frac{\partial \eta_c}{\eta_c} - 1.00\frac{\partial A_4}{A_4} + 0\frac{\partial \eta_t}{\eta_t}$$
$$= -0.019 \quad (3)$$

$$\frac{\partial W_f/\partial_2\sqrt{\theta_2}}{W_f/\partial_2\sqrt{\theta_2}} = 1.81\frac{\partial T_4/\theta_2}{T_4/\theta_2} + 1.36(0) + 0.68\frac{\partial W_{ac2}}{W_{ac2}} + 0.53\frac{\partial \eta_c}{\eta_c} + 0.32\frac{\partial A_4}{A_4} + 0\frac{\partial \eta_t}{\eta_t}$$
$$= +0.053 \quad (4)$$

$$\frac{\partial T_5/\theta_2}{T_5/\theta_2} = 1.25\frac{\boldsymbol{\partial T_4/\theta_2}}{\boldsymbol{T_4/\theta_2}} - 0.43(0) - 0.21\frac{\boldsymbol{\partial W_{ac2}}}{\boldsymbol{W_{ac2}}} + 0.36\frac{\boldsymbol{\partial \eta_c}}{\boldsymbol{\eta_c}} + 0.21\frac{\boldsymbol{\partial A_4}}{\boldsymbol{A_4}} + 0\frac{\boldsymbol{\partial \eta_t}}{\boldsymbol{\eta_t}}$$
$$= +0.050 \quad (5)$$

$$\frac{\partial P_5/P_2}{P_5/P_2} = 1.50\frac{\boldsymbol{\partial T_4/\theta_2}}{\boldsymbol{T_4/\theta_2}} + 0.28(0) + 0.14\frac{\boldsymbol{\partial W_{ac2}}}{\boldsymbol{W_{ac2}}} + 1.43\frac{\boldsymbol{\partial \eta_c}}{\boldsymbol{\eta_c}} - 0.14\frac{\boldsymbol{\partial A_4}}{\boldsymbol{A_4}} + 1.43\frac{\boldsymbol{\partial \eta_t}}{\boldsymbol{\eta_t}}$$
$$= -0.013 \quad (6)$$

O conjunto de cinco equações acima, de (2) a (6), possibilita a determinação das mudanças ocorridas nas variáveis independentes, pois, respeita a requisição do número de variáveis conhecidas igual ao número de variáveis desconhecidas. Assim, o sistema acima pode ser solucionado por qualquer método matemático pertinente à solução de sistemas, sendo que, nesta obra, será utilizado o software EXCEL para obtenção dos resultados.

3.5 – DIAGNÓSTICO DE FALHAS

Utilizando qualquer método matemático conhecido para determinação de resultados de sistemas possíveis e determinado, serão obtidas, segundo (URBAN,1973), os seguintes valores como soluções para as variáveis independentes das equações de (2) a (6):

$$\frac{\boldsymbol{\partial T_4/\theta_2}}{\boldsymbol{T_4/\theta_2}} = +0.042$$

A temperatura de entrada na turbina sofreu um acréscimo de 4.2%.

$$\frac{\boldsymbol{\partial W_{ac2}}}{\boldsymbol{W_{ac2}}} = -0.02$$

A capacidade de compressão de ar do compressor apresenta uma queda de 2%.

$$\frac{\boldsymbol{\partial \eta_c}}{\boldsymbol{\eta_c}} = -0.03$$

Observa-se um decréscimo de 3% na eficiência do compressor.

$$\frac{\boldsymbol{\partial A_4}}{\boldsymbol{A_4}} = +0.02$$

A área do bocal de entrada da turbina apresenta um ganho de 2%.

$$\frac{\boldsymbol{\partial \eta_t}}{\boldsymbol{\eta_t}} = -0.02$$

A eficiência da turbina sofreu um decréscimo de 2%.

A tabela 3 ainda nos oferece uma última equação:

$$\frac{\partial A_n}{A_n} = -0.86\frac{\boldsymbol{\partial T_4/\theta_2}}{\boldsymbol{T_4/\theta_2}} + 1.50(0) + 0.75\frac{\boldsymbol{\partial W_{ac2}}}{\boldsymbol{W_{ac2}}} - 1.25\frac{\boldsymbol{\partial \eta_c}}{\boldsymbol{\eta_c}} + 0.25\frac{\boldsymbol{\partial A_4}}{\boldsymbol{A_4}} - 1.43\frac{\boldsymbol{\partial \eta_t}}{\boldsymbol{\eta_t}} \quad (7)$$

De posse dos resultados anteriormente obtidos é possível encontrar o valor para a única variável dependente, cujo valor não pôde ser aferido por instrumentação. Substituindo os valores, em acordo com (URBAN,1973), segue que:

$$\frac{\partial A_n}{A_n} = -0.86(0.042) + 1.50(0) + 0.75(-0.02) - 1.25(-0.03) + 0.25(0.02) - 1.43(-0.02) = +0.02$$

É possível concluir, com base nos resultados acima, que a área efetiva do bocal de exaustão da turbina sofreu um acréscimo de 2%. O procedimento que segue a mensuração das mudanças nas variáveis independentes será a comparação dos valores, obtidos com a solução das equações diferenciais, com as tolerâncias adotadas em relação a cada parâmetro. Por exemplo, se a variação percentual da área efetiva do bocal de exaustão da turbina extrapolou os limites adotados para este parâmetro será necessário informar ao operador do motor que este componente demanda manutenção. Essa prática é iterada para todos os parâmetros analisados, permitindo uma operação do motor, segura e eficiente.

A previsão de armazenamento das mudanças nas variáveis independentes em função do tempo permite, não apenas o diagnóstico precoce de anomalias na operação como também, uma estimativa da velocidade com que uma degradação específica está ocorrendo em algum componente, através da extrapolação do comportamento da curva. Esses resultados confirmam o método *Gas Path Analysis* como um poderoso instrumento de monitoramento da integridade de motores compostos por turbinas a gás, fazendo com que sua implantação em usinas termoelétricas seja de indiscutível relevância.

3.6 – ESTIMATIVA DE ERROS

A estimativa dos erros inerentes à aplicação do método discutido é um procedimento crítico e fundamental para assegurar a eficácia da técnica aplicada. Como dito anteriormente, no capítulo 2, muitos trabalhos acadêmicos se dedicaram à abordagem da estimativa de erros para o presente método, dada a relevância da questão. Os procedimentos previstos demandam sofisticados sistemas para análise de dados captados, fazendo uso de complexos algoritmos para aplicação de métodos estatísticos, visando estimar os erros cometidos pela análise.

O presente trabalho lida com restrições do sistema de captação de dados, como já mencionado, não tendo à disposição um histórico de operação do motor, o que torna absolutamente ínvio a determinação de qualquer padrão de desvio. Além disso, a complexidade na determinação de algoritmos e modelos matemáticos para estimativa de erros foge à complexidade demandada pela graduação.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ao longo do presente capítulo serão mostrados os resultados obtidos em todas as etapas de aplicação do método, desde a criação da matriz de inter-relação de parâmetros até a obtenção da avaliação quantitativa das variáveis da turbina. De posse dos resultados, será possível analisar os números obtidos, discutindo o estado de deterioração do motor.

4.1 – MATRIZ DE INTER-RELAÇÃO DE PARÂMETROS

A primeira etapa na determinação da matriz de inter-relação de parâmetros consiste na escolha dos parâmetros dependentes e independentes que serão utilizados para construção teórica do motor. Foram escolhidos cinco parâmetros dependentes e independentes, obedecendo a exigência prevista pelo método. Os parâmetros dependentes escolhidos, ou seja, aqueles que estão sendo aferidos no motor por instrumentos de medição, estão descritos na tabela 4.

Tabela 4: Variáveis dependentes selecionadas

Variável	Símbolo	Descrição
1	TAT	Temperatura dos gases de escape
2	P_{comp}	Pressão de saída do compressor
3	T_{comp}	Temperatura de saída do compressor
4	M_{comb}	Consumo de combustível
5	Pot	Potência

Os parâmetros independentes escolhidos para serem analisados, ou seja, aqueles que sofrerão alteração ao longo da operação da turbina a gás, estão descritos na tabela 5.

Tabela 5: Variáveis independentes selecionadas

Variável	Símbolo	Descrição
1	ΔP_{entr}	Variação de pressão na entrada do compressor
2	$\Delta \eta_{comp}$	Variação na eficiência do compressor
3	$\Delta \eta_{comb}$	Variação na eficiência da combustão
4	$\Delta \eta_{turb}$	Variação na eficiência da turbina
5	ΔP_{boca}	Variação de contra pressão na saída do motor

Utilizando o programa DESTUR, (ALVES, 2003), com a turbina a gás GT11N2 devidamente modelada, os coeficientes da matriz de inter-relação de parâmetros serão determinados utilizando o método anteriormente descrito no capítulo 3. Incialmente serão computados no ponto de projeto do motor os valores de cada variável dependente escolhida. Após a aferição desses valores uma variável independente sofrerá um acréscimo ou decréscimo de 1% em seu valor no ponto de projeto e novamente o programa será executado para verificar a modificação ocorrida em todos os valores das variáveis dependentes. A variação de pressão na entrada do compressor será computada alterando-se a perda de pressão na entrada do motor. As eficiências do compressor, combustão e turbina serão modificadas utilizando-se os fatores de escala para cada uma, objetivando manter a correspondência com os mapas que descrevem o motor mesmo após a variação. A contra pressão na saída do motor será modificada em função da variação da área do bocal de saída da turbina, uma vez que a pressão de saída da turbina e entrada da caldeira não pode ser diretamente modificada no programa. De posse desses novos valores, é possível computar a diferença percentual entre os resultados obtidos para as variáveis dependentes, essa diferença percentual, que será calculada pela expressão (1). O coeficiente da matriz de inter-relação de parâmetros que relaciona a variável dependente com a variável independente será resultado da razão entre a diferença percentual dos parâmetros dependentes e a diferença percentual do parâmetro independente modificado. Para a variação de pressão na entrada do motor a diferença percentual do parâmetro independente será a queda na pressão de entrada. Para as eficiências essa diferença percentual será aferida pelo rendimento isentrópico do parâmetro. E para a variação de contra pressão na saída do motor essa diferença é obtida em função da pressão de saída do motor. Esse procedimento será reiterado para todas as variáveis independentes, possibilitando a construção completa da matriz. Os coeficientes obtidos com a variação em cada parâmetro independente são mostrados nas tabelas abaixo bem como as diferenças percentuais desses

coeficientes, obtidos através do DESTUR. Os valores encontram-se arredondados com duas casas decimais para fins de simplificação e uniformidade, pois, o programa exibe apenas cinco algarismos significativos em notação científica. As operações, no entanto, foram feitas com todas as casas decimais exibidas pelo programa, o que justifica a diferença obtida mesmo entre os valores iguais. Os coeficientes finais são mostrados com cinco casas decimais para aumentar a precisão dos resultados obtidos a partir da matriz.

- Variação de Pressão na Entrada do Compressor:

$$Diferença\ Percentual\ do\ Parâmetro\ Independente = \frac{0.00505 - 0.005}{0.005} = 0.01000\ (8)$$

Tabela 6: Cálculo dos coeficientes para Pressão na Entrada do Compressor

Acréscimo de 1% no valor da Perda de Pressão na Entrada do Compressor (P_{entr})				
Variável Dependente	**Valor Original**	**Valor Modificado**	**Diferença Percentual**	**Razão entre as Diferenças Percentuais**
TAT (K)	810.80	810.79	-0.0000123	-0.00123
P_{comp} (ATM)	14.75	14.74	-0.0000678	-0.00678
T_{comp} (K)	670.98	670.98	0.0000000	-0.00000
M_{comb} (kg/s)	7.17	7.17	-0.0000418	-0.00418
Pot (W)	106100000.00	106090000.00	-0.0000943	-0.00943

- Variação na Eficiência do Compressor:

$$Diferença\ Percentual\ do\ Parâmetro\ Independente = \frac{0.8786 - 0.8874}{0.8874}$$
$$= -0.00992\ (9)$$

Tabela 7: Cálculo dos coeficientes para Eficiência do Compressor

Decréscimo de 1% no valor da Eficiência do Compressor ($\Delta\eta_{comp}$)				
Variável Dependente	**Valor Original**	**Valor Modificado**	**Diferença Percentual**	**Razão entre as Diferenças Percentuais**
TAT (K)	810.80	810.77	-0.0000370	0.00373
$\boldsymbol{P_{comp}}$ **(ATM)**	14.75	14.75	0.0000000	0.00000
$\boldsymbol{T_{comp}}$ **(K)**	670.98	674.60	0.0053951	-0.54405
$\boldsymbol{M_{comb}}$ **(kg/s)**	7.17	7.13	-0.0049372	0.49787
Pot (W)	106100000.00	104570000	-0.0144203	1.45416

- Variação na Eficiência da Combustão:

$$Diferença\ Percentual\ do\ Parâmetro\ Independente = \frac{0.9336 - 0.9429}{0.9429}$$
$$= -0.00986\ (10)$$

Tabela 8: Cálculo dos coeficientes para Eficiência da Combustão

Decréscimo de 1% no valor da Eficiência da Combustão ($\Delta\eta_{comb}$)				
Variável Dependente	**Valor Original**	**Valor Modificado**	**Diferença Percentual**	**Razão entre as Diferenças Percentuais**
TAT (K)	810.80	810.81	0.0000123	-0.00125
$\boldsymbol{P_{comp}}$ **(ATM)**	14.75	14.75	0.0002034	-0.02063
$\boldsymbol{T_{comp}}$ **(K)**	670.98	671.05	0.0001043	-0.01058
$\boldsymbol{M_{comb}}$ **(kg/s)**	7.17	7.24	0.0099022	-1.00396
Pot (W)	106100000.00	106180000.00	0.0007540	-0.07645

- Variação na Eficiência da Turbina:

$$Diferença\ Percentual\ do\ Parâmetro\ Independente = \frac{0.845 - 0.853}{0.853}$$
$$= -0.00938\ (11)$$

Tabela 9: Cálculo dos coeficientes para Eficiência da Turbina

Decréscimo de 1% no valor da Eficiência da Turbina ($\Delta\eta_{turb}$)				
Variável Dependente	**Valor Original**	**Valor Modificado**	**Diferença Percentual**	**Razão entre as Diferenças Percentuais**
TAT (K)	810.80	816.66	0.0072274	-0.77062
$\boldsymbol{P_{comp}}$ **(ATM)**	14.75	14.73	-0.0007459	0.07954
$\boldsymbol{T_{comp}}$ **(K)**	670.98	670.76	-0.0003279	0.03496
$\boldsymbol{M_{comb}}$ **(kg/s)**	7.17	7.17	0.0003068	-0.03272
Pot (W)	106100000.00	103600000.00	-0.0235627	2.51237

- Variação de Contra Pressão na Saída do Motor:

$$Diferença\ Percentual\ do\ Parâmetro\ Independente = \frac{1.03631 - 1.02600}{1.02600}$$
$$= -0.01005\ (12)$$

Tabela 10: Cálculo dos coeficientes para Contra Pressão na Saída do Motor

Acréscimo de 1% no valor da Contra Pressão na Saída do Motor (ΔP_{boca})				
Variável Dependente	**Valor Original**	**Valor Modificado**	**Diferença Percentual**	**Razão entre as Diferenças Percentuais**
TAT (K)	810.80	812.89	0.0025777	0.25652
$\boldsymbol{P_{comp}}$ **(ATM)**	14.75	14.74	-0.0002713	-0.02699
$\boldsymbol{T_{comp}}$ **(K)**	670.98	670.90	-0.0001192	-0.01187
$\boldsymbol{M_{comb}}$ **(kg/s)**	7.17	7.17	0.0001116	0.01110
Pot (W)	106100000.00	105210000	-0.0083883	-0.83476

O detalhamento do procedimento de modelagem da turbina encontram-se no ANEXO 1. Organizando os coeficientes anteriormente calculados, obtemos a matriz de inter-relação de parâmetros descrita na tabela 11.

Tabela 11: Matriz de inter-relação de parâmetros

	$\frac{(\partial P_{entr}/\delta)}{(P_{entr}/\delta)}$	$\frac{\partial \eta_{comp}}{\eta_{comp}}$	$\frac{\partial \eta_{comb}}{\eta_{comb}}$	$\frac{\partial \eta_{turb}}{\eta_{turb}}$	$\frac{(\partial P_{boca}/\delta)}{(P_{boca}/\delta)}$
$\frac{(\partial TAT/\theta)}{(TAT/\theta)}$	-0.00123	0.003731	-0.00125	-0.77062	0.25652
$\frac{(\partial P_{comp}/\delta)}{(P_{comp}/\delta)}$	-0.00678	0.00000	-0.02063	0.07954	-0.02699
$\frac{(\partial T_{comp}/\theta)}{(T_{comp}/\theta)}$	0.00000	-0.54405	-0.01058	0.03496	-0.01187
$\frac{(\partial M_{comb}/(\delta\sqrt{\theta}))}{(M_{comb}/(\delta\sqrt{\theta}))}$	-0.00418	0.49787	-1.00396	-0.03272	0.01110
$\frac{(\partial Pot/(\delta\sqrt{\theta}))}{(Pot/(\delta\sqrt{\theta}))}$	-0.00943	1.45416	-0.07645	2.51237	-0.83476

Os parâmetros dependentes e independentes estão escritos com as correções pertinentes a cada variável, (FLETCHER). O parâmetro de correção para temperatura é dado por:

$$\theta = \frac{T_{entr}}{288.150} \qquad (13)$$

Sendo (T_{entr}) a temperatura ambiente em kelvins (K) aferida no momento da tomada de dados. O parâmetro de correção para pressão é dado por:

$$\delta = \frac{P_{entr}}{101.325} \qquad (14)$$

Na equação (14) o termo (P_{entr}) representa a pressão ambiente expressa em kilopascal (kPa) aferida no momento da tomada de dados. Os parâmetros expressos nas equações (13) e (14) estão de acordo com os valores requeridos pela condição ISA para condições estáticas ao nível do mar.

O ANEXO 2 contém o detalhamento e os resultados obtidos na validação da matriz de inter-relação de parâmetros aqui determinada.

4.2 – DADOS DE OPERAÇÃO DO MOTOR

Como dito anteriormente, não estão disponíveis dados de operação do motor analisado correspondentes as suas primeiras horas de operação. Sendo assim, é necessária uma adaptação do método arbitrando os valores de referência como os valores de operação mais antigos. Foram usados, como valores para as variáveis dependentes, dados coletados no dia 22 de julho de 2013, usados como os dados de referência, e dados coletados no dia 30 de abril de 2014. Ambos os conjuntos de informações foram tomados segundo a segundo durante dez minutos de operação da turbina, porém, em horários distintos. Todos os valores das variáveis dependentes necessitam ser corrigidos pelos valores calculados nas equações (8) e (9), de acordo com as condições no momento da tomada de dados.

Para os parâmetros coletados no dia 22 de julho de 2013 têm-se as seguintes correções:

$$\theta_1 = \frac{T_{entr}}{288.150} = \frac{294.390}{288.150} = 1.022$$

$$\delta_1 = \frac{P_{entr}}{101.325} = \frac{101.361}{101.325} = 1.000$$

A tabela abaixo exibe tanto os valores coletados no referido dia bem como sua correção. Os parâmetros constantes adotados para tomada de dados foram a rotação da turbina ($N = 3600.172$ rpm) e a temperatura de entrada da turbina ($TIT = 1358.160\ K$). As variáveis com índice 1 representa os dados de referência.

Tabela 12: Dados de referência coletados, dia 22/07/2013

Dado Coletado		Dado Corrigido	
Parâmetro	**Valor Coletado**	**Correção**	**Valor Corrigido**
$\boldsymbol{TAT_1}$ (K)	810.770	$\boldsymbol{TAT_1/\theta_1}$ **(K)**	793.317
$\boldsymbol{P_{comp1}}$ (Bar)	13.750	$\boldsymbol{P_{comp1}/\delta_1}$ **(Bar)**	13.750
$\boldsymbol{T_{comp1}}$ (K)	671.282	$\boldsymbol{T_{comp1}/\theta_1}$ **(K)**	656.832
$\boldsymbol{M_{comb1}}$ (kg/s)	7.170	$\boldsymbol{M_{comb1}/(\delta_1\sqrt{\theta_1})}$**(kg/s)**	7.092
$\boldsymbol{Pot_1}$(MW)	105.600	$\boldsymbol{Pot_1/(\delta_1\sqrt{\theta_1})}$ **(MW)**	104.451

Para os parâmetros coletados no dia 30 de abril de 2014 têm-se as seguintes correções:

$$\theta_2 = \frac{T_{entr}}{288.150} = \frac{288.755}{288.150} = 1.002$$

$$\delta_2 = \frac{P_{entr}}{101.325} = \frac{101.878}{101.325} = 1.005$$

A tabela abaixo exibe tanto os valores coletados no referido dia bem como sua correção. Os parâmetros constantes adotados para tomada de dados foram a rotação da turbina ($N = 3600.583$ rpm) e a temperatura de entrada da turbina ($TIT = 1358.145\ K$). As variáveis com índice 2 representa os dados que serão confrontados com os dados de referência.

Tabela 13: Dados de referência coletados, dia 30/04/2014

Dado Coletado		Dado Corrigido	
Parâmetro	**Valor Coletado**	**Correção**	**Valor Corrigido**
$\boldsymbol{TAT_2}$ (K)	809.462	$\boldsymbol{TAT_2/\theta_2}$ **(K)**	807.846
$\boldsymbol{P_{comp2}}$ (Bar)	13.787	$\boldsymbol{P_{comp2}/\delta_2}$ **(Bar)**	13.718
$\boldsymbol{T_{comp2}}$ (K)	666.434	$\boldsymbol{T_{comp2}/\theta_2}$ **(K)**	665.104
$\boldsymbol{M_{comb2}}$ (kg/s)	7.216	$\boldsymbol{M_{comb2}/(\delta_2\sqrt{\theta_2})}$**(kg/s)**	7.173
$\boldsymbol{Pot_2}$(MW)	105.519	$\boldsymbol{Pot_2/(\delta_2\sqrt{\theta_2})}$ **(MW)**	104.890

Com os valores dos parâmetros dependentes devidamente corrigidos é possível determinar a diferença percentual entre eles utilizando a equação (1).

Tabela 14: Variação percentual dos parâmetros dependentes coletados

Parâmetro Dependente	**Diferença Percentual**
$\boldsymbol{\frac{(\partial TAT/\theta)}{(TAT/\theta)}}$	0.01831
$\boldsymbol{\frac{(\partial P_{comp}/\delta)}{(P_{comp}/\delta)}}$	-0.00233
$\boldsymbol{\frac{(\partial T_{comp}/\theta)}{(T_{comp}/\theta)}}$	0.01259
$\boldsymbol{\frac{(\partial M_{comb}/(\delta\sqrt{\theta}))}{(M_{comb}/(\delta\sqrt{\theta}))}}$	0.01142
$\boldsymbol{\frac{(\partial Pot/(\delta\sqrt{\theta}))}{(Pot/(\delta\sqrt{\theta}))}}$	0.00420

4.3 – RESULTADOS OBTIDOS

De posse de todas as informações determinadas anteriormente, matriz de inter-relação de parâmetros e dados coletados corrigidos, é possível compilar o conjunto de equações diferenciais que irão gerar as soluções objetivadas. São elas:

$$\frac{(\partial TAT/\theta)}{(TAT/\theta)} = -0.00123\frac{(\boldsymbol{\partial P_{entr}/\delta})}{(\boldsymbol{P_{entr}/\delta})} + 0.003731\frac{\boldsymbol{\partial \eta_{comp}}}{\boldsymbol{\eta_{comp}}} - 0.00125\frac{\boldsymbol{\partial \eta_{comb}}}{\boldsymbol{\eta_{comb}}}$$
$$- 0.77062\frac{\boldsymbol{\partial \eta_{turb}}}{\boldsymbol{\eta_{turb}}} + 0.25652\frac{(\boldsymbol{\partial P_{boca}/\delta})}{(\boldsymbol{P_{boca}/\delta})} = +0.01831 \quad (15)$$

$$\frac{(\partial P_{comp}/\delta)}{(P_{comp}/\delta)} = -0.00678\frac{(\boldsymbol{\partial P_{entr}/\delta})}{(\boldsymbol{P_{entr}/\delta})} + 0.00000\frac{\boldsymbol{\partial \eta_{comp}}}{\boldsymbol{\eta_{comp}}} - 0.02063\frac{\boldsymbol{\partial \eta_{comb}}}{\boldsymbol{\eta_{comb}}}$$
$$+ 0.07954\frac{\boldsymbol{\partial \eta_{turb}}}{\boldsymbol{\eta_{turb}}} - 0.02699\frac{(\boldsymbol{\partial P_{boca}/\delta})}{(\boldsymbol{P_{boca}/\delta})} = -0.00233 \quad (16)$$

$$\frac{(\partial T_{comp}/\theta)}{(T_{comp}/\theta)} = 0.00000\frac{(\boldsymbol{\partial P_{entr}/\delta})}{(\boldsymbol{P_{entr}/\delta})} - 0.54405\frac{\boldsymbol{\partial \eta_{comp}}}{\boldsymbol{\eta_{comp}}} - 0.01058\frac{\boldsymbol{\partial \eta_{comb}}}{\boldsymbol{\eta_{comb}}}$$
$$+ 0.03496\frac{\boldsymbol{\partial \eta_{turb}}}{\boldsymbol{\eta_{turb}}} - 0.01187\frac{(\boldsymbol{\partial P_{boca}/\delta})}{(\boldsymbol{P_{boca}/\delta})} = +0.01259 \quad (17)$$

$$\frac{(\partial M_{comb}/(\delta\sqrt{\theta}))}{(M_{comb}/(\delta\sqrt{\theta}))} = -0.00418\frac{(\boldsymbol{\partial P_{entr}/\delta})}{(\boldsymbol{P_{entr}/\delta})} + 0.49787\frac{\boldsymbol{\partial \eta_{comp}}}{\boldsymbol{\eta_{comp}}} - 1.00396\frac{\boldsymbol{\partial \eta_{comb}}}{\boldsymbol{\eta_{comb}}}$$
$$-0.03272\frac{\boldsymbol{\partial \eta_{turb}}}{\boldsymbol{\eta_{turb}}} + 0.01110\frac{(\boldsymbol{\partial P_{boca}/\delta})}{(\boldsymbol{P_{boca}/\delta})} = +0.01142 \quad (18)$$

$$\frac{(\partial Pot/(\delta\sqrt{\theta}))}{(Pot/(\delta\sqrt{\theta}))} = -0.00943\frac{(\boldsymbol{\partial P_{entr}/\delta})}{(\boldsymbol{P_{entr}/\delta})} + 1.45416\frac{\boldsymbol{\partial \eta_{comp}}}{\boldsymbol{\eta_{comp}}} - 0.07645\frac{\boldsymbol{\partial \eta_{comb}}}{\boldsymbol{\eta_{comb}}}$$
$$+2.51237\frac{\boldsymbol{\partial \eta_{turb}}}{\boldsymbol{\eta_{turb}}} - 0.83476\frac{(\boldsymbol{\partial P_{boca}/\delta})}{(\boldsymbol{P_{boca}/\delta})} = +0.00420 \quad (19)$$

Representando o conjunto de equações acima de forma matricial temos:

$$(DPPD) = (MIP)(PIC) \qquad (20)$$

Sendo:

$$DPPD = Diferença\ Percentual\ entre\ os\ Parâmetros\ Dependentes$$

$$MIP = Matriz\ de\ Inter - relação\ de\ Parâmetros$$

$$PIC = Parâmetros\ Independetes\ Calculados$$

Solucionando a equação por inversão de matriz teremos:

$$(DPPD)(IMIP) = (PIC) \quad (21)$$

Onde:

$$IMIP = Inversa\ da\ Matriz\ de\ Inter - relação\ de\ Parâmetros$$

Utilizando o software EXCEL podemos inverter a matriz descrita na tabela 11, obtendo o seguinte resultado:

$$(IMIP) = \begin{pmatrix} -141.077 & -70.339 & -101.487 & 5.70235 & -39.5596 \\ -0.77457 & 0.42173 & -2.39278 & 0.03404 & -0.2172 \\ 0.59080 & 0.28560 & -0.47764 & -1.01024 & 0.16566 \\ 550.609 & -333.763 & 456.2883 & -11.8355 & 173.3507 \\ 1657.34 & -1003.02 & 1370.303 & -35.5337 & 520.5853 \end{pmatrix}$$

Utilizando o resultado anterior na equação (21) é possível obter os parâmetros independentes calculados através da multiplicação de matrizes.

$$\frac{(\boldsymbol{\partial P_{entr}/\delta})}{(\boldsymbol{P_{entr}/\delta})} = (0.01831)(-141.007) + (-0.00233)(-70.3398) + (0.01259)(-101.487)$$
$$+ (0.01142)(5.70235) + (0.00420)(-39.5596) = \mathbf{-3.79798}$$

$$\frac{\boldsymbol{\partial \eta_{comp}}}{\boldsymbol{\eta_{comp}}} = (0.01831)(-0.77457) + (-0.00233)(0.421732) + (0.01259)(-2.39278)$$
$$+ (0.01142)(0.034048) + (0.00420)(-0.2172) = \mathbf{-0.04581}$$

$$\frac{\boldsymbol{\partial \eta_{comb}}}{\boldsymbol{\eta_{comb}}} = (0.01831)(0.590802) + (-0.00233)(0.285602) + (0.01259)(-0.47764)$$
$$+ (0.01142)(-1.01024) + (0.00420)(0.165667) = \mathbf{-0.00670}$$

$$\frac{\boldsymbol{\partial \eta_{turb}}}{\boldsymbol{\eta_{turb}}} = (00.01831)(550.6094) + (-0.00233)(-333.763) + (0.01259)(456.2883)$$
$$+ (0.01142)(-11.8355) + (0.00420)(173.3507) = \mathbf{+17.19691}$$

$$\frac{(\boldsymbol{\partial P_{boca}/\delta})}{(\boldsymbol{P_{boca}/\delta})} = (0.01831)(550.6094) + (-0.00233)(-333.763) + (0.01259)(456.2883)$$
$$+ (0.01142)(-11.8355) + (0.00420)(173.3507) = \mathbf{+3.44772}$$

Ou seja,

$$\frac{(\partial P_{entr}/\delta)}{(P_{entr}/\delta)} = -3.79798$$

Queda de 379% na pressão de entrada no compressor.

$$\frac{\partial \eta_{comp}}{\eta_{comp}} = -0.04581$$

Queda de 4.58% na eficiência do compressor.

$$\frac{\partial \eta_{comb}}{\eta_{comb}} = -0.00670$$

A eficiência de combustão reduziu em 0.67%.

$$\frac{\partial \eta_{turb}}{\eta_{turb}} = +17.19691$$

A eficiência da turbina foi aumentada em 1719%.

$$\frac{(\partial P_{boca}/\delta)}{(P_{boca}/\delta)} = +3.44772$$

Houve um aumento de pressão no bocal de saída do motor de 344%.

4.3 – ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

A partir dos resultados obtidos no procedimento de avaliação individual de cada parâmetro independente, executado no ANEXO 2, é possível observar que, os valores obtidos encontram-se substancialmente próximos dos ideais, comprovando a validade da matriz de inter-relação de parâmetros criada a partir de dados obtidos pelo DESTUR. Na segunda avaliação, contida no mesmo anexo, os mesmos parâmetros independentes foram utilizados, porém, variando-se todos ao mesmo tempo. Neste caso apenas o resultado obtido para rendimento do compressor e rendimento da combustão foram razoáveis, estando todos os outros notavelmente distantes do esperado. Essa grande distorção prova que cada parâmetro independente exerce influencia substancial nos outros parâmetros, e quando estes são

modificados todos ao mesmo tempo, gera-se uma interferência nos resultados devido à sobreposição de efeitos causados por cada um. A aplicação realizada com dados reais de operação corrobora com a afirmação anterior, exibindo resultados não condizentes com a operação de um motor em boas condições. Nota-se que as diferenças percentuais obtidas para esses dados são muito maiores do que as obtidas nos procedimentos de validação, o que amplifica ainda mais as distorções geradas pela influência entre os parâmetros. Diante disso, é possível concluir que um software de monitoramento construído a partir da metodologia GPA demanda mecanismos eficientes de filtragem de influências entre as variáveis analisadas, o que não está ao alcance do DESTUR, pois este se propõe a reproduzir virtualmente o funcionamento de um motor real e não a monitorá-lo.

Outro efeito significativo notado durante a construção da matriz foi a necessidade de altíssima precisão nos dados utilizados, pois a alteração dos valores da quinta casa decimal em diante surtiram efeito nos coeficientes obtidos para a matriz de inter-relação de parâmetros. Este efeito, no entanto, não pôde ser observado durante a utilização dos dados de aplicação, pois a modificação na precisão da matriz não surtiu efeito nos resultados finais obtidos. Essa é uma evidência da necessidade de alta precisão também nos dados de operação que serão lidos pelo software a todo instante de atividade do motor, o que não está disponível neste intervalo utilizado.

Visando apenas ilustrar a metodologia prevista pelo GPA é possível avaliar possíveis deteriorações ocorridas em função das quedas mensuradas. A queda de pressão na entrada do compressor é causada pela sujeira depositada nos filtros de entrada do motor, que produzem um aumento na perda de carga do ar admitido. A queda na eficiência do compressor pode ser justificada por fatores como erosão e sujeira depositada nas palhetas. A queda na eficiência da combustão pode ter como possíveis causas fatores como carbonização dos bicos injetores de combustível e deformações da carcaça da câmara de combustão. Mesmo não sendo aceito como válido o resultado obtido para a queda de eficiência da turbina, é citado como fatores de influência no seu desempenho a erosão das palhetas, desprendimento de palhetas do rotor e sujeira depositada nas palhetas, que ocorre principalmente no compressor, mas pode haver também uma pequena ocorrência na turbina. A mesma análise é válida para a queda na contra pressão de saída da turbina e entrada da caldeira, aqui modelada em função da área do bocal de saída, como descrito no ANEXO 1. A queda da contra pressão nos casos reais pode ser justificada pela sujeira depositada no bocal, porém, este é um parâmetro de baixa influência sendo necessária uma redução substancial do bocal para influenciar de modo notável na queda de pressão.

CAPÍTULO 5 – CONLUSÃO

5.1 – CONCLUSÕES

Como pôde ser observado pelo exposto no capítulo anterior o método GPA construído por variáveis obtidas pelo DESTUR logrou êxito na avaliação individual dos parâmetros independentes do motor, comprovando a eficiência do programa na construção da matriz de inter-relação de parâmetros.

As distorções obtidas nos resultados gerados a partir da modificação de todos os parâmetros independentes ao mesmo tempo podem ser notadas tanto na validação do método quanto na aplicação com dados reais, evidenciando a necessidade de criação de filtros de influência nos softwares desenvolvidos para executar o método.

Outra necessidade notada foi a de alta precisão tanto nos dados utilizados na construção da matriz de inter-relação de parâmetros quanto nos dados de operação para entrada no programa.

5.2 – RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Apesar de não executado com êxito nesta obra, o método *Gas Path Analysis* se confirmou um interessante instrumento para implementação de manutenção preditiva em turbinas, tendo em vista a riqueza de informações contidas no método. Para um desenvolvimento mais eficaz, recomenda-se fortemente que a matriz seja construída em etapas, avaliando as interações de cada parâmetro de modo isolado possibilitando, dessa forma, a rastreabilidade de distorções ocorridas, uma vez que a literatura requerida para estudo da construção da matriz não encontra-se disponível. Essas distorções devem ser neutralizadas possibilitando que os resultados obtidos para os parâmetros investigados sejam aferidos com alta confiabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALSTOM, Power. **Technical Performance – Gas Turbine Range**. Switzerland, 2012.

- ALSTOM. **GT11N2 – GAS TURBINE: Unique in its fuel flexibility and reability**. Switzerland, 2007.

- ALVES, Marco. **DESTUR: Desempenho de Turbinas**. Manual do Programa, 2003.

- BEN. **Balanço Energético Nacional 2013: Ano base 2012**. Empresa de Pesquisa Energética – Rio de Janeiro, Brasil, 2013.

- ONS. **Operador Nacional do Sistema Elétrico**, 2014. Disponível em: <http://www.ons.org.br/historico/percentual_volume_util.aspx>. Acesso em: 18 nov. 2014.

- PETROBRAS. **Termelétricas: Governador Leonel Brizola**, 2014. Disponível em: <http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/principais-operacoes/termeletricas/governador-leonel-brizola.htm>. Acesso em: 13 out. 2014.

- RAZAK, Zak. **Gas Path Analysis Ltd: State of the Art Performance Monitoring systems for Gas Turbines, Process Compressors & CHP systems**, 2013. Disponível em: < http://www.gpal.co.uk/index.htm>. Acesso em: 18 set. 2014.

- SARAVANAMUTOO, HIH *et al*. **Gas Turbine Theory**. 5. ed. Inglaterra: Pearson Education, 2001.

- SONNTAG, Richard E.; BORGNAKKE, Claus. **Fundamentos da Termodinânica**. 7. ed. Editora Bluncher, 2009.

- URBAN, L.A. **Gas Turbine Engine Analyzer**. East Hartford: United Aircraft Corporation, 1973.

- URBAN, L.A. **Parameter Selection for Multiple Fault Diagnostics of Gas Turbine Engines**. ASME paper 74-GT-62, Journal of Engineering for Power, 1975.

- VOLPONI, Allan J. **GAS PATH ANALYSIS: An Approach to Engine Diagnostics**. Gaithersburg: 35th Symposium Mechanical Failures Prevention Group, 1982.

ANEXO 1 – MODELAMENTO DA TURBINA GT11NN2 UTILIZANDO O DESTUR

O motor que compõe a turbina a gás GT11N2 foi representado no software DESTUR a partir da construção de cinco módulos, como pode ser observado na tabela abaixo.

Tabela 15:Composição do motor no DESTUR

Módulo	Componente
1	Entrada de Ar
2	Compressor
3	Câmara de Combustão
4	Turbina
5	Bocal

Cada módulo do motor é descrito segundo vários parâmetros de entrada, que buscam simular as condições reais de operação da turbina. Para cada módulo temos as seguintes entradas:

Tabela 16: Parâmetros de modelagem da entrada de ar

Entrada de Ar (ENTR 1)	
Parâmetro	**Valor Adotado**
Número da estação de entrada	1
Número da estação de saída	2
Altitude (m)	0
Desvio de temperatura estática (ISA) (°C)	7.3
MACH de vôo	0
Fator de recuperação da parte subsônica	0.995
Fluxo em massa do ar (kg/s)	383.5
Massa de ar não é uma variável do fora do ponto de projeto	-1
O fluido de trabalho é o ar	-1

Tabela 17: Parâmetros de modelagem do compressor

Compressor (COMP 2)	
Parâmetro	**Valor Adotado**
Número da estação de entrada	2
Número da estação de saída	3
Razão de pressão no ponto de projeto	14.82
Rendimento isentrópico no ponto de projeto	0.8874
$\boldsymbol{\beta} = \left(\boldsymbol{r_{pp}} - \mathbf{1}/\boldsymbol{r_b} - \mathbf{1}\right)$ $\boldsymbol{r_{pp}} =$ razão de pressão do ponto de projeto $\boldsymbol{r_b} =$ razão de pressão de bombeamento na rotação do ponto de projeto	0.90
Fração decimal da rotação corrigida (PCN)	1
Número do mapa do compressor	3
Existe apenas um compressor	-1
PCN controla o regime do motor	1
Rotação do compressor (rpm)	3600
Regime permanente	-1
Número do controle da geometria	-23

Tabela 18: Parâmetros de modelagem da câmara de combustão

Câmara de Combustão (CAMA 4)	
Parâmetro	**Valor Adotado**
Número da estação de entrada	4
Número da estação de saída	5
$\left(\Delta \boldsymbol{P_{câmara}}/\boldsymbol{P_{entrada}}\right)$	0.02
Rendimento da combustão	0.9429
Temperatura total de saída da câmara (K)	1358
Indica que as perdas fundamentais não são importantes	-1
Indica que a temperatura de saída da câmara controla o motor	1
Indica o valor correspondente a frequência da senóide	-1
Módulo de controle	-18
Indica que combustível é um hidrocarboneto	-1
Poder calorífico do combustível (J/kg)	47755000

Tabela 19: Parâmetros de modelagem da turbina

Turbina (TURB 6)	
Parâmetro	**Valor Adotado**
Número da estação de entrada	6
Número da estação de saída	7
Rendimento isentrópico no ponto de projeto	0.853
Rendimento mecânico entre turbina e compressor	1
Potência de acionamento dos auxiliares	0
Indicação de turbina livre com rotação dada	2
Número da estação de descarga da turbina	1
Contra pressão na descarga da turbina (ATM)	1.026
Indica vazão em massa	-1
Indica rotação informada	-1
Indica que a turbina só aciona o compressor	-1
Número do mapa da turbina	5
Momento de inércia polar do rotor (kg.m²)	13038
Rotação (rpm)	3600
Indica regime permanente	-1

Tabela 20: Parâmetros de modelagem do bocal

Bocal (BOCA 7)	
Parâmetro	**Valor Adotado**
Número da estação de entrada	7
Número da estação correspondente a atmosfera de descarga	1
Indica bocal convergente	-1

Obs.: Não é possível calcular através do programa DESTUR qual seria a pressão de saída da turbina, ou seja, a contra pressão na entrada da caldeira. Portanto, durante o modelamento foi utilizada a manipulação da variável que representa a área do bocal de saída da turbina, relacionando a sua diminuição com o aumento da pressão de modo proporcional, para simplificar as análises.

ANEXO 2 – VALIDAÇÃO DA MATRIZ DE INTER-RELAÇÃO DE PARÂMETROS

Para garantir a confiabilidade dos resultados obtidos com a aplicação do método, utilizando dados reais de operação, faz-se necessária a validação da matriz de inter-relação de parâmetros obtida com o programa DESTUR. A validação será realizada com a verificação da compatibilidade de resultados utilizando dois métodos, são eles: variação de cada parâmetro independente individualmente e variação de todos os parâmetros independentes juntos. Para cada parâmetro independente será computada a mesma variação utilizada em seu valor original obtido pelo DESTUR para a construção da matriz. O novo valor será utilizado para gerar os valores dos parâmetros dependentes fora do ponto de projeto. Com o valor modificado obtido é possível computar as diferenças percentuais entre esses valores e os valores de referência. Dessa forma, quando a matriz de inter-relação de parâmetros retornar os valores independentes, através da sua solução, esses deverão ser compatíveis com as modificações realizadas, verificando a sua validade.

- Validação utilizando a variação de pressão na entrada do compressor:

Tabela 21: Cálculo das diferenças percentuais para as variáveis dependentes com a variação na pressão de entrada do compressor

Acréscimo de 1% no valor da Perda de Pressão na Entrada do Compressor (P_{entr})			
Variável Dependente	**Valor de Referência**	**Valor Modificado**	**Diferença Percentual**
TAT (K)	810.80	810.79	-0.0000123
P_{comp} (ATM)	14.75	14.74	-0.0000678
T_{comp} (K)	670.98	670.98	0.0000000
M_{comb} (kg/s)	7.17	7.17	-0.0000418
Pot (W)	106100000.00	106090000.00	-0.0000943

Utilizando as equações (20) e (21) e a primeira linha da matriz *IMIP*, descritos no capítulo quatro, obtemos para a perda de pressão:

$$\frac{(\partial P_{entr}/\delta)}{(P_{entr}/\delta)} = (-0.0000123)(-141.007) + (-0.0000678)(-70.3398) + (0.0000000)(-101.487) + (-0.0000418)(5.70235) + (-0.0000943)(-39.5596) = +\mathbf{0.01}$$

- Validação utilizando a variação na eficiência do compressor:

Tabela 22: Cálculo das diferenças percentuais para as variáveis dependentes com a variação na eficiência do compressor

Decréscimo de 1% no valor da Eficiência do Compressor ($\Delta\eta_{comp}$)			
Variável Dependente	**Valor de Referência**	**Valor Modificado**	**Diferença Percentual**
TAT (K)	810.80	810.77	-0.0000370
P_{comp} (ATM)	14.75	14.75	0.0000000
T_{comp} (K)	670.98	674.60	0.0053951
M_{comb} (kg/s)	7.17	7.13	-0.0049372
Pot (W)	106100000.00	104570000	-0.0144203

Utilizando as equações (20) e (21) e a segunda linha da matriz *IMIP*, descritos no capítulo quatro, obtemos para a perda de pressão:

$$\frac{\partial\eta_{comp}}{\eta_{comp}} = (-0.0000370)(-0.77457) + (-0.0000000)(0.421732) + (0.0053951)(-2.39278) + (-0.0049372)(0.034048) + (-0.0144203)(-0.2172) = \mathbf{-0.00992}$$

- Validação utilizando a variação na eficiência da combustão:

Tabela 23: Cálculo das diferenças percentuais para as variáveis dependentes com a variação na eficiência da combustão

Decréscimo de 1% no valor da Eficiência da Combustão ($\Delta\eta_{comb}$)			
Variável Dependente	**Valor de Referência**	**Valor Modificado**	**Diferença Percentual**
TAT (K)	810.80	810.81	0.0000123
P_{comp} (ATM)	14.75	14.75	0.0002034
T_{comp} (K)	670.98	671.05	0.0001043
M_{comb} (kg/s)	7.17	7.24	0.0099022
Pot (W)	106100000.00	106180000.00	0.0007540

Utilizando as equações (20) e (21) e a terceira linha da matriz *IMIP*, descritos no capítulo quatro, obtemos para a perda de pressão:

$$\frac{\partial \eta_{comb}}{\eta_{comb}} = (-0.0000123)(0.590802) + (-0.0002034)(0.285602) + (0.0001043)(-0.47764) + (-0.0099022)(-1.01024) + (-0.0007540)(0.165667) = \mathbf{-0.00986}$$

- Validação utilizando a variação na eficiência da turbina:

Tabela 24: Cálculo das diferenças percentuais para as variáveis dependentes com a variação na eficiência da turbina

Decréscimo de 1% no valor da Eficiência da Turbina ($\Delta\eta_{turb}$)			
Variável Dependente	**Valor de Referência**	**Valor Modificado**	**Diferença Percentual**
TAT (K)	810.80	816.66	0.0072274
P_{comp} (ATM)	14.75	14.73	-0.0007459
T_{comp} (K)	670.98	670.76	-0.0003279
M_{comb} (kg/s)	7.17	7.17	0.0003068
Pot (W)	106100000.00	103600000.00	-0.0235627

Utilizando as equações (20) e (21) e a quarta linha da matriz *IMIP*, descritos no capítulo quatro, obtemos para a perda de pressão:

$$\frac{\partial \eta_{turb}}{\eta_{turb}} = (0.0072274)(550.6094) + (-0.0007459)(-333.763) + (-0.0003279)(456.2883) + (0.0003068)(-11.8355) + (-0.0235627)(173.3507) = \mathbf{-0.01618}$$

- Validação utilizando a variação na contra pressão na saída do motor:

Tabela 25: Cálculo das diferenças percentuais para as variáveis dependentes com a variação na contra pressão na saída do motor

Acréscimo de 1% no valor da Contra Pressão na Saída do Motor (ΔP_{boca})			
Variável Dependente	**Valor de Referência**	**Valor Modificado**	**Diferença Percentual**
TAT (K)	810.80	812.89	0.0025777
P_{comp} (ATM)	14.75	14.74	-0.0002713
T_{comp} (K)	670.98	670.90	-0.0001192
M_{comb} (kg/s)	7.17	7.17	0.0001116
Pot (W)	106100000.00	105210000	-0.0083883

Utilizando as equações (20) e (21) e a quinta linha da matriz *IMIP*, descritos no capítulo quatro, obtemos para a perda de pressão:

$$\frac{(\partial P_{boca}/\delta)}{(P_{boca}/\delta)} = (0.0025777)(550.6094) + (-0.0002713)(-333.763) + (-0.0001192)(456.2883) + (0.0001116)(-11.8355) + (-0.0083883)(173.3507) = +\mathbf{0.01004}$$

- Validação utilizando a variação em todos os parâmetros independentes do motor:

Tabela 26: Cálculo das diferenças percentuais para as variáveis dependentes com a variação em todos os parâmetros independentes do motor

Acréscimo de 1% no valor da Contra Pressão na Saída do Motor (ΔP_{boca})			
Variável Dependente	**Valor de Referência**	**Valor Modificado**	**Diferença Percentual**
TAT (K)	810.80	818.76	0.0098175
P_{comp} (ATM)	14.75	14.73	-0.0008138
T_{comp} (K)	670.98	674.37	0.0050523
M_{comb} (kg/s)	7.17	7.2080	0.0052858
Pot (W)	106100000.00	101250000	-0.0457116

Utilizando as equações (20) e (21) e a matriz *IMIP*, descritos no capítulo quatro, obtemos para a perda de pressão:

$$\frac{(\partial P_{entr}/\delta)}{(P_{entr}/\delta)} = (0.0098175)(-141.007) + (-0.0008138)(-70.3398) + (0.0050523)(-101.487) + (0.0052858)(5.70235) + (-0.0457116)(-39.5596) = -\mathbf{0.00204}$$

$$\frac{\partial \eta_{comp}}{\eta_{comp}} = (0.0098175)(-0.77457) + (-0.0008138)(0.421732) + (0.0050523)(-2.39278) + (0.0052858)(0.034048) + (-0.0457116)(-0.2172) = -\mathbf{0.00993}$$

$$\frac{\partial \eta_{comb}}{\eta_{comb}} = (0.0098175)(0.590802) + (-0.0008138)(0.285602) + (0.0050523)(-0.47764) + (0.0052858)(-1.01024) + (-0.0457116)(0.165667) = -\mathbf{0.0098}$$

$$\frac{\boldsymbol{\partial \eta_{turb}}}{\boldsymbol{\eta_{turb}}} = (0.0098175)(550.6094) + (-0.0008138)(-333.763)$$
$$+ (0.0050523)(456.2883) + (0.0052858)(-11.8355)$$
$$+ (-0.0457116)(173.3507) = \mathbf{-0.00445}$$

$$\frac{(\boldsymbol{\partial P_{boca}/\delta})}{(\boldsymbol{P_{boca}/\delta})} = (0.0098175)(550.6094) + (-0.0008138)(-333.763)$$
$$+ (0.0050523)(456.2883) + (0.0052858)(-11.8355)$$
$$+ (-0.0457116)(173.3507) = \mathbf{+0.02575}$$

ANEXO 3 – TERMO DE AUTENTICIDADE

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA

Termo de Declaração de Autenticidade de Autoria

Declaro, sob as penas da lei e para os devidos fins, junto à Universidade Federal de Juiz de Fora, que meu Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Graduação em Engenharia de Produção é original, de minha única e exclusiva autoria. E não se trata de cópia integral ou parcial de textos e trabalhos de autoria de outrem, seja em formato de papel, eletrônico, digital, áudio-visual ou qualquer outro meio.
Declaro ainda ter total conhecimento e compreensão do que é considerado plágio, não apenas a cópia integral do trabalho, mas também de parte dele, inclusive de artigos e/ou parágrafos, sem citação do autor ou de sua fonte.
Declaro, por fim, ter total conhecimento e compreensão das punições decorrentes da prática de plágio, através das sanções civis previstas na lei do direito autoral[1] e criminais previstas no Código Penal[2], além das cominações administrativas e acadêmicas que poderão resultar em reprovação no Trabalho de Conclusão de Curso.

Juiz de Fora, _____ de _____ de 20____.

_____	_____
NOME LEGÍVEL DO ALUNO (A)	Matrícula
_____	_____
ASSINATURA	CPF

[1] LEI N° 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998. Altera, atualiza e consolida a legislação sobre direitos autorais e dá outras providências.
[2] Art. 184. Violar direitos de autor e os que lhe são conexos: Pena – detenção, de 3 (três) meses a 1 (um) ano, ou multa.