

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

HENRIQUE BASTOS SIQUEIRA

**OPORTUNIDADE ÓTIMA DA MANUTENÇÃO EM TURBINA A GÁS EM
TERMELÉTRICAS**

JUIZ DE FORA

2016

HENRIQUE BASTOS SIQUEIRA

**OPORTUNIDADE ÓTIMA DA MANUTENÇÃO EM TURBINA A GÁS EM
TERMELÉTRICAS**

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

JUIZ DE FORA

2016

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Siqueira, Henrique Bastos.

Oportunidade Ótima da Manutenção em Turbina a Gás em Termelétricas / Henrique Bastos Siqueira. -- 2016.

83 p.

Orientador: Marco Aurélio da Cunha Alves

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2016.

1. Manutenção Preditiva. 2. Turbinas a gás. 3. Geração Termelétrica. 4. Eficiência Energética. 5. Simulação . I. Alves, Marco Aurélio da Cunha, orient. II. Título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Myrian Cristina Bastos Siqueira e Jorge de Oliveira Siqueira e ao meu irmão Fernando de Rezende Bastos Siqueira pelos ensinamentos e por terem contribuído com meu desenvolvimento. Agradeço aos professores do curso de Engenharia Mecânica pelos conhecimentos passados, em especial para o Professor Marco Alves que me ensinou muito com suas histórias de vida. Agradeço a algumas pessoas também que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

HENRIQUE BASTOS SIQUEIRA

**OPORTUNIDADE ÓTIMA DA MANUTENÇÃO EM TURBINA A GÁS EM
TERMELÉTRICAS**

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 _____ de _____ de _____.

BANCA EXAMINADORA

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

Prof.º Dr. Luiz Gustavo Monteiro Guimarães
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof.º Dr. Raphael Fortes Marcomini
Universidade Federal de Juiz de Fora

RESUMO

Conhecer o comportamento do ativo em diversas situações é um fator importante para identificar as deficiências e eficiências. A partir desse conhecimento se torna mais factível a extração de informações para que seja possível a tomada de decisão de parada do ativo. Dessa forma a presente obra tem como objetivo municiar os tomadores de decisão com informações altamente relevantes, a fim de garantir o melhor aproveitamento do ativo. Neste trabalho o objeto de estudo é uma turbina a gás fabricada pela General Electric e com uma eficiência comprovada que é utilizada para a geração de em torno de 42 MW de potência, sendo a planta de operação está localizada da cidade de Juiz de Fora, mais precisamente na Usina Termelétrica de Juiz de Fora (UTE-JF), na qual é gerenciada pela Petrobras. A obra tem o intuito de utilizar metodologias relativamente antigas, porém extremamente eficientes e modernas, para identificar o momento ideal para realizar certas manutenções na turbina a gás, a fim de aumentar a eficiência da turbina e reduzir o custo de operação e manutenção.

Palavras-chave: Manutenção preditiva, Termelétrica, turbina a gás.

ABSTRACT

Knowing the behavior of the assets in different situations is an important factor to identify deficiencies and efficiencies. With this knowledge it is more feasible the extraction of informations to be possible talking a decision to stop assets. Thus the goal of this work is equip decision makers with high relevant informations to ensure the best use of assets. In this work the object of study is a gas turbine manufactured by General Electric and with a proven efficiency that is used to generate around 42 MW of power and the operating plant is located in Juiz de Fora, more precisely at the Juiz de Fora Thermoelectric (in portuguese UTE-JF), which is managed by Petrobras. The work aims to use relatively old but extremely efficient and modern methods to identify the perfect time to perform certain maintenance on the gas turbine in order to increase turbine efficiency and reduce the cost of maintenance and operation.

Keywords: predictive maintenance, Thermoelectric, gas turbine

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema do ciclo padrão a ar (Ciclo Brayton)	28
Figura 2 – Diagramas P-V e T-S do Ciclo Brayton.....	28
Figura 3 – Diagramas T-S do ciclo real da turbina a gás	29
Figura 4 – Acúmulo de material nas palhetas de uma turbina.....	30
Figura 5 – Efeito da erosão.....	31
Figura 6 – Efeito da corrosão da palheta	31
Figura 7 – Esquema explicativo do GPA	35
Figura 8 – Componentes da LM600	38
Figura 9 – Medições e valores padrão	38
Figura 10 – Desempenho das configurações da LM6000	39
Figura 11 – Módulos no DESTUR da LM6000	48

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Degradação da LM6000 com o acúmulo de sujeira no filtro	49
Gráfico 2 – Custo do MWh em relação ao acúmulo de sujeira no filtro de baixa.	50
Gráfico 3 – Degradação da LM6000 com o acúmulo de sujeira no compressor de baixa pressão	51
Gráfico 4 – Custo do MWh em relação ao acúmulo de sujeira no LPC.....	52
Gráfico 5 – Degradação da LM6000 com o acúmulo de sujeira no compressor de alta pressão.	53
Gráfico 6 – Custo do MWh em relação ao acúmulo de sujeira no HPC.	54
Gráfico 7 – Custo vs Horas de Operação.	57
Gráfico 8 – Momento ideal para a troca do filtro de baixa eficiência em função da taxa de sujeira.....	60
Gráfico 9– Momento ideal para a troca do filtro de alta eficiência em função da taxa de sujeira.....	61
Gráfico 10 – Momento ideal para lavagem do LPC em função da taxa de sujeira.....	61
Gráfico 11 – Momento ideal para lavagem do HPC em função da taxa de sujeira.	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Evolução da Manutenção.....	18
Tabela 2 – Matriz de inter-relação de parâmetros de um motor simples turbojato eixo único	44
Tabela 3 – Dados de referência.	55
Tabela 4 – Coeficientes com a variação de ETAC1.....	55
Tabela 5 – Coeficientes com a variação de ETAC2.....	56
Tabela 6 – MCI.....	56
Tabela 7 – MCF.....	56
Tabela 8 – Custo para realizar a troca do filtro de baixa.	59
Tabela 9 – Custo para realizar a troca do filtro de alta.....	59
Tabela 10 – Custo para realizar a lavagem do compressor.	59
Tabela 11 – Dados da simulação da sujeira no filtro de alta e baixa performance	69
Tabela 12 – Dados do aumento de custo da geração de energia do filtro de alta e baixa performance.....	70
Tabela 13 – Dados da simulação da sujeira no compressor de baixa pressão.....	71
Tabela 14 – Dados do aumento de custo da geração de energia do compressor de baixa pressão	72
Tabela 15 – Dados da simulação da sujeira no compressor de alta pressão.....	73
Tabela 16 – Dados do aumento de custo da geração de energia do compressor de alta pressão	74
Tabela 17 – Propriedades da entrada de ar.....	75
Tabela 18 – Propriedades do compressor de baixa pressão.....	76
Tabela 19 – Propriedades da bifurcação 3.....	76
Tabela 20 – Propriedades do compressor de alta pressão	77
Tabela 21 – Propriedades da bifurcação 5.....	77
Tabela 22 – Propriedades da bifurcação 6.....	78
Tabela 23 – Propriedades da câmara de combustão	78
Tabela 24 – Propriedades do misturador 8	79
Tabela 25 – Propriedades da turbina de alta pressão.....	79
Tabela 26 – Propriedades da turbina de baixa pressão.....	80
Tabela 27 – Propriedades do misturador 11.....	80
Tabela 28 – Propriedades do bocal 12.....	81

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

Z	Vetor das variáveis dependentes
H()	Função não-linear avaliada vetorialmente
X	Vetor dos parâmetros de desempenho
Y	Vetor das condições ambientais e dos parâmetros de controle da turbina a gás
V	Vetor com as incertezas na medição
B	Vetor contendo os erros sistemáticos (ou bias) do sensor
J()	Jacobiano
TS	Taxa de sujidade
C	Custo de operação
CM	Custo de Manutenção
CLV	Custo ao longo da vida da turbina
UTE-JF	Usina Termelétrica de Juiz de Fora
ETAC1	Eficiência do compressor de baixa pressão
ETAC2	Eficiência do compressor de alta pressão
LPC	Compressor de baixa pressão (<i>Low Pressure Compressor</i>)
HPC	Compressor de alta pressão (<i>High Pressure Compressor</i>)
LPT	Turbina de baixa pressão (<i>Low Pressure Turbine</i>)
HPT	Turbina de alta pressão (<i>High Pressure Turbine</i>)
RP1	Razão de pressão do LPC
RP2	Razão de Pressão do HPC
GPA	<i>Gas Patch Analysis</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1 JUSTIFICATIVA.....	14
1.2 ESCOPO DO TRABALHO	15
1.3 ELABORAÇÃO DOS OBJETIVOS.....	15
1.4 DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA	15
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1 MANUTENÇÃO	17
2.1.1 HISTÓRICO DA MANUTENÇÃO.....	17
2.1.2 TÉCNICAS DE MANUTENÇÃO	21
2.1.3 POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO	24
2.2 TURBINA A GÁS.....	26
2.2.1 FALHAS QUE AFETAM O DESEMPENHO DAS TURBINAS A GÁS.....	29
2.2.2 MODELOS DE PREVISÃO DE DESEMPENHO (MPD)	32
2.3 GAS PATH ANALYSIS (GPA).....	34
3. METODOLOGIA E EQUIPAMENTOS.....	37
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO	37
3.2 CRIAÇÃO DO MODELO VIRTUAL	39
3.3 APLICAÇÃO DO LGPA	41
3.4 IDENTIFICAÇÃO DO MOMENTO PARA A INTERVENÇÃO	45
4. RESULTADOS.....	47
4.1 SIMULAÇÃO DO MODELO VIRTUAL E MATRIZ DE INTER-RELAÇÃO	47
4.2 MODELO MATEMÁTICO.....	56

5. CONCLUSÕES	65
5.1 TRABALHOS FUTUROS	65
REFERÊNCIAS	66
ANEXO I – TABELAS SIMULAÇÃO.....	69
ANEXO II – MODELO LM6000	75
ANEXO III – TERMO DE AUTENTICIDADE	82

1. INTRODUÇÃO

O ambiente competitivo, dado pela evolução, crescimento e globalização da economia, obriga as organizações a possuírem um grande compromisso com o aperfeiçoamento de seus procedimentos. O aperfeiçoamento deve ser enfrentado pela empresa como um todo e com os seus recursos que possuir, logo ninguém e nenhuma função administrativa e produtiva pode ficar indiferente (Campos, 1992).

Uma atividade que deve ser aprimorada e que vem recebendo a atenção de empresas e pesquisadores é a gestão de ativos físicos, em outras palavras, a manutenção de equipamentos e instalações. A manutenção deve ser encarada como uma função estratégica na obtenção dos resultados da organização e deve estar direcionada ao suporte do gerenciamento e à solução de problemas apresentados na produção, lançando a empresa em patamares competitivos de qualidade e produtividade (Kardec *et. al.*, 2009). Segundo os mesmo autores a Manutenção existe para que não haja manutenção.

No Brasil o setor de geração de energia passou por grande dificuldade devido a uma crise hídrica (início de 2014 – até início de 2016) e que resultou na necessidade de utilização de outras fontes de produção de energia elétrica. Com a crise, as usinas termelétricas (UTE's) foram acionadas e em consequência houve um aumento significativo das tarifas elétricas, de acordo com os dados da CCEE (Câmara de Comercialização de Energia Elétrica) e a PLD (Preço de Liquidação das Diferenças) aumentaram significativamente.

As UTE's, na qual a energia elétrica é produzida a partir de energia química contida em um combustível, sobretudo o gás natural, a máquina que realiza essa transformação deve ser confiável e se manter com elevada eficiência e disponibilidade. Os equipamentos capazes de realizar essa conversão são: motores a diesel e turbinas a gás. As turbinas a gás são utilizadas nas grandes termelétricas, devido a alta eficiência, confiabilidade e produtividade.

O constante aumento do uso de turbinas a gás na geração de energia, oriunda da diversificação da matriz energética e aumento necessário da produção energética do país, inspira cada vez mais o estudo de técnicas de diagnóstico de falha, de maneira a manter as grandes disponibilidade e eficiência que esses motores apresentam. Para isso existem procedimentos de análise, dentro as quais, podemos citar: análise de desempenho, análise de óleos e partículas, análise de vibração e análise da vida útil. A união dessas técnicas possibilita uma assertividade elevada na gestão de manutenção desses equipamentos.

Turbinas a gás são equipamentos complexos, por conterem muitos componentes e envolverem varias áreas da engenharia, sendo necessário conhecer o desempenho de seus constituintes, possibilitando assim minimizar os custos de manutenção e operação, mantendo-as com um rendimento elevado, logo aumentando a competitividade desta fonte de energia.

1.1 JUSTIFICATIVA

A Manutenção é umas das áreas que mais vem sendo desenvolvida na indústria, devido à ligação direta desta atividade com a competitividade e sobrevivência da empresa. De acordo com (KARDEC *et. al*, 2009, p. 1) “Nas empresas vencedoras, o homem de manutenção tem reagido rápido a mudanças”. Com esse novo olhar há um crescente senso da importância do impacto da falha do equipamento, na segurança e no meio ambiente, maior conscientização da relação entre manutenção e qualidade do produto, maior pressão para se conseguir alta disponibilidade e confiabilidade da instalação, ao mesmo tempo em que se busca a redução de custos. Exigindo assim novas posturas e habilidades das pessoas envolvidas na manutenção, desde gerentes, passando pelos engenheiros, até os operadores.

Quando se trata do uso de motores para a geração de energia há um grande desafio em manter o equipamento com certo grau de confiabilidade, disponibilidade e eficiência. Portanto a operação do ativo deve ser acompanhada rigorosamente e a utilização de ferramentas para a identificação de possíveis falhas deve ser intrínseca a cultura das Usinas Termelétricas. A combinação dos fatores citados resulta no melhor funcionamento do sistema e na utilização correta dos recursos financeiros. Demasiadas intervenções no equipamento podem causar danos graves ao mesmo, porém pouca manutenção acarreta na ineficiência do sistema. Se traduzirmos para as turbinas a gás, por exemplo, a lavagem em excesso do compressor causaria corrosão nas aletas, devido ao uso excessivo de “detergente”. Ao contrário, a falta de lavagem eleva o custo de produção, devido à redução na eficiência de operação do motor.

Logo, é imprescindível que uma organização possua estudos que possibilitem ou facilitem a predição de falhas e que realizem a otimização da eficiência dos ativos, sobretudo as termelétricas, atingindo assim o mais alto nível de confiabilidade, com o menor investimento em componentes e mão – de – obra.

A falta de processos bem estruturados de identificação e predição de falhas é frequente nas organizações. Em consequência deste fato a empresa não consegue manter os

custos de operação minimizados, resultando assim na baixa competitividade, redução da segurança do ativo e aumento do impacto ambiental. O estabelecimento de critérios e a implementação de técnicas a serem adotadas torna-se um fator primordial no desempenho e disponibilidade global dos equipamentos (Seixas, 2008).

1.2 ESCOPO DO TRABALHO

O estudo proposto está direcionado à Usina Termelétrica de Juiz de Fora (UTE/JF), mais especificamente voltado para a turbina a gás (LM6000 da GE) instalada na unidade. No capítulo 3 será abordado com mais detalhes as propriedades deste equipamento.

Diante do exposto, o fenômeno a ser tratado no trabalho se refere ao desenvolvimento de um procedimento com embasamento teórico, a fim de tornar a intervenção na turbina a gás de forma assertiva, ou seja, realizar um procedimento da predição da falha. Para atingir tal fim será analisado o desempenho do motor, quando é acometido por duas falhas – sujeira nos filtros e nos compressores – utilizando simulação virtual do equipamento e o método intitulado de *Gas Patch Analysis* (GPA), além disso, será incorporado ao trabalho uma modelagem matemática, referente ao custo de operação e manutenção ao longo da vida útil, a fim de obter oportunidade ótima para a realização da manutenção, se faz necessária a minimização de tais custos.

1.3 ELABORAÇÃO DOS OBJETIVOS

O objetivo do trabalho é a determinação do momento ideal para que a intervenção na turbina a gás ocorra de forma eficiente e eficaz, levando em consideração as horas de operação, os parâmetros mensuráveis e os custos envolvidos com as operações.

Conhecer o comportamento do motor frente algumas adversidades inerentes ao seu processo de operação é uma perspectiva do presente trabalho.

1.4 DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA

O trabalho pretende abordar conceitos de modelagem matemática e modelo de previsão de desempenho (MPD) a fim de garantir que o principal objetivo do trabalho seja obtido com êxito. Primeiramente será realizada a criação do modelo virtual do objeto de

estudo, para que seja possível simular de forma econômica as condições de operação e realizar o isolamento dos defeitos que acometem o motor. *A posteriori* será feita a análise dos dados obtidos na simulação, para que seja possível modelar matematicamente o problema, de tal forma a minimizar o custo envolvido na operação e manutenção.

Assim a obra é de natureza aplicada, pois estão sendo utilizados conhecimentos obtidos pela pesquisa básica, para solucionar o problema existente. A abordagem será quantitativa, por envolver a geração de dados a partir do modelamento matemático e do modelo de previsão de desempenho.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

No capítulo 1 – Introdução – contém: uma breve explicação da importância da manutenção na sobrevivência das organizações. Possui também a motivação da escolha do tema abordado na presente obra, em sequência é dissertado sobre o escopo, ou seja, uma breve explicação do objeto do trabalho, os objetivos a serem atingidos, a metodologia utilizada e por ultimo a organização.

No capítulo 2 – Revisão Bibliográfica – é apresentada toda a base teórica do trabalho. É realizada uma abordagem geral sobre turbinas a gás e as falhas que acometem a este tipo de equipamento, em seguida a apresentação da importância, benefícios e aplicação do MDP. A história, os conceitos e as práticas de manutenção também são abordados deste capítulo.

O capítulo 3, “Metodologia e Equipamentos”, são tratados de forma pormenorizada os métodos utilizados no presente estudo, bem como a apresentação na turbina a gás a ser estudada.

O capítulo 4 – Resultado – contém o resultado obtido a partir da aplicação do método detalhado no capítulo 3. É exposto os dados de operação obtidos na simulação do motor e seu tratamento para a geração de informações relevantes aos gestores de manutenção.

Finalmente, no Capítulo 5, “Conclusão”, são apresentadas as conclusões, com a finalidade de garantir um perfeito entendimento sobre o método utilizado, comentários pertinentes e sugestões para novos trabalhos, relacionados o tema abordado, também estão no conteúdo deste capítulo . Ao final encontra-se a bibliografia consultada.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MANUTENÇÃO

MONBRAY *et al.* (1997) definem a manutenção como o conjunto de ações que permitem manter ou restabelecer um bem a um estado operacional específico ou, ainda, assegurar um serviço. O significado de “manter” é efetuar operações que possibilitem conservar o potencial do equipamento ou sistema, para garantir a continuidade e a qualidade de seu serviço (MIYAKE, 2002).

KIRBY (2002) destaca em sua pesquisa que o custo de manutenção representa entre 8 a 12% do custo do produto. SOUZA (2008) relata que a indústria americana gasta mais de 200 bilhões de dólares todo ano com manutenção [...] o que toma claro o impacto representado pela operação de manutenção sobre a produtividade e lucro.

A grande função da manutenção moderna é garantir a confiabilidade e a disponibilidade da função dos equipamentos e instalações de modo a atender a um processo de produção ou de serviço, com segurança, preservação do meio ambiente e custo adequado (KARDEC *et al.*, 2009).

Em tempos de alta competitividade é inaceitável que o ativo produtivo pare de forma não programada. Os paradigmas da manutenção vêm mudando rapidamente, contudo as empresas brasileiras não conseguem implementar os novos conceitos, fazendo com que a empresa perca espaço no mercado, podendo vir a decretar falência. Para que a empresa consiga produzir e entregar o produto com certos padrões de qualidade, aliada com um baixo custo de operação, tem que se investir cada vez mais em metodologias modernas de manutenção.

Nesta seção será dissertado de forma sucinta a evolução da manutenção, as técnicas de manutenção e sua importância na organização e as políticas mais difundidas nas empresas.

2.1.1 HISTÓRICO DA MANUTENÇÃO

A história da manutenção pode ser dividida em quatro gerações a partir dos anos de 1930. Cada geração tem sua particularidade, que é definida pela evolução tecnológica da

produção e das políticas de gestão que circundam a atividade de manutenção. Na Tabela 1 a seguir podemos ver de forma simplificada a evolução da manutenção.

Tabela 1: Evolução da Manutenção

EVOLUÇÃO DA MANUTENÇÃO				
	Primeira Geração	Segunda Geração	Terceira Geração	Quarta Geração
Ano				
Aumento das expectativas em relação à manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • Conserto após falha 	<ul style="list-style-type: none"> • Disponibilidade crescente • Maior vida útil do equipamento 	<ul style="list-style-type: none"> • Maior confiabilidade • Maior disponibilidade • Melhor relação custo-benefício • Preservação do meio ambiente 	<ul style="list-style-type: none"> • Maior confiabilidade • Maior disponibilidade • Preservação do meio ambiente • Segurança • Influir nos resultados do negócio • Gerenciar ativos
Visão quanto à falha do equipamento	<ul style="list-style-type: none"> • Todos os equipamentos se desgastam com a idade e, por isso, falham. 	<ul style="list-style-type: none"> • Todos os equipamentos se comportam de acordo com a curva da banheira 	<ul style="list-style-type: none"> • Existência de 6 padrões de falhas (Nowlan &Heap e Moubray) 	<ul style="list-style-type: none"> • Reduzir drasticamente falhas prematuras dos padrões A e F (Nowlan &Heap e Moubray)
Mudanças nas técnicas de Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • Habilidades voltadas para o reparo 	<ul style="list-style-type: none"> • Planejamento manual da manutenção • Computadores grandes e lentos • Manutenção Preventiva (por tempo) 	<ul style="list-style-type: none"> • Monitoramento da condição • Manutenção Preditiva • Análise de risco • Computadores pequenos e rápidos • Softwares potentes • Grupos de trabalho multidisciplinares • Projetos voltados para a confiabilidade • Contratação por mão de obra e serviços 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento da Manutenção Preditiva e Monitoramento da Condição • Minimização nas Manutenções Preventivas e Corretivas não Planejadas • Análise de falhas • Técnicas de Confiabilidade • Engenharia da Manutenção • Projetos voltados para confiabilidade, manutentabilidade e Custo do Ciclo de Vida • Contratação por resultado

Fonte: adaptado KARDEC *et al.*, 2009

2.1.1.1 PRIMEIRA GERAÇÃO

Esta geração se inicia em 1930 e se estende até um pouco após o término da Segunda Guerra Mundial, por volta de 1950. Onde a mecanização da indústria era incipiente, equipamentos simples e superdimensionados. Por conta da filosofia de vida da sociedade nesse período a eficiência da produção e em consequência a produtividade e o baixo custo não eram uma necessidade. Com isso a intervenção na máquina era somente corretiva não planejada, ou seja, esperava-se a máquina falhar para se fazer a manutenção. Como os equipamentos eram sobredimensionados as falhas eram reduzidas. Vale ressaltar que ocorriam atividades de manutenção preventivas, porém se restringia a limpeza e lubrificação do maquinário.

2.1.1.2 SEGUNDA GERAÇÃO

Com início nos anos 50 e fim nos anos 70, a segunda geração da manutenção passa a ter como objetivo básico um baixo custo aliado com uma maior disponibilidade e vida útil dos equipamentos. O ambiente industrial é um reflexo do comportamento da sociedade, com o aumento do desejo de compra de qualquer tipo de produto e a produção em massa proposta por Henry Ford, e somado com uma escassez de mão-de-obra especializada, as linhas de produção são obrigadas a se modernizar e a aumentar a mecanização, tornando as plantas industriais mais complexas.

Outro fator que é evidenciado na indústria no início dos anos dourados é a confiabilidade do equipamento, para que seja possível uma maior produtividade. Com a dependência do bom estado de funcionamento dos equipamentos de produção, por conta da alta demanda, motivou ao desenvolvimento e pesquisas de técnicas a fim de minimizar o tempo de parada do equipamento, como consequência surge o conceito de manutenção preventiva.

O custo de manutenção começou a ser muito superior ao custo de operação. Surgindo assim a técnicas de manutenção preditiva, o processo de revisão periódica dos equipamentos e os sistemas de planejamento e controle de manutenção. No fim desta geração as técnicas citadas anteriormente foram compiladas pela Manutenção Produtiva Total (TPM - *Total Productive Maintenance*), algumas dessas metodologias são integrantes da manutenção moderna.

2.1.1.3 TERCEIRA GERAÇÃO

Com a universalização do Toyotismo, um novo modelo de produção desenvolvido por Taiichi Ohno e implementado na Toyota, mas mais especificamente a globalização do *jus-it-time*, onde os estoques são reduzidos e qualquer parada em um determinado setor acarreta na paralisação de toda a produção, ficou mais evidente que a otimização da manutenção do maquinário é imprescindível. Contudo este não é o único fator que contribuiu com o desenvolvimento da manutenção a elevação de custo, de mão-de-obra, de capital, a competitividade em escala mundial, o aumento da automação e principalmente a exigência do mercado no que tange a qualidade e eficiência do produto, também contribuíram de forma significativa, exigindo de certa forma que as organizações se preocupassem ainda mais com a disponibilidade, confiabilidade e a vida útil dos ativos.

Com o aumento da automatização a possibilidade de falha afeta de forma considerável os padrões de qualidade do produto/serviço.

A segurança e o meio ambiente também são afetados pelas falhas, caso os padrões estabelecidos não fossem atingidos as indústrias poderiam ser interditadas. Esses padrões foram muito bem estabelecidos nesta época de 1975 até meados dos anos 2000.

Na terceira geração os conceitos que utilizam de manutenção preditiva foram reforçadas, os softwares para o planejamento, controle e acompanhamento da manutenção foram desenvolvidos, houve a aplicação do conceito de confiabilidade, ocorreu o desenvolvimento de mais uma política a Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC) criada na indústria aeronáutica e a busca de novos projetos com foco na confiabilidade, contudo a falta de sinergia entre as áreas de engenharia, manutenção e operação refletia em taxa elevadas de falhas desses projeto.

2.1.1.4 QUARTA GERAÇÃO

Muitos conceitos introduzidos e desenvolvidos na terceira geração continuam sendo utilizados na quarta geração. O mais importante é o conceito da disponibilidade, que mede a performance do equipamento.

Um importante ponto de vista foi discutido desta geração a relevância da Engenharia da Manutenção nos resultados da empresa.

A ideia que a função da Manutenção é diminuir as falhas e que cada vez menos têm que haver intervenções nos equipamentos, as práticas de monitoramento da condição do equipamento e a manutenção preditiva vem sendo cada vez mais explorados.

2.1.2 TÉCNICAS DE MANUTENÇÃO

O tipo de manutenção é o modo como a intervenção no equipamento será feita, existem várias formas de divisões a respeito da classificação de manutenção. Para detalhar melhor as maneiras de se realizar a manutenção será usado no trabalho seis divisões: Manutenção Corretiva Planejada; Manutenção Corretiva Não Planejada; Manutenção Preventiva; Manutenção Preditiva; Manutenção Detectiva; Engenharia da Manutenção.

Segundo KARDEC *et al.* (2009), os diversos tipos de manutenção podem ser também considerados como políticas de manutenção, desde que a sua aplicação seja o resultado de uma definição gerencial [...], baseada em dados técnico-econômico.

2.1.2.1 MANUTENÇÃO CORRETIVA

É a principal ação da manutenção, visto que é a partir dela que o equipamento será corrigido ou reparado, para que o mesmo possa restaurar seu desempenho original. É a política de manutenção que corresponde a uma atitude curativa, ou seja, efetua-se com o conserto após a avaria (ABNT NBR 5462, 1994).

A manutenção corretiva ocorre de duas formas distintas, queda do desempenho da máquina, na qual se realiza um monitoramento dos parâmetros de operação e falha inesperada.

O que a organização deve evitar é a ocorrência da manutenção corretiva não planejada que acaba acarretando prejuízos na produção e muitas das vezes causam grandes danos no próprio equipamento. A estratégia da manutenção não planejada esta associada também ao alto custo de estoque de peças para reparo. No estudo de ALMEIDA (2005) ele relata que o custo desta estratégia é cerca de três vezes maior que o custo de quando o reparo ocorre de forma planejada ou preventiva.

Por outro lado a empresa deve utilizar a técnica de manutenção corretiva planejada que resulta em menores custos, abrangendo desde o tempo de parada (lucro cessante) até o baixo custo com estoque de peças e sempre apresenta uma qualidade melhor. Esse tipo de

intervenção se dá pelo monitoramento de parâmetros operacionais que indicam a redução da eficiência ou por decisão dos gestores e que normalmente é baseada em nos dados de operação.

2.1.2.2 MANUTENÇÃO PREVENTIVA

A definição de manutenção preventiva de acordo com KARDEC *et al.* (2009) é a atuação de forma a reduzir ou evitar a falha ou queda de desempenho, obedecendo a um plano previamente elaborado baseado em intervalos de tempo. A manutenção preventiva pode ser descrita como as atividades de manutenção que tem o objetivo de manter o equipamento e as instalações em um estado satisfatório para a produção (SULLIVAN *et al.*, 2004).

A manutenção que visa a correção de defeitos Para alguns setores do mercado a utilização da prevenção é predominante, devido ao principal fator do sistema for a segurança do usuário, esse fato ocorre muito na área da saúde e aeronáutica.

Esta técnica deve ser adotada quando não é possível de se realizar uma manutenção preditiva, quando a segurança do equipamento ou da planta é uma restrição, risco grande de impacto ao meio ambiente, quando mais altos forem os custos de falha e a alta interferência desta falha na produção.

Estas intervenções são programadas em um equipamento ou sistema através da sua criticidade e recomendações definidas pelo fabricante (VIERRI, 2007). O fabricante é o detentor dos conhecimentos e recomendações para garantir o bom funcionamento do equipamento (BRANCO FILHO, 2006). Já KARDEC *et al.* (2009), afirma que os fabricantes nem sempre fornecem com precisão os dados necessários para executar os planos de manutenção preventiva e que o ambiente influencia de modo significativo na degradação. Forçando com que a empresa defina o período da troca.

2.1.2.3 MANUTENÇÃO PREDITIVA

Conhecida também como Manutenção sob Condição ou Manutenção com Base no Estado do Equipamento. É a manutenção que permite garantir a qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se meios de supervisão centralizados ou de amostragem para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva não planejada (ABNT NBR 5462, 1994).

O principal objetivo deste tipo de manutenção é parar o equipamento no momento certo, minimizando as intervenções e aumentando a disponibilidade. No que se refere a produção a Manutenção Preditiva é a mais adequada, visto que a parada da máquina ocorrerá somente quando for necessária, ou seja, o mínimo possível, reduzindo assim o lucro cessante da organização.

Por outro lado a esta técnica necessita geralmente de grandes investimentos iniciais para por conta de necessitar da instalação de instrumentos de medida e de análise, além de ser necessário o monitoramento *online*. Para se ter uma ideia, o investimento é cerca de 1% do valor do ativo a ser monitorado, por outro lado os benefícios gerados pela predição da falha é extremamente satisfatório. Estudos mais específicos indicam que a manutenção preditiva possui tantos resultados que é considerada como uma atividade produtiva e a principal técnica para levantamentos de parâmetros para ação de manutenção preventiva nos equipamentos. (SPAMER, 2009).

Vale ressaltar que antes de se propor a manutenção preditiva é importante analisar qual o custo atual da manutenção, o equipamento que pretende ser monitorado, a performance desta máquina atualmente. A predição não é absoluta e nem todos os ativos precisam ser monitorados.

Para que os resultados apareçam e que cheguem a uma redução de 15% do custo da manutenção clássica, é preciso contar com uma mão-de-obra altamente treinada e que não somente colete os dados, mas que analise e consiga identificar o diagnóstico e prognóstico.

2.1.2.4 MANUTENÇÃO DETECTIVA

Esta técnica começou a ser utilizada na década de 90 e sua a definição de Manutenção Detectiva é a atuação efetuada em sistemas de proteção, comando e controle, buscando detectar falhas ocultas ou não perceptíveis ao pessoal de operação e manutenção (KARDEC *et al.*, 2009). Segundo Xenos (2004), as atividades que visam detectar as falhas ocultas através de testes nos equipamentos podem ser classificadas como uma atividade de inspeção. Ela tem o objetivo de identificar falhas ocultas em sistemas de proteção, que não são perceptíveis pela manutenção e operação. A identificação de falhas ocultas é essencial para garantir a confiabilidade de sistemas e equipamentos (KARDEC, 2009).

A principal diferença é o nível de automatização. Na manutenção preditiva, faz-se necessário o diagnóstico a partir da medição de parâmetros, no entanto a manutenção

detectiva, o diagnóstico é obtido de forma direta a partir do processamento das informações colhidas junto à planta. Com implantação deste tipo de intervenção a ocorrência de paradas indesejadas, fica extremamente reduzida.

2.1.2.5 ENGENHARIA DA MANUTENÇÃO

É um conceito de que a planta pode ser melhorada continuamente no que tange ao setor de Manutenção. A Engenharia de Manutenção trabalha somente quando se consegue colher, armazenar dados de operação, para que seja possível a partir dessas informações propor melhorias nos procedimentos. Geralmente a Engenharia da Manutenção é implementada somente após a consolidação da manutenção preditiva, pois será ela que irá gerar dados relevantes sobre o equipamento.

O objetivo da Engenharia é aumentar a disponibilidade, confiabilidade, melhorar a manutenibilidade, aumento da segurança operacional e do meio ambiente, eliminação de problemas crônicos, através da aplicação de técnicas modernas de gerenciamento como, análise de falha, *benchmarks*. KARDEC *et al.* (2009) comenta que a implantação da deste conceito é a segunda quebra de paradigma da Manutenção e que significa uma mudança cultural da organização.

2.1.3 POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO

Ações de manutenção são maneiras de reparar o equipamento para restabelecer o desempenho operacional original. Quando se trata de gestão estratégica da manutenção, são tomadas decisões na identificação de quais ativos serão submetidos a certas intervenções, qual a manutenção a ser aplicada, determinar qual o papel da manutenção na empresa e quais técnicas de manutenção seguir, isso só é possível quando se adota uma política de manutenção, ou seja, a política de manutenção nada mais é do que a gestão da manutenção.

WAEYENBERGH (2005) relata que, a política de manutenção se manifesta como um conjunto de ações necessárias para desenvolver as tarefas específicas de manutenção numa organização.

Segundo KIRBY (2002), as três políticas mais utilizadas nas empresas são:

- Manutenção Produtiva Total – TPM: Caracteriza por manter o compromisso voltado para o resultado, ou seja, manter a planta com a máxima eficiência

de produção e aumentar o ciclo de vida do ativo, buscando assim a perda zero. Neste tipo de política os operadores são importantes, pois são eles que criam rotinas de manutenção preventiva. Para construir um bom programa de TPM é preciso seguir oito pilares, que são a base de sustentação e desenvolvimento: Melhoria individual dos equipamentos; Manutenção planejada; Controle inicial do equipamento; Treinamento dos colaboradores; Manutenção autônoma; Manutenção voltada para a qualidade; Gerenciamento e segurança, higiene e meio ambiente. Vale ressaltar que esta política envolve todos os departamentos da empresa em busca do resultado, como defeito zero ou falha zero.

- **Manutenção Baseada no Risco – RBM:** A política busca a redução do risco global do ativo de forma a determinar valores de risco e priorizar as atividades de manutenção. A implementação da manutenção baseada no risco visa reduzir a probabilidade de uma falha inesperada que desembocaria em um acidente, humano ou ambiental (STARR, 2003). A RBM é constituída de três partes, são elas: Determinar o risco; Determinação do nível aceitável do risco e planejar a manutenção. Este método prioriza os equipamentos mais suscetíveis a falha e defini esforços para minimizar as paradas indesejadas.
- **Manutenção Centrada na Confiabilidade – MCC:** A metodologia tem como função minimizar o custo com a manutenção, porém com foco nas funções mais vitais do ativo e eliminar as atividades desnecessárias. No caso da manutenção centrada na confiabilidade é indispensável para a implementação obter respostas para sete perguntas: Quais as funções preservar; Quais as falhas funcionais; Quais os modos de falha; Quais os efeitos das falhas; Quais as consequências das falhas; Quais as tarefas aplicáveis e efetivas e quais as alternativas restantes. Para que a equipe de manutenção seja capaz de responder as questões é preciso utilizar várias ferramentas de gestão como análise dos modos e efeitos de falha (FMEA), análise de árvore de falha (FTA), indicadores-chave de desempenho (KPI's) e muitos dados estatísticos.

2.2 TURBINA A GÁS

As turbinas a gás são classificadas como turbomáquinas térmicas, composta por elementos rotativos acoplados ao eixo. Esses motores são os principais para a geração de potência mecânica, pois se destacam pela alta eficiência e confiabilidade, aliada ainda com poucos problemas de balanceamento e baixo consumo de óleo lubrificante. Além do mais podem gerar elevadas potências. Segundo SARAVANAMUTOO (2001) 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.

Em 1791 John Barber um engenheiro inglês, desenvolveu o que seria o equipamento mais similar com as turbinas a gás modernas, contendo basicamente os mesmos componentes que as atuais, contudo utilizava um compressor alternativo. O grande avanço no desenvolvimento desses motores se deu durante a segunda guerra mundial, na qual a aeronáutica necessitava que as aeronaves de guerra precisassem atingir altas velocidades, onde se mostrou muito viável. Ao longo do tempo surgiram algumas configurações desses motores rotativos, como os turboélices, turboeixos e turbofans, cada um com sua vantagem e desvantagem.

Seus constituintes são basicamente cinco: entrada de ar, compressor, câmara de combustão, turbina e bocal. Os compressores podem ser classificados como axiais ou centrífugos e ambos são constituídos pelo rotor (parte rotativa) e pelo difusor ou estator (parte estática), podendo ser constituídos por vários estágios, seu papel é fornecer o máximo fluxo de ar, com maior pressão possível. Esse componente é fundamental importância no funcionamento do motor, pois é a partir de uma operação eficiente e estável que a turbina a gás apresentará um alto desempenho, este fato ocorre por cerca de $\frac{3}{4}$ da potência oriunda da expansão da mistura ar/combustível na turbina é usada para acioná-lo. Os compressores axiais possuem um rendimento melhor que os centrífugos, toda via ambos os tipos possuem característica próprias. Após a compressão o ar é direcionado para a câmara de combustão, nela ocorrerá a pulverização, vaporização, a mistura do ar com o combustível, além disso, tem a função de queimar e diluir a mistura. As câmaras das turbinas a gás podem possuir três configurações diferentes: Caneca ou tubular, Anular e tubo-anular. A expansão da mistura ocorre na turbina e o escoamento de entrada deve ser uniforme, tanto radial como

circunferencialmente, na temperatura, pressão e velocidade. A turbina tem o papel de fornecer energia para todos os componentes.

Tanto o compressor como a turbina são formados por aletas e uma das dificuldades do desenvolvimento das turbinas a gás antigamente era a falta de tecnologia, para produzir as aletas, fazendo com elas resistissem a grandes temperaturas de entrada na turbina (TET) e uma alta compressão. Um dos pontos que ajudaram e é extremamente importante para alcançar uma alta TET, foram as sangrias para a refrigeração da turbina, cerca de 15% do fluxo de massa que passa pelo compressor é utilizado para o resfriamento. Outra parte importante para o aumento da eficiência dos componentes foi o desenvolvimento de materiais e processos de fabricação utilizados na confecção dos constituintes, conseguindo assim atingir características razoáveis de projeto: razões de pressões da ordem de 35:1 para compressores, com eficiências de 85-90%; e temperaturas de trabalho de 1650K para turbinas com eficiência de 90%.

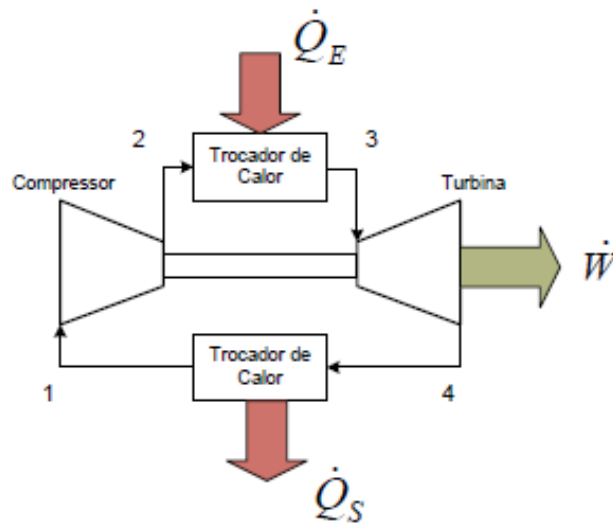
Como já foi dito anteriormente, as turbinas a gás possuem algumas configurações distintas para cada tipo de aplicação. Os motores destinados à geração de potência elétrica podem ser identificados como turbinas aeroderivativas, ou seja, são turbinas aeronáuticas modificadas. São caracterizadas pelo reduzido volume e peso, podendo gerar mais de 40 MW, outro ponto interessante é o aumento do número de sensores de monitoramento em comparação com as turbinas aeronáuticas. Os rolamentos, o sistema de combustão e a adição de uma turbina de potência são as adaptações mais comuns. Outra turbina industrial é a *heavy duty*, elas são conhecidas pela robustez, alta confiabilidade e monitoramento podendo fornecer potências superiores a 300 MW.

No transporte marítimo as turbinas a gás tem uma história de sucesso, 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 alto 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, por conta de 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.

Se analisarmos a turbina a gás pela ótica da termodinâmica veremos que ciclo aplicado foi proposto por George Brayton em 1870. O Ciclo Brayton ou Ciclo Padrão a Ar, as premissas desse ciclo são: o fluido de trabalho é o ar; o mesmo é um gás ideal; a variação de energia cinética na entrada e na saída de cada componente é desprezível e as trocas de calor são realizadas por intermédios de trocadores de calor; quaisquer perdas ao longo do ciclo são desprezadas. Na Figura 1, a seguir podemos ver o esquema do ciclo ideal.

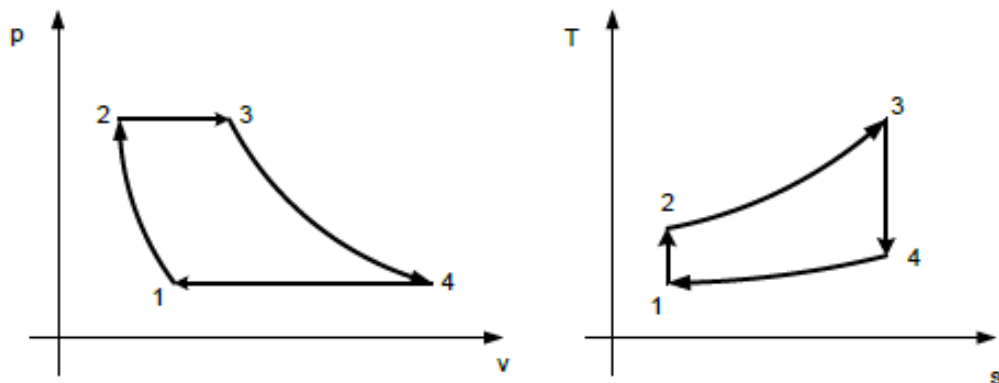
Figura 1: Esquema do ciclo padrão a ar (Ciclo Brayton).



Fonte: BARBOSA, 2010

Os processos que ocorrem no ciclo idealizado são: 1-2 compressão adiabática (Compressor), 2-3 adição isobárica de calor (Câmara de Combustão), 3-4 expansão adiabática (Turbina) e 4-1 rejeição isobárica de calor (Atmosfera). Na Figura 2, abaixo podemos ver como se comporta as variáveis de estado e a entropia nas etapas do ciclo.

Figura 2: Diagramas P-V e T-S do Ciclo Brayton.

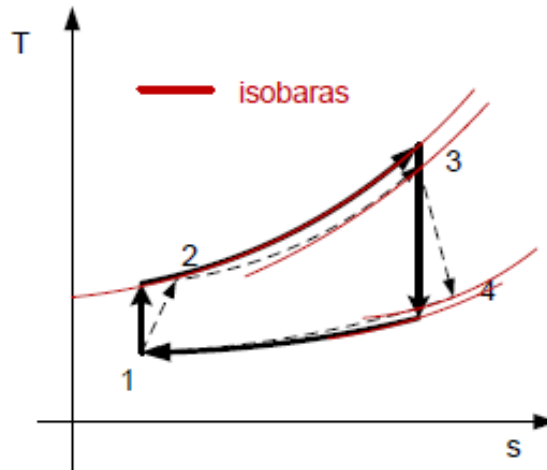


Fonte: BARBOSA, 2010

Infelizmente no mundo real há a presença de perdas e irreversibilidades no processo de conversão de energia química em energia mecânica, como: perdas de carga nos trocadores

de calor ou câmaras de combustão e nos dutos; o processo de compressão e expansão são descritos por processos irreversíveis; os mancais, rolamentos e outros componentes causam perdas mecânicas; as propriedades do fluido de trabalho variam significativamente ao longo do ciclo. Na Figura 3, segue o diagrama T–S com algumas perdas, que acarreta na diminuição da eficiência do ciclo.

Figura 3: Diagrama T–S do ciclo real da turbina a gás



Fonte: BARBOSA, 2010

2.2.1 FALHAS QUE AFETAM O DESEMPENHO DAS TURBINAS A GÁS

São vários os parâmetros que podem ser acompanhados para se estabelecer a condição de uma máquina. A análise do óleo e a vibração dos mancais é um exemplo. Segundo MONTEIRO, (2010) com esse acompanhamento, pode-se detectar vários tipos de falhas, inclusive a dos próprios mancais, mas a vibração, sozinha, não diz muito sobre as falhas que afetam o desempenho da turbina a gás.

As falhas descritas a seguir afetam os parâmetros de desempenho da turbina a gás instalada em Usinas Termelétricas, e podem ser identificadas através da análise de desempenho.

2.2.1.1 FOULING

O aumento da rugosidade, mudança na forma da palheta e/ou no ângulo de entrada e diminuição da área da seção, são causadas pela deposição de material nas superfícies das palhetas (*Fouling*). Uma das causas mais comuns de perda de desempenho encontrada pelos usuários de turbinas a gás e (OGAJI et al. 2002a, 2002b) pode ser responsável por mais de

70% da perda de desempenho durante a operação. A Figura 4, obtida em EFSTRATIOS (2008), mostra o acúmulo de material nas palhetas do bocal do 1º estágio de uma turbina.

Figura 4: Acúmulo de material nas palhetas de uma turbina



Fonte: ESTRATIOS, 2008

Segundo SARAVANAMUTOO, (1989) o material depositado, normalmente é formado por poeira, insetos e pólen, que quando misturados com o gás de escape do motor e os vapores de óleo, ambos de vazamentos internos e externos, formam uma massa pegajosa que adere nas palhetas.

O depósito leva às reduções da vazão em massa e da pressão na saída do compressor, a uma queda na eficiência do compressor e, finalmente, à diminuição da potência e ao aumento do Heat Rate (MONTEIRO, 2010). Foi relatada (OGAJI et al., 2002a) a ocorrência de fuligem em até 50% dos estágios do compressor. Existe um limite para a quantidade de material que é depositado, o qual é determinado pelas forças aerodinâmicas que previnem depósitos adicionais nas palhetas.

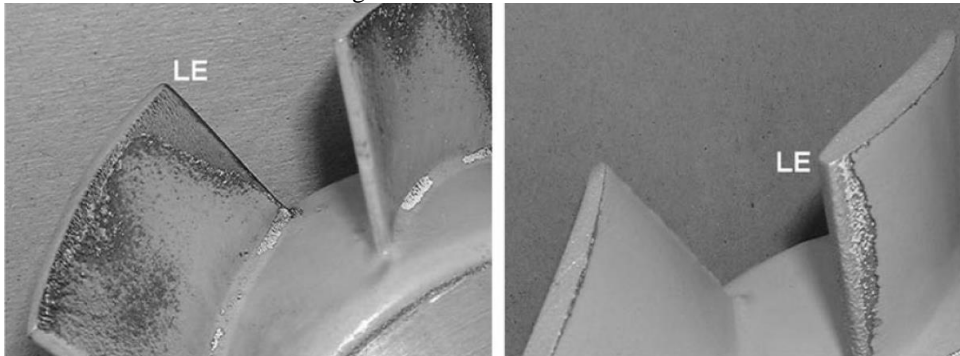
Pode-se recuperar o desempenho no motor devido ao *fouling*, realizando a lavagem dos compressores. De acordo com OGAJI et al., (2002) a limpeza é necessária quando a vazão em massa cai aproximadamente 2,5%.

2.2.1.2 EROSIÃO

A erosão é causada pela remoção abrasiva do material dos componentes da turbina a gás pelas partículas em suspensão no ar (EFSTRATIOS, 2008). As superfícies expostas aos impactos tornam rugosas, há uma mudança no perfil das palhetas, aumento das folgas, variação da distribuição de pressão na superfície da palheta e, portanto, decréscimo da eficiência e da vazão em massa do componente (OGAJI et al., 2002).

Outro efeito da erosão é fazer com que os estágios frontais do compressor de alta pressão e os do compressor de baixa pressão fiquem susceptíveis ao *Surge*, uma anomalia na qual afeta a direção do fluxo de ar, podendo ameaçar a integridade do motor. Foi mostrado também (OGAJI, S.O.T., SINGH, R., 2003), que a erosão afeta mais os últimos estágios do compressor do que os estágios iniciais (devido à alta pressão nessa região).

Figura 5: Efeito da erosão.



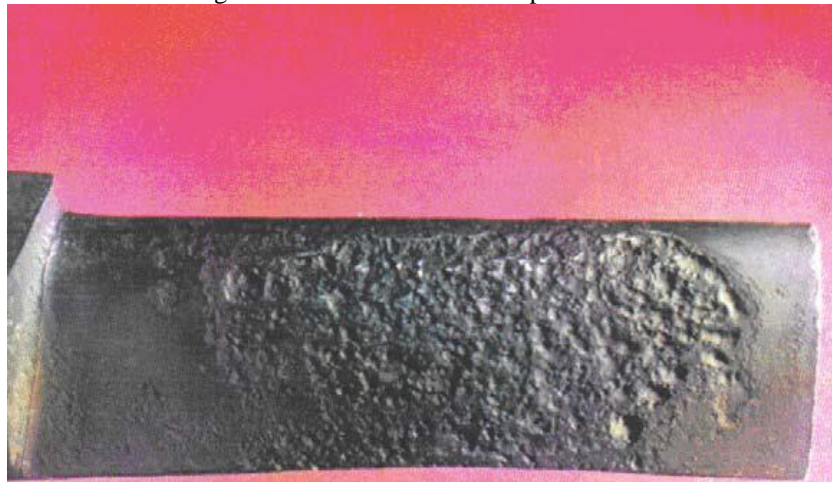
Fonte: ESTRATIOS, 2008

2.2.1.3 CORROSÃO

A corrosão é a perda de material oriunda de reações químicas com contaminantes que se misturam com o fluido de trabalho de turbina a gás. As palhetas da turbina são mais susceptíveis à corrosão (OGAJI et al., 2002a) devido à presença, nos produtos da combustão, de elementos como o vanádio e o sódio, levando à redução da eficiência desses componentes.

Uma proteção efetiva contra o ataque corrosivo, tanto nas turbinas quanto nos compressores, (EFSTRATIOS, 2008) é obtida através do revestimento das superfícies expostas ao ataque.

Figura 6: Efeito da corrosão da palheta.



Fonte: ESTRATIOS, 2008

2.2.1.4 FOLGA NO TOPO DAS PALHETAS DO ROTOR (*TIP CLEARANCE*)

Fenômeno típico de máquinas de fluxo axial como turbinas e compressores axiais, a instabilidade é provocada pela distribuição não uniforme da folga da selagem no topo das palhetas, isso provoca um diferencial na força axial do fluido sobre o rotor, gerando a componente desestabilizadora conhecida como “força de Alford” (RESENDE, 1991).

A eficiência da turbina e a vazão, são influenciadas, um aumento de 0,8% na folga, para um compressor axial, leva a uma redução de 3% na vazão e a uma redução de 2% na eficiência (OGAJI et al., 2002a).

2.2.2 MODELOS DE PREVISÃO DE DESEMPENHO (MPD)

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 bem projetado deve operar em várias condições distintas e o seu ciclo de vida, ou seja, da fase de projeto até o seu descarte, deve ser superior a 50 anos. Um modo de diminuir o custo do desenvolvimento do equipamento é a criação de um modelo virtual.

É óbvio que um fabricante de turbinas a gás deve possuir um Modelo de Previsão de Desempenho, por outro lado, é importante perceber que, aos usuários de turbinas a gás interessa muito esse tipo de ferramenta de análise, para investigações durante a operação dos motores que podem ser utilizadas, por exemplo, para diagnósticos (ALVES, 2003).

Os modelos têm como objetivo avaliar o desempenho no ponto de projeto, fora do ponto de projeto e em regime transitório, é interessante que o MPD esteja disponível já na fase inicial do projeto, antes mesmo da prototipação do motor.

Outro objetivo do MPD é facilitar o desenvolvimento de sistemas de controle, utilizados para investigar estratégias de controle e limitações de parâmetros, sem colocar em risco os equipamentos. Atualmente esta possibilidade é muito importante, dadas complexidades e sofisticações dos motores e sistemas de controles, analisar e direcionar os ensaios para que seja possível investigar condições perigosas de funcionamento e para familiarização com o provável funcionamento do motor no decorrer dos ensaios, diagnosticar problemas na operação, uma vez que a turbina a gás tenha sido colocada em operação, muitos dos problemas são transferidos para o usuário, modernamente, um MPD ajuda muito no estabelecimento das rotinas de operação e de manutenção dos motores (ALVES, 2003).

A fim de cancelar a importância dos MPD's no desenvolvimento de novos motores, vale a pena recorrer ao artigo de Khalid (1989), nos ensaios de desenvolvimento de um turbofan, percebeu-se uma flutuação inaceitável na pressão, na carcaça intermediária entre o fan e o compressor, durante o transitório; usando o MPD observou-se um aumento acentuado na razão de desvio durante a desaceleração; o grupo de projeto, de posse das informações provenientes do MPD, reprojeteu a carcaça intermediária e a flutuação inaceitável na pressão deixou de existir. No desenvolvimento de sistema de controle, a previsão do MPD é tão fiel que o sistema de controle projetado a partir da previsão de desempenho do modelo requer somente pequenas modificações durante os ensaios do motor; a coincidência das curvas de aceleração, real e prevista, em altitude, de marcha lenta até a máxima pós-combustão, demonstra o fato. No que diz respeito à operação do motor, o MPD foi usado com sucesso na determinação da tração transitória em voo de um turbofan instalado em uma aeronave de caça, moderna e de alto desempenho; outra utilidade do MPD foi no estudo da estabilidade, em regime transitório, de pós-queimador.

É necessário que o Modelo de Previsão de Desempenho siga alguns requisitos para atender o usuário e fornecer dados consistentes, para que seja possível a melhoria do equipamento tanto no desenvolvimento, quanto na operação.

Segundo ALVES, (2003) segue alguns dos requisitos que o MPD deve seguir:

Realidade: O Modelo tem que ser fiel e represente com precisão o comportamento do motor em toda faixa de operação.

Flexibilidade: o Modelo deve permitir que todos os modos de operação do motor sejam simulados (programação de combustível, geometria variável, etc.); deve permitir que novas informações sobre as características dos componentes sejam introduzidas; deve ser capaz de lidar com novas situações que não estavam previstas inicialmente.

Credibilidade: a previsão de desempenho deve ser facilmente entendida pelos especialistas de outras áreas de interesse, que não são especialistas em simulação; portanto os resultados produzidos pela previsão devem ter forma similar à do motor real e o modelo deve utilizar dados comumente disponíveis.

Disponibilidade: uma vez que o Modelo tenha sido estabelecido, ele deve estar pronto para uso, sem a necessidade de ajustes demorados na sua utilização.

Confiabilidade: um alto grau de confiabilidade e repetibilidade são, sem sombra de dúvidas, essenciais; o Modelo deve permitir a fácil verificação, para se assegurar o funcionamento correto.

2.3 GAS PATH ANALYSIS (GPA)

Para que seja possível realizar a gestão do ativo, como foi visto anteriormente, se faz necessário utilizar metodologias que facilitem o prognóstico da máquina. Em turbinas a gás e na maioria dos equipamentos utilizam as seguintes técnicas:

- A. Análise de desempenho;
- B. Análise de óleo e partículas;
- C. Análise de vibração;
- D. Análise da vida útil.

Neste trabalho será utilizada apenas uma metodologia dentro da grande área de análise do desempenho. Porém para que o gerenciamento gere resultados efetivos é indispensável à combinação de mais técnicas de análise.

Existem algumas técnicas de análise de desempenho, como a descrita no artigo do SARAVANAMUTO, 1989, no estudo ele utilizou a técnica de *Stacking Stage*. Uma metodologia muito interessante e que consegue analisar o equipamento de forma global e traduzir os dados de operação com os parâmetros de desempenho é o *Gas Patch Analysis* ou análise do caminho do gás. Segundo NATO, (2007) o método de análise do caminho do gás é baseado na ideia de que qualquer mudança no desempenho dos componentes que estão em contato com o caminho do gás resultará na mudança dos parâmetros termodinâmicos. Se esta segunda mudança for rastreada, a causa original pode, em princípio, ser detectada.

O GPA foi idealizado por URBAN, (1973) com o intuito de facilitar a identificação das falhas que estão acometendo o motor. Com a metodologia é possível identificar, isolar e quantificar o motivo da redução do desempenho. Contudo a técnica tem limitações e só consegue identificar as falhas dos componentes por onde o fluido de trabalho escoar. Isto implica que as falhas que ocorrem subitamente tais como trincas, não podem ser implicitamente detectadas através avaliação dessas variáveis mensuráveis (OGAJI *et al.*, 2002a). Ou seja, para que a falha seja identificada, ela precisa provocar alterações nos parâmetros mensuráveis (Pressão, temperatura, massa de combustível, rotação e potência) e que esteja no caminho do gás.

Na Figura 7, abaixo é possível visualizar de forma simplificada a ideia da metodologia.

Figura 7: Esquema explicativo do GPA.



Utilização dos Parâmetros de Performance na Detecção de Falhas

Fonte: Monteiro, 2010

URBAN, (1973), desenvolveu um método que após a coleta de dados das medidas realizadas pela instrumentação do motor (Parâmetros dependentes), desencadeia uma série de processos, permitindo assim a detecção de alterações indesejadas em parâmetros de difícil medição (Parâmetros independentes), com isso é possível determinar com precisão as falhas que estão interferindo de forma negativa no desempenho da turbina a gás.

A obtenção da matriz de inter-relação de parâmetros é o procedimento mais crítico do método, pois, será através desta que os parâmetros dependentes e independentes serão relacionados (ALVES, 2014). Isto faz com que haja a possibilidade da identificação acurada do(s) componente(s) defeituoso (s), de acordo com OGAMI et al. (2002c).

A aplicação do GPA traz inúmeros benefícios, um deles o econômico, por possibilitar a realização do monitoramento em tempo real, à consequência disto é a identificação do momento certo de parada da turbina para a manutenção, possibilitando assim, a redução de custo e o prolongamento da vida do motor. Como já foi dito, a metodologia também ajuda a identificar qual a falha que está interferindo no desempenho da máquina, possibilitando assim a interseção certa, isto é, com o problema detectado é possível saber qual

a ação corretiva que trará o melhor resultado, para que a turbina a gás volte a ter um desempenho satisfatório.

O método desenvolvido por Urban, (1975) é intitulado de *Linear Gas Path Analysis* (LGPA). Portanto, a utilização do termo GPA pode significar, no sentido mais amplo, uma técnica de manutenção preditiva de turbinas a gás, assim como a análise de vibração, ou no sentido mais estrito, um dos métodos lineares de análise do desempenho. O contexto se encarrega de dissipar as dúvidas sobre qual o significado que se pretende para o termo GPA (MONTEIRO, 2010).

Com o avanço da engenharia foi possível desenvolver outras metodologias capazes de relacionar as falhas com os parâmetros mensuráveis, como: GPA não-linear, Métodos lineares e não-lineares baseados em Filtros de Kalman, Redes Neurais, Lógica Fuzzy, Algoritmos Genéricos, Sistemas Especializados, Métodos baseados em Mínimos Quadrados Ponderados. Alguns pesquisadores como LI,2005 e MARINAI *et al.*,2004. realizaram estudos comparativos entre os métodos.

3. METODOLOGIA E EQUIPAMENTOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO

A LM6000 é um motor a gás estacionário que foi desenvolvido pela General Electric (GE) sendo derivada da família dos motores a jato CF6, mais especificamente provindo do turbo-ventilador CF6-80C2 utilizado no Boeing 747-400, combinado com a LM2500 uma turbina a gás com bastante importância no mercado. A LM6000 em conjunto com a CF6-80C2 possuem mais de 30 milhões de horas de operação, com uma disponibilidade de aproximadamente 99,6%.

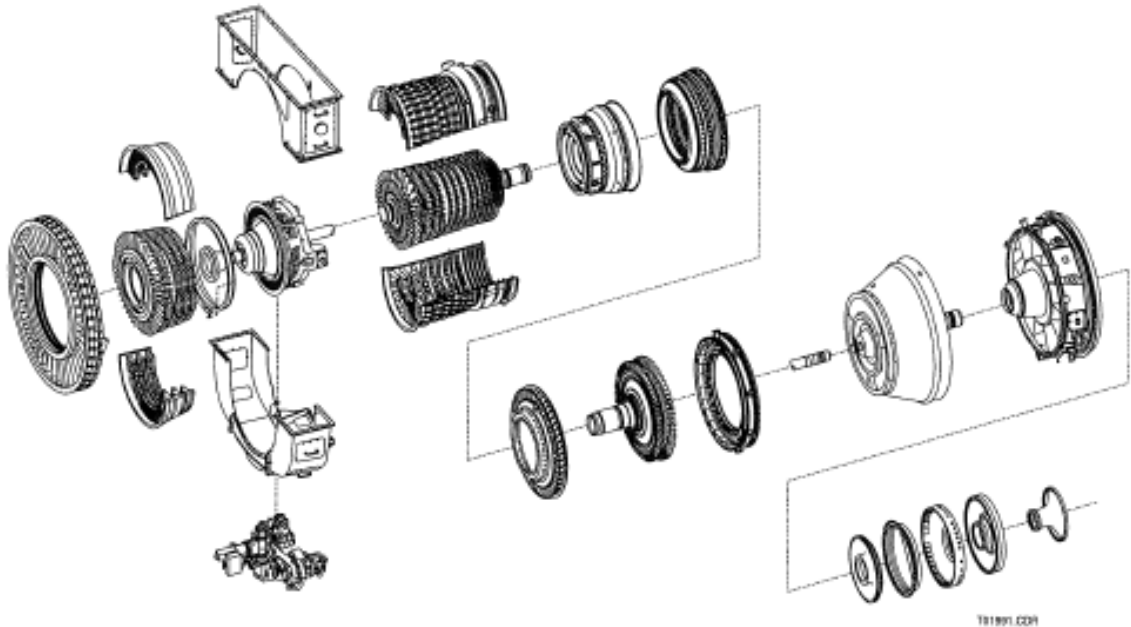
As modificações para adaptar o motor aeronáutico para a LM6000 ocorrem em alguns componentes¹, tais como; O ventilador frontal foi removido e aletas fixas de admissão foram adicionadas; Compressor de baixa pressão (LPC) do LM5000 foi usado; Estruturas dianteiras e traseiras adaptadas; Eixos de saída adicionados na frente do LPC e traseira da turbina de baixa pressão (LPT); Mancal 7R adicionado; Novo sistema de combustível industrial adicionado; Disco de equilíbrio adicionado à LPT e sistema de controle hidráulico para geometria variável adicionado.

A LM6000 possui eixo duplo concêntrico, podendo acionar o gerador tanto na parte da frente como na parte de traseira do rotor. O motor pode ser dividido em dois setores o de baixa pressão (LP) e o de alta pressão (HP). A baixa pressão consiste no compressor de baixa pressão (LPC) que é acionado pela turbina de baixa pressão (LPT), o LPC e a LPT possuem 5 estágios e o compressor tem uma razão de pressão de cerca de 2,4:1. O núcleo HP é constituído pelo compressor de alta pressão (HPC), o qual é integrado por 14 estágios de compressão, comprime o ar em até 12 vezes, e para um maior controle do fluxo as aletas do estator são variáveis. O núcleo é composto também pela turbina de alta pressão (HPT) que possui 2 estágios acionando assim o HPC. A turbina a gás apresenta também um conjunto de aletas fixas de admissão variável (VIGV), além de utilizar válvulas de derivação variáveis (VBV), para regular a passagem de fluxo de ar em marcha lenta e baixa potência. A configuração do combustor da LM 6000 é anular, apresentando 30 bocais de injeção de combustível.

¹ Curso Básico do Operador GE.

Na Figura 8 é possível observar todos os componentes citados.

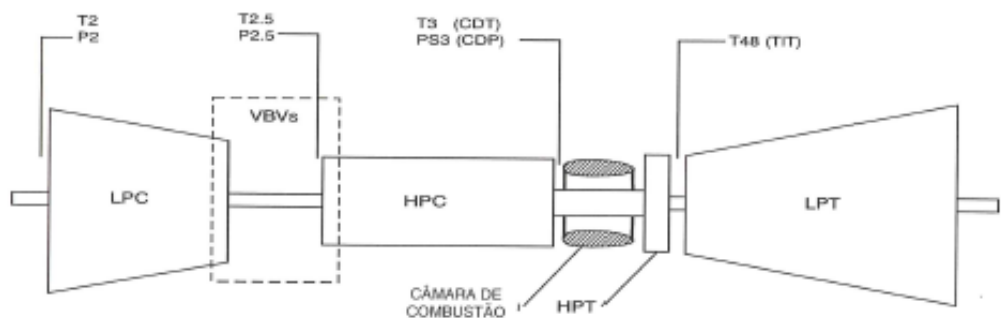
Figura 8: Componentes da LM6000.



Fonte: Curso básico do Operador GE.

A LM6000 é muito bem amparada, no que tange ao seu monitoramento, possuindo sensores que medem a rotação, a vibração e os parâmetros termodinâmicos como temperatura, pressão, emissão de poluentes, geração de potência. Na Figura 9 se encontra os alguns valores de operação e a localização dos sensores de temperatura (T2,T2.5,T3 e T48) e pressão (P2,P2.5, e PS3).

Figura 9: Medições e valores padrão.

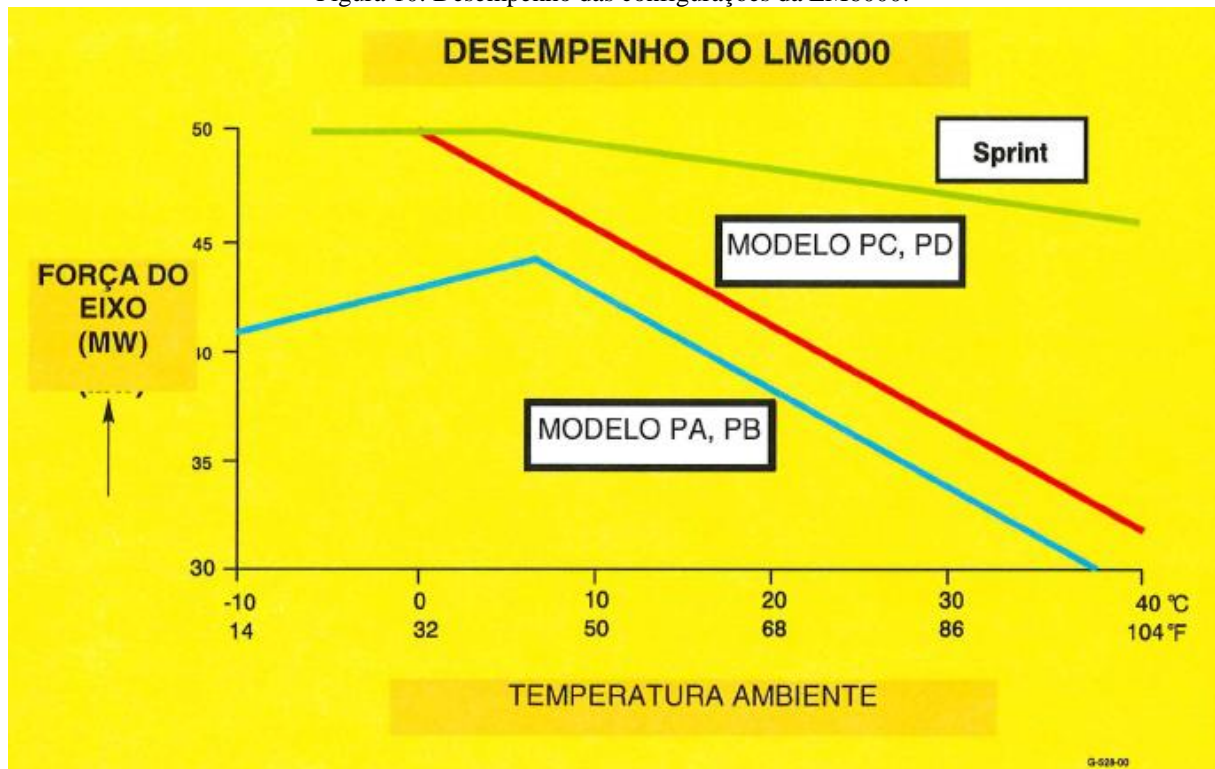


	MARCHA LENTA	MARCHA LENTA SÍNCRONA	MÁXIMA FORÇA BASE	MÁXIMO LIMITE OPERACIONAL
LPC rpm (XN2)	1650 – 1800	3600	3600	3780
HPC rpm (XN25)	6400 – 6700	8400 – 8700	10,300 – 10,500	10,650
HPC Discharge Temp. (T3)	360 – 400	650 – 750	990 – 1008	1008
HPC Discharge Pressure (CDP, PS3)	50 – 57	130 – 143	370 – 420	427
LPT Inlet Temp. (TIT, T48)	725 – 825	950 – 1050	1600 – 1615	1750
LPT rpm (XNSD)	1650 – 1800	3600	3600	3780

Fonte: Manual do Operador.

Com o passar do tempo e com o desenvolvimento de novas tecnologias a GE desenvolveu novos modelos de LM6000. O modelo padrão e que foi introduzido em 1992 foi a LM6000PA. Porém o objeto de estudo da presente obra é a LM6000 Sprint que possui uma câmara de combustão molhada, devido à injeção de água desmineralizada, com isso a turbina consegue gerar cerca de 3,9 MW de potência a mais que uma turbina sem Sprint, como pode ser observado na Figura 10.

Figura 10: Desempenho das configurações da LM6000.



Fonte: Manual do Operador.

3.2 CRIAÇÃO DO MODELO VIRTUAL

A simulação é útil e importante no estudo do desempenho e para conhecer o comportamento da turbina a gás, por permitir o isolamento de fenômenos/falhas que acometem o funcionamento do motor, aliado também ao custo reduzido. Este processo é inviável de ser realizado na planta de operação, por envolver elevados custos, talvez a única forma, de se isolar os fenômenos seria a criação de bancadas de ensaios, porém o custo seria elevado, tornando a alternativa inexecutável.

Na criação do modelo virtual da turbina é imprescindível que se conheça todo o funcionamento e as particularidades que regem o motor. Para se adquirir esse conhecimento sobre o equipamento é necessário utilizar o manual fornecido pelo fabricante e indexado com

os responsáveis pela operação, pois só assim será factível a criação e a simulação correta do motor.

Para iniciar a simulação de desempenho do motor é necessária a criação de uma turbina padrão (turbina modelo), sendo fundamental conhecer os dados no ponto de projeto, ou seja, as especificações do fabricante, encontradas no manual da turbina a gás. Caso não seja possível obter todas as informações via manual, os parâmetros podem ser relacionados a partir do *start* da turbina, isto é, início de operação.

Após a criação e validação do modelo padrão é preciso simular a máquina virtual nas condições que for pertinente a pesquisa, esta reprodução recebe o nome de simulação fora do ponto de projeto, por exemplo: se o objetivo do estudo for à obtenção de informações relacionadas ao comportamento da turbina quando ocorre à erosão na turbina será preciso variar a eficiência isentrópica, ou objetivo for à injeção de água na câmara de combustão, pode-se reduzir a eficiência da combustão, em suma, a simulação fora do ponto de projeto dependerá do fenômeno a ser estudado.

Para o Modelo de Previsão de Desempenho – MPD – será utilizado o programa DESTUR². O software foi projetado para realizar o cálculo do desempenho de qualquer tipo de turbinas a gás nas seguintes condições: no ponto de projeto; fora do ponto de projeto; e em regime transitório adiabático ou não-adiabático. O uso de fluidos de trabalho, considerados como uma mistura de gases com composição diferente do ar, bem como diferentes combustíveis, também está previsto.

Utilizando palavras-chave, relacionadas com os diversos “módulos”, várias sub-rotinas pré-programadas são utilizadas para simular a ação dos diferentes componentes de uma turbina a gás, apresentando como resultados dados de desempenho tais como a potencia ou a tração do motor, o consumo de combustível, etc., bem como detalhes de desempenho dos componentes individuais e a propriedade do fluido de trabalho nas varias estações dentro do motor.

O DESTUR foi concebido de maneira modular, de tal forma que qualquer tipo de turbina a gás pode ser estudada, bastando ordenar, de maneira adequada, a sequência de MODULOS. Está previsto também a introdução de novos módulos, dependendo da necessidade, ao conjunto de módulos já existentes; este tipo de arquitetura de programação é a denominada arquitetura aberta.

² Desenvolvido pelo Professor Doutor Marco Aurélio da Cunha Alves - UFJF

Muitos dos MODULOS correspondem a um componente particular (ENTR – entrada de ar; COMP – compressor; TURB – turbina; etc), outros são utilizados para efetuarem operações auxiliares (TABE – tabelamento de dados) ou mesmo operações aritméticas (OPER – operações aritméticas).

3.3 APLICAÇÃO DO LGPA

O processo de diagnóstico pelo LGPA calcula as mudanças na magnitude dos parâmetros de desempenho do componente (por exemplo, eficiência e vazão de ar no compressor), dadas um conjunto de medições (por exemplo, temperatura na saída do compressor e rotação do compressor) ao longo da turbina a gás (MARINAI et al.,2004).

Para a aplicação do método é preciso conhecer a classificação das variáveis e os parâmetros que circundam o funcionamento do motor. Com o intuito de familiarização de como funciona o método GPA, é preciso identificar de forma rápida o conceito referente aos dois tipos de parâmetro utilizados na metodologia e a importância desta informação.

Como foi relatado no capítulo 2, a matriz de inter-relação relaciona os parâmetros dependentes com os independentes, e este é o diferencial do método. Diante do exposto, os parâmetros dependentes ou variáveis dependentes (Pressão, Temperatura, vazão de combustível, rotação, potência), são as propriedades físicas passíveis de mensuração. As mudanças de seus valores estão relacionadas com a variação das variáveis independentes, ou seja, o parâmetro dependente pode ser interpretado como o efeito. Já os parâmetros independentes ou variáveis independentes (Vazão de ar, eficiência do compressor e turbina, áreas da seção) são propriedades termodinâmicas que estão ligadas com a concepção e construção do motor.

De posse das definições é possível entender o embasamento teórico da metodologia, a relação entre os parâmetros dependentes e independentes pode ser expressada conforme a equação abaixo:

$$Z = H(X, Y) + V + B \quad (1)$$

Onde Z é o vetor com as medições, X é o vetor dos parâmetros de desempenho, Y é o vetor das condições ambientais e dos parâmetros de controle da turbina a gás, V é o vetor com as incertezas na medição, B é o vetor contendo os erros sistemáticos (ou bias) do sensor e

$H()$ é uma função não linear avaliada vetorialmente, e é fornecido por um modelo termodinâmico da turbina a gás em estudo (MARINAI *et al.*, (2004)).

Desconsiderando as incertezas e os erros, pode-se escrever a equação (1) da seguinte forma:

$$Z = H(X, Y) \quad (2)$$

Assumindo que a variação dos parâmetros independentes é relativamente pequena, a equação (2) pode ser linearizada ao redor de um ponto de referência em regime permanente, expandindo-a por meio da série de Taylor, em torno do ponto de referência e de condições ambientais de referência, representada pelo subscrito “0” e desprezando termos de ordem superior, temos:

$$Z = Z_0 + \left. \frac{\partial H(X, Y)}{\partial X} \right|_0 \cdot (X - X_0) + \left. \frac{\partial H(X, Y)}{\partial Y} \right|_0 \cdot (Y - Y_0) \quad (3)$$

Simplificando a equação (3) considerando-se que não há variação nas condições ambientais e operacionais, e reconhecendo a derivada parcial de $H()$ em relação aos parâmetros independentes, X , como o Jacobiano da função não linear que representa o modelo termodinâmico, $J(X, Y)$ chega-se a:

$$\Delta Z = J_0(X, Y) \cdot \Delta X \quad (4)$$

Como já foi o subscrito “0” é referente às condições de referência, fazendo com que o Jacobiano seja calculado a partir do ponto de referência. A matriz J_0 recebe o nome de Matriz Inter-Relação de Parâmetros (MIP) ou matriz dos coeficientes de influência (MCI). O ΔX indica a degradação da turbina a gás, desta forma invertendo o Jacobiano (J_0), temos:

$$\Delta X = J_0^{-1}(X, Y) \cdot \Delta Z \quad (5)$$

Onde a inversa do Jacobiano recebe o nome Matriz dos Coeficientes de Falha (MCF) ou Inversa da Matriz De Inter-Relação de Parâmetros (IMIP). Esta inversão ocorre devido ao método se basear nesta hipótese. É necessário que antes de se utilizar o método é preciso verificar se as premissas da metodologia estão sendo cumpridas. A matriz de coeficientes de influência é um conjunto de coeficientes e a partir da multiplicação com o ΔX se transforma em equações diferenciais, sendo assim é indispensável, para a determinação da matriz, que o

número de variáveis independentes, seja o mesmo que o número de variáveis dependentes, caso isso não ocorra é impossível resolver a Equação (4) partir da inversão da matriz. Diante do exposto, a técnica se limita pela quantidade de instrumentação utilizada no motor.

Outra importante consideração faz-se em função da magnitude encontrada nos coeficientes que relacionam duas variáveis. 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 (ALVES, 2014).

Até o presente momento é de difícil compreensão a forma como se obtém de fato a MCI. O procedimento obtenção do Jacobiano é relatado 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. Traduzindo em termos mais práticos a proposta de VOLPONI, (1982) pode-se alterar em 1% o valor da eficiência do compressor e observar a variação percentual que irá produzir na pressão de saída do compressor de alta pressão, na vazão de combustível, na potência, ou em outro parâmetro que se deseja observar. Com este procedimento é possível obter a MCI que descreve o relacionamento entre todas as variáveis escolhidas, de acordo com os coeficientes que explicitam a porcentagem dessa variação. Vale ressaltar que para a obtenção da matriz de inter-relação é preciso que o parâmetro com a variação pré-determinada seja uma variável independente e o parâmetro que será observado tem que ser uma variável dependente.

De forma pormenorizada será abordado todo o procedimento para a utilização do LGPA, no que tange a criação da matriz de inter-relação. A primeira etapa a ser realizada é a identificação dos parâmetros independentes e dependentes que serão observados no estudo, esta etapa é complicada e deve ser muito bem fundamentada, devido à escolha das variáveis terem uma relação direta com o sucesso da aplicação do GPA. Após isto realizar a variação pré-determinada, mencionada anteriormente, vale ressaltar que esta variação poderá ser em qualquer escalar e este fica a critério do usuário, nesta etapa é importante salientar que a variação ocorrerá simulando o modelo virtual da turbina a gás.

Com isso será observada a diferença percentual das variáveis dependentes e serão computadas pela seguinte expressão genérica utilizada por (URBAN, 1973):

$$\text{Diferença percentual} = \frac{(\text{Dado após referência} - \text{Dado de referência})}{\text{Dado de referência}} \quad (6)$$

De posse desta variação é preciso realizar a razão entre as diferenças percentuais, sendo definida como a diferença percentual dos parâmetros dependentes dividida pela variação percentual dos parâmetros independentes, cujo foram pré-determinados. Esta razão são os coeficientes da matriz e este procedimento deverá ser realizado relacionando todos os parâmetros independentes com os dependentes para que seja possível montar as colunas e linhas da MCI. Na Tabela 2, segue um exemplo prático da matriz retirada da redação da patente referente ao método GPA, desenvolvido por URBAN, (1973).

Tabela 2: 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.

Cada linha da matriz de inter-relação de parâmetros é uma equação diferencial, e que terá uma configuração parecida com a equação (3), porém o conjunto X seria substituído pelos parâmetros independentes e o vetor Z pelos parâmetros dependentes. 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.

A equação abaixo exemplifica a teoria.

$$\frac{\partial T_3/\theta_2}{T_3/\theta_2} = 0.17 \frac{\partial T_4/\theta_2}{T_4/\theta_2} + 0.67(0) + 0.33 \frac{\partial W_{ac2}}{W_{ac2}} - 0.55 \frac{\partial \eta_c}{\eta_c} - 0.33 \frac{\partial A_4}{A_4} + 0 \frac{\partial \eta_t}{\eta_t} \quad (7)$$

Para a obtenção da matriz dos coeficientes de falha é preciso inverter a matriz de inter-relação e obter a equação onde o parâmetro independente será função da variável dependente. Assim o método estará pronto para ser executado, realizando a variação percentual descrita na equação (6), onde o dado de referencia são os dados do modelo virtual e os dados após a referencia será os dados obtidos no decorrer operação da turbina a gás, logo será possível identificar a perda de desempenho ao longo do tempo.

No caso deste trabalho o GPA não será utilizado com o intuito de somente observar a degradação do desempenho da turbina a gás, ele será utilizado para relacionar a razão de pressão dos compressores com a eficiência dos mesmos, para que seja possível realizar uma análise de custo, a fim de determinar o momento certo da intervenção no motor.

3.4 IDENTIFICAÇÃO DO MOMENTO PARA A INTERVENÇÃO

O momento ideal de se realizar a manutenção será obtido a partir de simulação do modelo de previsão de desempenho, da utilização da metodologia do GPA e da modelagem matemática do custo de geração e o objetivo será a minimização desta função.

Primeiramente será simulada no DESTUR a turbina a gás, para entender como o motor se comporta quando a falha ocorre de forma isolada. Com os dados da deterioração do equipamento será possível traduzir a perda de eficiência para o aumento do custo de geração, pois o único custo envolvido na operação do equipamento é o valor monetário do combustível.

De posse dos custos envolvidos na geração de energia e do levantamento dos custos envolvido na manutenção é possível modelar a função custo em função do tempo de operação. O GPA é utilizado para traduzir os parâmetros mensuráveis nos parâmetros de desempenho, visto que a simulação ocorrerá alterando os parâmetros independentes, ou seja, o aumento do custo estará diretamente ligado com a redução da eficiência do motor e como já se sabe não é possível medir tais parâmetros, logo é preciso à utilização da metodologia da análise do caminho do gás. Para a criação do modelo matemático será utilizado um tipo de modelo chamado de modelo mecânico, que consiste na construção pela ótica da estrutura do

sistema. Para a concepção do modelo é preciso construir algumas premissas básicas. Os momentos mais críticos é a concepção das hipóteses e o equacionamento matemático. É importante comparar a solução encontrada, a partir da resolução da descrição do modelo, com dados experimentais, esse talvez seja a parte mais demorada do processo de criação de modelos e é nesse momento que se descobre os erros cometidos na criação das premissas.

Neste trabalho não será provado empiricamente a eficácia do modelo matemático proposto.

4. RESULTADOS

4.1 SIMULAÇÃO DO MODELO VIRTUAL E MATRIZ DE INTER-RELAÇÃO

A construção do modelo virtual da turbina a gás ocorreu através da utilização dos dados de operação da LM6000 instalada na Usina Termelétrica de Juiz de Fora (UTE-JF) e de dados extraídos do manual da GE.

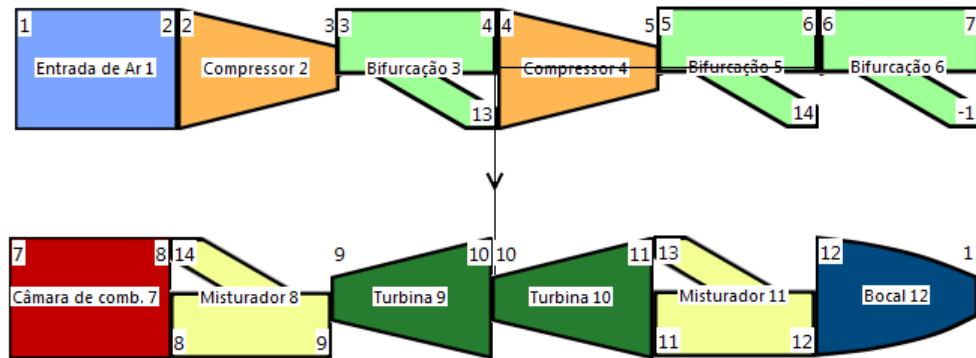
Na concepção do modelo virtual foi necessário adotar duas medidas com o propósito de uma melhor compatibilização com o motor real. A primeira medida, como o motor real possui sangrias em estágios diferentes, tanto no LPC, como no HPC, sendo que o ar sangrado é utilizado tanto no pistão de balanceamento, com função reduzir o empuxo axial no rotor de baixa rotação, como também é utilizado na refrigeração de alguns componentes do equipamento. Este problema foi solucionado de acordo com a literatura, que indica que o ar destinado à refrigeração consegue produzir trabalho, assim essa vazão de ar deve ser reintegrada ao modelo logo após a câmara de combustão. Em relação à massa de ar atribuída ao balanceamento foi incorporado ao sistema antes do bocal, pois de acordo com o esquema de fluxo de ar encontrado na manual da GE ele não é reutilizado na geração de potência.

A segunda medida, relativa à injeção de água na câmara de combustão, que é utilizada para diminuir a emissão de gases poluentes, contudo essa adição provoca um aumento na potência gerada e da eficiência do motor. O problema é solucionado da seguinte maneira: a eficiência da combustão é ajustada para atender o consumo de combustível, que resulta em uma eficiência de 0,967. Essa eficiência seria baixa para uma câmara comum, mas como existe a injeção de água, pode-se considerar que a injeção de água contribui para a redução da eficiência da combustão. Outra maneira de se considerar a injeção de água é diminuir o poder calorífico do combustível e nesse caso a eficiência de combustão será maior.

Os demais componentes da turbina a gás não apresentaram dificuldades na modelagem do motor, devido à facilidade de obtê-las no manual do fabricante e na unidade de operação, sendo assim, não é preciso realizar nenhuma consideração.

Na Figura 11 se encontra a configuração dos módulos do motor virtual a ser simulado. A descrição dos módulos se encontra no ANEXO II.

Figura 11: Módulos no DESTUR da LM6000.



Fonte: Autor

Com o modelo construído e validado a partir da comparação dos dados de simulação com os dados medidos na UTE-JF, foram simuladas quatro falhas que acometem a LM6000: sujeira do filtro, tanto no de baixa como no de alta eficiência, incrustação no compressor de baixa e de alta pressão. Tais falhas foram escolhidas para serem estudadas, devido ao curto prazo entre as manutenções corretivas, ou seja, a troca dos filtros e a lavagem no compressor (formas de solucionar os defeitos simulados) ocorrem com uma frequência elevada em comparação com outros tipos de intervenção, como por exemplo, a troca da turbina, que ocorre quando as aletas das turbinas sofreram com a erosão e corrosão.

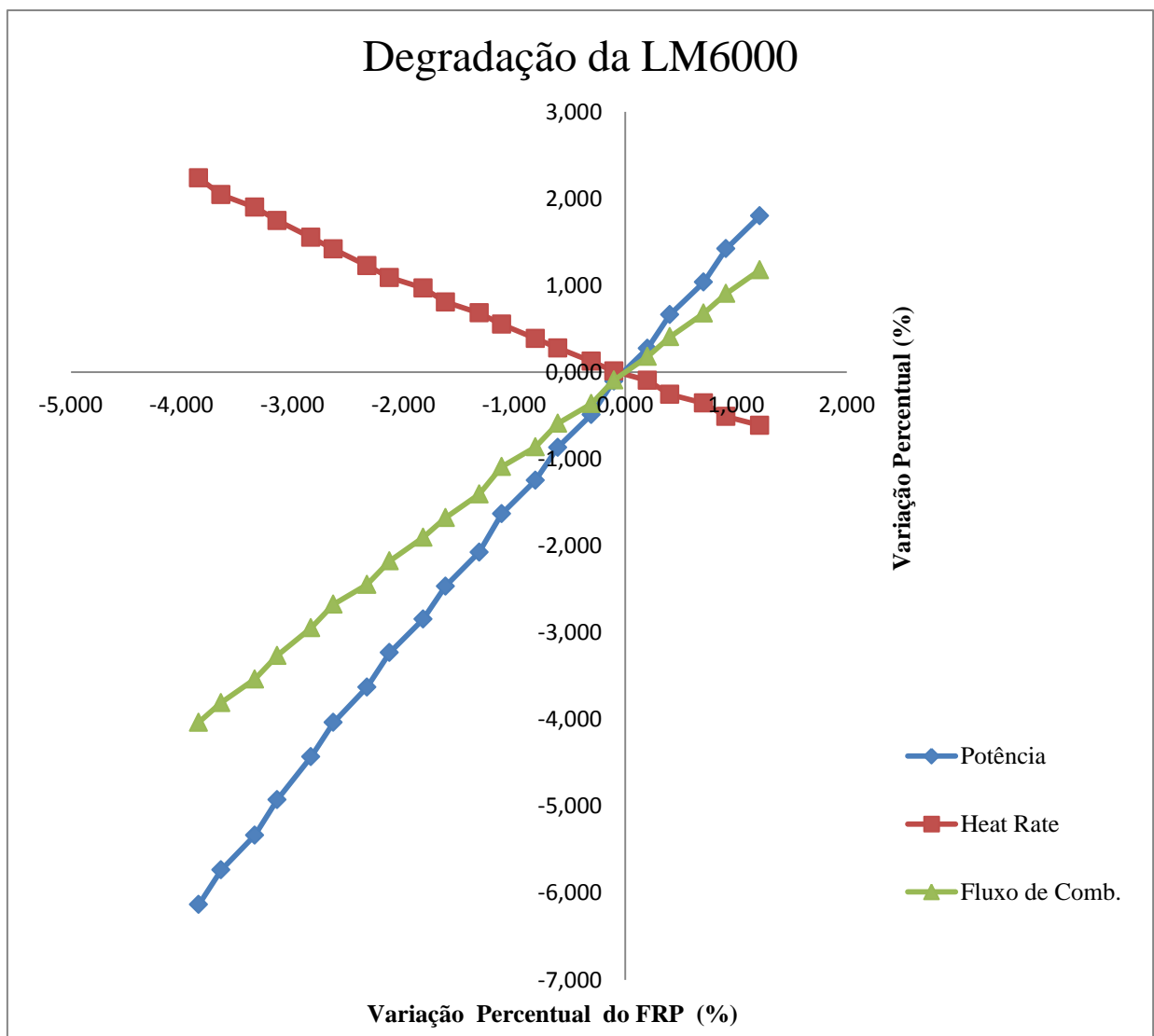
Para a simulação da sujeira dos filtros foi modificado o módulo Entrada de ar 1, mais precisamente o fator do módulo (FM), nomeado como fator de recuperação de pressão da parte subsônica, sendo assim, o valor deste fator é a razão da pressão de entrada do LPC pela pressão atmosférica, a diminuição deste FM significa no aumento de sujeira no filtro. A tabela com os dados da simulação pode ser encontrada no Anexo I (Tabela 11), vale ressaltar que os dados da simulação da sujeira do filtro de baixa são iguais ao do filtro de alta, devido o valor do fator de recuperação de pressão do modelo, ou seja, o valor padrão, ser referente à perda de carga com os dois filtros limpos, com isso, na simulação se admite que o aumento da perda de carga (acúmulo de sujeira no filtro) ocorreu em apenas um dos filtros, isto é, o outro filtro se mantém limpo. Diante do exposto foi realizada apenas uma simulação, em consequência, tem-se apenas uma tabela com os dados da simulação.

Uma observação cautelosa dos dados, verifica-se que o consumo de combustível reduz com o acúmulo de sujeira no filtro, isto ocorre por conta da diminuição da potência útil

gerada. Como a turbina a gás produz menos energia não é preciso manter a vazão de combustível. Por outro lado o *Heat Rate* aumenta, com isso conclui-se que a eficiência da LM6000 diminui, visto que, o *Heat Rate*, pode ser traduzida da seguinte forma, razão entre a energia fornecida pelo combustível, pela energia gerada, como consequência deste fato o custo da energia aumenta, sendo possível de observar esse fato no Gráfico 2, a seguir e na Tabela 12 (Anexo I).

O Gráfico 1 mostra o comportamento da deterioração da turbina a gás com o acúmulo de sujeira do filtro, dessa forma é evidente que a degradação é linear.

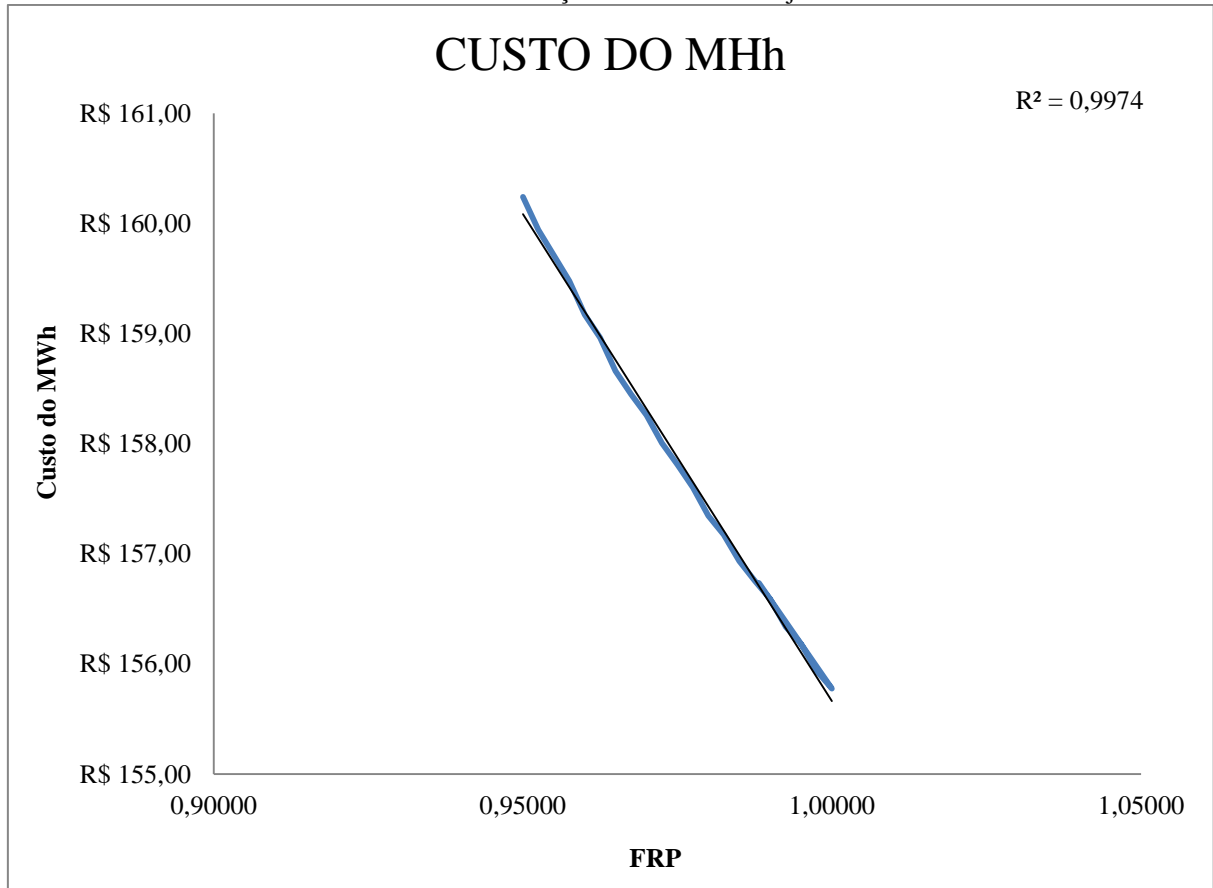
Gráfico 1: Degradação da LM6000 com o acúmulo de sujeira no filtro.



Fonte: Autor

Como foi dito anteriormente o Gráfico 2 mostra o aumento do custo da geração do MWh com o aumento da perda de carga (diminuição do FRP). Vale ressaltar que o único custo envolvido na operação do motor, foi o custo com o combustível.

Gráfico 2: Custo do MWh em relação ao acumulo de sujeira no filtro de baixa.

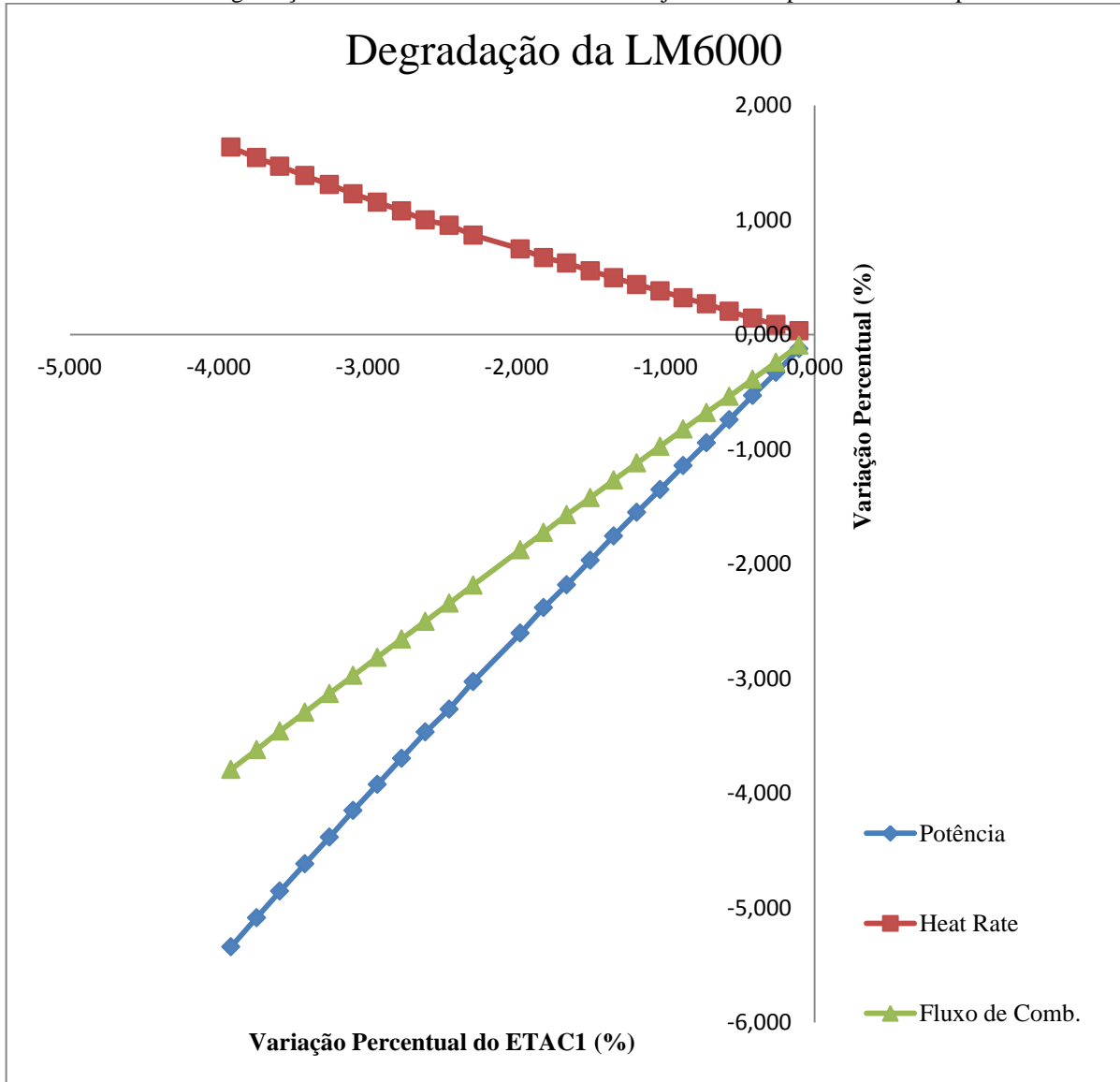


Fonte: Autor

A segunda simulação realizada foi o acumulo de sujeira do compressor de baixa pressão, na qual ocorre com a alteração do FM intitulado fator de escala do rendimento do módulo Compressor 2, esse fator altera a eficiência isentrópica do componente (ETAC1). Nesta simulação ocorre um fato muito interessante que é o aumento da razão de pressão no LPC quando se reduz a eficiência isentrópica (podendo ser observado no Anexo I, Tabela 13) fato este que intuitivamente seria impossível, porém é fisicamente possível.

No Gráfico 3, pode-se observar a degradação da turbina com a diminuição da eficiência isentrópica do LPC.

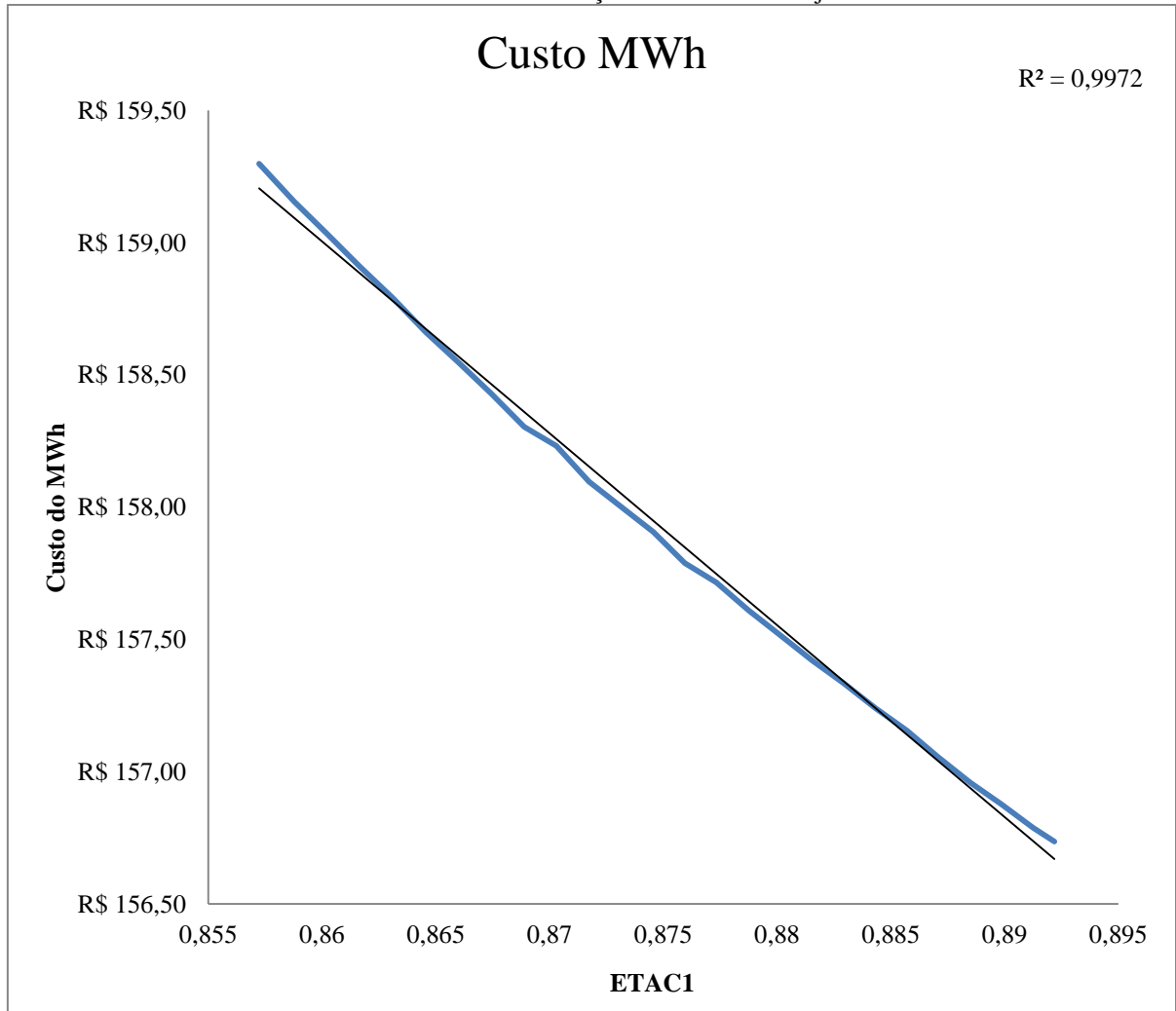
Gráfico 3: Degradação da LM6000 com o acúmulo de sujeira no compressor de baixa pressão.



Fonte: Auto

No Gráfico 4 mostra o aumento do custo da geração do MWh com a degradação da eficiência isentrópica do compressor de baixa pressão. O gráfico obtido com os dados da Tabela 14, encontrada no Anexo I.

Gráfico 4: Custo do MWh em relação ao acúmulo de sujeira no LPC.

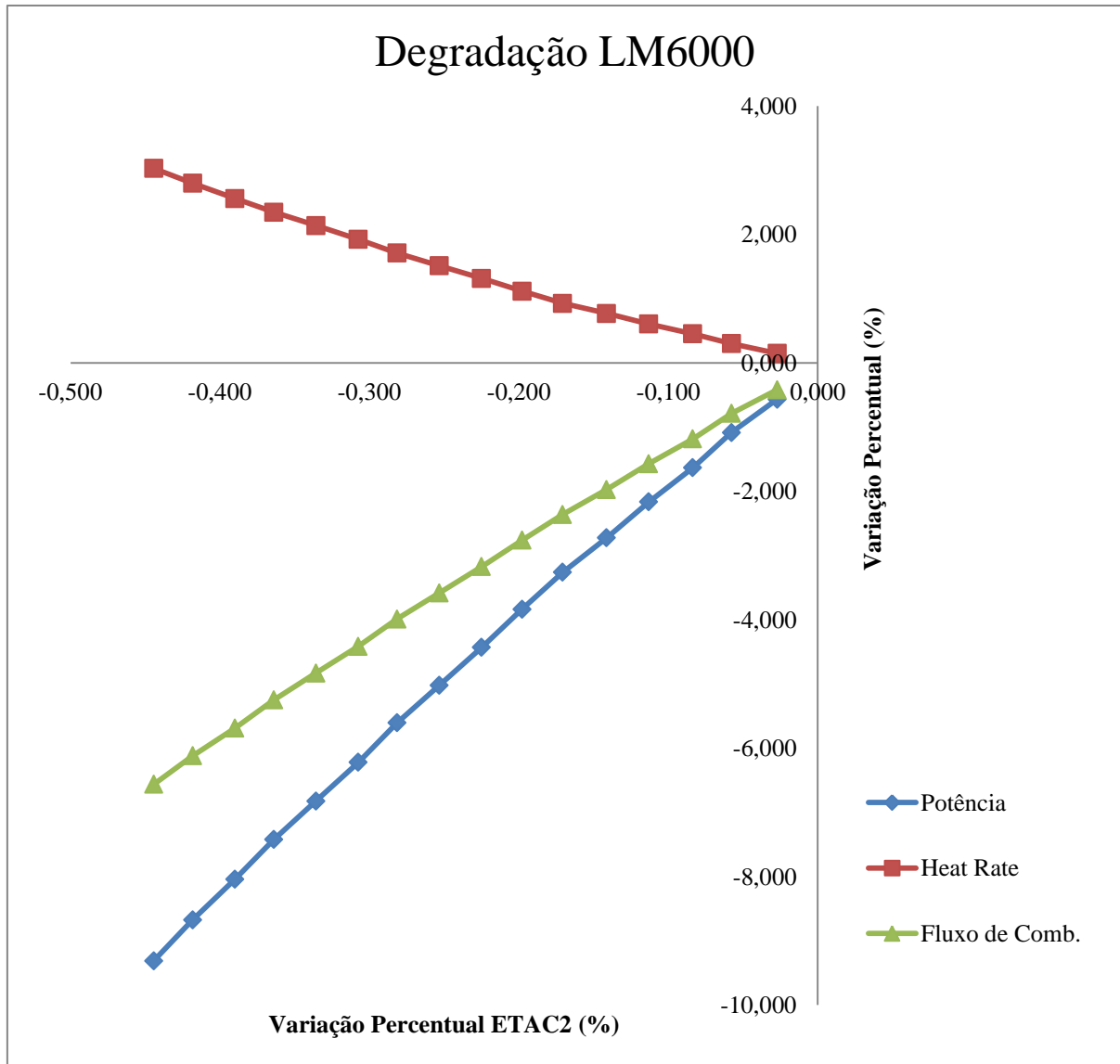


Fonte: Autor

A última simulação representa o acúmulo de sujeira do compressor de alta pressão (Anexo I, Tabela 15 e 16), que ocorre no fator de módulo intitulado fator de escala do rendimento do módulo Compressor 4, esse fator altera a eficiência isentrópica do componente (ETAC2).

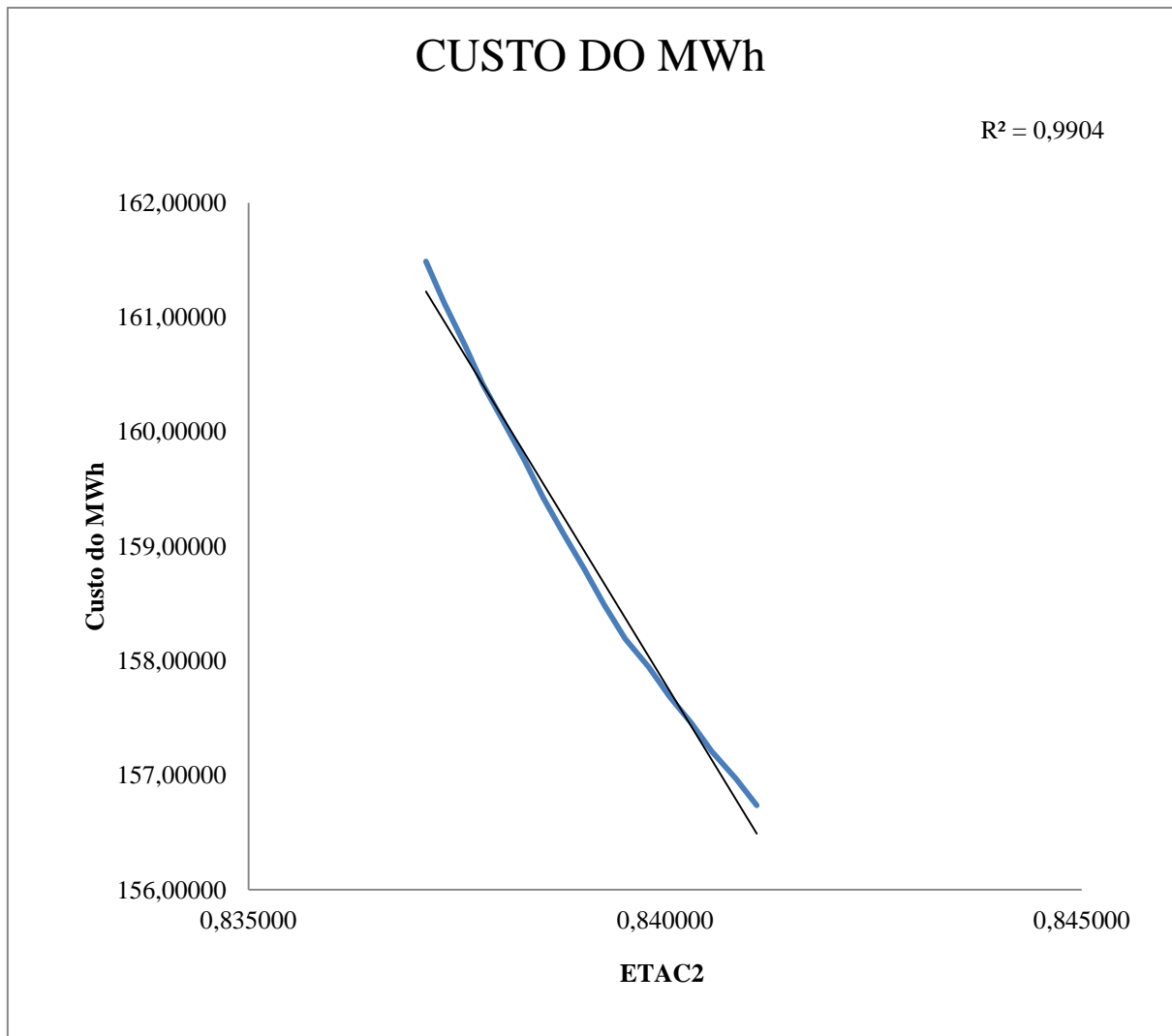
No Gráfico 5, pode-se observar a degradação da turbina com a diminuição da eficiência isentrópica do HPC. Podemos notar que o motor se comporta de forma similar e linear nas três simulações, apesar das diferentes falhas que o acometem.

Gráfico 5: Degradação da LM6000 com o acúmulo de sujeira no compressor de alta pressão.



No Gráfico 6, mostra o aumento do custo da geração do MWh com a degradação da eficiência isentrópica do compressor de alta pressão. O gráfico obtido com os dados da Tabela 16, encontrada no Anexo I.

Gráfico 6: Custo do MWh em relação ao o acumulo no HPC.



Fonte: Autor

Com os dados da simulação é factível a criação da matriz de inter-relação. A metodologia do LGPA será usada apenas para os compressores, pelo fato da simulação do acumulo de sujeira nos mesmos, terem ocorrido pela variação da eficiência isentrópica e devido também da impossibilidade de medição da eficiência por intermédio de sensores. No caso da sujeira do filtro o parâmetro medido na UTE-JF é o mesmo que variado na simulação, sendo assim torna dispensável a utilização do GPA neste caso.

A escolha dos parâmetros dependentes e independentes é um processo delicado e está diretamente relacionado com o sucesso do método, como já foi mencionado no capítulo

3. Como as duas variáveis de desempenho já foram estabelecidas por conta da simulação, é necessário escolher duas variáveis mensuráveis, obedecendo assim uma das premissas mais importantes do LGPA, que é a igualdade dos números parâmetros observados. Os parâmetros selecionados para compor a MCI são a razão de pressão no compressor de baixa pressão (RP1), razão de pressão no compressor de alta pressão (RP2), a eficiência isentrópica do compressor de baixa pressão (ETAC1) e a eficiência isentrópica do compressor de alta pressão (ETAC2).

RP1 e RP2 são os parâmetros dependentes e foram os escolhidos por serem variáveis mensuráveis, além do mais são sensíveis ao acúmulo de sujeira no compressor. Já ETAC1 e ETAC2 são os parâmetros independentes selecionados, devido à deposição de sujeira nas aletas serem a causa mais comum da perda de eficiência. Na Tabela 3 se encontra os dados do modelo, assim sendo, os dados de referência.

Tabela 3: Dados de referência.

Dados do Modelo	RP1	RP2	ETAC1	ETAC2
	2,3188	12,8934	0,89219	0,8411

Fonte: Autor

Como dito no Capítulo 3, a escolha da variação pré-determinada do parâmetro independente não segue possui nenhuma recomendação, sendo escolhida pelo autor de forma aleatoriamente.

Com isso ETAC1 sofrerá um decréscimo de 0,039% 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.

Tabela 4: Coeficientes com variação de ETAC1.

Variando -0,039% o ETAC1		
Parâmetros Dependentes	Variação percentual	Razão entre as variações
RP1	0,016085907	-0,410404512
RP2	-0,033412444	0,8524616

Fonte: Autor

ETAC2 sofrerá um decréscimo de 0,0047% 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.

Tabela 5: Coeficientes com a variação de ETAC2.

Variando -0,0047% o ETAC2		
Parâmetros Dependentes	Variação percentual	Razão entre as variações
RP1	0,0367431430	-7,726164395
RP2	-0,070695084	14,86540885

Fonte: Autor

Organizando os coeficientes anteriormente calculados, obtém-se a matriz de inter-relação de parâmetros descrita na Tabela 6.

Tabela 6: MCI.

Matriz de Inter-Relação		
-	ETAC1	ETAC2
RP1	-0,410052737	-7,726164395
RP2	0,851730919	14,86540885

Fonte: Autor

Utilizando o software EXCEL para inverter a matriz mostrada anteriormente, obtém-se a matriz de coeficientes de falha.

Tabela 7: MCF.

Matriz Inversa		
-	RP1	RP2
ETAC1	30,64959998	15,92985773
ETAC2	-1,756104539	-0,845449492

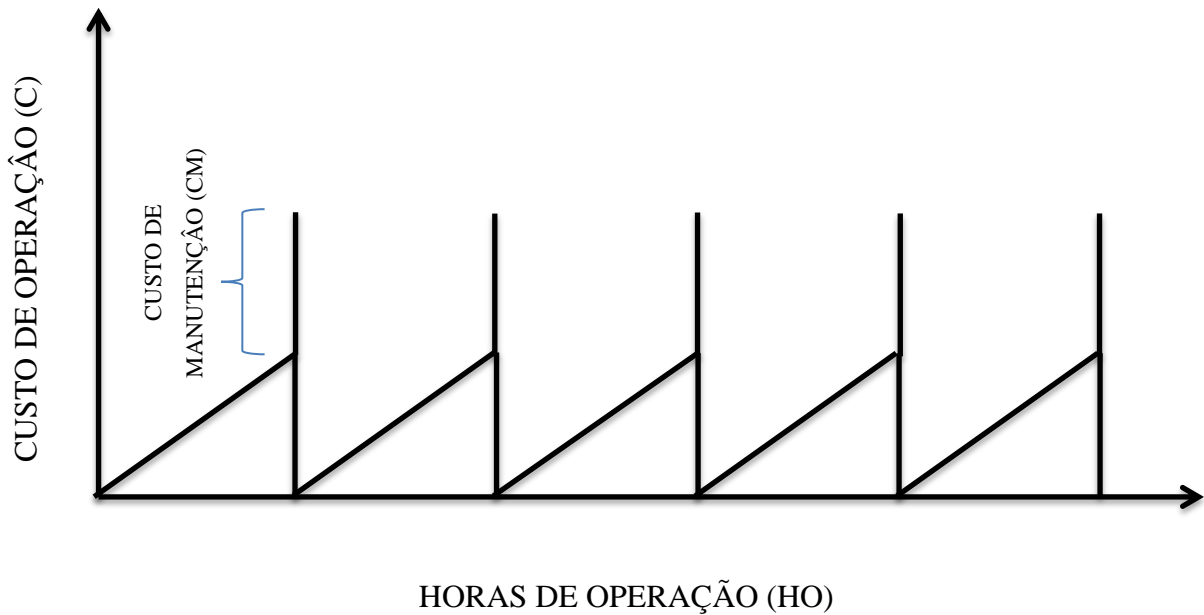
Fonte: Autor

4.2 MODELO MATEMÁTICO

A fim de identificar o momento ideal da troca do filtro e da lavagem do compressor é preciso realizar a modelagem matemática do problema, ou seja, traduzir através de uma expressão matemática a manutenção no filtro e dos compressores. Para começar a criação do é preciso identificar a variável que será descrita pela função, logo como o objetivo é a redução de custo na operação e manutenção da turbina LM6000, a variável estabelecida é o custo da geração (C). Com a definição do parâmetro resposta (custo) é preciso determinar os parâmetros que darão essa resposta, ou seja, selecionar as variáveis na qual o parâmetro resposta irá depender, com isso foi determinado somente uma variável e as horas de operação (HO), para saber qual é o momento que o custo é mínimo.

Sendo assim, admita-se que a relação entre o custo e a hora é linear e o coeficiente angular da reta foi intitulado de taxa de sujidade (TS). O Gráfico 7 mostra a relação entre o custo de operação e as horas de operação.

Gráfico 7: Custo vs Horas de Operação.



Fonte: Autor

Vale ressaltar que o menor custo de operação é considerado como zero, pois o gráfico tem a função de ilustrar o comportamento do aumento do custo em função das horas de operação, a rigor, o gráfico deve iniciar com o menor custo de operação real, que no caso da LM6000 instalada na UTE-JF é de aproximadamente R\$ 156,00, ou seja, a curva deve ser transladada do custo igual à zero para o custo igual a 156,00.

Finalmente é possível atingir um dos objetivos do trabalho que é a identificação do momento ideal para se realizar a manutenção, com o foco no custo de operação, sendo assim, é imprescindível a minimização do custo ao longo da vida do equipamento. Dessa forma a Equação 8 expressa de forma matemática o custo da turbina.

$$CLV = \left(\frac{HO * C}{2} + CM \right) * \left(\frac{K}{HO} \right) \quad (8)$$

Onde CLV é o custo ao longo da vida do motor, representada pelo Gráfico 4, CM é o custo de manutenção, a expressão (K/HO) indica quantas vezes foi realizada alguma intervenção na turbina e K é uma constante escolhida de forma arbitrária, possuindo uma unidade de tempo. A expressão $(HO*C/2)$ é utilizada para descrever o custo acumulado com a deterioração da turbina, a rigor, deve-se escrever uma integral, porém é sabido que a integral é a área abaixo da curva e área a ser representada é um triângulo descrito no Gráfico 4.

Como o objetivo é minimizar o custo, é preciso derivar a função CLV em função de HO e substituindo C por $TS*HO$, se tem:

$$CLV' = \left(\frac{TS}{2} - \frac{CM}{HO * HO} \right) * (K) \quad (9)$$

Igualando CLV' a zero, para determinar o ponto mínimo, admitindo que K é diferente de zero e isolando HO, a expressão é a seguinte:

$$HO^* = \sqrt{\frac{2 * CM}{TS}} \quad (10)$$

HO^* é para representar o valor de HO, quando o CLV é mínimo. Com isto o momento certo de realizar a intervenção na LM6000 é descrita pela Equação 10. Para a obtenção da solução da equação é preciso conhecer o custo de manutenção e a taxa de sujidade. CM é obtido somando o lucro cessante, ou seja, o lucro perdido enquanto o motor está parado para a realização da manutenção, mais o custo da peça a ser substituída ou dos insumos para realizar a manutenção. Já TS é obtido a partir da função C vs HO.

De posse da Equação (10), da simulação e do GPA é possível quantificar o momento ideal para a intervenção na turbina a gás, ou seja, idealizar um procedimento para obter a HO onde o custo é mínimo.

Assim é preciso obter o custo da manutenção, os dados são da UTE-JF. Na Tabela 8, segue os valores para realizar a troca do filtro de baixa performance, a intervenção tem um tempo corrido de 16 horas, para trocar 160 filtros, que custam R\$ 16.403,20. O custo com a mão-de-obra não está incluída, pois quem realiza a manutenção são os operadores da LM6000, não é preciso contratar nenhum terceiro para realizar a manutenção, isso ocorre tanto na lavagem do compressor, como na troca do filtro de alta.

Tabela 8: Custo para realizar a troca do filtro de baixa.

CUSTO DE MANUTENÇÃO	
LUCRO CESSANTE	R\$ 37.806,72
MATÉRIA PRIMA	R\$ 16.403,20
CUSTO TOTAL	R\$ 54.209,92
R\$/h	R\$ 3.388,12
CM (R\$/MW)	R\$ 1264,52

Fonte: Autor

Na Tabela 9, segue os valores para realizar a troca do filtro de alta performance, a intervenção tem um tempo corrido de 16 horas, para trocar 152 filtros, que custam R\$ 38.000,00.

Tabela 9: Custo para realizar a troca do filtro de alta.

CUSTO DE MANUTENÇÃO	
LUCRO CESSANTE	R\$ 37.806,72
MATÉRIA PRIMA	R\$ 38.000,00
CUSTO TOTAL	R\$ 75.806,72
R\$/h	R\$ 4.737,92
CM (R\$/MW)	R\$ 1768,29

Fonte: Autor

Na Tabela 10, segue os valores para realizar a lavagem do compressor, a intervenção tem um tempo corrido de 8 horas e o custo do insumo é referente ao detergente e a água desmineralizada. A lavagem do LPC e o HPC sempre ocorrem em concomitância, pois não existe a possibilidade de lavar somente um compressor, logo só tem um custo para essa manutenção.

Tabela 10: Custo para realizar a lavagem do compressor.

CUSTO MANUTENÇÃO	
LUCRO CESSANTE	R\$ 19.259,57
MATÉRIA PRIMA	R\$ 4.700,00
CUSTO TOTAL	R\$ 23.959,57
R\$/h	R\$ 2.994,95
CM (R\$/MW)	R\$ 69,86

Fonte: Autor

Neste momento, falta a obtenção do TS, para obter o HO*. A taxa de sujidade pode ser qualquer valor e é difícil determinar tal valor, desta forma, pode-se obter valores padrões de TS, utilizado a equação obtida com base na conhecida equação do cálculo do coeficiente angular.

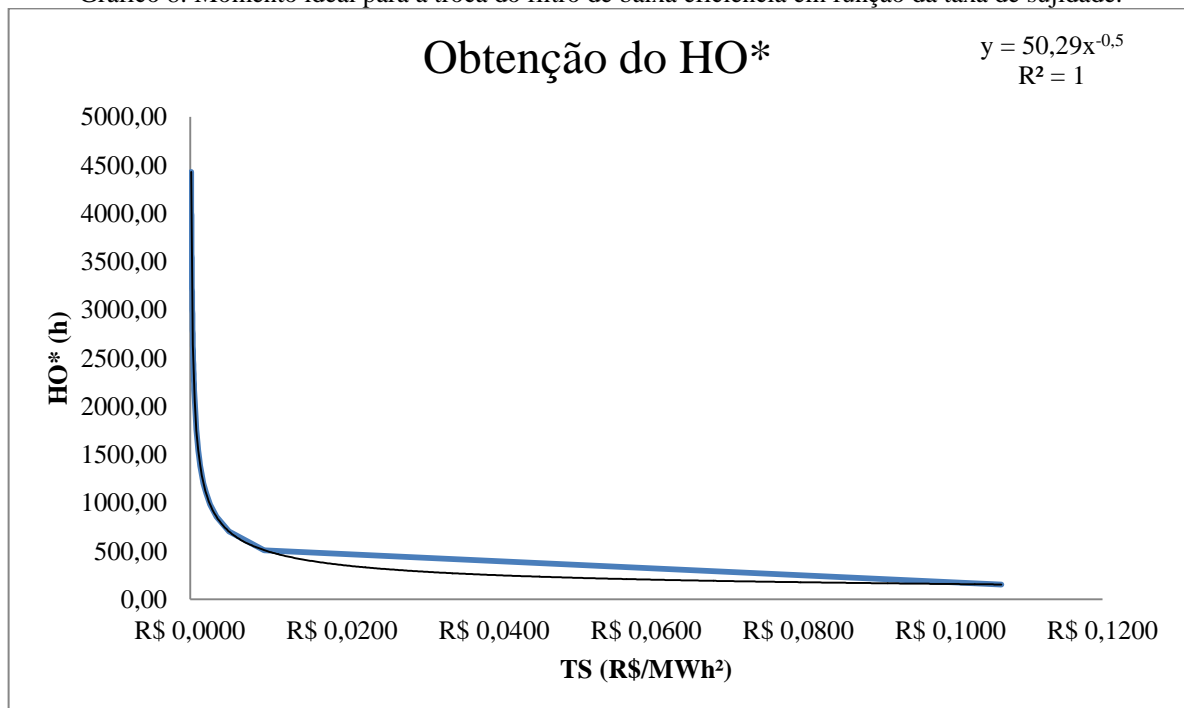
$$TS = \frac{\Delta C}{HO} \quad (11)$$

Onde HO são as horas de operação da LM6000 e ΔC é o custo de operação após as horas de operação subtraídas pelo custo de referência.

No caso da troca do filtro para determinar os valores padrões de TS, o ΔC é a subtração do custo de operação quando a perda de carga atinge 5in/wg (polegadas de coluna de água) pelo custo de operação do modelo. O custo quando a perda é de 5in/wg foi escolhido, pois o alarme é disparado quando tal valor de perda de carga é atingida, significado que o filtro já está sujo. No caso da lavagem do compressor o ΔC foi considerado como o custo de operação quando a vazão de ar na turbina a gás é de 97,5% menos o custo de operação do modelo. O custo quando a vazão mássica é de 97,5 % foi escolhido, pois na literatura consta que o momento da lavagem ocorre quando a vazão se reduz em 2,5% da vazão original menos o custo do modelo.

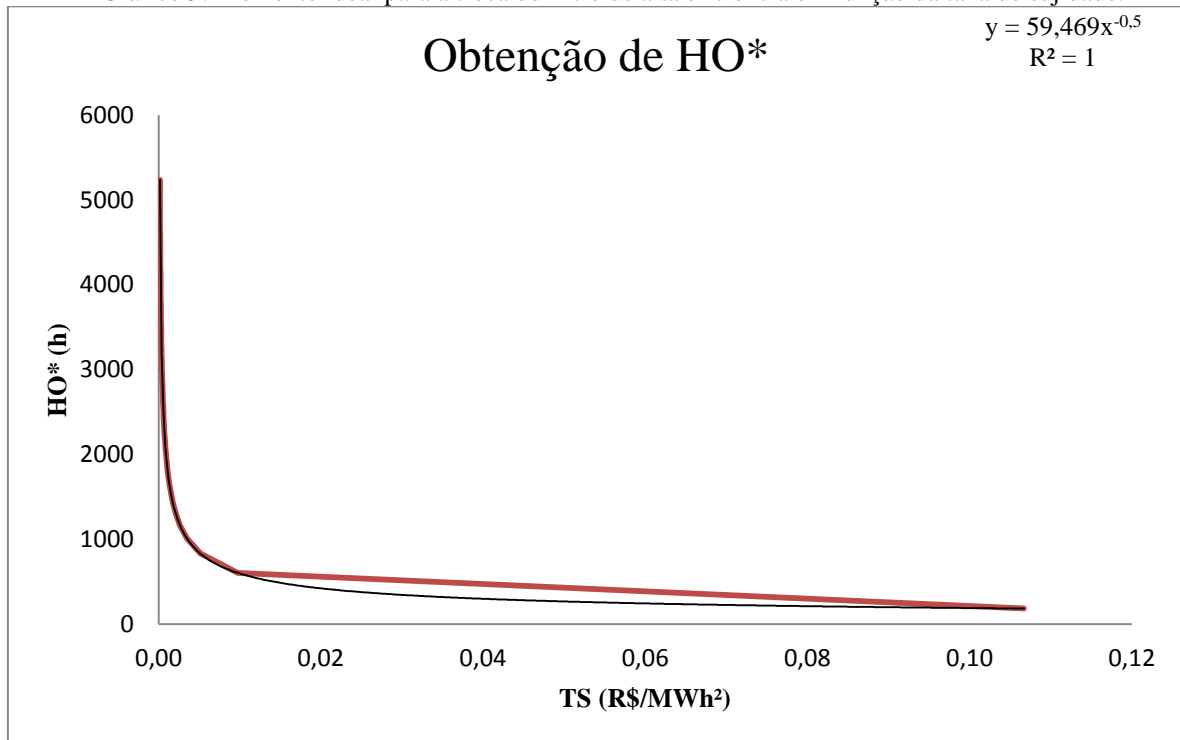
Com a obtenção do TS e em consequência a obtenção de HO*, segue os Gráficos 8, 9, 10 e 11 de HO* em função de TS, visto que o CM é constante. É fácil de observar que se TS for muito pequeno (acumulo de sujeira é lento) implica um HO* alto (oportunidade ótima retardada).

Gráfico 8: Momento ideal para a troca do filtro de baixa eficiência em função da taxa de sujidade.



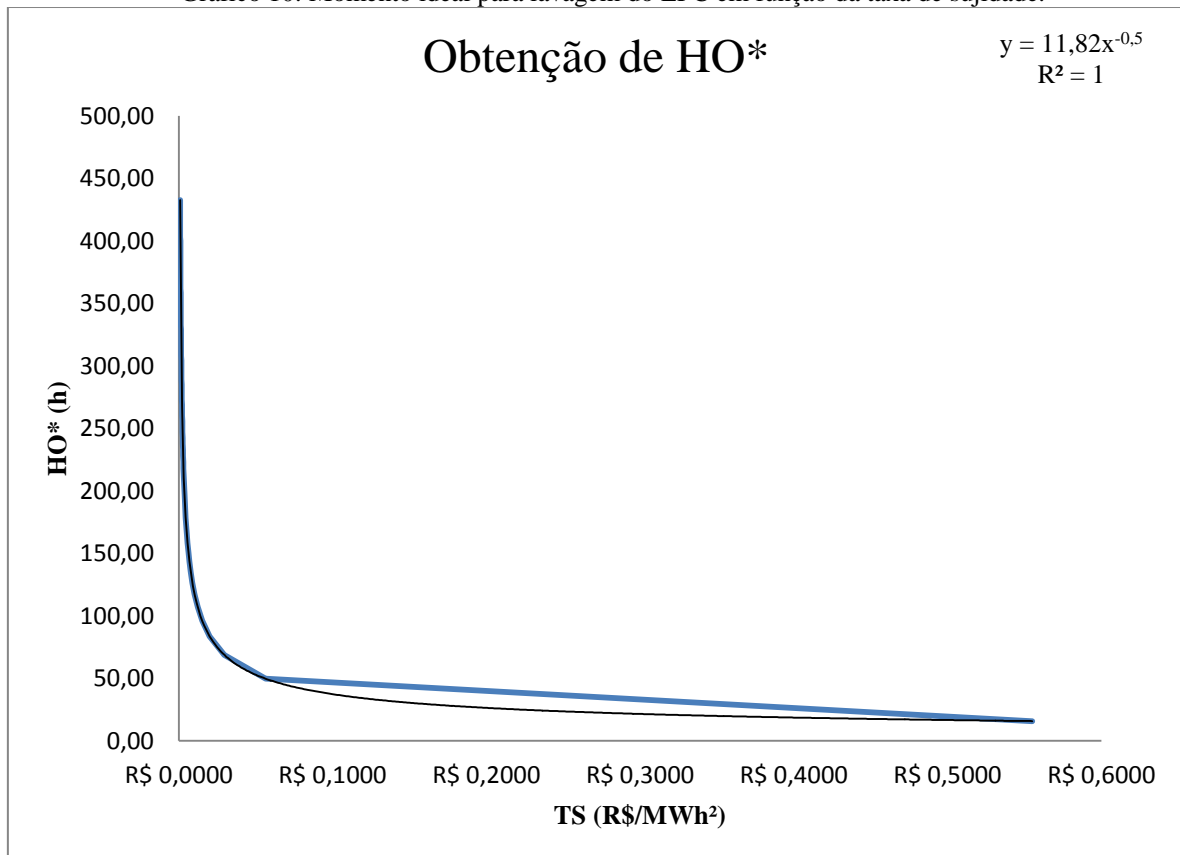
Fonte: Autor

Gráfico 9: Momento ideal para a troca do filtro de alta eficiência em função da taxa de sujidade.



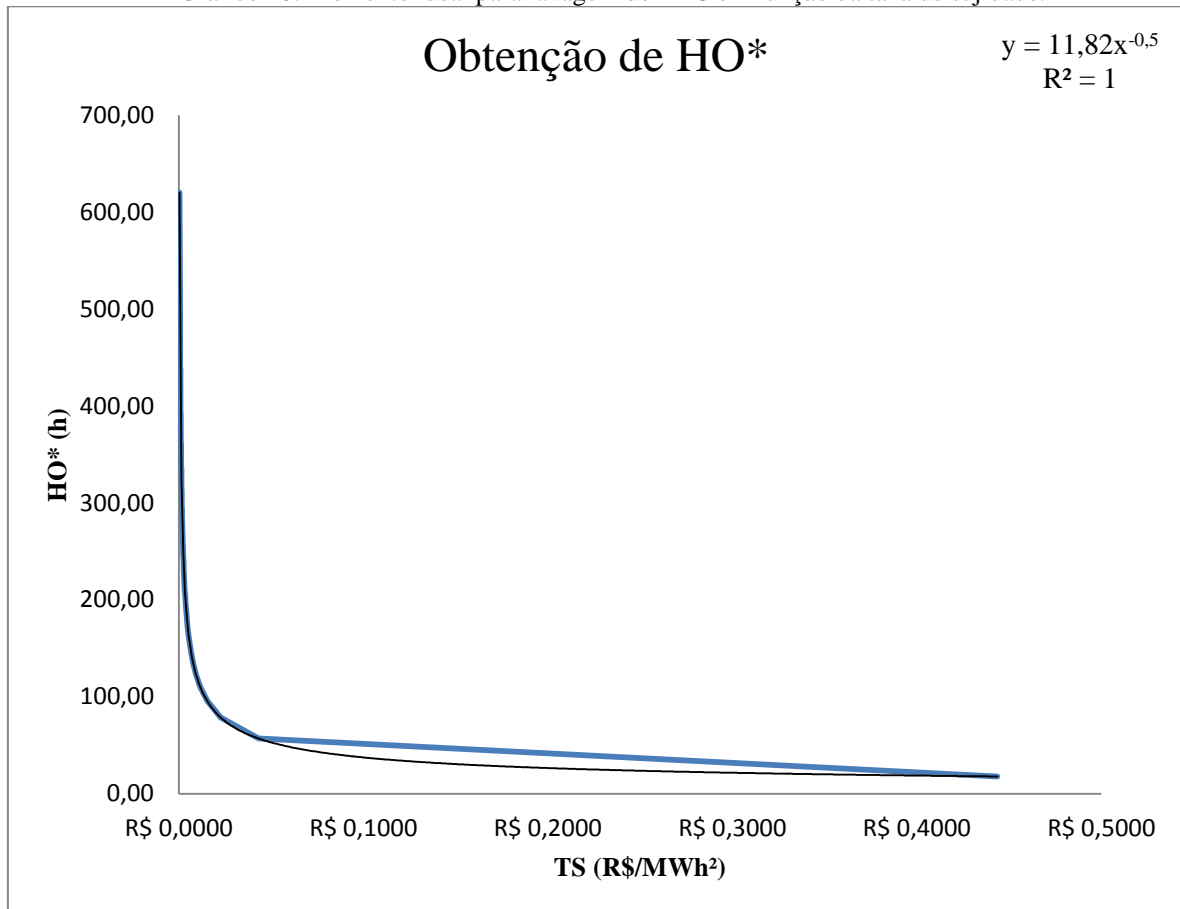
Fonte: Autor

Gráfico 10: Momento ideal para lavagem do LPC em função da taxa de sujidade.



Fonte: Autor

Gráfico 10: Momento ideal para lavagem do HPC em função da taxa de sujeidade.



Fonte: Autor

Apesar da lavagem do compressor em concomitância, a análise do HO* deve ocorrer tanto no LPC, como no HPC, pois deve-se saber qual compressor suja primeiro e qual está se sobressaindo sobre o outro, no que tange a necessidade de realizar a intervenção.

Finalmente é possível conceber um procedimento para identificar se o momento da manutenção chegou, ou, já passou. De posse dos Gráficos 2, 4, 6, 8, 9, 10, 11 obtidos via simulação e modelagem matemática e da MCF, fica trivial a confecção do procedimento para a obtenção do HO*.

Segue a descrição dos passos para se obter o HO*, quando se tratar da troca de filtro de alta de baixa eficiência:

1. Coletar os dados da perda de carga do filtro a ser analisado e identificar a hora de operação corrida da ultima troca até o momento da coleta dos dados;
2. Utilizar a equação $CO = -88,451 * FPR + 244,11$ obtida através do Gráfico 2, que relaciona a degradação da turbina com o custo de geração (R\$/MWh), para obter o custo de geração no momento atual;
3. Utilizar a Equação (11), a fim de conseguir o valor de TS;

4. Utilizar as expressões obtidas através do Gráfico 5 ou 6 (Depende do filtro a ser analisado), que relaciona a TS com HO*;

A diferença no procedimento da lavagem do compressor está na adição de mais uma etapa e é inserida após a coleta dos dados – etapa 1 – segue as etapas do procedimento, para o *fouling*:

1. Coletar os dados da razão de pressão a ser analisado e identificar a hora de operação corrida da ultima lavagem até o momento da coleta dos dados;
2. Utilizar a MCF para compreender o que ocorreu com ETAC1 e ETAC2;
3. Utilizar as equações $CO = -72,519 * FPR + 221,37$ ou $CO = -1192,4 * ETAC2 + 1154,9$ obtidas através dos Gráficos 4 ou 6 (Depende do compressor a ser analisado), que relaciona a degradação da turbina com o custo de geração (R\$/MWh), para obter o custo de geração no momento atual;
4. Utilizar a Equação (11), a fim de conseguir o valor de TS;
5. Utilizar as expressões obtidas através do Gráfico 7 ou 8 (Depende do compressor a ser analisado), que relaciona a TS com HO*.

No fim da quarta etapa o tomador de decisão irá analisar se é possível ou não a realização da manutenção. É importante ressaltar que existem outras variáveis que permeiam a tomada de decisão de parada, e que o HO* é somente uma dessas variáveis.

4.3 DISCUÇÃO DOS RESULTADOS

Algumas premissas admitidas no trabalho precisam ser estudadas de forma isolada, a fim de identificar de fato o comportamento da turbina na rotina operacional. Uma dessas premissas é referente à taxa de sujidade, sendo necessário verificar através de métodos estático qual é o real comportamento da relação entre o custo de operação e as horas de operação, a fim de conhecer o como ocorre o acumulo de sujeira tanto no filtro, como nos compressores.

Um ponto a ser investigado é a confecção da matriz de inter-relação, pode-se criar uma matriz com todos os parâmetros dependentes possíveis e determinar os parâmetros independentes de acordo com o numero das variáveis mensuráveis. Este procedimento traz maior fidedignidade ao real, visto que, a perda de eficiência dos compressores de alta e de baixa pressão forçam variações em varias variáveis dependentes e não somente na razão de

pressão. Isto traz maior conhecimento operacional/comportamental do motor. Os outros pontos do procedimento estão bem definidos e acredito que não é necessária mais pesquisas.

Um ponto interessante do trabalho é representatividade dos gráficos em relação aos dados utilizados, isto ocorre observando o R^2 , que expressa em porcentagem quanto o modelo consegue explicar dos valores observados, sendo o valor mais alto igual a 1.

Vale ressaltar que a aplicabilidade desta metodologia se refere quando a turbina está relativamente nova ou passou por um processo de reparo geral de forma a minimizar a degradação inerente a folgas dos mancais e rolamentos e a deterioração natural. Uma boa maneira de minimizar essa degradação oriunda do desgaste natural é a revalidação do modelo toda vez que se realizar uma manutenção geral. É interessante para a empresa realizar uma intervenção geral, mesmo que acarrete em alguma perda, somente para reavaliar o modelo de forma a minimizar essa degradação que ocorre com o avanço do tempo.

Outro ponto importante de se comentar é referente à finalidade do trabalho, cujo objetivo é municiar os gestores da empresa com informações relevantes ao processo de geração de energia. A fim de elucidar essa discussão, é notória a relevância do lucro cessante no custo de manutenção (Tabela 8, 9 e 10) chegando a ser mais de 50% deste custo. Caso o motor sofra uma parada programada e dependendo do valor de HO* obtido, será vantajosa para a organização a realização da lavagem do compressor e da troca dos filtros, logo caberá ao gestor analisar e tomar à decisão mais adequada a situação.

Contudo a implementação ou a realização deste tipo de estudo tratado no trabalho é oportuno e fornecerá informações muito relevantes para os gestores, visto que, se torna possível o conhecer o comportamento do equipamento em certas condições e com isso realizar ações para melhorar o processo de geração de energia.

5. CONCLUSÕES

É notório que a realização deste tipo de estudo se torna extremamente interessante para empresas que utilizam e que fabricam o motor, pois através destes se tem informações relevantes a respeito do comportamento que a turbina a gás terá em certas condições e com isso realizar ações para melhorar o processo de geração de energia.

Com o trabalho foi possível identificar o comportamento da LM6000 em algumas situações de operação, por intermédio da simulação, possibilitando assim a modelagem do custo e a identificação do momento ótimo de realização da manutenção no motor.

Adoção de uma metodologia de manutenção preditiva aliada com um sistema de monitoramento, que se faz presente na UTE-JF, é imprescindível para tornar as plantas de operação cada vez mais eficientes.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Como é preciso de mais estudo para que o procedimento traga resultados relevantes e para que ocorra uma melhoria contínua, segue algumas sugestões para trabalhos futuros:

1. Identificar a relação existente entre o custo de operação e as horas de operação e obter de maneira estatística qual é o valor da taxa de sujidade, este estudo é indispensável para o sucesso para a melhoria do procedimento proposto.
2. O GPA identifica falhas no caminho do gás, é interessante estudar novas metodologias para outros tipos de falha, utilizando que o monitoramento da vibração do motor.

REFERÊNCIAS

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5462: Confiabilidade – Terminologia**, Rio de Janeiro, 1994.

ALMEIDA, M.T. **Manutenção Preditiva: Confiabilidade e Qualidade**, 2005. Disponível em <<http://www.mtaev.com.br/download/mnt1.pdf>> . Acesso em: 01 jun 2016.

ALVES, B.G.S. **Análise de desempenho e diagnóstico de falhas em turbinas a gás operando em uma termoeletrica segundo o método do gas path analysis**. Monografia de graduação, Universidade de Juiz de Fora, MG, Brasil, 2014.

ALVES, M.A.C. **Transitório Não-Adiabático de Turbinas a Gás**. Tese de Doutorado, Instituto Tecnológico da Aeronáutica, 2003.

ALVES, M.A.C. **DESTUR: Desempenho de Turbinas**. Manual do Programa, 2003.

BARBOSA, R.S. **Diagnóstico de Falhas de Turbinas a Gás com o Uso de Lógica Fuzzy**. Dissertação de Mestrado, PUC-RJ, 2010.

BRANCO FILHO, Gil. **Indicadores e Índices de Manutenção**. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda., 2006.

CAMPOS, V.F. **TQC: Controle Da Qualidade Total No Estilo Japonês**. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 1992.

CCEEa. **Câmara de Comercialização de Energia Elétrica**, 2016. Disponível em: <http://www.ccee.org.br/portal/faces/oquefazemos_menu_lateral/precos?_adf.ctrl-state=wx3ry1cor_114&_afloop=247197740281169>. Acesso em: 05 jun. 2016.

CCEEb. **Câmara de Comercialização de Energia Elétrica**, 2016. Disponível em:<http://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/o-que-fazemos/como_ccee_atua/precos/precos_medios?_afloop=247357286531394#%40%3f_afroaf%3d247357286531394%26_adf.ctrl-state%3dwx3ry1cor_202>. Acesso em: 05 jun. 2016.

EFSTRATIOS N., **Capability Expansion of Non-Linear Gas Path Analysis**. Ph.D. Dissertation, School of Mechanical Engineering, Cranfield University, United Kingdom, 2008.

KHALID, S. J. **Role of dynamic simulation in fighter engine design and development**. AIAA-89-2467. AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 25., 1989. **Proceedings...**[s.l.]: AIAA/ASME/SAE/ASEE, 1989.

KARDEC, A., NASCIF, J. **Manutenção: Função Estratégica**. 3 ed., Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009.

KIRBY, K.E. **There is Gold in Those Reliability and Maintenance Practices**. Society for Maintenance and Reliability Professionals, 10th Annual Conference, 2002.

LI, Y.G. **Performance Analysis Based Gas Turbine Diagnostics: A Review**. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 216, 363-377, 2005.

MARINAI, L., PROBERT, D., SINGH, R. , **Prospects for Aero Gas Turbine Diagnostics: A Review**, *Applied Energy*, v.79, pp. 109-126, 2004.

MIYAKE, D.I., BOUER, G., ABRAHAM, M., MESQUITA, M.A., TOLEDO, N.N. **Glossário de Engenharia de Produção**. 16 ed., São Paulo: Fundação Vanzolini, 2002.

MONTEIRO, U. A. **Simulação Termodinâmica de Turbinas a Gás para Diagnóstico de Falhas**. Rio de Janeiro, Tese de Doutorado UFRJ/COPPE, 2010.

MOUBRAY, J. **RCM II: a manutenção centrada em confiabilidade**, Grã Bretanha: Biddles Ltd., Guilford and King's Lynn. Edição Brasileira, 1997.

NATO, S.I. **Performance Prediction and Simulation of Gas Turbine Engine Operation for Aircraft, Marine, Vehicular and Power Generation**. Research and Technology Organisation, 2007.

OGAJI, S.O.T., SINGH, R., PROBERT, S. D., **Multiple-Sensor Fault- Diagnoses for a 2-Shaft Stationary Gas Turbine**, *Applied Energy*, v.71, pp. 321-339, 2002a.

OGAJI, S.O.T., *et al.*, **Parameter Selection for Diagnosing GT Performance Deterioration**, *Applied Energy*, v.73, pp. 25-46, 2002b.

OGAJI, S.O.T., *et al.*, **Evolution Strategy for Gas Turbine Fault-Diagnoses**, *Applied Energy*, v.81, pp. 222-230, 2002c.

OGAJI, S.O.T., SINGH, R., **Advanced Engine Diagnostics Using Neural Networks**, *Applied Soft Computing*, v.3, pp. 259-271, 2003d.

OGAJI, S.O.T., *et al.*, **Gas Turbine Fault Diagnostics: a Fuzzy Logic Approach**, *Applied Energy*, v.82, pp. 81-89, 2005e.

PEREIRA, M.J. **Engenharia de Manutenção: Teoria e Prática**. Rio de Janeiro, Editora Ciência Moderna Ltda., 2011.

RESENDE, J.C.F. **Manutenção Preditiva em Turbomáquinas Utilizando Sistema Especialista na Análise de Vibração**. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1991.

SARAVANAMUTOO, H.I.H., AKER, G.F. **Predicting Gas turbine performance degradation due to compressor fouling using computer simulation techniques**. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1989.

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

- SARAVANAMUTOO, H.I.H., AKER, G.F. **Predicting Gas turbine performance degradation due to compressor fouling using computer simulation techniques.** Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1989.
- SEIXAS, E.S. **Determinação do Intervalo Ótimo para Manutenção Preventiva, Preditiva e Detectiva.** Reliasoft Brasil, 2008.
- SIQUEIRA, I.P. **Manutenção Centrada na Confiabilidade: Manual de Implementação.** Rio de Janeiro, Qualitymark, 2005, 408p.
- SPAMER, F.R. **Técnicas Preditivas de Manutenção de Máquinas Rotativas.** Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 2009.
- SOUZA, R.Q. **Metodologia e Desenvolvimento de um Sistema de Manutenção Preditiva Visando à Melhoria da Confiabilidade de Ativos de Usinas Hidrelétricas.** Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 226p, 2008.
- STARR, F., Bissel, A. **Maintenance, Inspection or Management: A Risk Based Approach.** 2002.
- SULLIVAN, G. P. PUGH, R. MELENDEZ, A. P. HUNT, W. D. **Operations & Maintenance Best Practices A Guide to Achieving Operational Efficiency.** Pacific Northwest National Laboratory for the Federal Energy Management Program.2004.
- 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.
- VIERRI, Luiz Alberto; **Gerenciamento pela Qualidade Total na Manutenção Industrial: Aplicação Prática.** Rio de Janeiro: Qualitymark, 2007 .
- VOLPONI, Allan J. **GAS PATH ANALYSIS: An Approach to Engine Diagnostics.** Gaithersburg: 35th Symposium Mechanical Failures Prevention Group, 1982.
- WAEYENBERGH, G. **CIBOCOF – A Framework for Industrial Maintenance Concept Development.** Tese de doutorado, Departamento de Ciências Aplicadas, Universidade Católica de Louvain, Belgica, 2005.
- XENOS, H. G. **Gerenciando a Manutenção Produtiva.** Nova Lima: INDG Tecnologia e Serviços Ltda, 2004.

ANEXO I – TABELAS SIMULAÇÃO

Tabela 11: Dados da simulação da sujeira no filtro de alta e baixa performance.

Dados Simulados	FRP	ETAC1	ETAS1	ETAC2	ETAS2	PEC1	TEC1	PSC1	TSC1	PSC2	TSC2	PET	TET	VC	MW	TSCC	PCI	VAZA	EGT	HR
	0,988	0,892	0,904	0,841	0,884	0,910	282,300	2,111	368,150	27,218	814,310	6,467	1143,400	2,207	42,867	1543,300	48,441	117,540	754,950	8978
	1,000	0,892	0,904	0,841	0,884	0,921	282,300	2,135	368,120	27,539	814,240	6,543	1143,400	2,233	43,639	1543,300	48,441	118,960	752,980	8923
	0,997	0,892	0,904	0,841	0,884	0,918	282,300	2,130	368,120	27,472	814,270	6,526	1143,400	2,227	43,477	1543,300	48,441	118,660	753,390	8933
	0,995	0,892	0,904	0,841	0,884	0,916	282,300	2,125	368,130	27,403	814,280	6,511	1143,400	2,222	43,312	1543,300	48,441	118,360	753,810	8946
	0,992	0,892	0,904	0,841	0,884	0,914	282,300	2,120	368,140	27,335	814,290	6,495	1143,400	2,216	43,152	1543,300	48,441	118,060	754,200	8955
	0,990	0,892	0,904	0,841	0,884	0,912	282,300	2,114	368,140	27,267	814,300	6,479	1143,400	2,211	42,985	1543,300	48,441	117,760	754,650	8970
	0,987	0,892	0,904	0,841	0,884	0,909	282,300	2,109	368,150	27,199	814,310	6,463	1143,400	2,205	42,823	1543,300	48,441	117,460	755,060	8979
	0,985	0,892	0,904	0,841	0,884	0,907	282,300	2,104	368,160	27,130	814,330	6,447	1143,400	2,199	42,658	1543,300	48,441	117,150	755,490	8990
	0,982	0,892	0,904	0,841	0,884	0,905	282,300	2,099	368,170	27,061	814,340	6,431	1143,500	2,194	42,496	1543,300	48,441	116,860	755,900	9003
	0,980	0,892	0,903	0,841	0,884	0,902	282,300	2,093	368,180	26,993	814,360	6,415	1143,500	2,188	42,333	1543,300	48,441	116,560	756,320	9013
	0,977	0,892	0,903	0,841	0,884	0,900	282,300	2,088	368,180	26,924	814,370	6,399	1143,500	2,183	42,168	1543,300	48,441	116,260	756,750	9028
	0,975	0,891	0,903	0,841	0,884	0,898	282,300	2,083	368,220	26,850	814,330	6,381	1143,200	2,176	41,978	1542,900	48,441	115,940	757,010	9040
	0,972	0,891	0,903	0,841	0,884	0,895	282,300	2,078	368,240	26,781	814,330	6,365	1143,200	2,170	41,810	1542,900	48,441	115,640	757,460	9051
	0,970	0,891	0,903	0,841	0,884	0,893	282,300	2,073	368,240	26,712	814,350	6,349	1143,200	2,165	41,647	1542,900	48,441	115,330	757,880	9065
	0,967	0,891	0,903	0,841	0,884	0,891	282,300	2,067	368,260	26,643	814,360	6,334	1143,300	2,159	41,482	1542,900	48,441	115,030	758,330	9076
	0,965	0,891	0,903	0,841	0,884	0,889	282,300	2,062	368,280	26,574	814,370	6,318	1143,300	2,153	41,311	1542,900	48,441	114,740	758,810	9089
	0,962	0,891	0,903	0,841	0,884	0,886	282,300	2,057	368,300	26,503	814,380	6,302	1143,300	2,148	41,137	1542,900	48,441	114,430	759,320	9106
	0,960	0,891	0,903	0,841	0,884	0,884	282,300	2,052	368,320	26,434	814,390	6,286	1143,300	2,142	40,968	1542,900	48,441	114,120	759,790	9118
	0,957	0,891	0,903	0,841	0,884	0,882	282,300	2,047	368,390	26,355	814,310	6,269	1143,000	2,135	40,756	1542,500	48,441	113,870	760,120	9135
0,955	0,891	0,903	0,841	0,884	0,879	282,300	2,042	368,420	26,285	814,310	6,253	1143,100	2,129	40,581	1542,500	48,441	113,480	760,640	9149	
0,952	0,890	0,902	0,841	0,884	0,877	282,300	2,037	368,440	26,215	814,320	6,237	1143,100	2,123	40,409	1542,500	48,441	113,180	761,150	9162	
0,950	0,890	0,902	0,841	0,884	0,875	282,300	2,032	368,460	26,146	814,330	6,221	1143,100	2,118	40,238	1542,500	48,441	112,880	761,640	9179	

Fonte: Autor.

Tabela 12: Dados do custo da geração de energia da simulação da sujeira do filtro de baixa e alta eficiência.

CUSTO DE OPERAÇÃO				
FRP	MWh	VC (m ³ /h)	R\$/h	R\$/MWh
0,988	42,867	10186,154	R\$ 6.718,80	R\$ 156,74
1,000	43,639	10306,154	R\$ 6.797,96	R\$ 155,78
0,998	43,477	10278,462	R\$ 6.779,69	R\$ 155,94
0,995	43,312	10255,385	R\$ 6.764,47	R\$ 156,18
0,993	43,152	10227,692	R\$ 6.746,20	R\$ 156,34
0,990	42,985	10204,615	R\$ 6.730,98	R\$ 156,59
0,988	42,823	10176,923	R\$ 6.712,72	R\$ 156,75
0,985	42,658	10149,231	R\$ 6.694,45	R\$ 156,93
0,983	42,496	10126,154	R\$ 6.679,23	R\$ 157,17
0,980	42,333	10098,462	R\$ 6.660,96	R\$ 157,35
0,978	42,168	10075,385	R\$ 6.645,74	R\$ 157,60
0,975	41,978	10043,077	R\$ 6.624,43	R\$ 157,81
0,973	41,810	10015,385	R\$ 6.606,16	R\$ 158,00
0,970	41,647	9992,308	R\$ 6.590,94	R\$ 158,26
0,968	41,482	9964,615	R\$ 6.572,68	R\$ 158,45
0,965	41,311	9936,923	R\$ 6.554,41	R\$ 158,66
0,963	41,137	9913,846	R\$ 6.539,19	R\$ 158,96
0,960	40,968	9886,154	R\$ 6.520,92	R\$ 159,17
0,958	40,756	9853,846	R\$ 6.499,61	R\$ 159,48
0,955	40,581	9826,154	R\$ 6.481,35	R\$ 159,71
0,953	40,409	9798,462	R\$ 6.463,08	R\$ 159,94
0,950	40,238	9775,385	R\$ 6.447,86	R\$ 160,24

Fonte: Autor.

Figura 13: Dados da simulação da sujeira no compressor de baixa pressão.

Dados Simulados	FRP	ETAC1	ETAS1	ETAC2	ETAS2	PEC1	TEC1	PSC1	TSC1	PSC2	TSC2	PET	TET	VC	MW	TSCC	PCI	VAZA	EGT	HR
	0,988	0,892	0,904	0,841	0,885	0,910	282,300	2,111	368,150	27,218	814,310	6,468	1143,400	2,207	42,867	1543,300	48,441	117,540	754,950	8978
	0,988	0,891	0,903	0,841	0,885	0,910	282,300	2,112	368,280	27,207	814,330	6,465	1143,100	2,205	42,814	1542,900	48,441	117,510	754,780	8981
	0,988	0,890	0,902	0,841	0,885	0,910	282,300	2,113	368,480	27,189	814,330	6,460	1142,500	2,202	42,726	1542,100	48,441	117,460	754,510	8986
	0,988	0,888	0,901	0,842	0,885	0,910	282,300	2,114	368,690	27,168	814,310	6,456	1142,000	2,198	42,639	1541,400	48,441	117,500	754,220	8991
	0,988	0,887	0,900	0,842	0,885	0,910	282,300	2,116	368,890	27,150	814,300	6,452	1141,500	2,195	42,549	1540,700	48,441	117,360	753,980	8997
	0,988	0,886	0,898	0,842	0,886	0,910	282,300	2,117	369,090	27,132	814,310	6,447	1140,900	2,192	42,462	1540,000	48,441	117,400	753,730	9002
	0,988	0,884	0,897	0,842	0,886	0,910	282,300	2,118	369,300	27,113	814,310	6,443	1140,400	2,189	42,377	1539,400	48,441	117,350	753,470	9007
	0,988	0,883	0,896	0,843	0,886	0,910	282,300	2,119	369,510	27,094	814,310	6,438	1139,900	2,186	42,288	1538,700	48,441	117,210	753,210	9013
	0,988	0,882	0,895	0,843	0,886	0,910	282,300	2,121	369,710	27,076	814,310	6,434	1139,300	2,182	42,203	1538,000	48,441	117,250	752,930	9018
	0,988	0,880	0,893	0,843	0,886	0,910	282,300	2,122	369,920	27,057	814,310	6,430	1138,800	2,179	42,114	1537,300	48,441	117,200	752,670	9023
	0,988	0,879	0,892	0,843	0,886	0,910	282,300	2,123	370,140	27,038	814,310	6,425	1138,200	2,176	42,023	1536,500	48,441	117,140	752,400	9028
	0,988	0,877	0,891	0,844	0,886	0,910	282,300	2,125	370,350	27,018	814,300	6,420	1137,700	2,172	41,931	1535,800	48,441	117,090	752,140	9034
	0,988	0,876	0,890	0,844	0,887	0,910	282,300	2,126	370,560	26,999	814,300	6,416	1137,100	2,169	41,846	1535,100	48,441	117,040	751,840	9039
	0,988	0,875	0,889	0,844	0,887	0,910	282,300	2,127	370,770	26,980	814,300	6,411	1136,500	2,166	41,751	1534,400	48,441	116,990	751,600	9045
	0,988	0,872	0,886	0,845	0,887	0,910	282,300	2,130	371,210	26,941	814,310	6,402	1135,400	2,159	41,570	1532,900	48,441	116,790	751,050	9056
	0,988	0,870	0,885	0,845	0,887	0,910	282,300	2,132	371,440	26,920	814,300	6,397	1134,800	2,155	41,467	1532,200	48,441	116,730	750,820	9064
	0,988	0,869	0,884	0,845	0,887	0,910	282,300	2,133	371,660	26,900	814,300	6,392	1134,300	2,152	41,381	1531,400	48,441	116,770	750,480	9068
	0,988	0,867	0,882	0,845	0,888	0,910	282,300	2,134	371,880	26,880	814,300	6,388	1133,700	2,148	41,283	1530,700	48,441	116,720	750,250	9075
	0,988	0,866	0,881	0,846	0,888	0,910	282,300	2,136	372,110	26,859	814,300	6,383	1133,100	2,145	41,185	1529,900	48,441	116,560	750,000	9082
0,988	0,865	0,880	0,846	0,888	0,910	282,300	2,137	372,350	26,838	814,300	6,379	1132,600	2,141	41,088	1529,200	48,441	116,610	749,760	9089	
0,988	0,863	0,878	0,846	0,888	0,910	282,300	2,139	372,570	26,818	814,310	6,374	1132,000	2,138	40,988	1528,400	48,441	116,550	749,500	9096	
0,988	0,862	0,877	0,846	0,888	0,910	282,300	2,140	372,810	26,796	814,310	6,369	1131,400	2,134	40,888	1527,700	48,441	116,490	749,240	9103	
0,988	0,860	0,876	0,847	0,888	0,910	282,300	2,142	373,060	26,775	814,310	6,364	1130,800	2,131	40,786	1526,900	48,441	116,430	749,000	9110	
0,988	0,859	0,875	0,847	0,889	0,910	282,300	2,143	373,280	26,754	814,310	6,359	1130,200	2,127	40,687	1526,100	48,441	116,370	748,730	9117	
0,988	0,857	0,873	0,847	0,889	0,910	282,300	2,145	373,540	26,731	814,310	6,354	1129,600	2,123	40,578	1525,300	48,441	116,210	748,500	9125	
0,988	0,820	0,841	0,854	0,893	0,910	282,300	2,187	380,040	26,145	814,300	6,223	1113,700	2,026	37,850	1504,400	48,441	114,550	741,560	9334	

Fonte: Autor.

Figura 14: Dados do custo da geração de energia da simulação da sujeira do compressor baixa pressão.

CUSTO DE OPERAÇÃO				
ETAC1	MW	VC (m ³ /h)	R\$/h	R\$/MWh
0,892	42,867	10186,154	R\$ 6.718,80	R\$ 156,74
0,891	42,814	10176,923	R\$ 6.712,72	R\$ 156,79
0,890	42,726	10161,692	R\$ 6.702,67	R\$ 156,88
0,888	42,639	10146,462	R\$ 6.692,62	R\$ 156,96
0,887	42,549	10131,231	R\$ 6.682,58	R\$ 157,06
0,886	42,462	10116,923	R\$ 6.673,14	R\$ 157,16
0,884	42,377	10102,154	R\$ 6.663,40	R\$ 157,24
0,883	42,288	10086,923	R\$ 6.653,35	R\$ 157,33
0,882	42,203	10072,154	R\$ 6.643,61	R\$ 157,42
0,880	42,114	10056,923	R\$ 6.633,56	R\$ 157,51
0,879	42,023	10041,231	R\$ 6.623,21	R\$ 157,61
0,877	41,931	10026,000	R\$ 6.613,17	R\$ 157,72
0,876	41,846	10010,308	R\$ 6.602,82	R\$ 157,79
0,875	41,751	9995,077	R\$ 6.592,77	R\$ 157,91
0,872	41,570	9963,692	R\$ 6.572,07	R\$ 158,10
0,870	41,467	9947,538	R\$ 6.561,41	R\$ 158,23
0,869	41,381	9931,385	R\$ 6.550,76	R\$ 158,30
0,867	41,283	9915,692	R\$ 6.540,41	R\$ 158,43
0,866	41,185	9899,538	R\$ 6.529,75	R\$ 158,55
0,865	41,088	9883,385	R\$ 6.519,10	R\$ 158,66
0,863	40,988	9867,231	R\$ 6.508,44	R\$ 158,79
0,862	40,888	9850,615	R\$ 6.497,48	R\$ 158,91
0,860	40,786	9834,000	R\$ 6.486,52	R\$ 159,04
0,859	40,687	9817,385	R\$ 6.475,56	R\$ 159,16
0,857	40,578	9799,846	R\$ 6.464,00	R\$ 159,30
0,820	37,850	9349,846	R\$ 6.167,17	R\$ 162,94

Fonte: Autor.

Figura 15: Dados da simulação da sujeira no compressor de alta pressão.

Dados Simulados	FRP	ETAC1	ETAS1	ETAC2	ETAS2	PEC1	TEC1	PSC1	TSC1	PSC2	TSC2	PET	TET	VC	MW	TSCC	PCI	VAZA	EGT	HR
	0,988	0,892	0,904	0,841	0,885	0,910	282,300	2,111	368,150	27,218	814,310	6,468	1143,400	2,207	42,867	1543,300	48,441	117,540	754,950	8978
	0,988	0,890	0,902	0,841	0,885	0,910	282,300	2,116	368,570	27,157	814,290	6,453	1142,000	2,198	42,625	1541,500	48,441	117,490	754,300	8992
	0,988	0,889	0,901	0,841	0,884	0,910	282,300	2,120	368,980	27,101	814,310	6,440	1140,900	2,190	42,403	1540,100	48,441	117,190	753,840	9005
	0,988	0,887	0,899	0,840	0,884	0,910	282,300	2,125	369,420	27,041	814,300	6,427	1139,600	2,181	42,168	1538,400	48,441	117,140	753,260	9019
	0,988	0,885	0,898	0,840	0,884	0,910	282,300	2,129	369,820	26,984	814,300	6,413	1138,300	2,172	41,940	1536,800	48,441	116,960	752,700	9033
	0,988	0,883	0,896	0,840	0,884	0,910	282,300	2,134	370,260	26,924	814,300	6,399	1136,900	2,164	41,700	1535,100	48,441	116,660	752,130	9048
	0,988	0,881	0,895	0,840	0,883	0,910	282,300	2,138	370,680	26,866	814,310	6,385	1135,600	2,155	41,470	1533,500	48,441	116,610	751,560	9062
	0,988	0,879	0,893	0,839	0,883	0,910	282,300	2,143	371,140	26,805	814,310	6,372	1134,400	2,146	41,223	1531,900	48,441	116,290	751,100	9079
	0,988	0,877	0,891	0,839	0,883	0,910	282,300	2,148	371,600	26,743	814,300	6,358	1133,000	2,137	40,968	1530,200	48,441	116,240	750,620	9097
	0,988	0,875	0,889	0,839	0,883	0,910	282,300	2,153	372,070	26,681	814,300	6,344	1131,700	2,128	40,716	1528,500	48,441	116,050	750,130	9114
	0,988	0,873	0,888	0,839	0,882	0,910	282,300	2,158	372,550	26,618	814,310	6,330	1130,400	2,119	40,465	1526,900	48,441	115,720	749,650	9132
	0,988	0,871	0,886	0,838	0,882	0,910	282,300	2,163	373,040	26,553	814,300	6,316	1129,100	2,110	40,201	1525,100	48,441	115,520	749,150	9151
	0,988	0,869	0,884	0,838	0,882	0,910	282,300	2,168	373,530	26,488	814,300	6,302	1127,800	2,100	39,942	1523,400	48,441	115,470	748,670	9170
	0,988	0,867	0,882	0,838	0,882	0,910	282,300	2,173	374,020	26,425	814,320	6,287	1126,400	2,091	39,686	1521,700	48,441	115,270	748,170	9189
	0,988	0,865	0,880	0,838	0,881	0,910	282,300	2,178	374,530	26,357	814,300	6,272	1125,000	2,082	39,420	1519,900	48,441	115,070	747,610	9208
	0,988	0,863	0,879	0,837	0,881	0,910	282,300	2,183	375,040	26,292	814,310	6,257	1123,600	2,072	39,149	1518,100	48,441	114,710	747,120	9230
0,988	0,861	0,877	0,837	0,881	0,910	282,300	2,189	375,580	26,223	814,300	6,242	1122,200	2,062	38,876	1516,200	48,441	114,660	746,590	9250	

Fonte: Autor.

Figura 16: Dados do custo da geração de energia da simulação da sujeira do compressor alta pressão.

CUSTO DE OPERAÇÃO				
ETAC2	MW	VC (m ³ /h)	R\$/h	R\$/MWh
0,841	42,867	10186,154	R\$ 6.718,80	R\$ 156,74
0,841	42,625	10143,692	R\$ 6.690,80	R\$ 156,97
0,841	42,403	10106,308	R\$ 6.666,14	R\$ 157,21
0,840	42,168	10065,692	R\$ 6.639,35	R\$ 157,45
0,840	41,940	10026,462	R\$ 6.613,47	R\$ 157,69
0,840	41,700	9985,385	R\$ 6.586,38	R\$ 157,95
0,840	41,470	9945,692	R\$ 6.560,20	R\$ 158,19
0,839	41,223	9905,077	R\$ 6.533,41	R\$ 158,49
0,839	40,968	9863,077	R\$ 6.505,70	R\$ 158,80
0,839	40,716	9821,538	R\$ 6.478,30	R\$ 159,11
0,839	40,465	9780,000	R\$ 6.450,90	R\$ 159,42
0,838	40,201	9736,615	R\$ 6.422,29	R\$ 159,75
0,838	39,942	9694,154	R\$ 6.394,28	R\$ 160,09
0,838	39,686	9651,692	R\$ 6.366,27	R\$ 160,42
0,838	39,420	9606,923	R\$ 6.336,74	R\$ 160,75
0,837	39,149	9563,077	R\$ 6.307,82	R\$ 161,12
0,837	38,876	9517,846	R\$ 6.277,99	R\$ 161,49

Fonte: Autor.

ANEXO II – MODELO LM6000

O motor que compõe a turbina a gás LM600 foi representado no DESTUR a partir da construção de doze módulos, mostrados na Figura 12. Os módulos são descritos por propriedades, abaixo temos tais propriedades para cada componente.

ENTRADA DE AR (ENTR 1)	
Propriedades	Valor
Número da estação de entrada	1
Número da estação de saída	2
Altitude [m]	686,5
Desvio de temperatura estática [ISA – 15 °C]	-1,391
Mach de vôo	0
Fator de recuperação de pressão da parte subsônica [entre 0 e 1]	0,9882
Fluxo em massa do ar [kg/s]	117,54
Massa de ar é uma variável [1] se não [-1]	-1
Fluido de trabalho [-1 para ar]	-1

Tabela 17: Propriedades da entrada de ar.

Fonte: Autor

COMPRESSOR DE BAIXA PRESSÃO (COMP 2)

Propriedades	Valor
Número da estação de entrada	2
Número da estação de saída	3
Razão de pressão no ponto de projeto	2,3188
Rendimento do compressor no ponto de projeto	-0,9041
Número Beta	0,85
PCN, fração decimal da rotação corrigida	1
Número do mapa do compressor	1
Número do módulo do primeiro compressor	-1
Variação do PCN	1
Rotação do compressor (rpm)	3601
Regime de trabalho (permanente -1)	-1
Número do controle da geometria	-1

Tabela 18: Propriedades do compressor de baixa pressão.
Fonte: Autor

BIFURCAÇÃO (BIFU 3)

Propriedades	Valor
Número da estação de entrada	3
Número da estação de saída	4
Número da segunda estação de saída	13
Km	0,98
Delta (m)	0
Kp	1
Delta (p)	0
Destino da bifurcação	-1

Tabela 19: Propriedades da bifurcação 3.
Fonte: Autor

COMPRESSOR DE ALTA PRESSÃO (COMP 4)

Propriedades	Valor
Número da estação de entrada	4
Número da estação de saída	5
Razão de pressão no ponto de projeto	12,8934
Rendimento do compressor no ponto de projeto	-0,8848
Número Beta	0,85
PCN, fração decimal da rotação corrigida	-1
Número do mapa do compressor	1
Número do módulo do primeiro compressor	-1
Variação do PCN	-1
Rotação do compressor (rpm)	10400
Regime de trabalho (permanente -1)	-1
Número do controle da geometria	-1

Tabela 20: Propriedades do compressor de alta pressão.
Fonte: Autor

BIFURCAÇÃO (BIFU 5)

Propriedades	Valor
Número da estação de entrada	5
Número da estação de saída	6
Número da segunda estação de saída	14
Km	0,98
Delta (m)	0
Kp	1
Delta (p)	0
Destino da bifurcação	-1

Tabela 21: Propriedades da bifurcação 5.
Fonte: Autor

BIFURCAÇÃO (BIFU 6)	
Propriedades	Valor
Número da estação de entrada	6
Número da estação de saída	7
Número da segunda estação de saída	-1
Km	1
Delta (m)	-2,019
Kp	1
Delta (p)	0
Destino da bifurcação	-1

Tabela 22: Propriedades da bifurcação 6.
Fonte: Autor

CÂMARA DE COMBUSTÃO (CAMA 7)	
Propriedades	Valor
Número da estação de entrada	7
Número da estação de saída	8
Razão entre a variação de pressão na câmara pela pressão de entrada	0,02
Rendimento da combustão	0,96667
Temperatura total de saída da câmara (K)	-1
Fluxo de combustível injetado	2,207
MACH de entrada na câmara	-1
Controle do motor	1
Frequência da senóide	-1
Módulo de controle	-1
Número de componentes no combustível (hidrocarboneto -1)	-1
PCI do combustível (J/kg)	48441000

Tabela 23: Propriedades da câmara de combustão.
Fonte: Autor

MISTURADOR (MIST 8)	
Propriedades	Valor
Número da estação de entrada principal (E1)	8
Número da estação de saída	9
Número da estação de entrada secundária (E2)	14
Propriedade em E1	-1
Valor da propriedade anterior	-1

Tabela 24: Propriedades do misturador 8.
Fonte: Autor

TURBINA DE ALTA PRESSÃO (TURB 9)	
Propriedades	Valor
Número da estação de entrada	9
Número da estação de saída	10
Rendimento da turbina no ponto de projeto	0,864
Rendimento mecânico	1
Potência de acionamento dos auxiliares (W)	0
Número do primeiro compressor	4
Número da estação da atmosfera de descarga da turbina	-1
Contrapressão na descarga da turbina	-1
TF	-1
CN	-1
CN da turbina livre	-1
Número do mapa da turbina	1
Momento de inércia polar do rotor	100
Rotação	104000
Regime de trabalho	-1

Tabela 25: Propriedades da turbina de alta pressão.
Fonte: Autor

TURBINA DE BAIXA PRESSÃO (TURB 10)	
Propriedades	Valor
Número da estação de entrada	10
Número da estação de saída	11
Rendimento da turbina no ponto de projeto	0,882
Rendimento mecânico	1
Potência de acionamento dos auxiliares (W)	0
Número do primeiro compressor	2
Número da estação da atmosfera de descarga da turbina	1
Contrapressão na descarga da turbina	1,0247
TF	-1
CN	-1
CN da turbina livre	-1
Número do mapa da turbina	1
Momento de inércia polar do rotor	100
Rotação	3600
Regime de trabalho	-1

Tabela 26: Propriedades da turbina de baixa pressão.
Fonte: Autor

MISTURADOR (MIST 11)	
Propriedades	Valor
Número da estação de entrada principal (E1)	11
Número da estação de saída	12
Número da estação de entrada secundária (E2)	13
Propriedade em E1	-1
Valor da propriedade anterior	-1

Tabela 27: Propriedades do misturador 11.
Fonte: Autor

BOCAL (BOCA 12)	
Propriedades	Valor
Número da estação de entrada	12
Número da estação de saída	1
Tipo de bocal (Convergente -1)	-1
Frequência (Hz) da variação da área	-1

Tabela 28: Propriedades do bocal 12.
Fonte: Autor

ANEXO III – 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 Mecânica 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 autoral¹ e criminais previstas no Código Penal², 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.