

# 1

## Introdução

Em nosso mundo, muito se fala em energia, sabe-se que ela é essencial à vida. Um dos princípios básicos da Física diz que a energia pode ser transformada ou transferida, porém nunca criada ou destruída. O papel do sol, do petróleo e de outros combustíveis naturais, é de vital importância para que se consiga a energia que nos mantém vivos e as nossas máquinas e mecanismos em funcionamento. O mundo científico encontra-se em constante busca de outras fontes alternativas de energia, para substituir algumas quase esgotadas. Para isso é necessária uma série de estudos sobre equipamentos alternativos para a geração desta energia.

Os derivados de petróleo representam a principal fonte de energia utilizada hoje pela humanidade. O consumo atual, no entanto, permite prever que as reservas conhecidas deste recurso se esgotarão em pouco mais de 40 anos, o que impõe a necessidade de diversificar as fontes de energia, para que as necessidades da sociedade continuem a ser atendidas. O uso do gás natural como fonte alternativa de energia é solução mais econômica e menos poluente [ANP, 2001].

Segundo informações da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2002), a situação atual do sistema elétrico nacional tem despertado interesse na aplicação das turbinas a gás na produção de energia elétrica, devido ao estrangulamento sofrido pelo sistema elétrico nacional nos últimos anos que não consegue suprir o aumento da demanda energética, ocasionando racionamento no consumo e inúmeros prejuízos à economia nacional. Grande tem sido o interesse do Sistema Nacional de Energia Elétrica na implantação no país de uma malha geradora de energia utilizando o gás natural como fonte energética.

Com o incentivo à produção independente de energia elétrica aliada à crise energética vivenciada por muitos países, o uso de tecnologias que promovam a geração de energia elétrica deve aumentar. Determinar e acompanhar o desempenho desta tecnologia, avaliando as perdas e seu comportamento ao longo da operação, é uma atividade de alto interesse no sentido de melhor utilizar os recursos disponíveis, sejam em equipamentos, ou

na energia dos combustíveis utilizados. No contexto das plantas termoelétricas, esta afirmação é ainda mais relevante, tendo em vista que a maior parcela dos custos totais de geração, ao redor de 75%, esta associada ao combustível consumido [Li e Priddy, 1985].

Um novo conceito que está sendo introduzido após a desregulamentação do setor elétrico, tanto no Brasil como em diversos outros países, é o da geração distribuída.

A geração distribuída refere-se a qualquer tecnologia de conversão de energia em pequena escala próximo ao local de consumo, podendo ser conectado ou não na rede de distribuição. As tecnologias de geração distribuída incluem pequenas turbinas a gás (incluindo microturbinas), motores de combustão interna, painéis fotovoltaicos, células combustível, motores Stirling, conversão solar de energia e conversão energética de biomassa. A viabilidade de se implantar um programa de geração distribuída no Brasil, tendo em vista o baixo preço da energia de origem hidrelétrica em unidades tipo microturbina, está associada à disponibilidade do gás natural.

As tecnologias de geração distribuídas são ambientalmente amigáveis, desde uma emissão de poluentes nula, como é o caso das células fotovoltaicas, a baixa emissão pelas microturbinas a gás, para citar alguns exemplos. Porém, pelo fato de ser uma filosofia inovadora, a geração distribuída, assim como qualquer nova tendência, apresenta um desempenho técnico ou viabilidade econômica não favorável. Entretanto, com a produção em massa destes equipamentos deverá melhorar e aumentar o desempenho técnico e a viabilidade econômica.

Com o aumento da demanda de energia e com a adoção das novas políticas ambientais os fornecedores de energia devem considerar o impacto da queima de combustíveis no meio ambiente, dentre as várias opções de geração de energia elétrica, a microturbina, aliada com o incentivo do uso do gás natural e de combustíveis renováveis, pode constituir uma solução promissora para a atual crise energética, pois em geral a combustão de hidrocarboneto gera dióxido de carbono, o qual está modificando o clima com o efeito estufa. A emissão de metano, óxidos de nitrogênio e hidrocarbonetos também provocam o efeito estufa. Estas considerações levam a uma substituição do óleo pelo gás natural, porém esta mudança reduz somente as emissões de dióxido de carbono por kW.

A microturbina a gás, operando em ciclo simples ou com trocador de calor, para recuperar a energia liberada na exaustão, não é muito atrativa para a

geração distribuída, em consequência de sua baixa eficiência. Porém, o uso desta tecnologia deverá ser através de sistemas de cogeração e sistemas híbridos acoplados a microturbinas [Lourival, 2003].

O desenvolvimento de unidades que possam gerar potência de 30-100 kW torna-se uma alternativa tecnológica de curto prazo importante para a matriz energética nacional. No mercado internacional os fabricantes de turbinas a gás estão ampliando suas pesquisas e já existe um seguimento de microturbinas disponíveis.

O presente trabalho descreve um método para avaliar o desempenho de microturbinas para geração de energia elétrica e verificar o rendimento. Como principal contribuição, o trabalho desenvolve um estudo das incertezas associadas, desde a medição do gás natural até a medição da energia elétrica produzida pela microturbina, comparando os dados do fabricante para os vários regimes de operação, isto é, com carga total e parcial, isolada e em paralelo com a rede elétrica. Enfim, serão calculados o consumo específico de combustível e a relação entre a energia elétrica gerada pela microturbina e a quantidade de gás natural fornecida pela distribuidora de gás.

O desenvolvimento da presente dissertação foi motivado em função de:

- o grande interesse, em escala mundial, na busca de novas formas de geração de energia elétrica;
- a utilização de combustíveis menos poluentes e pouco interferentes na natureza;
- uma nova alternativa para geração de energia elétrica com menor custo.

A utilização das microturbinas diminuiria a influência de racionamentos de energia em, por exemplo, centros clínicos, centrais de processamento de dados e centros comerciais. Em regiões afastadas, a produção de energia muitas vezes è feita utilizando grupos geradores a diesel, que são caros e não permitem a flexibilidade de combustível que a da microturbina pode ofertar.

Uma vez instalada as microturbinas, faz-se necessário analisar:

- Desempenho da Produção de Calor e Energia
- Desempenho da Qualidade da Energia Elétrica
- Estimativa da Emissão de Poluentes no Ar
- Estimativa das Emissões de  $\text{NO}_x$

## 1.1

### Gás Natural

Os derivados de petróleo representam a principal fonte de energia utilizada hoje pela humanidade, com a taxa de participação do gás natural na matriz energética mundial corresponde a cerca de 24,2 %. No Brasil, onde a hidrelétrica e o petróleo respondem pela grande parte da energia gerada, esse índice não passa de 3,7 %. O consumo atual, no entanto, permite prever que as reservas conhecidas desse recurso se esgotarão em pouco mais de 40 anos, o que impõe a necessidade de diversificar as fontes de energia, para que as necessidades da sociedade continuem a serem atendidas. Quase todas as fontes primárias com participação relevante na matriz energética podem ser descartadas como opções para essa diversificação, seja pela redução de reservas, caso do carvão mineral, ou das chances de aproveitamento, caso da hidreletricidade, seja pelo impacto ambiental, como da energia nuclear e da queima de biomassa, ou por outras desvantagens [ANP, 2001].

Apenas uma das fontes de energia atualmente relevantes ainda conta com amplas reservas e apresenta, além de vantagens comparativas, potencial para continuar ampliando seu uso nas mais diversas atividades humanas: o gás natural. Antes desprezado, o gás natural tem sido considerado cada vez mais um bom substituto do petróleo na geração de energia e surge agora como o principal candidato a dividir a cena com o petróleo no século 21. Mesmo no Brasil, onde a importância da energia hidrelétrica ainda é maior que a dos combustíveis obtidos do petróleo, o gás natural pode ser apontado como a alternativa energética que mais crescerá nas próximas décadas.

#### 1.1.1

#### Características e Vantagens

O gás natural é um combustível fóssil extraído de poços subterrâneos, podendo estar associado ou não ao petróleo. Ele resulta de uma mistura de hidrocarbonetos (moléculas compostas de hidrogênio e carbono) formada pela decomposição de matéria orgânica submetida a altas temperaturas e pressão ao longo de milhões de anos.

Os principais componentes são o metano ( $\text{CH}_4$ ) e o etano ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ), podendo ainda conter impurezas, como hidrocarbonetos mais complexos, água,

gás sulfídrico e gás carbônico. Isso requer que o combustível seja submetido a um processo de limpeza em unidades processadoras de gás natural antes de ser distribuído para as diferentes aplicações.

A composição típica de um gás natural pode ser dada como [Perry, 1973]:

- Metano ( $\text{CH}_4$ )  $\Rightarrow$  maior que 80 %;
- Etano ( $\text{C}_2\text{H}_6$ )  $\Rightarrow$  de 2 a 10 %;
- Propano ( $\text{C}_3\text{H}_8$ )  $\Rightarrow$  menor que 5 %;
- Butano normal ( $\text{nC}_4\text{H}_{10}$ ) e isobutano ( $\text{iC}_4\text{H}_{10}$ )  $\Rightarrow$  menor que 2 %;
- Pentano normal ( $\text{nC}_5\text{H}_{12}$ ) e isopentano ( $\text{iC}_5\text{H}_{12}$ )  $\Rightarrow$  menor que 1 %;
- Hexano ( $\text{C}_6\text{H}_{14}$ )  $\Rightarrow$  menor que 0,5 %;
- Heptano e frações mais pesadas ( $\text{C}_7\text{H}_{16}^+$ )  $\Rightarrow$  Traços;
- Hidrocarbonetos cíclicos e aromáticos  $\Rightarrow$  ocasionalmente podem ocorrer em pequenas proporções;
- Impurezas comuns: nitrogênio ( $\text{N}_2$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ );
- Outros gases: hélio (He) e vapor d água ( $\text{H}_2\text{O}$ ).

O gás comercializado tem seu poder calorífico, maior que os combustíveis derivados do petróleo, tornando-o uma alternativa em inúmeras atividades, desde que a oferta seja constante e o preço competitivo.

As reservas desse recurso existem em praticamente todos os continentes, e o gás natural apresenta ainda melhor rendimento energético e maiores vantagens ambientais que outros combustíveis fósseis [ANP, 2001]. Essas características impulsionam seu uso, em substituição ao gás liquefeito de petróleo, à gasolina, ao diesel e aos óleos combustíveis em praticamente qualquer aplicação. Outro aspecto positivo é a segurança, o gás natural é em geral transportado em gasodutos subterrâneos e dissipa-se rapidamente na atmosfera em caso de vazamento, o que também reduz seus efeitos ambientais.

O aproveitamento desse gás, comum em muitas regiões do chamado mundo desenvolvido e mesmo em diversos países em desenvolvimento, exige grandes investimentos em unidades de processamento e na construção de gasodutos para o transporte dos locais de produção para os centros de consumo.

Não é sem razão que o gás natural alcançou a popularidade de que desfruta hoje. Entre os combustíveis fósseis, é o de queima mais limpa, produzindo apenas água e gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ). A emissão de  $\text{CO}_2$  é 30 %

menor que a de outros combustíveis fósseis, o que reduz sua participação no efeito estufa. A queima do gás natural também não emite óxidos de enxofre, notórios poluidores. À redução do impacto ambiental, se junta outras vantagens técnicas, como facilidade de manuseio, alto rendimento energético e reduzido custo de manutenção. Para o Brasil, a adoção do gás natural, com a conseqüente diversificação da matriz energética nacional, implicará a redução da dependência de derivados de petróleo.

Vários fatores contribuem para o estabelecimento de uma cultura do uso de gás natural:

- Investimentos nas áreas de produção e transporte;
- Oferta crescente e regular do produto;
- Regulamentação de preços;
- Divulgação de seu baixo poder de impacto no meio ambiente.

A concretização dessas perspectivas deve fazer do gás natural uma das fontes de energia mais importante do país no futuro.

### 1.1.2

#### **Justificativa**

O mercado consumidor de gás natural começou a surgir nos anos 20 do século passado, a partir da descoberta de grandes poços de petróleo e do aperfeiçoamento da tecnologia de dutos, que permitiu transportar grandes volumes a longas distâncias, reduzindo custos, ampliando assim a utilização desse recurso em outras regiões do mundo.

O desenvolvimento da economia mundial trouxe a preocupação quanto à exaustão de recursos energéticos naturais, sua relação com a deterioração do meio ambiente, além da questão da dependência externa em relação ao petróleo. A diversificação das atividades econômicas nas indústrias resultou da soma de um número muito grande de operações independentes na demanda de energia, que são constantemente objeto de aperfeiçoamento e de intensas inovações tecnológicas principalmente em países industrializados. Por maior que seja o esforço no desenvolvimento de tecnologias mais eficientes, a demanda total de energia tenderá a crescer, assim como a degradação ambiental. As inovações tecnológicas têm origem, em proporção esmagadora, nos países industrializados. São poucas as exceções de países em desenvolvimento, como o Brasil, que buscam novos recursos energéticos. É natural nesse sentido, que

nem todos os esforços realizados em função de prioridades das instituições de pesquisa e das indústrias satisfaçam as prioridades e a capacidade econômica de cada um dos países em desenvolvimento. Associado a isso, as condições de transferência estabelecidas pelos países do mundo industrializado dificultam o acesso dos países em desenvolvimento às tecnologias por eles consideradas críticas ou inconvenientes (seja através de custos onerosos, ou proteção de qualquer natureza).

No Brasil, nesta última década, a descoberta de amplas reservas e a ampliação da malha de gasodutos, em especial com a construção do gasoduto Brasil-Bolívia e com a interligação das regiões produtoras do Nordeste, começa a garantir uma oferta constante e regular de gás natural, abrindo caminho para o rápido crescimento de sua utilização pelo mercado nacional.

### 1.1.3

#### **Combustão**

A combustão é o processo de reações químicas que se produzem durante a oxidação completa ou parcial do carbono, do hidrogênio e do enxofre contidos em um combustível. A análise destas reações é feita através de Balanço de Massas e de Balanço Térmico.

No Balanço de Massas está em consideração a quantidade de ar empregada para a combustão, sendo a referência a quantidade mínima exata para reagir completamente o combustível, chamada estequiométrica.

No Balanço Térmico são analisadas as quantidades de calor liberadas, a temperatura da combustão e a quantidade de calor perdido na exaustão.

São características importantes da combustão, a composição do combustível e sua temperatura, as pressões em que ocorre, seu estado e o formato da câmara de combustão. Estes determinam a forma com que ocorrerá o processo, se por detonação ou por deflagração.

## 1.2

### Microturbina a Gás para Geração de Energia

O gás natural vem sendo usado em sistemas de turbina a gás para geração de energia elétrica, desde 1950 [SRI/USEPA-GHG-GD-03, 2002]. Desenvolvimentos técnicos e industriais aconteceram na última década que possibilitaram a introdução de microturbinas, com capacidade de geração de energia, com potência variando de 30 a 100 kW.

A maioria das microturbinas opera com gás natural a uma pressão de combustível que varia de 3,5 a 8,5 bar dependendo dos fabricantes. Os sistemas de microturbinas são compostos basicamente por um compressor (responsável pela elevação de pressão do ar), câmara de combustão (onde ocorre uma reação química de oxidação exotérmica, em que os reagentes são o combustível e o ar proveniente do compressor, formando uma mistura de gases que é expandida na microturbina), um rotor e um gerador.

O sistema a ser verificado consiste de uma microturbina Capstone, modelo C60 que opera com gás natural, a uma rotação de 96.000 rpm, o combustível é fornecido a pressão de 75 a 80 psig e fornece uma potência de  $60(\pm 2)$  kW, com eficiência elétrica (PCI) de  $28(\pm 2)$  % e um Heat Rate (PCI) de 12.900 kJ/kWh, as emissões de  $\text{NO}_x$  são de 9 ppmV @ 15 %  $\text{O}_2$  com uma temperatura de exaustão de 305 °C (578,15 K).

**Nota:** Os valores acima estão fidedignos aos valores indicados pelo fabricante.



Figura 1: Montagem de uma microturbina a gás, utilizada como dispositivo experimental da presente pesquisa (Fabricante: Capstone, modelo C60)

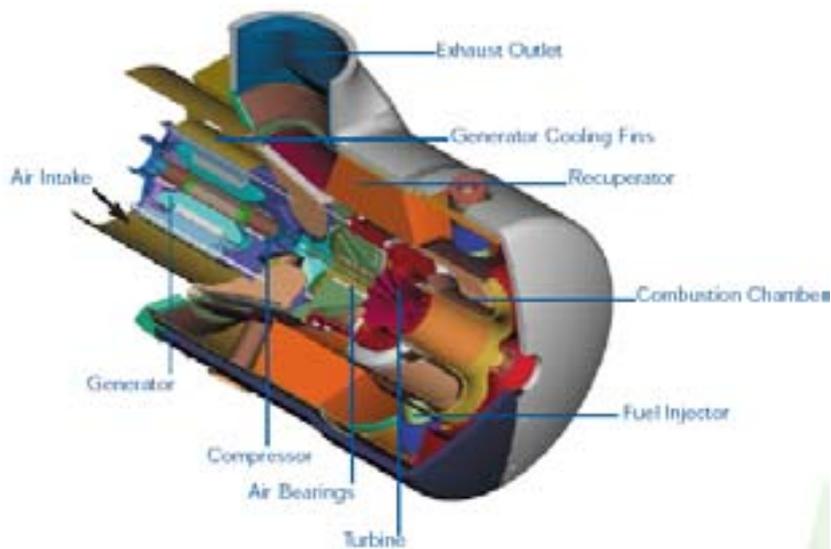


Figura 2: Gerador da Microturbina (Fabricante: Capstone, modelo C60)

As características principais das unidades do tipo microturbina estão listadas a seguir:

- Geração de potência elétrica entre 10 e 500 kW;
- Baixíssimos índices de emissões, principalmente na queima de gás natural;
- Possibilidade de operar com diversos combustíveis;
- Baixo custo de operação;
- Fácil instalação e comissionamento;
- Apenas um ou dois eixos giratórios, dependendo da concepção;
- Geração elétrica em alta frequência demandando inversão para 60 Hz;
- Leveza no conjunto com montagem extremamente compacta;
- Facilidade na incorporação de recuperadores de calor;
- Facilidade para operar em cogeração;
- Ruído controlável.

### 1.2.1

#### Princípio de Funcionamento de uma Microturbina a Gás

Similar ao funcionamento das turbinas, também o princípio de funcionamento das microturbinas é hoje bem compreendido, a luz dos fundamentos da Termodinâmica Clássica [Van Wylen, 1995; Cohen, 1995]. Assim, para descrição de sua operação, a figura 3, que representa o diagrama

esquemático de uma microturbina a gás simples de ciclo aberto, que opera segundo o ciclo termodinâmico de Brayton.

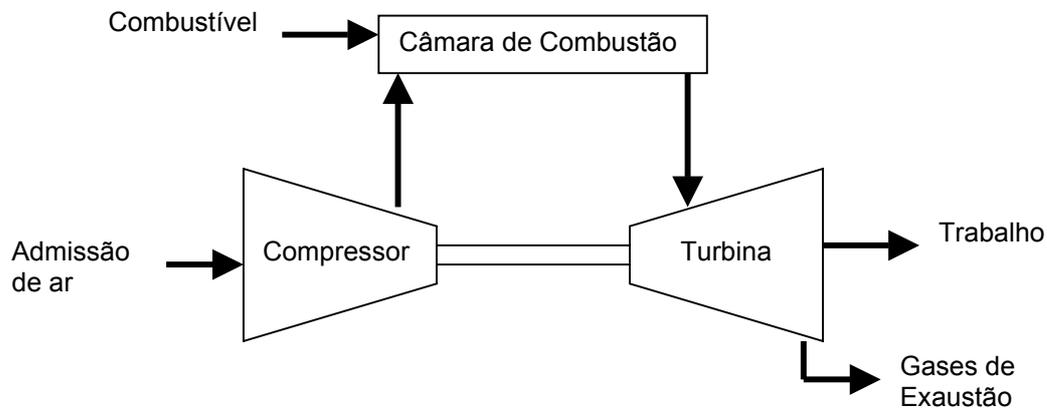


Figura 3: Diagrama esquemático de uma microturbina a gás

Na configuração mais simples, o primeiro componente é o compressor, o qual é responsável pela elevação de pressão do ar desde a admissão até a câmara de combustão. Enquanto nenhum calor é adicionado neste processo, pois o compressor em condições ideais opera em regime adiabático, o trabalho de compressão faz aumentar a temperatura do ar. Turbinas a gás antigas e tipicamente turbinas a gás de pequena capacidade (potência), operam com pressões de até 2.067 kPa, enquanto turbinas a gás mais novas e turbinas a gás de grande capacidade operam em pressões de 4.137 kPa. Em alguns casos onde a microturbina opera em altas pressões, o compressor pode ser dividido em várias seções utilizando resfriamento intermediário. Este resfriamento reduz o trabalho requerido pelo compressor. Desde que o compressor pode requerer 50 % ou mais da potência desenvolvida na microturbina, o resfriamento pode ter um significativo efeito na potência líquida da microturbina.

O ar comprimido a alta temperatura é então entregue através de um difusor para a câmara de combustão onde o combustível é injetado e queimado a pressão constante, aumentando a temperatura dos gases. O difusor reduz a velocidade do ar para valores aceitáveis na câmara de combustão. Na prática, existe uma perda de carga através da câmara de combustão, que está na faixa de 1 % à 2 %. A combustão acontece com uma considerável quantidade de excesso de ar que dilui e abaixa a temperatura dos produtos da combustão. Os gases provenientes da câmara de combustão podem exceder 2.300 °F (1.533 K) e ter concentração de oxigênio de até 15 % ou 16 %.

A máxima relação combustível-ar que pode ser usada é determinada pela temperatura de trabalho das pás da turbina.

Os gases a alta temperatura e pressão provenientes da câmara de combustão são então entregues para a turbina. Na turbina, a energia dos gases de exaustão é convertida em energia cinética, que é convertida em energia mecânica. Os gases de exaustão da turbina são consideravelmente mais frios que os gases provenientes do câmara de combustão e estão geralmente na faixa de 850 °F (727 K) até 1.100 °F (866 K).

Com o propósito de aumentar a eficiência térmica do sistema de microturbina, seja, através da diminuição das temperaturas dos gases de exaustão, comumente utiliza-se um arranjo que considera um regenerador, cujo o objetivo é o aproveitamento da energia térmica dos gases de exaustão para pré-aquecer o ar de entrada na câmara de combustão (saída do compressor), tal qual será caracterizado no próximo capítulo, fundamentos teóricos.

### 1.3

#### **Comissionamento do Sistema de Microturbinas**

##### 1.3.1

##### **Descrição**

O objetivo principal do comissionamento é verificar o desempenho da produção de energia, a qualidade da energia elétrica e o desempenho de emissões, para com isso, desenvolverem um estudo de consumo de energia e dos índices de desempenho energético em microturbinas a gás.

O teste de aceitação do sistema de microturbina ocorre a cada 30 minutos, quando serão executadas 4 leituras ao longo da faixa de trabalho, com cargas elétricas de 25 %, 50 %, 75 % e 100 % da capacidade de carga (60 kW). O tempo estimado para estabilizar a carga será de 15 a 30 min. Durante cada teste de carga serão feitos simultaneamente os monitoramentos: da produção de energia, da taxa de recuperação de calor, do consumo de combustível, das condições meteorológicas, da taxa de emissão de gases de exaustão, da produção média de energia elétrica, da taxa de recuperação de calor, da eficiência do conversor de energia e da emissão de gases CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub>, CO e hidrocarbonetos (THC).

Também serão coletados dados de verificação durante operações locais, durante as quais a microturbina será operada com carga máxima (60 kW nominal). O teste será programado nestas condições, e consistem do monitoramento contínuo da geração de energia elétrica, do consumo de combustíveis, condições meteorológicas e qualidade da energia. O monitoramento dos resultados contínuos será usado para informar a quantidade total de energia elétrica gerada.

A identificação de parâmetros de verificação deveria mostrar todos os aspectos de desempenho de uma microturbina que é aplicável à instalação. Na avaliação do desempenho da microturbina foram considerados os seguintes parâmetros:

- Desempenho da Produção de Energia
- Desempenho de Qualidade da Energia Elétrica
- Desempenho Operacional
- Estimativa da Emissão de Poluentes no Ar
- Estimativa de Emissões de NO<sub>x</sub>

#### **1.3.1.1**

##### **Desempenho da Produção de Energia**

O desempenho da produção de energia é uma característica operacional que é de grande interesse dos compradores, operadores e usuários dos sistemas geradores de eletricidade. Parâmetros-chave que deveriam ser caracterizados incluem:

- Eficiência da Produção de energia elétrica e cargas selecionadas dentro do alcance normal de operação;
- Geração de energia elétrica total de um período pré-determinado com monitoramento contínuo.

As microturbinas são equipadas com um medidor elétrico que mede a energia gerada. As medições de produção de energia elétrica permitem a determinação de perdas de cargas nos transformadores de voltagem externa, que não são incluídos freqüentemente na produção de energia do sistema de controle do fabricante. A produção de energia pode ser anotada continuamente, pode ser calculada por média ou pode ser integrada em cima da duração do período monitorado.

Determinações da eficiência elétricas são baseadas em diretrizes listadas em ASME PTC22, 1997. Isto requer medida direta de produção da energia elétrica, a taxa de vazão de combustível e a energia do combustível. A eficiência de conversão da Energia eletricidade é determinada dividindo a produção de energia elétrica pela energia de combustível introduzida. A medição da vazão de gás natural pode ser feita através de um medidor mássico ou volumétrico e a determinação da quantidade de energia de entrada fornecida pelo combustível pode ser obtida através da análise em laboratório para determinar o PCI do combustível ou através de cálculos partindo dos PCI de cada componente do gás.

A produção de energia e eficiência elétrica em microturbinas depende das condições do ar de entrada. Para apresentar coerentemente os dados de desempenho resultantes de ensaios e testes de microturbinas sob quaisquer condições e compará-los com os dados do fabricante, tais resultados devem ser normalizados para as condições de referência. Estas condições dizem respeito às condições ambientais e procedimentos de teste padronizados pela norma *ISO 2314 – Gás Turbines – Acceptance Tests* de 1973. Tal padronização é absolutamente indispensável, tendo em vista a forte influência que as condições ambientais têm sobre o desempenho das microturbinas a gás.

Tabela 1: Condições de Referência [ISO 2314, 1973]

<b>Variável</b>	<b>Valor</b>
Pressão	1,013 bar
Temperatura	288,15 K
Umidade Relativa	60 %

Para verificar o desempenho em outras condições, os fabricantes utilizam freqüentemente uma série de curvas de desempenho que ilustram produção de energia esperada e eficiência a diferentes condições ambientes. Assim, a verificação independente de produção de energia e eficiência é recomendada para determinar desempenho em condições reais.

### 1.3.1.2

#### **Desempenho de Qualidade da Energia Elétrica**

A qualidade do fornecimento da energia elétrica raramente foi um tema em destaque, já que se entendia que a elevada confiabilidade deste fornecimento energético constituía a essência da questão do fornecimento energético.

Uma mudança significativa de atitude ocorreu nos anos 80, partindo da engenharia de sistemas elétricos comerciais e industriais e depois se expandindo para todo o sistema de fornecimento de energia elétrica. O termo "qualidade de energia", então, agregou significados muito mais amplos relegando a questão única da confiabilidade do fornecimento a ser uma parte de um todo muito mais complexo e importante. Assim, tornou-se claro que os equipamentos poderiam apresentar defeitos operacionais quando sujeitos a perturbações de tensão, mesmo de curta duração, e que estes equipamentos poderiam representar fontes de distúrbios em tensão e corrente, comprometendo a funcionalidade de outros equipamentos.

Os dados da qualidade da energia são usados para informar o número e magnitude de incidentes que não se encontram ou exceder um padrão de qualidade da energia. Tais padrões são desenvolvidos pelo Instituto de Padrões Nacional Americano (ANSI) e pelo Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Especificamente, foram adotadas as Práticas Recomendadas de IEEE.

### 1.3.1.3

#### **Desempenho operacional**

O desempenho operacional da microturbina também deverá ser avaliado. A capacidade da unidade para gerar energia, quando necessário, é documentada com os seguintes parâmetros de desempenho:

- Partida a frio;
- Avaliação operacional.

O tempo de partida da microturbina é usado sabendo-se o tempo necessário para alcançar a potência máxima desejada, sendo definido como o número de segundos exigidos para obter energia total depois que um comando

para iniciar é enviado ao sistema de controle da unidade, logo após um período de paralisação de no mínimo 4 horas.

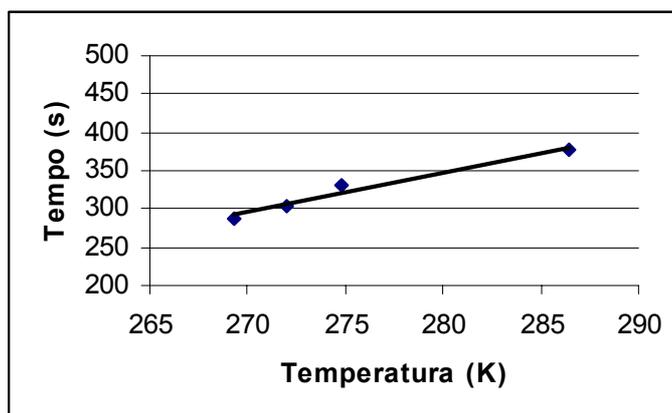


Figura 4: Exemplo da variação do tempo de partida a frio da microturbina

A disponibilidade da microturbina representa a porcentagem de tempo que a unidade está disponível para entrar em operação. A disponibilidade da microturbina responde por tempos de manutenção fora do programa de manutenção preventiva.

#### 1.3.1.4

##### Estimativa da Emissão de Poluentes no Ar

O desempenho de emissões da microturbina é crítico a qualquer avaliação no impacto ambiental. Testes de emissões serão verificados simultaneamente com as determinações da eficiência. Testes de emissões a cada carga serão repetidos três vezes. Este procedimento está baseado na U.S Environmental Protection Agency (EPA) New Soucer Performace Standards (NSPS), norma para medição de emissões para turbinas a gás [SRI/USEPA-GHG-GD-03, 2002]. Além das emissões determinadas durante os testes, será determinado o perfil da microturbina ao longo da sua faixa de operação (aproximadamente 15 a 60 kW).

Os procedimentos de teste dos gases de exaustão estão descritos na U.S. EPA NSPS para turbinas a gás. A medição da concentração será medida em unidades de partes por milhão de volume, base seca (ppmvd) e corrigida para 15 por cento de oxigênio (15 % de O<sub>2</sub>) na microturbina. A taxa de emissão será dada em unidade de massa por hora, massa por calor (na entrada) e massa por energia (na saída).

### 1.3.1.5

#### Estimativa da Emissão de $\text{NO}_x$

A medida do desempenho de emissões do sistema de microturbina é crítica à determinação do impacto ambiental. As principais emissões de microturbinas a gás consideradas poluentes são: óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}$  e  $\text{NO}_2$ , expressos com  $\text{NO}_x$ ), monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), hidrocarbonetos não queimados (THC, usualmente expresso em equivalente de metano) e óxidos de enxofre ( $\text{SO}_2$  e  $\text{SO}_3$ ). Hidrocarbonetos não queimados são provenientes de compostos orgânicos voláteis (VOC) os quais contribuem para a formação de uma camada de ozônio troposférico, e compostos tais como metano e etano que não contribuem para a formação desta.  $\text{SO}_2$  e THC são considerados negligenciáveis quando se queima gás natural. Sendo assim somente  $\text{NO}_x$  e possíveis  $\text{CO}$  serão as únicas emissões significantes quando o combustível da microturbina for o gás natural.

Os óxidos de nitrogênio são produzidos pela oxidação do nitrogênio atmosférico nas altas temperaturas da chama [Lefebvre, 1983]. O processo de formação é endotérmico e se processa de modo mais rápido em temperaturas acima de 1800 K. Assim, ao contrário do  $\text{CO}$  e do THC, a quantidade de óxidos aumenta somente nas regiões centrais da chama em um combustor.

## 1.4

### Objetivo

A presente dissertação de mestrado, intitulada “Procedimento experimental para avaliação metrológica do desempenho de uma microturbina utilizada para geração de energia elétrica”, tem como objetivo descrever um método para avaliar o desempenho de microturbinas a gás natural para geração de energia elétrica e desenvolver uma metodologia para calcular a incerteza dos principais parâmetros, que são necessários para o cálculo do desempenho de microturbinas, juntamente com a análise da incerteza de medição, com o propósito de comissionamento metrológico, baseando-se em uma parametrização para as condições de referência estabelecidas em normas internacionais [ISO 2314, 1973] e fundamentado pela metodologia descrita pelo manual da U.S. Environmental Protection Agency para o cálculo dos parâmetros

e comparando os dados do fabricante para os vários regimes de operação, isto é, operando em carga total e parcial, isolada e em paralelo com a rede elétrica, desenvolver uma metodologia para o cálculo das incertezas e fazer um estudo desses parâmetros à curto prazo, para depois extrapolar à longo prazo.

## 1.5

### **Estrutura da Dissertação**

O presente trabalho encontra-se estruturado em 5 capítulos. O primeiro capítulo refere-se à introdução, características do gás natural e apresentação dos objetivos da tese. No segundo capítulo são apresentados os fundamentos teóricos e a metodologia empregada na análise da incerteza. No terceiro capítulo são apresentados os princípios de funcionamento e calibração dos instrumentos para medição da vazão de gás. No quarto capítulo é realizada uma análise dos resultados comparando os valores encontrados de incerteza com os valores pré-determinados [SRI/USEPA-GHG-GD-03, 2002] . O capítulo quinto apresenta a análise dos dados e as principais conclusões do trabalho.