MICROTURBINA A GÁS APLICADA COMO FONTE ALTERNATIVA DE ENERGIA EM REGIÕES COM DEFICIÊNCIA ENERGÉTICA

GAS MICROTURBINE APPLIED AS AN ALTERNATIVE ENERGY SOURCE IN REGIONS WITH ENERGY DEFICIENCY

Simoni Maria Gheno[I]
Rui Sérgio Mendes de Oliveira Junior[II]
Felipe do Nascimento Gonçalves[III]
Danilo dos Santos Barbosa[IV]
Maria Aparecida Bovério[V]

RESUMO

Com o crescimento da demanda energética prevista a médio e longo prazos e inúmeras falhas no sistema de distribuição de energia elétrica no Brasil, surgem novas tecnologias versáteis e eficazes para atenderem tal responsabilidade. O objetivo deste trabalho foi desenvolver e construir uma microturbina a gás para a propulsão de um microgerador de energia elétrica. A utilização de microturbinas a gás é extremamente vantajosa, pois permite atingir a carga plena de trabalho em pouco tempo. O projeto da microturbina a gás foi desenvolvido baseado em cálculos termodinâmicos e estequiométricos, sendo dimensionados a partir deles, os componentes da microturbina no *software SolidWorks*. Como resultados, apresentaram-se eficiência na combustão dos gases de 97%, contudo, sua eficiência térmica do ciclo termodinâmico foi de 8,1% devido à necessidade de se manter uma temperatura relativamente baixa para não danificar as peças internas da turbina. Conclui-se que a microturbina se apresentou como uma ótima alternativa para atender empresas que necessitam de um fornecimento de energia ininterrupto e regiões de difícil acesso.

Palavras-chave: Microgeração. Energia. Microturbina.

ABSTRACT

Based on the increasing forecasts for medium and long terms energy demands and several breakdowns in the electrical distribution system in Brazil, there have been new versatile and effective technologies to meet this responsibility. The objective of the present work was to develop and build a gas micro turbine for the propulsion of an electric micro generator. The Based on the increasing forecasts for medium and long terms energy demands and several

[I] Profa. Pós-Dra. da Faculdade de Tecnologia (FATEC) de Sertãozinho – SP – Brasil. E-mail: simoni.gheno@cps.sp.gov.br
[II] Engenheiro Mecânico formado pela Universidade Paulista de Ribeirão Preto – SP – Brasil. E-mail: rui.junior@tgminternational.com
[III] Engenheiro Mecânico formado pela Universidade Paulista de Ribeirão Preto – SP – Brasil. E-mail: felipenascimento789@hotmail.com
[IV] Engenheiro Mecânico formado pela Universidade Paulista de Ribeirão Preto – SP – Brasil. E-mail: danilo_sb05@hotmail.com
[V] Profa. Pós-Dra. da Faculdade de Tecnologia (FATEC) de Sertãozinho – SP – Brasil. E-mail: mariaboverio@hotmail.com

breakdowns in the electrical distribution system in Brazil, there have been new versatile and effective technologies to meet this responsibility. The objective of the present work was to develop and build a gas micro turbine for the propulsion of an electric micro generator. The use of gas micro turbines is highly beneficial, as it allows the full work capacity to be achieved in a short period of time. The gas micro turbine design was developed upon thermodynamic and stoichiometric calculations, and based on them, the micro turbine components were dimensioned in Solid Works software. As a result, the efficiency of the combustion of the gases was of 97%, however, its thermal efficiency of the thermodynamic cycle was of 8.1% due to the need to maintain a relatively low temperature to avoid damage to the internal parts of the turbine. It is concluded that the micro turbine presented as a great alternative to serve companies that need an uninterrupted power supply and regions of difficult access.

Keywords: Micro generation. Energy. Micro turbine.

Data de submissão do artigo: 18/06/2019.
Data de aprovação do artigo: 20/09/2019.
DOI:

1 INTRODUÇÃO

A demanda energética no Brasil de 2013 a 2050 dobrará seu valor (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, 2014). Dessa maneira, são necessárias tecnologias que acompanhem tal ritmo de crescimento. Além disso, à alta taxa de crescimento da demanda energética, somam-se, também, problemas de falha na distribuição de energia elétrica e seus limites, tendo em vista que, embora tenha uma grande extensão e esteja bem posicionada logisticamente, é impossível alcançar várias regiões brasileiras, entre elas, regiões remotas e de difícil acesso, onde existem ribeirinhos e pequenas comunidades. Nesses locais faz-se necessário o uso de tecnologias de microgeração de energia para atender às demandas básicas dos habitantes dessas regiões.

Há que se considerar, também, que as grandes redes de distribuição elétrica causam significativos impactos ambientais em sua construção e perdas de potência na transmissão da eletricidade, além de ter vários obstáculos que impedem sua boa operacionalidade, como: atos de vandalismo, acidentes e quedas de árvores, que interrompem a transmissão de energia. A ocorrência de blecautes, gerados devido a problemas na sustentação da malha de distribuição, picos de consumo e fatores climáticos, também devem ser levados em consideração. Sendo, mais uma vez, necessária a utilização de dispositivos de microgeração de energia práticos e que independam de fontes externas para atender cargas de ponta, demanda de emergência hospitalar, como em leitos de UTI e luzes de emergência.

Dessa forma, a microgeração de energia elétrica tem se tornado uma ferramenta na melhoria da eficiência e confiabilidade do sistema elétrico além de ser uma ferramenta de sustentabilidade. Porém, a microgeração necessita de um combustível versátil, com boa eficiência e pouco poluidor. Um combustível que atende a essas características é o gás natural.

Mas, como ter um equipamento capaz de gerar uma quantidade de energia que suprisse as necessidades básicas, independente de fontes externas de energia como o sol, pouco poluidor e compacto? Isso é possível com o uso de microturbina a gás. As

microturbinas são compactas, possuem grande capacidade de potência se comparada ao seu tamanho e quando alimentadas a gás podem emitir baixas quantidades de gases poluidores. Ademais, sua geração é instantânea, tornando-a excelente para atender cargas de ponta, emergências, bem como necessidades básicas de energia em regiões remotas. Nesse trabalho foi desenvolvida e construída uma microturbina alimentada a gás para a propulsão de um microgerador de energia elétrica. Ela foi calculada e dimensionada seguindo o ciclo Brayton real, considerando-se o ciclo aberto.

2 DEMANDA ENERGÉTICA

O estudo sobre a demanda energética tem como principal foco mostrar diferentes cenários e avaliar seus efeitos na economia como: infraestrutura, consumo de eletricidade, combustíveis renováveis e não renováveis. Alguns parâmetros de setores específicos possibilitam supor um grande avanço da demanda energética, onde será necessário a nível nacional fazer um estudo minucioso. Um dos parâmetros é a geração de energia elétrica que é parte de suma importância à demanda do sistema brasileiro para curto e longo prazos. Pensando nesse sentido ocorre uma enorme perspectiva para a autoprodução de energia e eletricidade nos setores de biogás e geração e distribuição que são partes de suma importância que indicarão as condições necessárias de demanda de energia que o sistema brasileiro deverá suprir a um período de longo prazo. No Brasil, no período de 2013 a 2050, há uma estimativa de que a demanda de energia aumentará mais de duas vezes (EPE, 2014).

2.1 Falhas na distribuição de energia elétrica

O sistema de transmissão de energia elétrica do Brasil alcança grandes distâncias e em função da distância da geração de energia até chegar ao consumidor existem alguns tipos de obstáculos que podem e causam possíveis problemas na rede, como por exemplo fatores climáticos, acidentes, quedas de arvores, atitudes de vandalismo, etc., porém não se deve culpar tais fatores, e sim, realizar um planejamento, qualificação, investimento e melhorias no sistema para que estejam preparados para tais eventualidades (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS, 2009).

2.2 Microgeração de energia

O conceito de microgeração surge junto com o conceito de geração distribuída. Entende-se por geração distribuída a instalação de pequena unidade de geração junto à rede de distribuição ou consumidor. No Brasil a potência máxima de 30 MW é a mais utilizada nas literaturas para definir geração distribuída. As vantagens desse tipo de geração são a diminuição das perdas nas redes de transmissão, aumento da disponibilidade de energia, diminuição da emissão de gases na atmosfera, aproveitamento de recursos naturais e sistemas de cogeração, dessa forma promovendo aumento da confiabilidade do sistema elétrico (EL-KHATTAN; SAMALA, 2004).

No Brasil, o microgerador de energia é um consumidor produtor de energia elétrica. A energia é basicamente gerada para consumo próprio sendo seu excedente vendido para a rede elétrica. Esse consumidor pode ser residencial ou comercial. Sistemas de microgeração podem possuir uma única fonte, ou combinar duas ou mais fontes renováveis, desde que não seja excedido o limite de produção. São consideradas fontes apropriadas para microgeração, a

energia solar fotovoltaica, micro geradores eólicos, microturbinas hidráulicas, biomassa e células a combustível (BRITO, 1999).

A produção de energia elétrica por pequenos produtores ganha cada vez mais espaço. Vários países incluindo o Brasil estão adaptando sua legislação para aumentar a participação da microgeração na sua matriz energética. No Brasil a Nota Técnica da ANEEL busca determinar as condições para conexão da microgeração à rede, conforme o Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST, Módulo 3 (Acesso ao Sistema de Distribuição) e Módulo 5 (Medição). Os sistemas de aquecimento de água, aquecedores solares, podem ser considerados sistemas indiretos ou ainda microgeração de calor (PIRES; PICANTE, 2007).

2.3 Turbina a gás e seus componentes

Turbina a gás é uma máquina térmica que transforma a energia potencial mecânica existente nos gases quentes oriunda de uma combustão em trabalho mecânico, sendo também utilizada para propulsão. São máquinas onde o fluido se desloca em um sistema rotativo construído com pás, conhecido como rotor, fornecendo ou absorvendo a energia deste rotor, dependendo da aplicação entre turbina ou compressor. É complexa e com várias partes móveis, como também utiliza recursos como controle eletrônico com objetivo de converter a energia proveniente do combustível em potência no eixo e refere-se a um conjunto de três equipamentos: compressor, câmara de combustão e a própria turbina. Sua principal característica é a alta velocidade do seu fluido de trabalho, atingindo até 500 m/s ou mais (MENESES, 2011).

Segundo Dekker (2003), os componentes de uma turbina a gás são:

I - Cone de entrada: tem por finalidade direcionar o ar de maneira ordenada até a entrada do compressor.

II – Compressor: tem por finalidade succionar o ar à temperatura e pressão ambiente e comprimir o mesmo até uma determinada pressão e entalpia. Este ar a alta pressão e entalpia serão direcionados para a câmara de combustão.

III - Carcaça do Compressor: serve como estrangulador e direcionador do ar até o difusor de ar. Além desta finalidade é parte estrutural de fixação do conjunto compressor e difusor na carcaça principal da turbina.

IV - Difusor de ar do compressor: tem a finalidade de direcionar o ar em alta velocidade e comprimir a alta pressão e entalpia. O difusor de ar acoplado a compressores de saídas radiais geralmente apresenta entrada e saída radial devido sua facilidade de construção e projeto.

V - Eixo da turbina: é responsável pela transmissão do trabalho da turbina para o compressor. Está desenhado de tal maneira que os esforços e vibrações naturais e externas não influenciam no total desempenho e segurança da turbina.

VI - Túnel do eixo: cumpre papel muito importante no projeto. Ele é responsável por unir mecanicamente as partes móveis e estática do projeto. Como principal objetivo, evidencia-se que ele suporta os rolamentos e o sistema de lubrificação dos rolamentos da turbina.

VII – Rolamentos: estão montados dentro do túnel do eixo e permitem a livre rotação do eixo.

VIII - Câmara de combustão: a combustão é iniciada por uma fonte externa, e, uma vez iniciada, a combustão permanece e se torna autossustentável através de uma chama

composta por ar mais combustão. Uma combustão com oxigênio para determinada quantidade de combustível é conhecida como estequiométrica, ou seja, há uma quantidade mínima de oxigênio para cada parcela de combustível injetado e quando há maior quantidade de ar do que a mínima, a combustão é denominada combustão com excesso de ar. Na falta do ar a combustão não é completa e pode derivar outros produtos como resultados, tais como CO. Quanto maior a temperatura dos gases na saída da câmara de combustão, melhor será o rendimento do equipamento. A câmara de combustão é a responsável por receber o ar pressurizado proveniente do compressor e realizar a mescla ar / combustível. Na câmara de combustão, ocorrerá a oxidação do combustível onde os gases da combustão serão direcionados ao injetor (estator) da turbina.

Os tipos mais comuns de câmara de combustão são a simples e a múltipla. As simples podem ser anulares e tubulares, já as câmaras múltiplas são sempre tubulares.

IX – Combustíveis: as turbinas a gás podem utilizar alguns diferentes tipos de combustíveis, mas deve-se atentar a quantidade de cinzas. São indicados combustíveis, tais como, gás natural desde que esteja limpo, petróleo bruto, gases de alto fornos com a utilização de um filtro antes do compressor, este combustível não é viável devido ao seu pequeno poder calorífico e derivados do petróleo, gasolina, querosene, diesel, entre outros, desde que como já citado, não produzam cinzas em excesso. O ideal é que o combustível seja abundante na natureza, tenha um bom poder calorífico, produza gases de combustão que não poluam o meio ambiente e que seus derivados no processo de combustão não prejudiquem partes do equipamento.

X - Estator da turbina: localizado na saída da câmara de combustão, o estator é responsável por direcionar os gases de combustão em alta temperatura, expandindo e acelerando os gases nas palhetas fixas até o disco da turbina.

XI - Rotor da Turbina: as turbinas, como os compressores, são também classificadas como axiais e radiais, segundo a direção do fluxo do fluido de trabalho entre as palhetas do rotor da turbina.

Os rotores de fluxo radial normalmente apresentam somente um estágio com rotor semiaberto, o fluxo do ar segue contra o efeito da força centrífuga no sentido radial. Esse tipo de rotor é normalmente empregado em instalações de baixa potência. Em contrapartida, os rotores axiais são mais eficientes quando comparados com os radiais, sendo que, turbinas com essas configurações podem ser construídas com vários estágios, onde cada estágio da turbina é constituído por uma fileira de palhetas estacionárias seguidas por uma fileira de lâminas giratórias.

Os gases provenientes da queima do combustível na câmara de combustão a altas temperaturas e entalpia saem do estator da turbina e se expandem no disco da turbina produzindo torque no eixo. O projeto da turbina deve ser bem desenvolvido para o melhor aproveitamento dos gases de combustão aumentando a eficiência do ciclo.

XII - Carcaça externa do conjunto: é a responsável por conectar o estator da turbina e o difusor do compressor além de manter o enclausuramento da câmara de combustão e as demais partes internas do protótipo. Na carcaça externa também se encontram os pontos de fixação do conjunto na bancada de testes.

XIII - Anel injetor de combustível: o anel injetor e distribuidor é o responsável por direcionar o combustível até a câmara de combustão onde, por meio de uma bomba de combustível, pulveriza-se o mesmo para a mescla ar/combustível.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Esta pesquisa caracteriza-se como bibliográfica e aplicada. A pesquisa bibliográfica, foi elaborada a partir de material já publicado acerca do assunto. Em seguida, na pesquisa aplicada objetivou-se gerar conhecimentos para aplicação prática dirigidos à solução de problemas específicos, tal como definem Prodanov e Freitas (2013).

3.1 Métodos

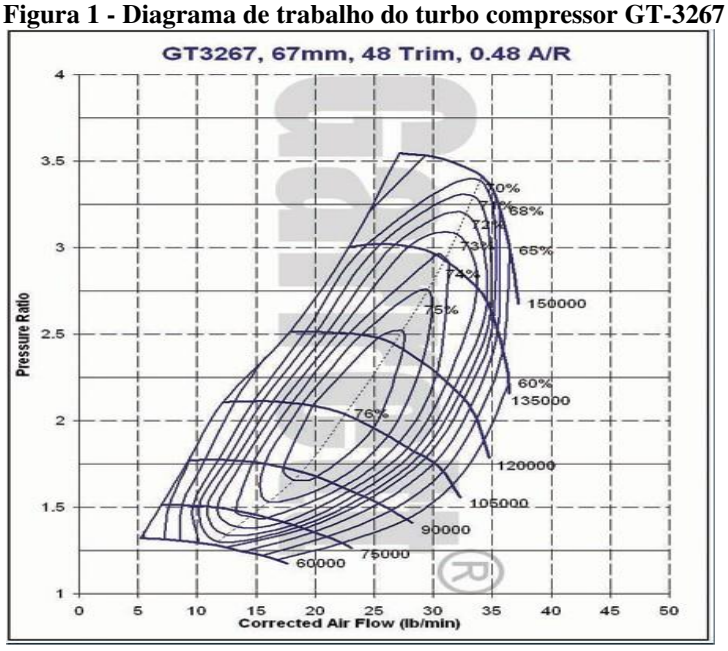
Inicialmente faz-se necessário definir certas considerações baseadas nos projetos de turbinas similares já fabricadas e verificadas. Estas considerações não podem ser controladas mediante projeto, desenho e até mesmo na operação da turbina.

Uma turbina a gás é uma máquina complexa de se projetar, fabricar e operar devido as altas temperaturas e velocidade dos fluidos. No caso de uma mini turbina a gás, o projeto torna-se ainda mais desafiador devido à alta velocidade de giro da turbina e compressor (100.000 RPM). A simplicidade e a funcionalidade foram consideradas pontos positivos.

- **Compressor**

O compressor utilizado foi baseado em um compressor radial existente modelo Garrett GT 3267. Na Figura 1, se pode ver a curva de rendimento do compressor utilizado no projeto. De acordo com as curvas apresentadas, se supõe um compressor de dimensões idênticas, com uma relação de compressão de 2,2 e eficiência de 72%. A eficiência de admissão será de η_{adm} = 0,98.

Figura 1 - Diagrama de trabalho do turbo compressor GT-3267



Fonte: (TURBO GARRETT, 2016)

Considera-se que o compressor seja do tipo axial-radial de um estágio, de acordo com o compressor de referência anteriormente citado com relação de pressão r = 2,2. Para o compressor se assume um grau de reação de 0,1; isto quer dizer que apenas 10% da entalpia total sobe para o rotor, o resto sobe no estator.

- **Ar**

Com referência nos dados de ar onde o projeto foi desenvolvido, tomou-se como condições de entrada de ar uma temperatura de 25°C (298,15K) a 1,01 BAR com umidade relativa do ar de 50% e altura no nível do mar de 580m. Os dados considerados são valores médios anuais. A vazão mássica de ar se determina supondo uma vazão de 310% de excesso de ar, dizendo que, j = 3,1. Este excesso de ar é assumido devido a necessidade de excesso de ar para manter as peças da turbina resfriadas, a fim de não haver danos severos na câmara de combustão.

- **Câmara de combustão**

A câmara de combustão desse projeto é anelar e está dividida em duas regiões: interior, onde ocorre o processo de queima, e a parte exterior que também possui tubos internos no qual o combustível será pressurizado a uma determinada pressão de trabalho e direcionado até a região de queima. O anel de fechamento é montado na parte superior da câmara para criar um sentido de exaustão dos gases e o ar pressurizado pelo compressor atravessa os furos no sentido "exterior-interior", cumprindo duas funções importantes na câmara de combustão: a primeira é a parcela de ar para ocorrer a oxidação do combustível e a segunda é a parcela de excesso de ar, a qual mantém a temperatura da câmara controlada, evitando fusão do material devido as altas temperaturas.

Foi considerada uma câmara de combustão anelar devido as limitações de tamanhos e de construção contra fluxo. O combustível será dirigido para dentro da câmara de combustão através de tubos de bronze que estarão em contato com a câmara, fazendo assim um pré-aquecimento do combustível antes da entrada do mesmo para o processo de queima. O combustível será injetado por tubos capilares, onde, devido ao processo de pressurização por bomba, será pulverizado dentro da câmara de combustão em sentido contrário ao fluxo de ar, proporcionando ao sistema uma mescla do combustível.

Com base nesta câmara de combustão e o tamanho reduzido, considerou-se uma eficiência de combustão de 97%. Para conseguir maior eficiência de combustão se requer uma análise detalhada do funcionamento e dos fenômenos intrínsecos ao sistema além da queda de pressão dele. A câmara de combustão foi desenhada para ter uma entrada completamente axial e de forma anelar de dois cilindros concêntricos com um anel de fechamento e um anel distribuidor dos gases provenientes da queima do combustível. O combustível para a partida será o butano e o querosene para operação contínua.

PCI_butano=45,8 [MJ/kg] – razão ar/combustível – 11,1: 1

PCI_querosene=47,93 [MJ/kg] – razão ar/combustível – 14,67: 1

- **Gerador**

O gerador utilizado para a geração de energia é monofásico, de tensão nominal 110 V e frequência de 60 Hz. A relação de redução da transmissão será de acordo com a equação 1 em um gerador de dois polos.

$$N = \frac{120 * f}{P} = \frac{(120 * 60)}{2} = 3.600\ [RPM] \quad (1)$$

Na rotação nominal de 3.600 [RPM] o gerador disponibilizará uma potência de 7 [KW] nos bornes. O fator de potência será de 0,85% devido à disponibilidade e baixo custo se comparado aos geradores com maiores eficiências. Neste projeto não se projetará o gerador. Considerou-se uma eficiência de redução de 0,95% devido às perdas nas engrenagens e mancais.

- **Turbina**

As turbinas em geral apresentam maior eficiência que os compressores devido a melhor estabilidade do fluxo dos gases de combustão. Dada a eficiência do compressor de 72%, supõe-se uma eficiência de 77%, assumindo assim 5% a mais para a turbina. Construída em um disco de um estágio, a turbina receberá os gases da combustão provenientes da câmara de combustão onde os fluxos dos gases da queima serão direcionados pelo estator, e os gases se expandirão até a entrada da turbina.

A turbina a ser calculada tem uma série de eficiências associadas ao ciclo que devem ser estimadas para desenvolver os cálculos. Para a rotação de trabalho da turbina considerou-se uma velocidade de giro de 110.000 [RPM].

- **Potência líquida**

Partindo da potência elétrica, a potência do gerador se obtém através da equação 2 onde: P_elétrica=7,0 [kW] é a potência elétrica nos bornes e cos⁡φ=0,85 é o fator de potência do gerador.

$$P_{gerador} = \frac{P_{elétrica}}{cos\,\varphi} = 8{,}23\ [KW] \tag{2}$$

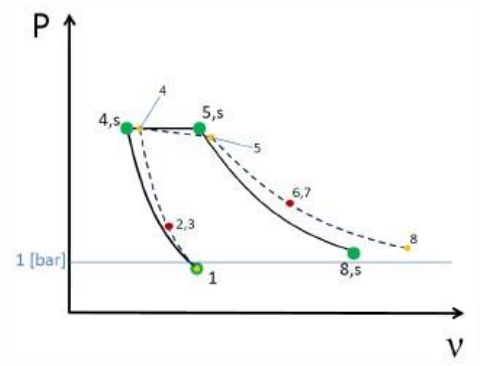
Em seguida pode-se calcular a potência líquida no eixo com o auxílio da equação 3, onde P_gerador=8,23 [kW] é a potência do gerador e η_mec=0,95 é a eficiência mecânica da redução.

$$P_{liq.Eixo} = \frac{P_{gerador}}{\eta_{mec}} = 8{,}66\ [kW] \tag{3}$$

- **Ciclo termodinâmico**

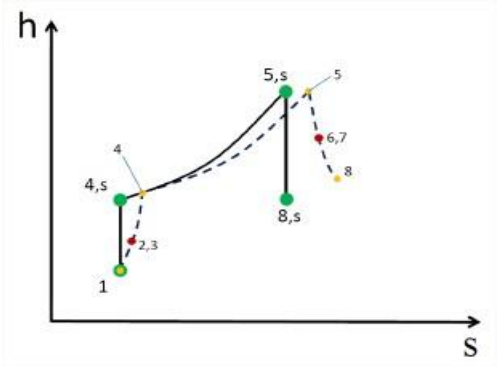
O ciclo termodinâmico da turbina é conhecido como ciclo de Brayton real levando em consideração as eficiências do compressor, turbina e câmara de combustão. No ciclo de Brayton há uma compressão isentrópica do ponto 1 (entrada do compressor) até o ponto 4 (entrada de ar na câmara de combustão), logo do ponto 5 (saída da câmara de combustão) os gases se expandem até o ponto 8 (saída da turbina). Os pontos 2 e 3 representam a saída do rotor e entrada no difusor do compressor. Os pontos 6 e 7 representam a saída do estator da turbina até a entrada do rotor da turbina. O ponto 0 indica a região atmosférica do compressor. O ciclo calculado foi considerado como ciclo aberto, conforme o diagrama P-V da Figura 2. A Figura 3 representa o diagrama h-s do ciclo completo da turbina.

Figura 2 - Diagrama P-V real do Ciclo Brayton



Fonte: elaborado pelos autores (2019)

Figura 3 - Diagrama H-S do ciclo Brayton real



Fonte: elaborado pelos autores (2019)

3.2 Materiais

- **Compressor, câmara de combustão e turbina**

O compressor está sujeito a esforços mecânicos elevados, porém os esforços térmicos são desprezíveis, deve apresentar resistência a corrosão e baixa densidade para minimizar o peso e facilitar a usinabilidade. Para este projeto foi definido um compressor de liga de alumínio 2424. Devido sua baixa densidade há um menor momento de inércia no sistema rotor. Para o estator, elegeu-se alumínio de mesma característica devido a disponibilidade de matéria prima, como o estator é estacionário, este material apresenta boas características mecânicas para a aplicação.

Devido às características da aplicação, a câmara de combustão deverá ser capaz de suportar altas temperaturas, pois é onde será produzida a combustão do combustível. A temperatura interna da câmara de combustão poderá chegar a uma temperatura média de 1.600 [°C] onde o material deverá apresentar um ponto de fusão elevado. Além de apresentar características de fusão elevada, o material deverá apresentar resistência à corrosão. Devido a estes fatores característicos, foi eleito um material do tipo INCONEL 718 para esta aplicação. O ponto de fusão deste material é de aproximadamente 1.340 [°C]. Para esta aplicação está limitada a temperatura interna da câmara de combustão em 1.200[°C]. Este material satisfaz às condições de resistência a corrosão e de alta temperatura expressa aos gases de combustão.

A turbina é uma peça complexa para a definição do material. O disco da turbina e também o estator está sujeito a altas temperaturas, além disso, o disco da turbina estará sujeito a esforços mecânicos elevados devido a sua alta velocidade de giro. Devido a estes fatores, foi eleito o material UDIMET Alloy 720 que é uma superliga de Cr-Fe-Cr com ótimas características térmicas e resistência a fluência. Em função do estator não apresentar características de esforços mecânicos de rotação, elegeu-se um material para esta aplicação onde aplicou-se o INCONEL 718.

- **Eixo, carcaça da turbina e túnel do eixo**

O eixo da turbina deve ser capaz de suportar as forças axiais do sistema devido às ações das forças providas do compressor e do disco da turbina. Devido a estas características, aplicou-se um aço liga de Cr-Ni-Mo, especificamente o aço SAE 4340 temperado e revenido. A carcaça da turbina não estará sujeita a temperaturas muito elevadas devido ao ar pressurizado estar sempre isolando a câmara de combustão e a carcaça externa. O material

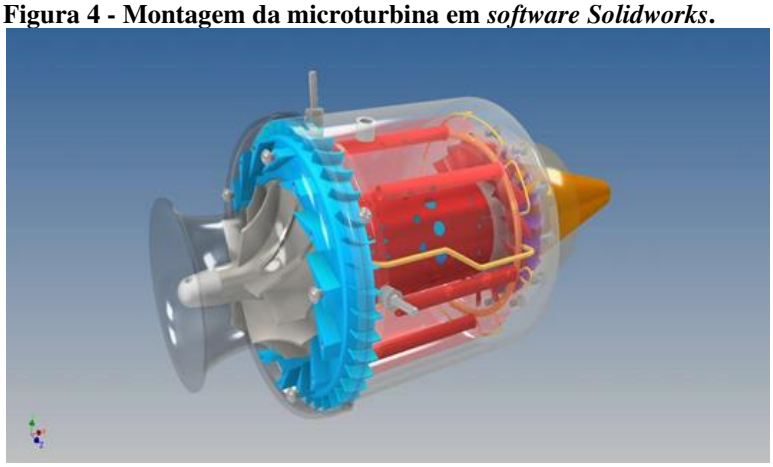
elegido para esta aplicação foi o SAE 1045. O túnel do eixo apresenta características similares a da carcaça, o material escolhido foi o alumínio 2424.

- **Rolamentos, tubos do sistema de lubrificação e anel distribuidor de combustível**

Para este projeto, foram considerados rolamentos de alta rotação (100.000 [RPM]) e para evitar superaquecimentos, a turbina conta com um sistema de lubrificação forçada a óleo ISO VG 68. A tubulação de lubrificação tem função de direcionar o fluxo de óleo para dentro do túnel do eixo e assim fornecer óleo lubrificante para os rolamentos. Levando em conta a disponibilidade de espaços reduzidos e dimensões complexas para a aplicação devido à falta de espaço, escolheu-se o cobre como material de aplicação.

O anel distribuidor de combustível está aplicado dentro da câmara de combustão e por este motivo estará sujeito a altas temperaturas. Este anel estará diretamente em contato com as chamas proveniente da combustão e em um ambiente altamente corrosivo. Logo, os tubos serão de AISI 446. Na Figura 4 é possível verificar a montagem de todos os componentes feita no programa *Solidworks*.

Figura 4 - Montagem da microturbina em *software Solidworks*.



Fonte: elaborada pelos autores (2019)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Partindo-se do cálculo inicial em relação à potência do gerador para o qual a turbina foi projetada, chegou-se ao resultado de que a potência do gerador é de 8,23 [KW], enquanto a potência líquida no eixo é de 8,66 [KW].

Em acordo com o ciclo Brayton foram calculadas variáveis de oito pontos da microturbina, pontos estes disponíveis e numerados conforme descrição dos cálculos contidos na seção de materiais e métodos deste trabalho e que apresentam o Ciclo Termodinâmico do processo. Os valores encontrados correspondem à entrada e saída do compressor, câmara de combustão, turbina, rotor e estator e são apresentados na Tabela 1 de forma ordenada. Como resultado final, foi obtido com êxito uma micro turbina capaz de gerar potência em seu eixo motriz principal a fim de acionar um gerador elétrico e fornecer energia elétrica a um sistema independente ou interconectado com a rede de energia existente em seu local de instalação e operação.

Tabela 1 - Resumo do ciclo Termodinâmico

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	Unid.
Pressão	1,013	0,993	1,129	1,129	2,184	2,14	1,946	1,946	1,05	**[bar]**
Temperatura	298,15	298,15	309,31	309,31	399,56	1273,64	1245,07	1245,07	1091,53	**[ºK]**
Vol. Específico	0,844	0,858	0,782	0,782	0,366	1,709	2,251	2,251	2,613	**[m³/Kg]**
Entalpia	298,18	290,25	302,42	302,42	400,93	1341,29	1246,87	1246,87	1152,46	**[KJ/Kg]**
K	1,400	1,400	1,400	1,400	1,396	1,380	1,312	1,312	1,317	

Fonte: elaborada pelos autores (2019)

Além dos dados apresentados em relação ao Ciclo Termodinâmico, outros valores importantes obtidos foram:

A eficiência na combustão dos gases dentro da câmara de combustão foi considerada de 97% e o rendimento interno do ciclo foi de 8,1% em consequência da necessidade de manter a temperatura T_3 relativamente baixa para não danificar as peças internas da turbina. O calor fornecido ao sistema foi de 108,45 [KW], enquanto o fluxo mássico de combustível necessário para alimentação foi de 0,00232 [Kg/s] e o fluxo mássico de ar para admissão foi de 0,10518 [Kg/s]. Todos estes valores foram calculados para uma rotação de 110.000 [RPM].

Os valores relacionados aos cálculos das dimensões do projeto estão contidos na seção de materiais e métodos deste trabalho, onde foram definidos os diâmetros, comprimentos, áreas e espessuras das peças. Todo projeto foi desenvolvido em *software SolidWorks*, componente por componente, tais como, compressor, eixo, turbina, rolamentos, câmara de combustão, carcaça da turbina, anel injetor, estator, entre outros. A Figura 5 apresenta uma vista explodida do projeto pronto em três dimensões.

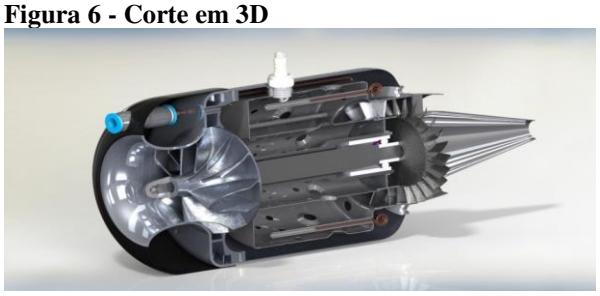
Figura 5 - Vista explodida do projeto em 3D



Fonte: elaborada pelos autores

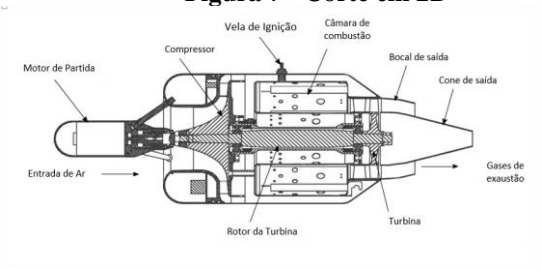
As Figuras 6 e 7 apresentam respectivamente, o corte do projeto em três e duas dimensões.

Figura 6 - Corte em 3D



Fonte: elaborada pelos autores (2019)

Figura 7 - Corte em 2D



Fonte: elaborada pelos autores (2019)

Os valores correspondentes ao orçamento são referentes à compra das peças e serviços de usinagem realizados nas mesmas durante a construção do protótipo, totalizando R$ 4760,00.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo desenvolver e construir uma microturbina alimentada a gás para a propulsão de um microgerador de energia elétrica. Tendo em vista atender a diversos problemas relacionados ao setor energético, como: a crescente demanda energética no país, a demanda básica de energia dos habitantes de regiões remotas, a cargas de ponta e a falhas de geração e distribuição de energia elétrica. A turbina foi calculada de acordo com o ciclo Brayton real, considerando-se o ciclo aberto. Através desses cálculos termodinâmicos, foram selecionados e dimensionados os diversos componentes da turbina, tais como: compressor, câmara de combustão, difusor, rotor da turbina e também os materiais utilizados em sua construção.

A eficiência na combustão dos gases dentro da câmara de combustão foi considerada de 97%, ao mesmo tempo que o rendimento interno do ciclo foi de 8,1%, em consequência da necessidade de manter a temperatura T_3 relativamente baixa para não danificar as peças internas da turbina. Obteve-se uma potência liquida no eixo de 8,66KW, utilizando-se de um fluxo mássico de combustível de 0,00232 [Kg/s], tendo em vista uma rotação de 110.000 [RPM].

Conclui-se que a microturbina pode ser empregada nos mais diversos tipos de ambiente, consistindo em um equipamento fiável, independente de fontes externas de energia e de fácil transporte, devido a sua pequena massa e dimensões. Além disso, sua geração é instantânea, tornando-a excelente para atender emergências hospitalares, cargas de ponta, bem como necessidades básicas de energia em regiões remotas.

REFERÊNCIAS

BRITO, Sergio de Salvo. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CRESESB, 1999.

DEKKER, Marcel. **Axial flow and radial flow gas turbines**. 2003. Disponível em: www.himech.files.wordpress.com/2010/02/dke672_ch7.pdf. Acesso em: 16 abr. 2017.

EL-KHATTAN, W.; SALAMA, M.M.A. **Distributed generation technologies, definitions and benefits**. Electric Power Systems Research, Volume 71, Issue 2, Pages 119-128, October 2004.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Demanda de Energia 2050**. Nota técnica DEA 13/14. Ministério de Minas e energia. Rio de Janeiro, 2014.

MENESES, Ernane do L. **O uso de turbinas a gás para geração de energia elétrica em plataforma**s. Rio de Janeiro: 2011. Disponível em: http://www.uezo.rj.gov.br/tccs/capi/ErnaniMeneses.pdf. Acesso em: 26 mar. 2017.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). **Relatório final sobre blecaute de 2009**. Disponível em: http://www.ons.org.br/newsletters/informativos/nov2009/06-materia01.html. Acesso em: 19 de mar. 2017.

PIRES, Bruno; PICANTE, Nuno. **Microgeração**. 2007. 51p. Trabalho acadêmico – Universidade de Coimbra, Coimbra, 2007.

PRODANOV, Cleber Cristiano; FREITAS, Ernani Cesar. **Metodologia do Trabalho Científico**: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico. 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

TURBO GARRETT. **Diagrama de trabalho do turbo compressor GT-3267**. 2016. Disponível em: https://www.turbobygarrett.com/turbobygarrett/sites/default/files/catalog/TBG-Catalog-Vol-6.pdf. Acesso em: 09 out. 2017.