



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO AMAZONAS - IFAM
PRÓ-REITORIA DE ENSINO
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA



NEWTON DE LEIROS GARCIA JUNIOR

**EFICIÊNCIA DE TURBINAS A GÁS: INFLUÊNCIA DA
TEMPERATURA NO RENDIMENTO**

MANAUS - AM
2021

NEWTON DE LEIROS GARCIA JUNIOR

**EFICIÊNCIA DE TURBINA A GÁS: INFLUÊNCIA DA
TEMPERATURA NO RENDIMENTO**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Processos Industriais do Campus Manaus Centro do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. José Josimar Soares.

Biblioteca do IFAM- Campus Manaus Centro

G216e Garcia Junior, Newton de Leiros.
Eficiência de turbinas a gás: influência da temperatura no rendimento /
Newton de Leiros Garcia Junior. – Manaus, 2021.
32 p. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) – Instituto
Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, *Campus Manaus*
Centro, 2021.

Orientador: Prof. Dr. José Josimar Soares.

1. Engenharia mecânica. 2. Turbina a gás. 3. Consumo de energia. I.
Soares, José Josimar. (Orient.) II. Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia do Amazonas III. Título.

CDD 621

NEWTON DE LEIROS GARCIA JUNIOR

EFICIÊNCIA DE TURBINA A GÁS: INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO RENDIMENTO

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Processos Industriais do Campus Manaus Centro do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. José Josimar Soares.

Aprovada em 9 / 4 / 2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof. José Josimar Soares(Orientador)
Instituto Federal de Ciência e Tecnologia - IFAM

Prof. Plácido Ferreira Lima
Instituto Federal de Ciência e Tecnologia - IFAM

Prof. Raimundo Mesquita Barros
Instituto Federal de Ciência e Tecnologia - IFAM

CONCEITO FINAL: _____

MANAUS – AM
2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, o Pai eterno, que me presenteou com a vida, dando-me a oportunidade de ter grandes experiências terrenas. Agradeço aos meus pais, que desde cedo me amaram e me criaram com toda devoção e esforço.

Agradeço a minha esposa Kelyanne que sempre andou comigo neste caminho de alegrias, tristezas, provações e desafios, contudo sempre se manteve firme como uma rocha e aos nossos filhos que nos enchem de alegria e nos ensinam a ter muita paciência.

Agradeço aos engenheiros Humberto, Emmerson e Adriano que me auxiliaram nas coletas dos dados de campo na usina termelétrica.

Por fim, agradeço aos mestres deste renomado Instituto, pois são mais que professores, que transmitem seus conhecimentos e experiências de vida.

“E como nem todos têm fé, buscai diligentemente e ensinai-vos uns aos outros palavras de sabedoria; sim, nos melhores livros buscai palavras de sabedoria; procurai conhecimento, sim pelo estudo e também pela fé “. (D&C88:118)

RESUMO

Este trabalho apresenta uma pesquisa descritiva sobre como o rendimento de uma turbina a gás é influenciado pela temperatura do ar de entrada. A pesquisa analisará o funcionamento de uma turbina e mostrará os efeitos do ar de entrada na queda de rendimento da máquina. O motor gerador objeto desta pesquisa é a turbina a gás aeroderivativa GE LM6000PC, disposta em um parque de geração de energia elétrica situado em Manaus-Am. A partir de pesquisas bibliográficas, informações coletadas no parque gerador o trabalho se desenvolveu como uma pesquisa descritiva, e logo em seguida foram feitas simulações usando o programa de cálculos de funções termodinâmicas *Engineering Equation Solver (EES)*. Os dados gerados no EES foram inseridos em uma planilha e gerou-se um gráfico temperatura vs rendimento no MS Excel. O gráfico mostra por meio de variações dos parâmetros de diminuição da temperatura de entrada do ar a quantificação do aumento, em até 7,00%, no rendimento da turbina a gás.

Palavras-chave: Temperatura. Turbina a gás. Rendimento.

ABSTRACT

This work presents a descriptive research on how the efficiency of a gas turbine is influenced by the temperature of the inlet air. The research will analyze the operation of a turbine and show the effects of the incoming air on the machine's drop in performance. The generating engine object of this research is the GE LM6000PC aeroderivative gas turbine, located in an electric power generation park located in Manaus-Am. Based on bibliographic research, information collected in the generator park, the work developed as a descriptive research, and soon afterwards, simulations were performed using the Engineering Equation Solver (EES) thermodynamic function calculations program. The data generated in the EES were inserted in a spreadsheet and a graph of temperature vs. yield was generated in MS Excel. The graph shows, by means of variations in the parameters for decreasing the inlet air temperature, the quantification of the increase, up to 7.00%, in the efficiency of the gas turbine.

Keywords: Temperature. Gas turbine. Efficiency.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema básico do ciclo Brayton.....	13
Figura 2 – Gráfico Txs do ciclo Brayton.....	14
Figura 3 - Gráfico Txs.....	15
Figura 4 – Turbina GE LM 6000 PC.....	22
Figura 5 – Compressor axial LM 6000 PC.....	24
Figura 6 – Casa de filtros.....	24
Figura 7 – Condensador e Evaporadora do sistema de refrigeração.....	25
Figura 8 – Bombas de circulação do sistema de refrigeração da usina.....	25
Figura 9 – Fluxograma estrutural do programa EES.....	27
Figura 10 – Temperatura vs Rendimento.....	28
Figura 11 - Comparativo entre a temperatura mínima e temperatura ambiente.....	29

LISTA DE TABELA

Tabela 1 – Dados fornecidos pela UTE-Aparecida operando em ciclo simples.....	22
Tabela 2 – Dados coletados na sala de controle UTE-Aparecida.....	26
Tabela 3 – Dados gerados pelo programa EES.....	27

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1 CICLO BRAYTON.....	13
2.2 TURBINA DE COMBUSTÃO IDEAL SIMPLES.....	15
2.2.1 Equação geral do balanço de energia para volume de controle	15
2.3 RELAÇÃO DE PRESSÃO DO COMPRESSOR SOBRE O DESEMPENHO.....	17
2.4 TURBINA A GÁS.....	18
2.4.1 Turbina a gás industrial	19
2.5 <i>ENGINEERING EQUATION SOLVER EES</i>	20
3 METODOLOGIA	21
3.1 TURBINA GE LM6000 PC.....	21
3.2 COMPRESSOR AXIAL.....	23
3.2.1 Método de resfriamento do ar de entrada no compressor	24
3.2.2 Tecnologia <i>Sprint</i> GE LM 6000 PC pulverização <i>intercooling</i>	25
3.3 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO.....	26
4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	28
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	30
REFERÊNCIAS	31

1 INTRODUÇÃO

O consumo de energia vem crescendo ao longo dos anos, muito em razão do desenvolvimento tecnológico dos países. As turbinas de ciclo a gás vêm sendo uma máquina de grande utilidade para este crescimento. Contudo, as turbinas a combustão sofrem uma influência negativa no seu rendimento energético com o incremento da temperatura do ar ambiente utilizado na combustão, e isto ocorre ao longo do dia levando a variações na produção do equipamento.

O resfriamento do ar na entrada das turbinas a gás torna-se um fator que pode interferir de modo bastante positivo tanto na potência como no rendimento das turbinas quanto na melhoria da distribuição de energia elétrica levando assim a uma operação mais econômica.

Tendo em vista esse processo termodinâmico que busca diminuir a temperatura do ar na entrada do ciclo a gás, o trabalho se propõe a questionar; Como o ar de entrada pode contribuir, quando resfriado, até a certa temperatura de trabalho para que haja um rendimento ideal da turbina a gás?

Estudar o resfriamento do ar de entrada de turbinas a gás em países como o Brasil, onde a temperatura ambiente média alcança os 25°C, é de suma importância, pois quanto maior for essa temperatura, a partir de um valor considerado ideal, adotada pelo fabricante, menor será a potência gerada pela turbina.

Logo, como objetivo geral deste trabalho, apresenta-se uma investigação através de dados coletados em uma usina termelétrica de ciclo simples na área urbana da cidade de Manaus. Dados como temperatura, pressão e vazão mássica da turbina quando inseridos em um programa do *Engineering Equation Solve - EES* e no *MicroSoft Excel* mostram um aumento no rendimento da turbina a gás. Disso discorre outros objetivos específicos, a saber:

- Descrever o processo de resfriamento do ar de entrada da turbina.
- Simular o aumento do rendimento de uma turbina quando há a diminuição da temperatura do ar de entrada.
- Comparar, por meio de simulação, os rendimentos de um sistema com temperatura ambiente de entrada versus um sistema de resfriamento de ar de entrada.

O parque opera com quatro turbinas a gás modelo LM 6000 PC da fabricante *General Electric* e potência nominal de 43 megawatts, com dois sistemas de central de água gelada. Todavia o estudo foi realizado somente em uma turbina a gás.

Uma revisão bibliográfica com base teórica fundamenta o estudo. É apresentado o ciclo de potência que caracteriza o trabalho de uma turbina a gás, seu princípio de operação e seu desempenho em ciclo simples e uma breve descrição do processo de resfriamento do ar de entrada.

Utilizou-se dados coletados em campo tanto para descrever o processo como para simular e comparar o rendimento quando uma turbina trabalha com e sem sistema de resfriamento de ar de entrada. Também foi simulado, em certa faixa de temperatura, a variação do rendimento.

Obteve-se como resultado uma variação de 7,00% ao simular a queda de temperatura de 17°C para 7°C. E ao comparar a simulação da temperatura mínima de trabalho (7°C) com a temperatura ambiente (27°C) o resultado foi, um diferencial, de 14,00%.

Por fim o trabalho está apresentado em quatro capítulos, quais sejam:

O capítulo um, esta introdução, apresenta seus objetivos e sua organização.

O capítulo dois, a fundamentação teórica, apresenta uma análise teórica das turbinas a gás estudado de forma a dar fundamentação, contribuir para a sustentação de um plano argumentativo e dando um comparativo para os resultados obtidos.

Capítulo três, a metodologia, apresenta uma estrutura descritiva e o procedimento adotado para se chegar aos resultados.

Capítulo quatro, as discussões e resultados, baseados nas simulações feitas nos dados coletados na referida usina mencionada.

Capítulo cinco, são as considerações finais dos resultados encontrados.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

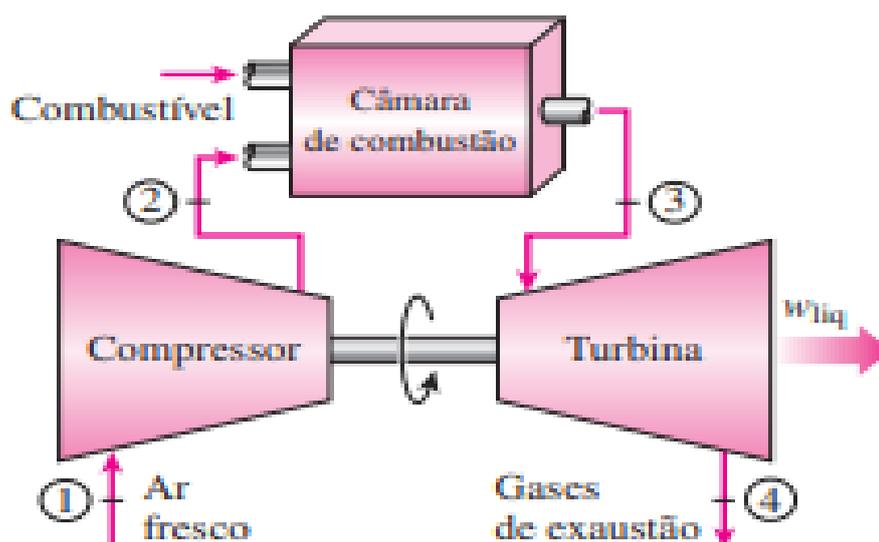
Neste capítulo temos como objetivo entender, teoricamente, o funcionamento dos equipamentos estudados. Começando pela teoria ciclo Brayton e sua concepção termodinamicamente nos processos envolvidos no ciclo.

2.1 CICLO BRAYTON

O ciclo Brayton foi proposto por George Brayton para ser utilizado no motor alternativo desenvolvido por ele em 1870. Atualmente, é usado apenas em turbinas a gás, as quais os processos de compressão e expansão ocorrem em um maquinário rotativo (CENGEL; BOLES, 2013).

Este ciclo ao usar o ar como fluido de trabalho se torna o ciclo termodinâmico ideal que serve de modelo para a turbina a gás. Ele é composto de quatro processos como é mostrado na figura 1, abaixo.

Figura 1 – Esquema básico do ciclo Brayton



Fonte: Cengel, (2013)

As instalações de potência com turbina a gás podem operar tanto em modo aberto como fechado. O modo aberto é mais comum, pois se trata de um motor no qual o ar atmosférico é continuamente arrastado para um compressor, onde é comprimido até uma pressão mais elevada. O ar entra em uma câmara de combustão, ou combustor, onde é misturado com combustível, e a combustão ocorre, resultando em produtos de combustão a uma temperatura

elevada. Os produtos da combustão se expandem através da turbina e são, em seguida, descarregados nas vizinhanças. Parte do trabalho produzido é usada para acionar o compressor, o restante fica disponível para gerar eletricidade, para impulsionar um veículo ou para outros propósitos.

No modo fechado, o fluido de trabalho recebe um aporte de energia por transferência de calor de uma fonte externa, como por exemplo, um reator nuclear resfriado a gás. O gás que deixa a turbina passa por um trocador de calor, onde é resfriado antes de entrar novamente no compressor.

Uma idealização frequentemente utilizada no estudo de instalações de potência com turbina a gás é a de uma análise de ar-padrão. Na análise de ar-padrão sempre são formuladas duas hipóteses:

- O fluido de trabalho é o ar, o qual se comporta como um gás ideal.
- O aumento de temperatura que resultaria da combustão é realizado através de uma transferência de calor de uma fonte externa.

Termodinamicamente, o ciclo ideal pelo qual passa o fluido de trabalho nesse circuito é o ciclo Brayton, formado por quatro processos internamente reversíveis:

- 1 – 2 Compressão isentrópica (em um compressor).
- 2 – 3 Fornecimento de calor a pressão constante.
- 3 – 4 Expansão isentrópica (em uma turbina).
- 4 – 1 Rejeição de calor a pressão constante.

O diagrama $T \times s$ (figura 2) mostra que todos os quatro processos do ciclo Brayton são executados em dispositivos com escoamento em regime permanente e, portanto, devem ser analisados desta mesma forma.

Figura 2 – Diagrama $T \times s$ do ciclo Brayton



Em geral, existir vários locais na fronteira através dos quais a massa entra ou sai. Isso pode ser levado em conta através do somatório, conforme a seguir:

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = \sum_e \dot{m}_e - \sum_s \dot{m}_s \quad (2)$$

A equação (2) é o balanço da taxa de massa em termos de taxa para volume de controle com várias entradas e saídas. Ela é a formulação do princípio de conservação de massa normalmente empregada em engenharia.

Para um volume de controle em regime permanente, a situação da massa em seu interior e em suas fronteiras não se altera com o tempo. As vazões mássicas e as taxas de transferência de energia por calor e trabalho também são constantes com o tempo, desse modo $dm_{vc}/dt = 0$ e o balanço da taxa de massa toma a seguinte forma:

$$\sum_e \dot{m}_e = \sum_s \dot{m}_s \quad (3)$$

Por meio de uma seleção apropriada da fronteira do volume de controle que envolve uma turbina a vapor ou a gás, a energia cinética líquida da matéria escoando através da fronteira é usualmente pequena para ser abandonada. A energia potencial líquida da matéria em escoamento normalmente é desprezível. Tão somente ficando os termos relacionados à potência, à entalpia e à transferência de calor:

$$0 = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \dot{m}(h_1 - h_2) \quad (4)$$

A única transferência de calor entre a turbina e a vizinhança seria a transferência de calor inevitável (ou perda), quantidade usualmente pequena quando comparada aos termos relacionados à potência e à entalpia, de modo que pode ser abandonada, obtendo-se simplesmente: (MORAN; SHAPIRO, 2013, p. 404).

$$\dot{W}_{vc} = \dot{m}(h_1 - h_2) \quad (5)$$

Considerando que a turbina opera adiabaticamente e com efeitos desprezíveis das energias cinética e potencial, o trabalho produzido por unidade de massa em escoamento e fazendo os devidos ajustes, temos:

$$\frac{\dot{W}_t}{\dot{m}} = h_3 - h_4 \quad (6)$$

Em que \dot{m} designa a vazão em massa. Com as mesmas hipóteses, o trabalho do compressor por unidade de massa em escoamento é:

$$\frac{\dot{W}_c}{\dot{m}} = h_2 - h_1 \quad (7)$$

O símbolo \dot{W}_c denota trabalho fornecido ao compressor e assume valor positivo. O calor adicionado ao ciclo por unidade de massa é:

$$\frac{\dot{Q}_{entra}}{\dot{m}} = h_3 - h_2 \quad (8)$$

O calor rejeitado por unidade de massa é:

$$\frac{\dot{Q}_{sai}}{\dot{m}} = h_4 - h_1 \quad (9)$$

Em que \dot{Q}_{sai} é um valor positivo. Então, a eficiência térmica do ciclo em função das entalpias é:

$$\eta = \frac{\dot{W}_t/\dot{m} - \dot{W}_c/\dot{m}}{\dot{Q}_{entra}/\dot{m}} = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{h_3 - h_2} \quad (10)$$

No entanto, ignorando as irreversibilidades associadas à circulação do ar pelos vários componentes do ciclo Brayton, não há perdas de carga por atrito e o ar escoar a pressão constante pelos trocadores de calor. Se perdas por transferência de calor para o ambiente também forem ignoradas, os processos através da turbina e do compressor são isentrópicos. O ciclo ideal mostrado no diagrama T x s, figura – 2 são coerente com estas idealizações.

Considerando as possibilidades, anteriormente citadas, para escoamentos internamente reversíveis ao longo de volumes de controle em regime permanente se pode conduzir uma análise que envolva o ciclo Brayton ideal, as seguintes relações, aplica-se aos processos isentrópicos 1-2 e 3-4. (MORAN; SHAPIRO, 2013, p. 405).

$$p_{r2} = p_{r1} \cdot \frac{p_2}{p_1} \quad (11)$$

$$p_{r4} = p_{r3} \cdot \frac{p_4}{p_3} = p_{r3} \cdot \frac{p_1}{p_2} \quad (12)$$

Em que p_2/p_1 é a relação de pressão do compressor. Já que o ar escoar pelos trocadores de calor do ciclo ideal a pressão constante segue-se que:

$$\frac{p_4}{p_3} = \frac{p_1}{p_2} \quad (12a)$$

Quando um ciclo Brayton ideal é analisado com base em ar-padrão frio, os calores específicos são considerados constantes. A equação (7a) é então substituída, respectivamente, pelas expressões:

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{(k-1)}{k}} \quad (13)$$

$$T_4 = T_3 \cdot \left(\frac{p_4}{p_3}\right)^{\frac{(k-1)}{k}} = T_3 \cdot \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{(k-1)}{k}} \quad (14)$$

Em que k é a razão entre os calores específicos, $k = c_p/c_v$.

2.3 RELAÇÃO DE PRESSÃO DO COMPRESSOR SOBRE O DESEMPENHO

Baseado em um estudo do ciclo Brayton ideal pode-se deduzir que a eficiência térmica aumenta com o aumento da relação de pressão no compressor. Esse aumento pode ser visto de maneira simples através do seguinte desenvolvimento, no qual o calor específico c_p , e a razão

entre os calores específicos k é considerado constante. Para c_p constante obter-se-á: (MORAN; SHAPIRO, 2013, p. 407).

$$\eta = \frac{c_p(T_3 - T_4) - c_p(T_2 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{(T_4 - T_1)}{(T_3 - T_2)}$$

$$\eta = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{T_2(T_3/T_2 - 1)} \quad (15)$$

Substituindo as equações 8 e 9, teremos:

$$\eta = 1 - \frac{1}{(p_2/p_1)^{(k-1)/k}} \quad (16)$$

Avaliando a equação 11, pode-se ver que a eficiência térmica, do ciclo de ar-padrão frio Brayton ideal aumenta com o aumento da relação de pressão com o compressor.

Como existe um limite imposto por considerações metalúrgicas com relação a temperatura máxima permissível na entrada da turbina, é instrutivo considerar o efeito do aumento da relação de pressão do compressor sobre a eficiência térmica quando a temperatura na entrada da turbina estiver restrita à temperatura máxima permitida.

Naijjar e Abubaker (2015) modelaram ciclo a gás com resfriamento na entrada através de sistemas de refrigeração por compressão e absorção combinado com resfriamento evaporativo. Esses autores observaram que a menor temperatura do ar implicou em uma maior vazão de combustível e, conseqüentemente, uma maior troca de calor na câmara de combustão. Porém, notou-se que os valores de potência líquida do ciclo aumentaram, em valores percentuais, de modo que a eficiência térmica também aumentou.

2.4 TURBINA A GÁS

Moran et al. (2011) define uma turbina como um dispositivo no qual potência é desenvolvida como resultado de um gás ou líquido passando através de um conjunto de lâminas ligadas a um eixo livre para rodar. Segundo BOYCE (2002), a turbina a gás é uma usina de potência que produz enorme quantidade de energia para o seu tamanho e peso. Compacidade, baixo peso e múltiplas aplicações de combustível fazem dessas turbinas uma usina natural para as plataformas offshore. Essas turbinas utilizam o ar como fluido motriz para a produção de energia. Quanto aos combustíveis utilizados, atualmente existem turbinas a gás que operam com gás natural, diesel, nafta, metano, petróleo, óleos combustíveis vaporizados, gases de biomassa, entre outros.

As turbinas a gás apresentaram um enorme crescimento nos últimos 30 anos. Esse crescimento se deve ao desenvolvimento na tecnologia dos materiais, novos revestimentos e também novos processos de resfriamento. Isso combinado ao aumento nas relações de pressões

dos compressores, aumentou a eficiência térmica dessas turbinas de 15% para em torno de 45% (BOYCE, 2002).

As turbinas a gás industriais são divididas em grupos principais, dos quais destacamos:

- Turbinas a gás aeroderivativas: são unidades de geração de potência que tiveram origem na indústria aeroespacial como motor principal de aeronaves. Esses equipamentos são adaptados para a geração de energia elétrica e operam em uma faixa de 2,5 MW a 50 MW, atingindo eficiências de 35-45%.
- Turbinas a gás originalmente industriais: operam em uma faixa de 2,5 MW a 15 MW e são muito utilizadas em plataformas petroquímicas. Apresentam eficiências na casa dos 30%.

2.4.1 Turbina a gás industrial

As turbinas a gás industriais são equipamentos de capacidade média, atingindo de 5 a 50 MW. Sua eficiência é alcançada deixando com que a seção responsável por produzir os gases quentes opere à sua máxima eficiência, enquanto a turbina de potência opera em uma grande variedade de velocidades. Geralmente emprega um compressor axial de 10 a 16 estágios, resultando em uma razão de pressões de 5 a 15. Os combustores utilizados variam entre tubo-anular e anular. Esse tipo de turbinas a gás é usado nas plataformas offshore e também tem encontrado uso crescente nas indústrias petroquímicas. Apresentam baixa eficiência operando em ciclo simples, mas essa eficiência pode ser ampliada pela utilização de regeneradores, trocadores de calor empregados para preaquecer o ar que deixa o compressor antes que esse entre no combustor, diminuindo a quantidade de combustível que deve ser queimada (MORAN et al., 2011).

2.5 ENGINEERING EQUATION SOLVER (EES)

O EES foi desenvolvido por Sanford Klein e Beckman Willian, da universidade de Winsconsin, esse programa combina a capacidade de resolver equações com dados de propriedades de engenharia. Pode fazer otimização, análise parametrização, além de gráficos com qualidade. Propriedades termodinâmicas e de transporte do ar, da água e de muitos outros fluidos estão incluídos no EES e é permitido aos usuários inserir dados de propriedades ou de relações funcionais (CENGEL, 2013; BOLES, 2013).

É um programa que resolve numericamente sistemas lineares ou não lineares de equações diferenciais e algébricas. Ele tem uma ampla biblioteca de funções de propriedades termodinâmica incorporadas, bem como de funções matemáticas, e permite que o usuário

forneça dados de propriedades adicionais. Ao contrário de alguns pacotes computacionais, ele não soluciona os problemas de engenharia; apenas resolve as equações fornecidas pelo usuário. O usuário deve entender o problema e formulá-lo pelas aplicações das leis físicas e relações matemáticas relevantes. O EES economiza tempo e esforços consideráveis para o usuário, simplesmente resolvendo as equações matemáticas resultantes da problemática em questão. Isso possibilita a tentativa de resolver problemas significativos de engenharia não adequados aos cálculos à mão, e a realização de estudos paramétricos de forma rápida e conveniente. O EES é um programa muito poderoso, intuitivo e fácil de usar (CENGEL, 2013; BOLES, 2013).

3 METODOLOGIA

Este capítulo aborda a metodologia usada para descrever a influência da temperatura do ar de entrada no compressor da turbina no desempenho desta, como por exemplo, a melhora no rendimento, cerne de estudo deste capítulo.

A finalidade baseia-se em constatar e descrever o conhecimento científico teórico identificado *in loco*, ou seja, no mundo real que a teoria se corrobora na prática. Estudos relatam que turbinas a gás geralmente sofrem com queda acentuada na potência e aumento excessivo no consumo de combustível (NAJJAR, 2017; ABUBAKER, 2017). Porquanto esta referida pesquisa analisará o funcionamento de uma turbina e mostrará os efeitos do ar de entrada na queda de rendimento da máquina.

O procedimento descritivo constitui uma sequência de atividades que inclui pesquisas bibliográficas, dados coletados em campo e o tratamento dos dados para que seja feita a simulação, usando o programa EES, logo em seguida os dados produzidos no EES inseridos em uma planilha excel, para analisar a influência da temperatura no rendimento da turbina.

3.1 TURBINA GE LM 6000 PC

A máquina objeto deste trabalho é a turbina a gás LM 6000 PC, instalada no parque gerador elétrico na cidade de Manaus. O parque gerador possui dois motores geradores LM 6000 PC, em ciclo simples, que consomem combustível gás natural, tendo sua capacidade de geração de 86 Megawatts sendo 43 Megawatts por unidade. Essas turbinas são do tipo aeroderivativas e usam componentes mais leves e mais compactos, por conseguinte tem custos mais elevados.

Figura 4 – GE LM 6000 PC



Fonte: Manual General Electric-GE, (2008)

A tabela 1, mostra algumas especificações, da LM 6000PC, retiradas das pesquisas feita em campo na UTE-Aparecida.

Tabela1 – Dados fornecidos pela UTE-Aparecida operando em ciclo simples

Saída líquida (MW)	41,33
Taxa de calor líquida (Btu/kWh, LHV)	8,651
Eficiência líquida (% , LHV)	39,4
Pressão de entrada (atm)	0,92847
Pressão de entrada na Câmara de combustão	26,210
Razão de pressão LPC	2,3218
Razão de pressão HPC	12,9002
Fluxo de combustível (kg/s)	2,41
Temperatura de entrada LPC (K)	290,3
Temperatura de saída do HPC (K)	815,7
Temperatura de entrada da LPT (K)	1139,8
Temperatura de saída da Turbina (K)	864,23
Trabalho do Compressor (MW)	10,87
Trabalho da Turbina (MW)	53,60
Potência líquida Turbina (MW)	41,32
Emissão de NOx (ppm) (@ 15% O2)	25
CO (ppm) (@ 15% O2)	89
Temperatura de saída (°C)	540
Fluxo de massa (Kg/s)	129

Fonte: UTE Aparecida-AM (2019)

Em observância aos dados da tabela 1, ressalta-se a temperatura de saída da turbina (chaminé) 864,23 K, que representa um grande potencial energético a ser reaproveitado, o que não é o caso da referida usina em questão, se houvesse uma caldeira de reaproveitamento de calor. Outro dado interessante é que a potência líquida da turbina de, aproximadamente, 41,32 MW se aproxima da potência nominal de 43,882 MW descrita no manual técnico fornecido pela *General Eletric* (2008). Um outro fator de destaque é a grande potência utilizada para movimentar o compressor, o que impacta na potência líquida gerada pela turbina.

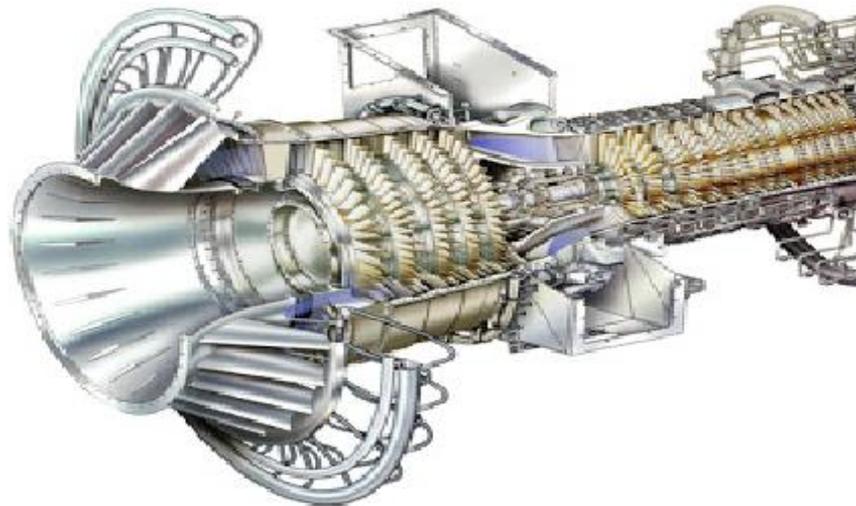
3.2 COMPRESSOR AXIAL

A turbina LM 6000PC é dividida em três partes; compressor, câmara de combustão e turbina. Iremos nos manter no compressor que é parte essencial da pesquisa.

O objetivo do compressor é fornecer o máximo de fluxo de ar, com a maior pressão possível, que será aquecido no volume limitado da câmara de combustão e logo após expandido na turbina. O compressor é um dos componentes mais importantes da turbina a gás, uma vez que sua operação eficiente e estável é o ponto chave para o alto desempenho do motor. Todavia a energia absorvida pelo compressor se aproxima do dobro da energia útil do motor gerador. Durante pesquisas bibliográficas em campo do parque gerador foram observados que as razões de pressão do compressor podem chegar a 25;1, fluxo de vazão de ar de 450 kg/s e eficiência de 90% (LORA, 2004; NASCIMENTO, 2004).

O compressor axial consiste de uma série de estágios, cada estágio de compressão é constituído de um estator e um rotor. O fluido de trabalho (ar) é inicialmente acelerado pelas pás do rotor e em seguida desacelerada no estator, onde a energia cinética do escoamento é convertida em pressão estática. Este processo é repetido em vários estágios até se atingir a razão de pressão desejada. Durante a operação do rotor acionado pelo eixo da turbina o ar é acelerado pela rotação das pás e induzido a passar pelo estator. Os estatores também tem a função de defletir o escoamento na direção correta para entrar no próximo estágio. A última grade de pás do compressor normalmente tem a função de alinhar o escoamento, removendo o movimento circular para entrar na câmara de combustão com perfil de velocidade axial aproximadamente uniforme. As mudanças no aumento da pressão são acompanhadas do aumento da temperatura (LORA, 2004; NASCIMENTO; 2004).

Figura 5 – Compressor Axial LM 6000PC

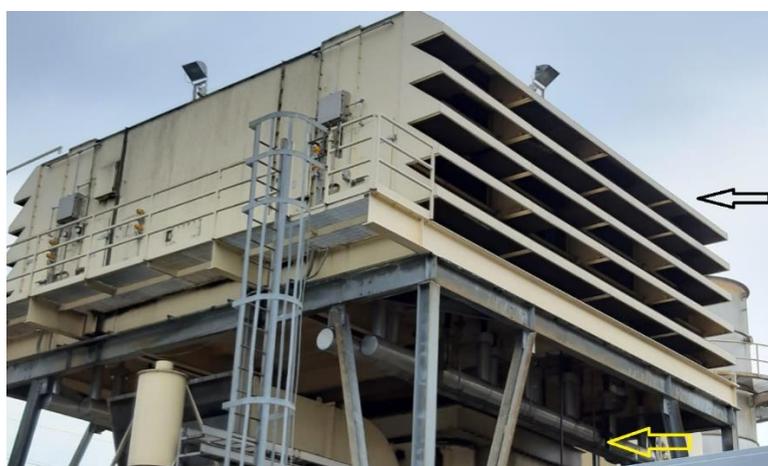


Fonte: Manual General Electric-GE, (2008)

3.2.1 Método de resfriamento do ar de entrada no compressor

Na referida usina é usado sistema de resfriamento mecânico (Chiller), que se baseia em utilizar o resfriamento do ar por meio de tubos, trocadores de calor, no filtro de entrada do ar – a visualização pode ser observada pela seta amarela na figura 5. Estes filtros ficam instalados dentro de um compartimento em que é chamado de casa de filtros da unidade geradora a gás. A seta preta na figura 5 indica a entrada do ar ambiente na casa de filtros.

Figura 6 – Casa de Filtros



Fonte: UTE Aparecida-AM, (2019)

A desvantagem do sistema de refrigeração mecânica é que ele possui um alto custo operacional devido a equipamentos de alto consumo de energia tais como; compressor de refrigeração, condensador, bombas de circulação e torres de resfriamento. Todavia o sistema é

imprescindível para o funcionamento da usina na medida que fornece água gelada para resfriamento do ar de entrada, para o pacote onde encontra-se a turbina e o gerador síncrono (SARAVANAMUTTOO, 1996)

Figura 7 – Condensador e Evaporadora do sistema de refrigeração da usina



Fonte: UTE Aparecida-AM, (2019)

Figura 8 – Bombas de circulação do sistema de refrigeração da usina



Fonte: UTE Aparecida-AM, (2019)

3.2.2 Tecnologia *sprint* LM 6000 PC pulverização *intercooling*

A tecnologia *Spray Intercooling (SPRINT)* é um sistema auxiliar do motor gerador que serve para aumentar a saída de energia da turbina a gás resfriando o fluido de trabalho, ar, resultando em um fluxo de massa maior através do compressor de baixa pressão (LPC) e do compressor de alta pressão (HPC). O funcionamento consiste em água desmineralizada atomizada com ar comprimido de alta de pressão na porta de sangria do 8º estágio e pulverizada

na entrada do LPC e do HPC. O resfriamento do fluxo de ar aumenta a massa de fluxo de ar, o que resulta em maior saída de energia (GE ENERGY, 2008).

3.3 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

Para simular os fenômenos termodinâmicos que ocorrem na turbina usaremos o programa EES. Entretanto o estudo ficará restrito ao impacto da temperatura no rendimento da turbina, ou seja, foram coletados dados em dias específicos em que houve variações da temperatura do ar de entrada da turbina, como informa a tabela 2.

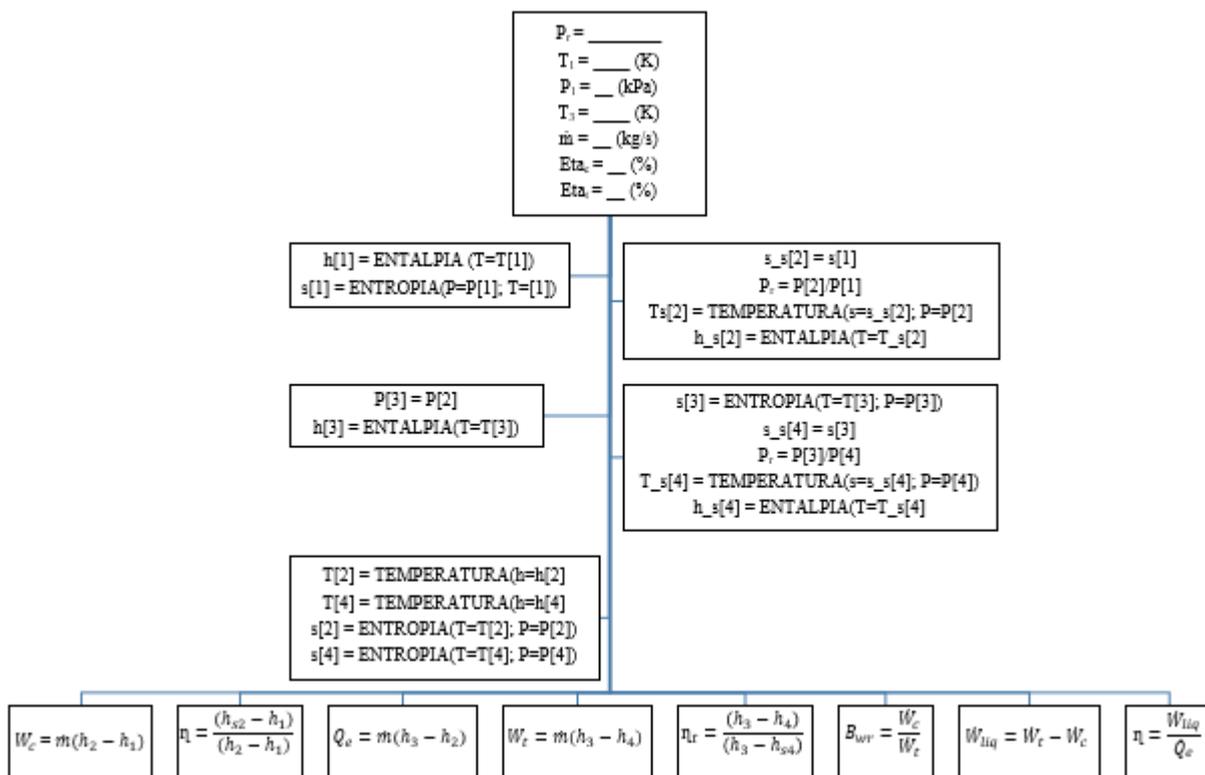
Tabela 2 – Dados coletados na sala de controle UTE Aparecida

Dados Turbina LM 6000 PC UTE Aparecida Eletrobrás				
Entrada (°C) LPC	Saída (°C) HPT	Pressão (Psig)	Chaminé (°C)	Potência (MW)
17,32	866,76	379,32	581,23	41,32
15,04	883,92	378,83	587,65	35,39
12,07	894,84	346,52	590,88	40,54
9,35	901,87	337,48	591,12	41,17
7,14	906,25	342,20	591,39	40,48
27,5	851,27	381,96	589,44	42,01
Vazão de ar (kg/s)	P_{ratio}	PCI (MJ/Kg)	P_{entrada} (kPa)	
129	26,21	47,629	94,07	

Fonte: UTE Aparecida-AM, (2019)

Para simulação no EES foram usados os dados de temperatura de entrada no compressor de baixa pressão (LPC), temperatura de saída da turbina de alta pressão (HPT), vazão de ar, pressão de entrada e a relação de pressão do compressor (P_{ratio}). Devido ao EES ter origem norte americana as unidades de grandeza da LPC e da HPT foram convertidas para o Sistema Internacional (SI). Um programa, foi usado para calcular e gerar dados que serão apresentados posteriormente em uma planilha do programa Excel. O fluxograma da figura 9 descreve a estrutura básica do programa mostrando o escopo de entrada e saída de dados.

Figura 9 – Fluxograma estrutural do programa EES



Fonte: O próprio autor, (2020)

Analisando a estrutura do programa percebe-se que ele é formado pelas equações termodinâmicas, nas quais fizemos referências no capítulo anterior. No programa foram inseridos os dados de temperatura e pressão de cada ponto separadamente em que foram calculados e gerados, por meio das equações, os dados e logo em seguida inseridos em uma planilha do MS-Excel e dispostos na tabela 3.

Tabela 3 – Dados gerados pelo programa EES

T1(C)	Bwr	η	h1 (kJ/kg)	h2 (kJ/kg)	h3 (kJ/kg)	h4 (kJ/kg)	hs2 (kJ/kg)	hs4 (kJ/kg)	P1 (kPa)	P2 (kPa)	P3 (kPa)	P4 (kPa)	Qin (kW)	ṁ (kg/s)	Pratio
17,32	0,764	0,3938	290,7	804,6	1208	535	737,8	484,4	94,07	2466	2466	94,07	51983	129	26,21
15,04	0,7463	0,4039	288,4	798,4	1228	544,2	732,1	492,8	94,07	2466	2466	94,07	55360	129	26,21
12,07	0,7315	0,4117	285,4	790,3	1240	550,2	724,7	498,2	94,07	2466	2466	94,07	58049	129	26,21
9,35	0,7202	0,4174	282,7	782,9	1249	554	717,9	501,7	94,07	2466	2466	94,07	60067	129	26,21
7,14	0,7119	0,4214	280,5	776,8	1254	556,4	702,3	503,9	94,07	2466	2466	94,07	61506	129	26,21
27,50	0,8016	0,3682	300,9	832,3	1189	526,6	763,2	476,7	94,07	2466	2466	94,07	46081	129	26,21
T1 (°C)	T1 (K)	T2 (K)	T3 (K)	T4 (K)	Ts2 (K)	Ts4 (K)	s1 (kJ/kg*K)	s2 (kJ/kg*K)	s3 (kJ/kg*K)	s4 (kJ/kg*K)	s_s2 (kJ/kg*K)	s_s4 (kJ/kg*K)	Wc	Wnet	Wt
17,32	290,32	783,9	1140	530,6	698,8	481,5	5,69	5,779	6,202	6,302	5,69	6,202	66290	20472	86762
15,04	288,04	778,2	1157	539,6	717,2	489,8	5,682	5,771	6,219	6,319	5,682	6,219	65784	22359	88144
12,07	285,07	770,8	1168	545,3	710,3	495	5,672	5,76	6,23	6,33	5,672	6,23	65126	23900	89026
9,35	282,35	764	1175	549	704	498,4	5,662	5,751	6,237	6,337	5,662	6,237	64522	25072	89594
7,14	280,14	758,5	1179	551,3	698,8	500,5	5,654	5,743	6,241	6,354	5,654	6,241	64031	25917	89948
27,50	300,50	809,1	1124	522,6	745,9	474,1	5,725	5,814	6,186	6,286	5,725	6,186	68,541	16968	85509

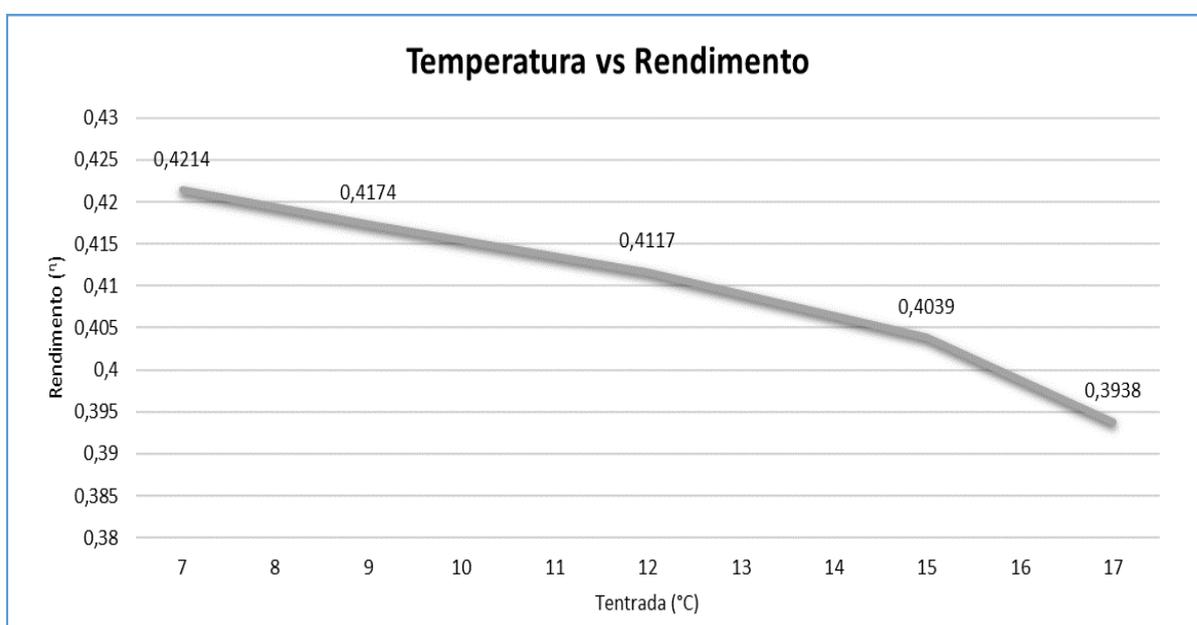
Fonte: Programa EES versão estudante (2009)

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Para uma melhor compreensão e com o objetivo de descrever a influência da temperatura de entrada da turbina sobre o rendimento foram usadas temperaturas de 27,50°C (ambiente) e a faixa de 7,14°C até 17,32°C - uma amplitude de temperatura de 10,18°C – essa faixa foi usada porque são os limites inferior e superior de trabalho na usina, e devido ao sistema de resfriamento a turbina não opera em temperatura ambiente. Porquanto verificar como esse arrefecimento influencia, de acordo com os parâmetros da tabela 3, na turbina a gás. Tampouco utilizamos os conceitos termodinâmicos relacionados ao ciclo Brayton, manual do fabricante, estudos realizados anteriormente sobre o assunto, dados coletados em campo, programa MS-Excel e a utilização do programa EES para obtenção das soluções numéricas apresentadas.

Após os dados gerados pelo EES terem sido inseridos em uma planilha do Excel gerou-se um gráfico da temperatura pelo rendimento, disposto na figura 10.

Figura 10 – Temperatura vs Rendimento

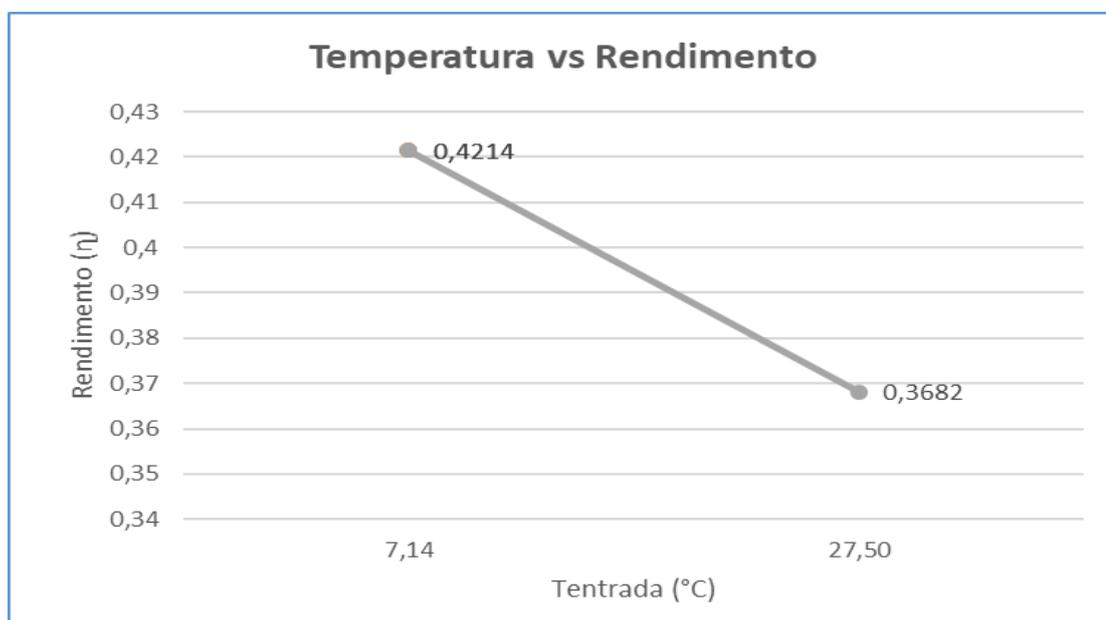


Fonte: O próprio autor, (2020)

De acordo com a figura 10, ao verificar o decremento da temperatura em 10°C houve um aumento no rendimento de 0,0276, que em valores percentuais significa 7,00%. EL HADIK (1990) apresentou um estudo teórico da influência das condições climáticas no funcionamento de turbina a gás, ele observou que o parâmetro que mais influencia no desempenho é a temperatura.

Outro objetivo a ser atingido, ao simular e fazer um comparativo entre a entrada de ar em temperatura média ambiente ($27,5^{\circ}\text{C}$) e a turbina operando com o sistema de resfriamento em sua menor temperatura ($7,14^{\circ}\text{C}$) temos, respectivamente, um rendimento de $\eta = 0,3682$ e $\eta = 0,4214$, por conseguinte um aumento de 14,45%. A figura 13 nos mostra a curva comparativa entre os dois pontos citados e seus respectivos rendimentos.

Figura 11 – Comparativo entre temperatura mínima e temperatura ambiente



Fonte: O próprio autor, (2020)

Ressalta-se que a descrição do trabalho se restringiu somente em uma parte do sistema de funcionamento da turbina a gás que foi a temperatura de entrada do ar no compressor da turbina. Diante disso nota-se que o resfriamento de ar na entrada do ciclo a gás se mostrou termodinamicamente válido com os parâmetros analisados sendo coerentes com o esperado. Com esse tipo de sistema auxiliar, em se tratando de uma usina que trabalha com ciclo simples, mais energia pode ser gerada com um consumo menor de combustível, as manutenções se tornam mais estáveis e a vida útil dos materiais da turbina cumprem o prazo estabelecido pelo fabricante. Sendo assim, uma viabilidade alternativa para alta demanda energética amazonense.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao descrever o sistema de resfriamento do ar de entrada em turbinas a gás pode-se inferir o quanto é impactante a sua atuação nesse processo, pois por meio deste tem-se um valor de temperatura viável na operação da turbina mesmo que haja um gasto significativo de energia para colocar em funcionamento os sistemas auxiliares – bombas de circulação, condensador, evaporadora e torres de resfriamento.

Estudar o resfriamento do ar de entrada em turbinas a gás instaladas em parques de geração de energia no Brasil, onde, por exemplo, a temperatura média é em torno de 27°C é de grande valia haja vista que quanto maior a temperatura menor é o rendimento. E ao simular um sistema com resfriamento e outro sem e os comparando, observamos que ao diminuirmos a temperatura de entrada tem-se como resultado um aumento no rendimento.

Este trabalho deixou mais evidente que estudos realizados em usinas termelétricas devem ser rotineiros para que ocorra modificações de forma que seu funcionamento seja sempre economicamente viável.

Não obstante sugere-se para pesquisas futuras relacionadas a:

- A temperatura ideal de entrada de ar na turbina comparando o custo benefício de funcionamento de um sistema de água gelada ao baixar a temperatura do ar;
- Que tipo de sistema auxiliar poderia ser instalado para reaproveitar o tanto de energia, em torno de 550°C, que é expelida para o ambiente na chaminé da turbina.
- O sistema Sprint, que é uma tecnologia de atomização de água desmineralizada antes da câmara de combustão e tem como função o aumento da massa de ar, o controle de temperatura da queima no momento da combustão e o aumento da vida útil do material que é feita a turbina. E como esse sistema tem grande influência na potência e no rendimento da turbina.

REFERÊNCIAS

BOYCE, M. P. **Gas Turbine Engineering Handbook**. - 2. ed. – Houston, Texas: Gulf Professional Publishing, 2002.

CENGEL, Y.A.; BOLES, M.A. **Termodinâmica**. - 7ed. - Porto Alegre: McGraw-Hill Interamericana.

EL-HADIK, A. A. 1990. O impacto das condições atmosféricas sobre o desempenho da turbina a gás. **Revista de Engenharia de Turbinas a Gás e Energia**.

Disponível em: [Analysis of Gas Turbine Performance with Inlet Air Cooling Techniques Applied to Brazilian Sites \(scielo.br\)](#) Acesso em 11/3/2020.

LORA, E.E.S; NASCIMENTO, M.A.R. **Geração Termelétrica**. Rio de Janeiro: Interciência, 2004. v. 1 e 2.

MANUAL LM6000 – 50/60 Hz. **Gerador de Turbina a gás, Conjunto e Especificações GE Energy**, 2008.

Disponível em: [LM6000 Aeroderivative Gas Turbine | GE Power](#) Acesso em : 15/3/2020

MORAN, MICHAEL J.; SHAPIRO, HOWARD N.; **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. - 7ª ed – Rio de Janeiro: LTC, 2013.

NAJJAR, Y.S.H.; ABUBAKER, A.M. **Resfriamento indireto de ar de entrada combinada com turbinas a gás para tecnologia de energia verde**. Revista Internacional de Refrigeração. v. 59, 2015.

Disponível em: [Indirect evaporative combined inlet air cooling with gas turbines for green power technology - ScienceDirect](#) Acesso em: 02/3/2020.

NAJJAR, Y.S.H.; ALHAZMY, M. **Aumento do desempenho da turbina a gás usando refrigeradores de ar**. Engenharia Térmica Aplicada. v. 24, 2016.

Disponível em: [Gas turbine performance enhancement via utilizing different integrated turbine inlet cooling techniques - ScienceDirect](#) Acesso em: 02/3/2020.

SARAVANAMUTTOO, H.; ROGERS, G.; COHEN, H. **Gas Turbine Theory**. - 5. ed. – Nova Delhi, Índia: Pearson, 2001.

UTE APARECIDA – USINA TERMELÉTRICA DE APARECIDA. **Dados de operação da turbina a gás GE LM 6000 PC. AAUGG-10**. Manaus, 2019.

ANEXO



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO AMAZONAS
PRÓ-REITORIA DE ENSINO
Campus Manaus Centro



**TERMO DE COMPROMISSO DO ORIENTANDO SOBRE AS
NORMAS/REGULAMENTOS DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

Eu, Newton de Leiros Garcia Junior, estudante regularmente matriculado no curso Superior de Graduação em Engenharia Mecânica, do Instituto Federal do Amazonas, *Campus Manaus-Centro*, estou ciente e concordo com as normas/regulamentos instituídos para o desenvolvimento do meu Trabalho de Conclusão de Curso. Outrossim, declaro seguir tal regimento. Por estar plenamente de acordo firmo o presente.

Manaus, AM. 30 de março de 2021.

Newton de Leiros Garcia Junior

Assinatura do estudante