



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
CAMPUS TERESINA CENTRAL
DEPARTAMENTO DE INDÚSTRIA, SEGURANÇA E PRODUÇÃO CULTURAL
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

EDILSON MARINHO DA SILVA JUNIOR

**SOFTWARE DIDÁTICO PARA SIMULAÇÃO TERMODINÂMICA DE CICLO
DE POTÊNCIA A GÁS**

Teresina

Junho de 2021

EDILSON MARINHO DA SILVA JUNIOR

SOFTWARE DIDÁTICO PARA SIMULAÇÃO TERMODINÂMICA DE CICLO DE
POTÊNCIA A GÁS

Trabalho de Conclusão de Curso (monografia)
apresentado como exigência parcial para obtenção
do diploma do Curso de Engenharia Mecânica do
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
do Piauí. Campus Teresina-Central.

Orientador: Prof. Msc. Eng. Anderson Fortes
Chaves Fortes

Co-orientador: Prof. Dr. Efrain Pantaleon
Matamoros

Teresina

Junho de 2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Silva Júnior, Edilson Marinho da
S586s Software didático para simulação termodinâmica de ciclo de potência a gás
/ Edilson Marinho da Silva Júnior. - 2021.
68 f.: il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica)
- Instituto Federal do Piauí, Campus Teresina Central, 2021.

Orientador : Prof. Me. Anderson Felipe Chaves Fortes.

Coorientador : Prof. Dr. Efrain Pantaleon Matamoros.

1. Ciclo de potência a gás. 2. Software. 3. Simulação computacional.
I. Título.

CDD - 620

Elaborado por Sindya Santos Melo CRB 3/1085

EDILSON MARINHO DA SILVA JUNIOR

SOFTWARE DIDÁTICO PARA SIMULAÇÃO TERMODINÂMICA DE CICLO DE
POTÊNCIA A GÁS

Trabalho de Conclusão de Curso (monografia)
apresentado como exigência parcial para obtenção do
diploma do Curso de Engenharia Mecânica do Instituto
Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí.
Campus Teresina-Central.

Aprovada em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Msc. Anderson Felipe Chaves Fortes (Orientador)
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Eng. Francisco José Patricio Franco
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Msc. Eng. Edivaldo Feitosa Pereira
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

*Dedicado a minha mãe Maria Ubetânia Marinho da
Silva e minha mulher Larissa Campos Marinho.*

AGRADECIMENTOS

Os meus maiores agradecimentos para meu divino mestre Jesus e meu Mestre dos Mestres José Gabriel da Costa.

Meus agradecimentos para minha mãe Maria Ubetânia Marinho da Silva, minha mulher Larissa Campos Marinho, meu pai Edilson Marinho da Silva e meu irmão Matheus Felipe Marinho da Silva.

Meus agradecimentos aos meus irmãos de vida, Prof. Dr. Efrain Pantaleon Matamoros e família, Prof. Moises Pinto e família, Prof. Felipe Zumba e família, Prof. Msc. Rodolfo Albuquerque e família, Prof Dr. Ricardo Cesar e família, Prof. Msc. Otacílio e família, Prof. Msc. Ricardo e família.

Meus agradecimentos a todos os meus professores da UFRN e IFPI, representado pelos Prof. Msc. Anderson Fortes (IFPI) e Prof. Dr. João Telésforo (UFRN).

Meus agradecimentos a toda a minha família, representadas pelas minhas tias Prof. Msc. Ivana Lúcia e Suzana Mathias.

Meus agradecimentos a família da minha mulher que também é minha família, representado pelo meu sogro Francisco Pinheiro.

Meus agradecimentos a todos da União do Vegetal representados pelo grande amigo Eng. Raimisson Monteiro.

Meus agradecimentos aos meus amigos do trabalho, representados pelos Prof. Msc. Franciscleo Castro e Prof. Msc. Igor Carvalho.

Meus agradecimentos a todos os brasileiros.

*“O homem só faz o que pode, só dá o
que tem e só mostra o que é”*
Mestre José Grabiél da Costa

RESUMO

Com o surgimento do termo Indústria 4.0 na última década na Alemanha e a crescente demanda mundial no desenvolvimento em ações que visem estratégias nas áreas de ciências, tecnologia e inovação capazes de agregar melhores tecnologias de forma a garantir maior confiabilidade nas tomadas de decisões através da velocidade em análise de processos por meio de plataformas ciberfísicas de simulação real assistida, na área de energias, surge uma ascendente necessidade de desenvolvimentos de plataformas digitais capazes de simular plantas energéticas. Com isso, o presente trabalho consiste em fundir ferramentas da metodologia ativa com os conceitos da indústria 4.0 no estudo da energia, por meio da elaboração de um software de simulação didática dos ciclos de potência a gás Brayton, de modo a determinar os principais dados termodinâmicos e exergéticos dos ciclos e dos dispositivos que os compõem e contribuir no estudo e desenvolvimento de projetos termodinâmicos em termelétricas a gás natural. Serão realizadas análises energética e exergética para os diferentes tipos de ciclos tanto no software quanto a partir da análise comparativa com software comercial. Para avaliação dos processos foram consideradas algumas hipóteses, tais como: processos em regime permanente, sistema estacionário e processos adiabáticos em compressores e turbinas. Espera-se, através das análises dos resultados dos dados termodinâmicos extraídos do software, a possibilidade de simular ciclos de potência a gás Brayton com dados de precisão superior a 85% de confiabilidade e desenvolver um software para simulação didática.

Palavras-Chave: ciclo de potência a gás. Software. Simulação computacional

ABSTRACT

With the emergence of the term Industry 4.0 in the last decade in Germany and the growing worldwide demand for the development of science, technology and innovation strategies that can bring together better technologies to ensure greater decision-making reliability through speed. In process analysis through assisted real simulation cyberphysical platforms, in the area of energies, there is an increasing need for digital platform developments capable of simulating energy plants. Thus, the present work consists of merging active methodology tools with industry 4.0 concepts in the study of energy, through the elaboration of a didactic simulation software of Brayton gas power cycles, in order to determine the main thermodynamic data and exergetics of the cycles and the devices that compose them and contribute to the study and development of thermodynamic projects in natural gas thermoelectric plants. energy analysis will be performed and Exergy for different types of cycles in both the software and from the comparative analysis with commercial software. To evaluate the processes, some hypotheses were considered, such as: steady state processes, stationary system and adiabatic processes in compressors and turbines. Through the analysis of the results of the thermodynamic data extracted from the software, it is expected to simulate Brayton gas power cycles with data accuracy greater than 85% reliability and to develop a software for didactic simulation.

Keywords: gas power cycle. Software Computational simulation

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. TERMELÉTRICA A GÁS NATURAL DE CICLO ABERTO.	27
FIGURA 2. TERMELÉTRICA A GÁS NATURAL DE CICLO COMBINADO.....	28
FIGURA 3. COMPONENTES DE UMA TURBINA A GÁS	29
FIGURA 4. O CICLO BRAYTON. DIAGRAMAS P-V E T-S	32
FIGURA 5. (A) TURBINA A GÁS DE CICLO ABERTO (B) TURBINA A GÁS DE CICLO FECHADO	33
FIGURA 6. CICLO BRAYTON COM REGENERAÇÃO	36
FIGURA 7. CICLO BRAYTON COM RESFRIAMENTO INTERMEDIÁRIO, REAQUECIMENTO E REGENERAÇÃO.	38
FIGURA 8. SOFTWARE DE SIMULAÇÃO DO CICLO BRAYTON SIMPLES.	42
FIGURA 9. ABA DE ANÁLISE ENERGÉTICA.	43
FIGURA 10. ABA DE ANÁLISE EXERGÉTICA.	44
FIGURA 11. SOFTWARE DE SIMULAÇÃO DO CICLO BRAYTON COM REGENERAÇÃO.	45
FIGURA 12. ABA DE ANÁLISE ENERGÉTICA.	46
FIGURA 13. ABA DE ANÁLISE EXERGÉTICA.	47
FIGURA 14. SOFTWARE DE SIMULAÇÃO DO CICLO BRAYTON COM REGENERAÇÃO.	48
FIGURA 15. ABA DE DADOS DE TEMPERATURA E PRESSÃO.....	50
FIGURA 16. ABA DE ANÁLISE ENERGÉTICA.	50

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. USINAS TERMELÉTRICAS A GÁS NATURAL EM OPERAÇÃO	25
TABELA 2. DADOS DE ENTRADA DO SOFTWARE CICLO BRAYTON SIMPLES	52
TABELA 3 DADOS DE RESULTADOS COMPARATIVOS DO CICLO BRAYTON SIMPLES.....	53
TABELA 4 DADOS DE ENTRADA DO SOFTWARE CICLO BRAYTON COM REGENERAÇÃO	54
TABELA 5 DADOS DE RESULTADOS COMPARATIVOS DO CICLO BRAYTON COM REGENERAÇÃO	55
TABELA 6 DADOS DE ENTRADA DO SOFTWARE CICLO BRAYTON COM RESFRIAMENTO INTERMEDIÁRIO, REGENERAÇÃO E REAQUECIMENTO	56
TABELA 7 DADOS DE RESULTADOS COMPARATIVOS DO CICLO BRAYTON CICLO BRAYTON COM RESFRIAMENTO INTERMEDIÁRIO, REGENERAÇÃO E REAQUECIMENTO	57

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 MATRIZ DE ENERGIA ELÉTRICA BRASILEIRA	21
QUADRO 2. EMPREENDIMENTOS EM OPERAÇÃO.....	23
QUADRO 3. EMPREENDIMENTOS EM CONSTRUÇÃO	24
QUADRO 4. EMPREENDIMENTOS COM CONSTRUÇÃO NÃO INICIADA	24

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS	17
OBJETIVO GERAL:.....	17
OBJETIVOS ESPECÍFICOS:.....	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1. Metodologias ativas na industria 4.0	18
2.2. Cenário da matriz energética do Brasil	21
2.2.1. Matriz de energia elétrica.....	21
2.2.2. Capacidade de geração	23
2.2.3. Geração termelétrica a gás natural	24
2.3. Tecnologia das usinas termelétricas a gás natural.....	26
2.4. Ciclo de potência a gás.....	30
2.4.1. Ciclo brayton simples	32
2.4.2. Ciclo de ar-padrão Brayton com regeneração	36
2.4.3. Ciclo Brayton com resfriamento intermediário, reaquecimento e regeneração....	38
3. METODOLOGIA.....	41
3.1. Software do ciclo brayton simples.....	41
3.2. Software do ciclo brayton simples com regeneração	44
3.3. Software do ciclo brayton simples com resfriamento intermediário, regeneração e reaquecimento	47
4.0 RESULTADOS	52
4.1. Software do ciclo brayton simples.....	52
4.2. Software do ciclo brayton com regeneração	54
4.3. Software do ciclo brayton com resfriamento intermediário, regeneração e reaquecimento	56
5.0 CONCLUSÃO.....	59
REFERÊNCIAS.....	60

1. INTRODUÇÃO

A denominação indústria 4.0 foi criada e desenvolvida em 2011, na Alemanha, quando um conjunto de representantes da tríplice: governo, empresas e academia promoveram a ideia de uma abordagem que tinha como intuito aperfeiçoar a competitividade da indústria alemã. Nesse ensejo, o governo alemão anunciou que esse conceito faria parte da High-Tech Strategy 2020 for Germany, cuja finalidade seria levar a Alemanha à liderança na inovação tecnológica (KAGERMANN et al., 2013 apud MARINHO, 2018).

A indústria 4.0 trouxe ainda ao cenário mundial a necessidade de desenvolvimento de ações estratégicas nas áreas de ciências, tecnologia e inovação capazes de agregar melhores tecnologias de forma a garantir maior confiabilidade nas tomadas de decisões através da velocidade em análise de processos por meio de plataformas ciberfísicas de simulação real assistida, na área de energias.

Observou-se a necessidade de desenvolvimento de plataformas digitais capazes de simular plantas de polos industriais de geração de energia elétrica e atrelado a isso metodologias facilitadoras do processo ensino-aprendizagem nas áreas das engenharias de energia com foco no desenvolvimento de habilidades e aptidões em simulações de plantas industriais em espaços ciberfísicos, por meio de softwares educativos.

Um Software Educativo se configura como uma ferramenta de metodologias ativas cujo objetivo é servir como ferramenta de apoio ao ensino e aprendizagem promovendo o incentivo a aquisição do conhecimento pelos alunos. Um software educativo tem características particulares tais como: conteúdo didático, foco na aprendizagem do aluno e a assimilação do conteúdo. É um programa de computador desenvolvido para atender aos objetivos educacionais estabelecidos (PASQUALINI; PASCHOAL, 2013).

A metodologia ativa se utiliza da problematização como principal estratégia de ensino-aprendizagem, com o objetivo motivacional ao discente quando se depara com um problema, levando-o ao encontro com as informações e o desenvolvimento do conhecimento para solucionar os revezes e garantir o seu próprio desenvolvimento. Trata-se de uma metodologia libertadora direcionada para formação ativa, mostrando a necessidade de aprender a aprender. O ensino é centrado no estudante e a educação é problematizadora, fundamentada no diálogo entre o professor e o estudante,

valorizando os conhecimentos colhidos de experiências da vida profissional do docente (COVIZZI; LOPES DE ANDRADE, 2012).

A falta de formação específica docente no uso de ferramentas tecnológicas é um dos principais problemas existentes hoje na educação tanto para a geração de competências técnicas e pedagógicas, quanto para à inovação e motivação pessoal, principalmente com a aparição e disseminação dos conceitos e ferramentas da indústria 4.0 (PEREIRA et al., 2016).

Devido a necessidade de estratégias e ferramentas que cada vez mais inicie os discentes ao universo da indústria 4.0, a sinergia entre modelos de metodologias ativas englobando conceitos e ferramentas da indústria 4.0 nos cursos de engenharia mecânica vem sendo cada vez mais atrativas para a motivação e ao entendimento de conceitos e conteúdos complexos. Com isso, diversas ferramentas da metodologia ativa vem sendo usadas para esse fim, dentre elas temos as tecnologias educativas, voltadas, nesse objeto de estudo, aos estudos de simulações termodinâmicas em ciclos de potência a gás utilizados nas usinas termelétricas a gás natural.

As usinas termelétricas são definidas como unidades de geração de eletricidade através da utilização de máquinas térmicas para transformação da energia química do combustível em energia elétrica. Os combustíveis utilizados podem ser tanto combustíveis sólidos, como carvão mineral e biomassa, como combustíveis líquidos, diesel e óleo combustível, e combustíveis gasosos, como o gás liquefeito de petróleo – GLP e gás natural – GN.

As usinas termelétricas a gás utilizam sistemas de ciclo de potência a gás, que se qualificam como um ciclo bastante aplicado quando se deseja gerar energia elétrica por meio da energia térmica, nesse caso o gás natural, retirado de reservas de gás no solo. Podendo ser elemento principal da geração de energia elétrica ou componente de sistemas de cogeração e ciclos combinados, esses sistemas podem está dispostos em diversos arranjos, seja no ciclo de potência a gás simples, seja no ciclo de potência a gás com regeneração, no ciclo de potência a gás com regeneração, resfriamento intermediário e reaquecimento ou em sistemas de cogeração por ciclo combinado, o qual utiliza um ciclo de potência a gás, geralmente simples, com o aproveitamento dos gases de escape, da turbina a gás, para cogeração de energia por meio de uma caldeira de recuperação e turbina a vapor.

Dito isso, o presente trabalho consiste em fundir ferramentas da metodologia ativa com os conceitos da indústria 4.0 no estudo da energia, por meio da elaboração de um software de simulação didática dos ciclos de potência a gás Brayton, de modo a determinar os principais dados termodinâmicos e exergéticos dos ciclos e dos dispositivos que os compõem e contribuir no estudo e desenvolvimento de projetos termodinâmicos em termelétricas a gás natural.

OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS

OBJETIVO GERAL:

Elaboração de um software de simulação didática dos ciclos de potência a gás Brayton, de modo a determinar os principais dados termodinâmicos e exergéticos dos ciclos e dos dispositivos que os compõem.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Desenvolvimento de um software didático de simulação do ciclo Brayton simples;
- Elaboração de um software didático de simulação do ciclo Brayton simples com regeneração;
- Desenvolver um software didático de simulação do ciclo Brayton simples com resfriamento intermediário, regeneração e reaquecimento;
- Simular aspectos termodinâmicos e exergéticos dos ciclos de potência a gás;

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Metodologias ativas na indústria 4.0

Segundo Piaget (1982), o processo de aprendizagem existe quando a informação é processada pelos esquemas mentais e agregados a esses esquemas, decorrente da construção de estruturas de conhecimento que, à medida que vão sendo construídas, vão se alojando no cérebro.

Para Niemann e Brandoli (2012), o construtivismo condiciona que o aluno seja vetor ativo do próprio aprendizado, mediante a experimentação, a pesquisa em grupo, o estímulo a dúvida e o desenvolvimento do raciocínio. A partir de sua ação, o próprio aluno vai estabelecendo as propriedades dos objetos e construindo as características do mundo. Que, segundo Chaves (2017), vão sendo formados esquemas que lhe permitem agir sobre a realidade de um modo muito mais complexo do que podia fazer com seus reflexos iniciais, e sua conduta vai enriquecendo-se constantemente.

Para Valente (1999), dentro da concepção construtivista um ambiente educacional para ser considerado educativo deve possuir um ambiente interativo que proporcione ao estudante investigar, levantar hipóteses, testá-las e refinar suas ideias iniciais, dessa forma o aluno estará construindo o seu próprio caminho e conhecimento.

Dito isso, a metodologia ativa se utiliza da problematização como principal estratégia de ensino-aprendizagem, com o objetivo motivacional ao discente quando se depara com um problema, levando-o ao encontro com as informações e o desenvolvimento do conhecimento para solucionar os revezes e garantir o seu próprio desenvolvimento. Trata-se de uma metodologia libertadora direcionada para formação ativa, mostrando a necessidade de aprender a aprender. O ensino é centrado no aluno e a educação é problematizadora, fundamentada no diálogo entre o professor e o aluno, valorizando os conhecimentos colhidos de experiências da vida profissional do docente (COVIZZI; LOPES DE ANDRADE, 2012).

O uso de metodologias ativas cria uma dinâmica diferente de aprendizagem, para isso o professor deve estar preparado, o que nem sempre ocorre. As atividades envolvem tanto o planejamento complexo, quanto o domínio de competências pedagógicas que vão além das cognitivas. O professor, ao mesmo tempo em que

contribui para o enriquecimento do conteúdo das aulas, necessita dominar estratégias e técnicas que possibilitem ao grupo atingir os objetivos de forma eficiente. É necessário criar e sustentar um ambiente de troca de ideias, conhecimentos e experiências (GAETA; MASETTO, 2010).

A denominação indústria 4.0 foi criada e desenvolvida em 2011, na Alemanha, quando um conjunto de representantes da tríplice: governo, empresas e academia promoveram a ideia de uma abordagem que tinha como intuito aperfeiçoar a competitividade da indústria alemã. Nesse ensejo, o governo alemão anunciou que esse conceito faria parte da High-Tech Strategy 2020 for Germany, cuja finalidade seria levar a Alemanha à liderança na inovação tecnológica (KAGERMANN et al., 2013 apud MARINHO, 2018).

Dessa forma, o tema foi debatido no World Economic Forum de 2016, na Suíça, ocasião em que seu fundador, Klaus M. Schwab, afirmou que a sociedade moderna se depara com o início de uma revolução que está modificando a forma como o ser humano vive, trabalha e se relaciona. Esta é encarada como a quarta Revolução Industrial (SCHWAB, 2016 apud MARINHO, 2018).

No Brasil a Indústria 4.0 é denominada como Manufatura Avançada, tendo sido divulgada na Feira Internacional de Máquinas e Equipamentos (FEIMEC), em 2016, como uma indústria onde: o produto é individualizado, levando em consideração as suas características e a comunicação com as máquinas; os acontecimentos no mundo real são os mesmos no mundo virtual; há intensa comunicação entre máquina-máquina, decidindo o que deve ser feito; realiza-se conexão totalizada de cadeia de valor; está tudo conectado gerando Big Data, e o analytics identifica tendências e antecipa ações; e o ser humano é visto como elemento criativo e gestor de recursos (AZEVEDO, 2017 apud MARINHO, 2018).

Devido a necessidade de estratégias e ferramentas que cada vez mais inicie os discentes ao universo da indústria 4.0, a sinergia entre modelos de metodologias ativas englobando conceitos e ferramentas da indústria 4.0 nos cursos de engenharia mecânica vem sendo cada vez mais atrativas para a motivação e ao entendimento de conceitos e conteúdos complexos. Com isso, diversas ferramentas da metodologia ativa vem sendo usadas para esse fim, dentre elas temos as tecnologias educativas.

As tecnologias educativas são métodos utilizados para facilitar o processo ensino-aprendizagem. São consideradas um excelente meio pedagógico e usadas como um processo de transferência de conhecimento, propiciando ao indivíduo a participação em um momento de troca de experiências que leva ao aprimoramento de habilidades. Para se elaborar tecnologias educacionais, deve-se avaliar o público a que elas se destinam, respeitando suas peculiaridades, para que se tenha uma boa aplicação dessas tecnologias na prática. Dentre as tecnologias educacionais temos: entrevistas, simulação e vídeo, aconselhamento, slides, manual, cadernetas, jogo educativo e website, cartilhas, metodologias ativas e softwares (ÁFIO et al., 2014).

Imerso ao conceito, o uso da informática vem ganhando bastante representatividade devido suas ferramentas computacionais orientadas para desenvolvimento de plataformas didáticas. Dentre uma delas temos o uso de softwares educativos.

Um Software Educativo se configura como um tipo de software especializado cujo objetivo é servir como ferramenta de apoio ao ensino e aprendizagem promovendo o incentivo a aquisição do conhecimento pelos alunos. Um software educativo tem características particulares tais como: conteúdo didático, foco na aprendizagem do aluno e a assimilação do conteúdo. É um programa de computador desenvolvido para atender aos objetivos educacionais estabelecidos (PASQUALINI; PASCHOAL, 2013).

Um software educativo tem por objetivo principal garantir o aprendizado em uma área do conhecimento, fazendo uso de estratégias pedagógicas e teoria de aprendizagem (ABREU et al., 2012).

Segundo Albuquerque (2011), um software educativo tem como principal peculiaridade a atuação como uma ferramenta que auxilia e apoia o professor no processo de ensino e aprendizagem buscando favorecer a aquisição de conhecimento pelo aluno. Assim pode-se entender que um software educativo é um sistema computacional interativo, intencionalmente concebido para facilitar a aprendizagem de conceitos específicos, cuja finalidade é o ensino ou autoaprendizagem.

A produção de um software educativo requer o uso de metodologias que norteem e definem os processos para elaboração desse tipo de produto especializado. A utilização de um método científico baseado em procedimentos, métodos e

ferramentas permitem creditar que o desenvolvimento de um software esteja de acordo com as especificações previamente definidas (PRESSMAN, 2016; ABREU et al., 2012).

2.2. Cenário da matriz energética do Brasil

Nesse tópico serão abordados uma série de dados a respeito do cenário da matriz energética do Brasil, priorizando a matriz de energia elétrica, a capacidade de geração e a geração termelétrica a gás natural.

2.2.1. Matriz de energia elétrica

O quadro 1 ilustra o cenário da matriz de energia elétrica no Brasil, segundo ANEEL, abordando suas origens, fontes, numero de usinas e capacidade instalada em KW.

Quadro 1 Matriz de energia elétrica brasileira

Matriz de energia elétrica								
Fonte			Capacidade Instalada			Total		
Origem	Fonte Nível 1	Fonte Nível 2	Nº de Usinas	(KW)	%	Nº de Usinas	(KW)	%
Biomassa	Agroindustriais	Bagaço de Cana de Açúcar	404	11.415.302	64,839	422	11.508.286	65,367
		Biogás-AGR	3	7.951	0,0045			
		Capim Elefante	2	31.700	0,018			
		Casca de Arroz	13	53.333	0,0303			
	Biocombustíveis líquidos	Etanol	1	320	0,0002	3	4.670	0,0027
	Floresta	Óleos vegetais	2	4.350	0,0025	102	3.182.253	18,075
		Carvão Vegetal	8	48.197	0,0274			
		Gás de Alto Forno – Biomassa	12	127.705	0,0725			
		Lenha	6	39.915	0,0227			
		Licor Negro	18	2.530.719	14,374			
		Resíduos Florestais	58	435.717	0,2475			

	Resíduos animais	Biogás – RA	14	4.481	0,0025	14	4.481	0,0025
	Resíduos sólidos urbanos	Biogás – RU	22	168.599	0,0958	25	178.127	0,1012
		Carvão – RU	2	5.250	0,003			
		Resíduos Sólidos Urbanos – RU	1	4.278	0,0024			
Eólica	Cinética do vento	Cinética do vento	622	15.568.193	88,427	622	15.568.193	88,427
Fóssil	Carvão mineral	Calor de Processo – CM	2	28.400	0,0161	23	3.596.830	20,430
		Carvão Mineral	13	3.202.740	18,192			
	Gás natural	Gás de Alto Forno – CM	8	365.690	0,2077	166	13.434.733	76,309
		Calor de Processo – GN	1	40.000	0,0227			
		Gás Natural	165	13.394.733	76,082			
	Outros Fósseis	Calor de Processo – OF	4	165.970	0,0943	4	165.970	0,0943
	Petróleo	Gás de Alto Forno – PE	1	1.200	0,0007	2264	8.906.814	50,591
		Gás de Refinaria	6	319.530	0,1815			
		Óleo Combustível	75	3.319.055	18,852			
		Óleo Diesel	2165	4.243.701	24,104			
		Outros Energéticos de Petróleo	17	1.023.328	0,5812			
Hídrica	Potencial hidráulico	Potencial hidráulico	1361	107.076.533	608,194	1361	107.076.533	608,194
Nuclear	Urânio	Urânio	2	1.990.000	11,303	2	1.990.000	11,303
Solar	Radiação solar	Radiação solar	3408	2.269.666	12,892	3408	2.269.666	12,892
Undi-Elétrica	Cinética da água	Cinética da água	1	50	0	1	50	0
Importação	Paraguai			5.650.000	32,091			46,405
	Argentina			2.250.000	12,779			
	Venezuela			200.000	0,1135			
	Uruguai			70.000	0,0397			
		Total	8417	176.056.606	100	8417	176.056.606	100

Fonte: ANEEL (12/11/2019) –

<https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>

2.2.2. Capacidade de geração

Segundo dados da ANEEL de 12/11/2019, o Brasil possui, no momento, quanto a sua capacidade de geração, 8.417 empreendimentos em operação, totalizando 167.886.607 KW de potência instalada. Estando previsto para os próximos anos uma adição de 23.503.777 KW na capacidade de geração do país, por meio de 222 empreendimentos em construção e 389 em empreendimentos com construção não iniciada.

Conforme os empreendimentos em operação o quadro 2 ilustra os tipos de centrais e usinas, sua quantidade, potência outorgada, potência fiscalizada e o percentual.

Quadro 2. Empreendimentos em operação

Empreendimentos em Operação				
TIPO	QUANTIDADE	POTÊNCIA OUTORGADA (KW)	POTÊNCIA FISCALIZADA (KW)	%
Central Geradora Hidrelétrica	719	763.049	762.863	0,45
Central Geradora Undi-elétrica	1	50	50	0
Central Geradora Eólica	622	15.271.189	15.568.193	9,27
Pequena Central Hidrelétrica	425	5.316.955	5.270.902	3,14
Central Geradora Solar Fotovoltaica	3.408	2.269.791	2.269.666	1,35
Usina Hidrelétrica	217	102.964.008	101.042.768	60,19
Usina Termelétrica	3.023	42.537.888	40.982.165	24,41
Usina Termonuclear	2	1.990.000	1.990.000	1,19
Total	8.417	171.112.930	167.886.607	100

Fonte: ANEEL (12/11/2019) –

<https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>

O quadro 3 ilustra os tipos de centrais e usinas, sua quantidade, potência outorgada e o percentual dos empreendimentos em construção e o quadro 4 os empreendimentos com construção não iniciada.

Quadro 3. Empreendimentos em construção

Empreendimentos em Construção			
TIPO	QUANTIDADE	POTÊNCIA OUTORGADA (KW)	%
Central Geradora Hidrelétrica	3	3.512	0,04
Central Geradora Eólica	74	1.838.630	20,45
Pequena Central Hidrelétrica	29	398.709	4,43
Central Geradora Solar Fotovoltaica	25	829.536	9,22
Usina Hidrelétrica	1	141.900	1,58
Usina Termelétrica	89	4.430.197	49,27
Usina Termonuclear	1	1.350.000	15,01
Total	222	8.992.484	100

Fonte: ANEEL (12/11/2019) –

<https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>

Quadro 4. Empreendimentos com construção não iniciada

Empreendimentos com Construção não iniciada			
TIPO	QUANTIDADE	POTÊNCIA OUTORGADA (KW)	%
Central Geradora Hidrelétrica	2	5.100	0,04
Central Geradora Eólica	130	4.422.225	30,47
Pequena Central Hidrelétrica	97	1.340.471	9,24
Central Geradora Solar Fotovoltaica	99	4.036.462	27,82
Usina Hidrelétrica	6	659.000	4,54
Usina Termelétrica	55	4.048.035	27,9
Total	389	14.511.293	100

Fonte: ANEEL (12/11/2019) –

<https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>

2.2.3. Geração termelétrica a gás natural

O mercado de geração de gás natural no Brasil ainda é bastante recente, mesmo com o aumento da disponibilidade de combustível no país, totalizando 8.000 MW vendidos em leilões de energia. Entretanto esse nicho é visto ainda como bastante promissor, haja vista as reservas nacionais de petróleo e gás, o desenvolvimento do Pré-sal e novos terminais de regaseificação de GNL.

Quanto a oferta de gás natural no território nacional, segundo o “*relatório de geração termelétrica a gás natural*” de 2017, o Brasil em 2015 consumia cerca de 102.58 MM m³/dia, e 51% de todo gás consumido no país é extraído e beneficiado no próprio território nacional, com cerca de 49% vindo através de importação do GNL (17.49%), da

Bolívia (31.22%) e da Argentina (0.45%). Com a empresa Petrobrás sendo a detentora da maior parcela de produção nacional, respondendo a produção de 81% da produção total no Brasil.

No que refere a demanda nacional de gás natural, os segmentos termelétricos e industriais são os maiores consumidores de gás natural do Brasil, respondendo em cerca de 47% e 44%, respectivamente, da demanda em 2015. Com cerca de 43.61 MMm³/dia para o setor industrial e 38.08 MMm³/dia na geração elétrica (MME e Abegás, 2015).

No segmento termelétrico nacional, em 2015, existia por volta de 38 usinas termelétricas movidas a gás natural, totalizando uma potência instalada de 12.008 MW. A tabela 1 ilustra as usinas termelétricas a gás natural em operação no Brasil, relacionando as usinas, tipo de térmica, combustível, potência (MW), estado e custo variável unitário (R\$/MWh).

Tabela 1. Usinas termelétricas a gás natural em operação

Usina	Tipo de térmica	Combustível	Potência (MW)	UF	Custo variável unitário (R\$/MWh)
Governador Leonel Brizola (Ex-TermoRio)	Ccv	GN	1058	RJ	232.06
Norte Fluminense - Preço 1	Cc	GN	869	RJ	37.80
Norte Fluminense - Preço 2	Cc	GN		RJ	58.89
Norte Fluminense - Preço 3	Cc	GN		RJ	102.84
Norte Fluminense - Preço 4	Cc	GN		RJ	279.71
Fernando Gasparian (Ex-Nova Piratininga)	Cc	GN	565	SP	399.02
Termopernambuco	Cc	GN	533	PE	70.16
Baixada Fluminense	Cc	GN	530	RJ	82.43
Maranhão III (4)	Cc	GN	519	MA	-
Araucária	Cc	GN	484	PR	595.11
Termofortaleza	Cc	GN	347	CE	139.88
Euzébio Rocha (Ex-Cubatão)	Cc	GN	250	SP	269.18
Aureliano Chaves (Ex-Ibirité)	Cc	GN	226	M G	217.52
Santa Cruz (nova)	Cc	GN	200	RJ	118.53
Uruguaiana (3)	Cc	GN/OD	640	RS	486.20
Cuiabá (1)	Cc	GN/OD	529	MT	511.77
Sepé Tiaraju (Ex-Canoas)	Cc	GN/OC	249	RS	-
Total CICLO COMBINADO			6999		
Mário Lago (Ex-Macaé Merchant)	Ca	GN	923	RJ	528.79

Luiz Carlos Prestes (Ex-Três Lagoas) (2)	Ca	GN	385	MS	193.46
Jesus Soares Pereira (Ex-Vale do Açu)	Cav	GN	368	RN	314.63
Maranhão IV (5)	Ca	GN	338	MA	110.36
Maranhão V (5)	Ca	GN	338	MA	110.36
Luiz O. R. de Melo (Ex-Linhares)	Ca	GN	204	ES	177.22
Celso Furtado (Ex-Termobahia)	Cav	GN	186	BA	259.42
MC2 Nova Venécia	Ca	GN	176	MA	188.18
Rômulo Almeida (Ex-FAFEN)	Cav	GN	138	BA	213.45
Barbosa Lima Sobrinho (Ex-Eletrobolt)	Ca	GN/OD	379	RJ	306.01
Camaçari	Ca	GN/OD	347	BA	486.20
Termoceará	Ca	GN/OD	242	CE	295.08
Modular de Campo Grande (Willian Arjona)	Ca	GN/OD	206	MS	297.27
Aparecida	Ca	GN/OC	166	AM	302.19
Mauá	Ca	GN/OC	120	AM	411.92
Juiz de Fora	Ca	GN/ET	87	M G	213.84
Total CICLO ABERTO			4603		
Cristiano Rocha	Motor	GN/OC	85	AM	0
Manauara	Motor	GN/OC	85	AM	0
Gera	Motor	GN/OC	85	AM	0
Jaraqui	Motor	GN/OC	75	AM	0
Tambaqui	Motor	GN/OC	75	AM	0
Total MOTOR			405		
Total GERAL			12007		

Fonte: MME.

https://ceri.fgv.br/sites/default/files/publicacoes/2018-10/53_53_relatorio-geracao-termelétrica-a-gas-natural-2017_0.pdf

2.3. Tecnologia das usinas termelétricas a gás natural

As usinas termelétricas são definidas como unidades de geração de eletricidade através da utilização de máquinas térmicas para transformação da energia química do combustível em energia elétrica. Os combustíveis utilizados podem ser tanto combustíveis sólidos, como carvão mineral e biomassa, como combustíveis líquidos, diesel e óleo combustível, e combustíveis gasosos, como o gás liquefeito de petróleo – GLP e gás natural – GN.

No referente as máquinas térmicas, essas são responsáveis por transformar a energia presente nos combustíveis em energia elétrica, por meio de sistemas mecânicos responsáveis por rotacionar o eixo de um gerador elétrico, sua eficiência vai depender

da razão entre a quantidade de energia transformada em energia elétrica pela quantidade de energia disponibilizada pelo combustível.

Souza (1933) define máquinas térmicas como sendo todo sistema termodinâmico que troca com o meio externo do modo contínuo as formas de energia CALOR e TRABALHO. As máquinas térmicas são classificadas a partir do sistema em que há a transformação de energia, o processo em que a transformação ocorre em sistema fechado é classificado como máquinas térmicas a pistão e o processo em que a transformação ocorre em sistema aberto, máquinas térmicas a fluxo ou turbomáquinas.

Como foco do presente trabalho, as centrais termelétricas, que utilizam máquinas térmicas abastecidas a gás natural, possuem uma série de características que as tornam deveras interessante na geração de energia elétrica. Desde sua flexibilidade operacional no acompanhamento da carga, seu padrão significativo de segurança e disponibilidade, localização próximo a centros de consumo, menor tempo de construção e menor custo por KW instalado (Tolmasquim, 2005).

As termelétricas a gás natural possuem três categorias mais usuais, a ciclo aberto, a ciclo combinado e termelétricas que utilizam motores a combustão interna de ciclo Diesel adaptadas para combustível a gás natural. As termelétricas de ciclo aberto possuem apenas turbinas a gás natural para geração de energia elétrica, sendo seus gases espelidos para atmosfera, a figura 1 ilustra uma termelétrica a gás natural de ciclo aberto.

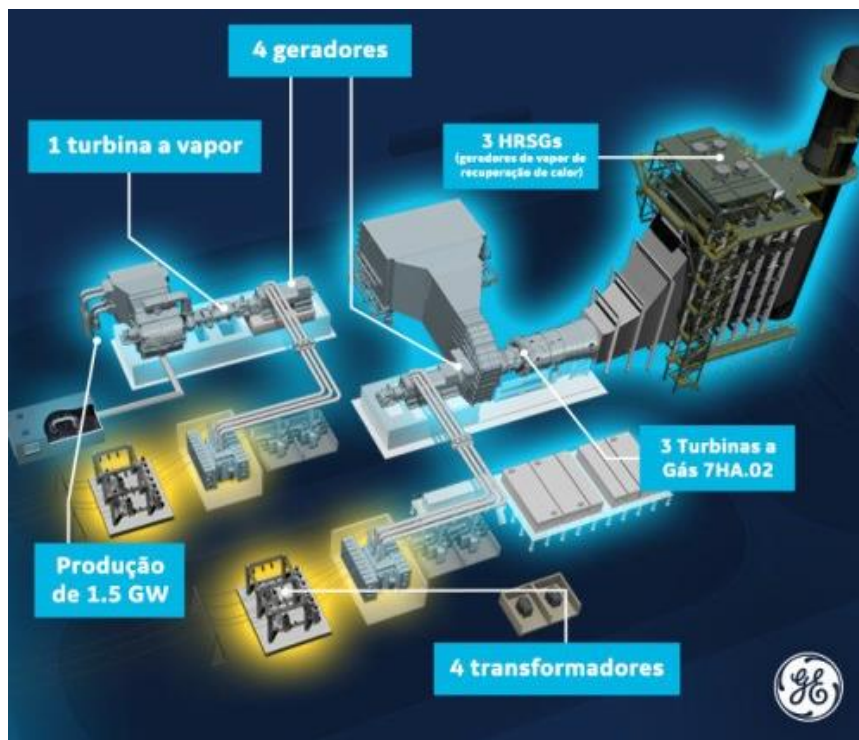
Figura 1. Termelétrica a gás natural de ciclo aberto.



Fonte: <http://www.tenaris.com/pt-br/products/powergeneration/gasfiredpowerplants.aspx>

Já o ciclo combinado, além de utilizar a disposição usual do ciclo aberto ainda possuem uma unidade de recuperação capaz de utilizar o gás de escape, que ainda possui qualidade exergética, para cogeração de energia, por meio de caldeiras de recuperação e turbinas a vapor. A figura 2 mostra a disposição de uma termelétrica a gás natural de ciclo combinado.

Figura 2. Termelétrica a gás natural de ciclo combinado.



Fonte: <https://gereportsbrasil.com.br/a-maior-termoel%C3%A9trica-a-g%C3%A1s-natural-da-am%C3%A9rica-latina-conta-com-tecnologia-ge-e-ser%C3%A1-instalada-no-b3a6803b1900>.

Devido ao não aproveitamento da exergia dos gases de exaustão as termelétricas de ciclo aberto possuem menor eficiência que as termelétricas de ciclo combinado. Para isso utiliza-se algumas outras disposições para aumentar a sua eficiência, como a utilização de regeneradores, reaquecedores e resfriadores intermediários. Segundo Tusiani (2007) e Sousa (2009) a eficiência das termelétricas de ciclo combinado chegam a 60% enquanto a de ciclo aberto apenas 35% em sua constituição mais simples.

As termelétricas que utilizam motores a combustão interna com combustível a gás natural estão aos poucos decrescendo a sua representatividade no cenário de geração elétrica, sendo substituídos por sistemas com turbinas a gás, como termelétricas tanto

ciclo aberto, como ciclo combinado.

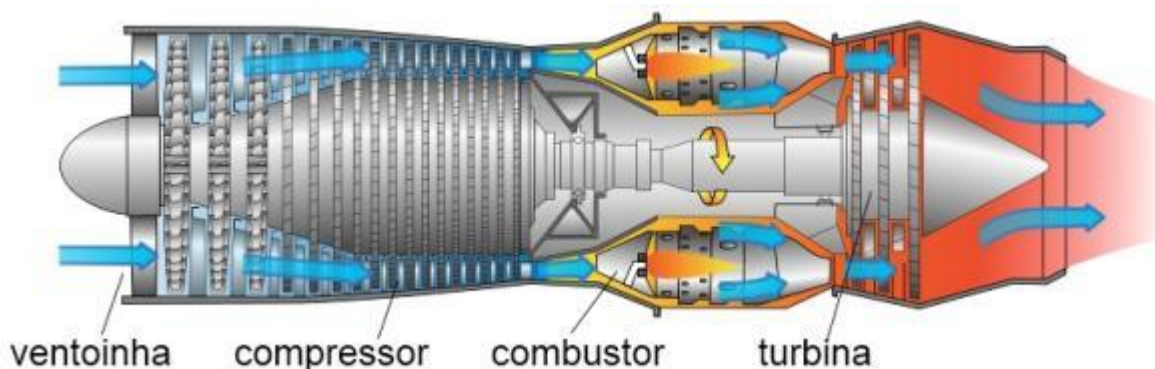
As turbinas a gás são classificadas como turbomáquinas térmicas, composta por elementos rotativos acoplados ao eixo. Essas máquinas térmicas são as responsáveis para a geração de potência mecânica em uma termelétrica a gás natural, e se destacam pela alta eficiência e confiabilidade, aliada ainda com poucos problemas de balanceamento e baixo consumo de óleo lubrificante (SIQUEIRA, 2016).

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

As turbinas a gás são constituídas são basicamente três componentes: o compressor, câmara de combustão e a turbina. O compressor tem a função de comprimir o ar de entrada da turbina, aumentando a pressão e a temperatura do fluido a fluxo constante, por meio de diversos estágios de compressão. Após a compressão o ar é direcionado para a câmara de combustão, nela ocorrerá a pulverização, vaporização, a mistura do ar com o combustível, cuja função é injetar calor no sistema por meio da reação química exotérmica do combustível mais o comburente (SIQUEIRA, 2016).

A expansão da mistura ocorre na turbina, onde sua função é proporcionar trabalho a partir do calor enviado da câmara de combustão, gerando trabalho mecânico para o eixo que movimenta o compressor e o gerador elétrico. A figura 3 mostra o funcionamento de uma turbina a gás.

Figura 3. Componentes de uma turbina a gás



Fonte: <https://www.tecmundo.com.br/aviao/33110-como-funciona-um-motor-com-turbina-a->

2.4. Ciclo de potência a gás

O sistema de ciclo de potência a gás se qualifica como um ciclo bastante aplicado quando se deseja gerar energia elétrica por meio da energia térmica, nesse caso o gás natural, retirado de reservas de gás no solo.

Podendo ser elemento principal da geração de energia elétrica ou componente de sistemas de cogeração e ciclos combinados, esses sistemas podem está dispostos em diversos arranjos, seja no ciclo de potência a gás simples, seja no ciclo de potência a gás com regeneração, no ciclo de potência a gás com regeneração, resfriamento intermediário e reaquecimento ou em sistemas de cogeração por ciclo combinado, o qual utiliza um ciclo de potência a gás, geralmente simples, com o aproveitamento dos gases de escape, da turbina a gás, para cogeração de energia por meio de uma caldeira de recuperação e turbina a vapor.

O ciclo de potência a gás também pode ser conhecido como ciclo Brayton, em homenagem a George Brayton, desenvolvedor deste ciclo termodinâmico. O ciclo Brayton foi desenvolvido por George Brayton para ser utilizado, inicialmente, em um motor alternativo desenvolvido em 1870. Atualmente este ciclo é utilizado somente em turbinas a gás geralmente em circuito aberto (ÇENGEL e BOLES, 2006).

Dentre as várias contribuições a cerca do tema, é importante frisar alguns dos trabalhos de forte representatividade para o estudo de caso. Como Machado (1993) que realizou um estudo de avaliação de desempenho de turbinas a gás principalmente no relativo a análises de falhas como forma de avaliações de possíveis não conformidades durante diferentes condições de operações de sistemas de potência, objetivando a elaboração de planos de manutenção e, conseqüentemente, o manutenção das boas condições de operação da turbina.

Já Huang (1990) analisa o desempenho de um turbina a gás associada a um sistema de cogeração, se baseando na aplicação da 1° e 2° leis da termodinâmica, utilizando o conceito de exergia. Beans (1990) apresenta uma análise comparativa entre o ciclo Brayton e o ciclo Rankine, utilizando turbina a gás e turbina a vapor, respectivamente. Kam (1995) apresenta estudos a respeito da análise de disponibilidade dos ciclos de Carnot, Brayton, Otto e Diesel em função de análises da segunda lei da termodinâmica.

Moran e Sciubba (1994) apresentam os conceitos e definições de exergia como o máximo trabalho disponível que pode ser extraído de um ciclo termodinâmico, aplicando o conceito em análise de projetos de sistemas térmicos e químicos. Valero et al (1994) apresenta uma aplicação da teoria dos custos exergéticos, atribuindo custos aos fluxos de um sistema energético e aos insumos. Propondo o conceito de exergoeconomia para otimização de projetos de sistemas térmicos complexos.

Chiesa et al (1995a e 1995b) estudaram aspectos de análises termodinâmicas em ciclos de potência com injeção de vapor, cujo objetivo era a melhora no desempenho de ciclos equipados com turbinas a gás. Oh et al (1997) utiliza uma turbina a gás com sistema de cogeração de 1000 kW, onde são caracterizados fluxos exergéticos e fluxos entrópicos, na elaboração do balanço exergético global.

Cheng e Chen (1999) estudaram a função ecológica máxima para o ciclo Brayton adicionando uma série de irreversibilidades além da causada pela troca de calor entre o reservatório e o sistema. Determinando que para a obtenção de uma maior função ecológica, a condutância térmica do trocador de calor deve ser maior no lado frio do que no lado quente. Khaliq e Kumar (2005) otimizaram um ciclo de potência a gás utilizando como critério a função ecológica. Os autores concluíram que o uso de regeneradores causa em um aumento considerável na taxa de geração de entropia e na potência de saída para o ciclo otimizado, propondo que, com uma pequena perda na potência de saída é possível obter uma considerável redução na taxa de geração de entropia e um aumento na eficiência térmica.

Leal et al. (2002) desenvolveram um software em linguagem de programação Visual Basic 6.0, que possibilita, a partir de dados experimentais de equilíbrio líquido-vapor, determinar os coeficientes de atividade, ajustar os parâmetros dos modelos de GE (Wilson, van Laar, NRTL e UNIQUAC) e modelar o equilíbrio de fases usando os procedimentos bolha e orvalho (P e T).

Miquilin et al. (2004) criaram um software para calcular o equilíbrio termodinâmico do sistema e verificar as condições que minimizam a energia livre de Gibbs total do meio reacional. Boros e Krähenbühl (2001) elaborou um programa de computador na linguagem FORTRAN para a verificação da Consistência Termodinâmica de Dados Experimentais de Equilíbrio Líquido-Vapor de Misturas Binárias, através da Integração da Equação da Coexistência na sua forma Isotérmica.

Silva et al. (2009) realizaram estudos com utilização do software ees no auxílio ao

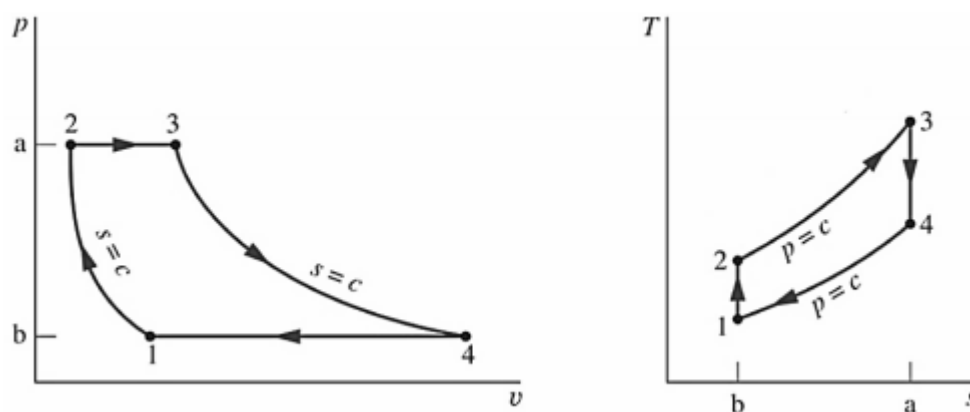
desenvolvimento de trabalhos acadêmicos e de projetos de P&D. apresentando alguns exemplos de aplicação do software ees (engineering equation solver) como ferramenta de ensino em auxílio ao professor no desenvolvimento de questões de provas, ao aluno no desenvolvimento de trabalhos acadêmicos e na elaboração de simulações em projetos de p&d. como resultado, observou-se uma maior facilidade de realizar análises de sensibilidade das variáveis de projeto, de visualização do comportamento das funções de transferência através de gráficos e de determinação de limites operacionais para o dimensionamento do sistema.

Azevedo et al. (2018) trataram do desenvolvimento de software de monitoramento em tempo real de propriedades termodinâmicas em sistemas de escoamento, visando o desenvolvimento de um software de monitoramento capaz de mostrar em tempo real propriedades termodinâmicas (vazão volumétrica, temperatura, densidade) de escoamento de um fluido em um sistema hidráulico.

2.4.1. Ciclo brayton simples

Segundo Boyce (2002), o ciclo brayton simples consiste em dois processos isoentrópicos e dois processos isobáricos. A Figura 4 evidencia os diagramas p-v (pressão – volume) e T-s (temperatura – entropia) do ciclo Brayton onde pode-se observar as transformações isoentrópicas e isobáricas, sendo a compressão no compressor (processo 1-2), a expansão na turbina (processo 3-4), a combustão na câmara de combustão (processo 2-3) e a exaustão que é a eliminação dos gases para atmosfera (processo 4-1) (BOYCE, 2002).

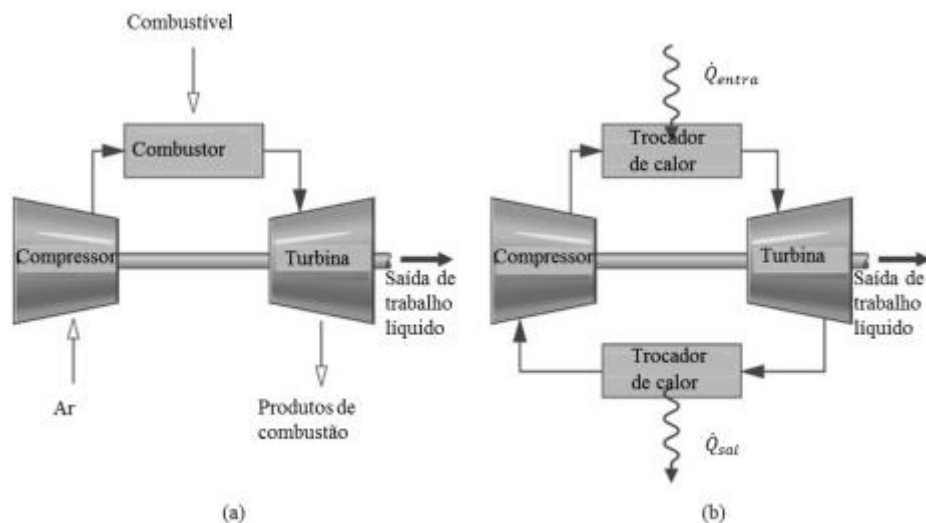
Figura 4. O ciclo Brayton. Diagramas p-v e T-s



Fonte: Pinto (2017).

Para efeitos de modelagem termodinâmica, adota-se o ciclo Brayton Simples como um ciclo de ar-padrão, onde o ciclo aberto pode ser modelado a partir de um ciclo fechado. A diferença na análise se encontra no processo de combustão, que é substituído por um sistema de fornecimento de calor, e no processo de exaustão, que é representado por um processo de rejeição de calor, além disto, os calores específicos são considerados constantes e a temperatura ambiente. Na Figura 5 em (a) e (b) são representados os circuitos aberto e fechado, respectivamente (Pinto, 2017).

Figura 5. (a) Turbina a gás de ciclo aberto (b) Turbina a gás de ciclo fechado



Fonte: Pinto (2017).

Considerando os aspectos da modelagem no ciclo aberto, o ar que se encontra em condições ambientes e é considerado um gás ideal, entra no compressor, onde são incrementadas a temperatura e a pressão. O ar a alta pressão e temperatura segue na direção da câmara de combustão, onde o combustível é injetado e se queima a pressão constante. Os gases entram a turbina, onde se expande até a pressão atmosférica, produzindo potência, a partir da transformação da energia presente no fluido expandido em energia mecânica, dado o movimento das pás que geram um movimento de rotação em um eixo acoplado em um gerador, onde há a transformação de energia elétrica. Os gases de exaustão que saem da turbina são expulsos para o ambiente (não recircular), caracterizando assim como ciclo aberto (Çengel et al, 2013).

Já ao considerar o ciclo fechado, este ciclo se compõe de quatro processos reversíveis: compressão adiabática, transferência de calor a pressão constante (entrada

de calor), expansão adiabática, transferência de calor a pressão constante (saída de calor). Portanto, a compressão e a expansão são processos isentrópicos, e o processo real de combustão é substituído por um processo de transferência de calor, seja a transferência endotérmica e exotérmica, ambos processos isobáricos (Wark et al, 2001).

Considerando os aspectos de modelagem termodinâmica do ciclo Brayton Simples teórico, desconsiderando as irreversibilidades nos processos, o trabalho líquido produzido por uma turbina a gás é resultado do trabalho produzido na turbina menos o trabalho requerido pelo compressor. As seguintes equações de 1-5 resultam da aplicação da 1ª Lei da Termodinâmica para volumes de controle em torno dos componentes do ciclo, cujas hipóteses simplificativas são: regime permanente; compressor e turbina adiabáticos; influência das energias cinética e potencial desprezível; e calor específico do ar constante nos vários pontos do ciclo. Nessas equações, h_1 , h_2 , h_3 e h_4 representam, respectivamente, as entalpias na entrada do compressor, na saída do compressor, na entrada da turbina e na saída da turbina (Pinto, 2017).

Na Equação (1) é representado o trabalho produzido na turbina por unidade de massa (wt), no qual o trabalho pode ser encontrado por meio da diferença entre a entalpia na entrada da turbina e a entalpia na saída da turbina (h_3-h_4).

$$wt = h_3 - h_4 = cp * (T_3 - T_4) \quad (1)$$

Na Equação (2) encontrasse o trabalho fornecido ao compressor por unidade de massa (wc), onde o trabalho no compressor é determinado a partir da diferença entre a entalpia na saída do compressor pela entalpia na entrada (h_2-h_1).

$$wc = h_2 - h_1 = cp * (T_2 - T_1) \quad (2)$$

A Equação (3) indica o calor adicionado ao ciclo por unidade de massa (q_{ent}), cujo calor de entrada ou de combustão, pode ser acurado a partir da diferença entre a entalpia da entrada do turbina e a entalpia de saída do compressor (h_3-h_2).

$$q_{ent} = h_3 - h_2 = cp * (T_3 - T_2) \quad (3)$$

O calor rejeitado por unidade de massa (q_{sai}) é mostrado na Equação (4). Este pode ser verificado por meio da diferença entre a entalpia de saída da turbina e a entalpia de entrada do compressor (h_4-h_1).

$$q_{sai} = h_4 - h_1 = cp (T_4 - T_1) \quad (4)$$

A eficiência térmica do ciclo (η) é apresentada na Equação (5). Podendo ser representado pela razão da diferença do trabalho da turbina e o trabalho do compressor

($wt-wc$), pelo calor de entrada ou de combustão (q_{ent}).

$$\eta = \frac{wt-wc}{q_{ent}} \quad (5)$$

Como visto anteriormente, o ciclo Brayton teórico envolve duas transformações isentrópicas e duas isobáricas. Porém o ciclo teórico ou ideal é impossível na realidade já que existem perdas energéticas em cada uma das quatro etapas. Segundos Santos (2006), as duas transformações isentrópicas citadas no ciclo teórico na realidade não existem, pois ocorrem transferências de calor do ar para a carcaça do compressor na compressão, bem como dos gases quentes para a carcaça da turbina na expansão. Além disto, existem outras perdas, como o atrito que ocorre nos mancais e as perdas de carga inerentes ao movimento dos fluidos através da câmara de combustão, compressor e turbina (Pinto, 2017).

Visto isso, no ciclo Brayton Simples real se faz necessário determinar as temperaturas e entalpias reais nas saídas do compressor e turbina, relacionando com o rendimento dos componentes, dado pelo fabricante. A partir desses dados se faz possível determinar os trabalhos reais do compressor e turbina, bem como o calor de entrada real na câmara de combustão, visto o rendimento da mesma, para com isso determinar os rendimentos reais do ciclo.

Relacionando os aspectos exergéticos, se faz necessário determinar a entropia da entrada e saída no compressor e turbina, dado a temperatura e pressão indicadas. Para então, através desses fatores, determinar a exergia (ex), equação (6), por meio da diferença da entropia do ponto com a entropia do estado morto (h_1-h_0) menos a diferença da temperatura (T_0) vezes a variação da entropia do ponto estudado com a entropia de estado morto (S_{01}). Lembrando de multiplicar pela vazão mássica.

$$ex = m * ((h_1 - h_0) - t_0 * s_{12}) \quad (6)$$

Dito isso, é possível determinar também a exergia destruída e a entropia gerada. Sendo a exergia destruída (X_{dest}), equação (7), uma relação entre as variações da exergia (EX_i-EX_f) mais o trabalho real (W_{real}) ou o calor no processo do dispositivo estudado. Quanto a entropia gerada (SGC), equação (8), o valor é descrito a partir da multiplicação da vazão mássica (m) e a variação de entropia do dispositivo (S_{12}).

$$X_{dest} = (ex_i - ex_f) - W_{real} \quad (7)$$

$$SGC = m * s_{12} \quad (8)$$

Como determinação do rendimento exergético, equação (9), se faz necessário a

razão da variação de trabalho do compressor e turbina, pela multiplicação do calor de entrada pela diferença de um e a razão da temperatura de estado morto e a temperatura de combustão.

$$r_{sx} = \frac{W_{realt} - W_{realc}}{Q_{cc} * (1 - (\frac{t_0}{t_3}))} \quad (9)$$

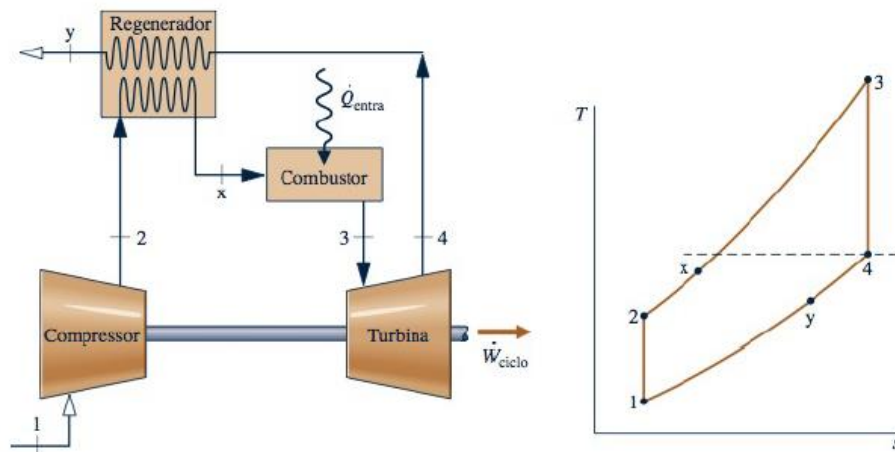
2.4.2. Ciclo de ar-padrão Brayton com regeneração

O sistema de ciclo Brayton com regeneração consiste na utilização de um trocador de calor (regenerador) cuja função é emitir mais energia ao sistema por meio da troca térmica entre os gases de exaustão na saída da turbina com o fluido de processo na entrada da câmara de combustão, aumentando a temperatura e entropia do processo, garantindo com isso uma maior eficiência quando comparado com o ciclo Brayton simples.

Sabe-se que os gases de exaustão que saem da turbina, no ciclo Brayton simples, normalmente com uma temperatura acima da temperatura ambiente, ainda possuem um grande potencial exergético para utilização no ciclo e, caso fosse descartado para o ambiente, consistiria numa considerável perda de oportunidade para se incrementar a eficiência do ciclo. Como forma de aproveitar estes gases quentes é utilizado um regenerador, o qual permite que os gases que saem do último compressor a alta pressão sejam pré-aquecidos antes de entrarem na câmara de combustão, no caso de ciclos abertos, reduzindo a quantidade de calor a ser adicionada ao ciclo e, consequentemente, a quantidade de combustível (REPINALDO, 2013).

Segundo Moran (2002), um ciclo de ar-padrão Brayton com regeneração, dispõe de um trocador de calor em contra corrente, entre o compressor e a câmara de combustão, conforme figura 6, pelo qual o gás quente de escape da turbina e o ar mais frio que deixa o compressor trocam calor, por meio da passagem em direções opostas.

Figura 6. Ciclo Brayton com regeneração



Fonte: Moran (2002)

Se tratando do método de modelagem desse ciclo, as equações que regem esse modelo pode ser descrita a partir das equações da modelagem do ciclo Brayton simples, com acrescimo da efetividade do regenerador, que relaciona a razão da diferença entre a entalpia na saída (h_x) e a entalpia na entrada (h_2) do regenerador dos fluidos de processo com a diferença da entalpia na saída da turbina (h_4) e a entalpia de entrada do compressor (h_2), conforme equação (10).

$$n_{reg} = \frac{h_x - h_2}{h_4 - h_2} \quad (10)$$

Quanto ao calculo do calor do regenerador, este é mensurado a partir da soma entre a multiplicação da vazão mássica (M) com diferença entre as entalpias da saída do compressor (h_{2r}) e entrada da câmara de combustão (h_3), e a multiplicação da vazão mássica total - Mt (vazão mássica do ar mais vazão mássica do combustível) com a diferença entre as entalpias dos gases de escape para o ambiente (h_6) e a entalpia dos gases de escape na saída da turbina (h_{5r}), conforme equação (11).

$$Q_{reg} = \frac{M \times (h_3 - h_{2r})}{Mt \times (h_6 - h_{5r})} \quad (11)$$

No quesito da modelagem exergética do ciclo Brayton com regeneração, os cálculos todos se assemelham com o já supracitados no ciclo Brayton simples, com o acrescimo dos cálculos exergéticos para o regenerador, o qual relaciona a entropia gerada (sg_{reg}) como sendo a multiplicação da vazão mássica total (mt) pela diferença da entropia do regenerador, entre o compressor e a câmara de combustão (s_{23}), e a entropia do regenerador, entre a turbina e o ambiente (s_{56}), conforme equação (12).

$$sg_{reg} = mt \times (s_{23} - s_{56}) \quad (12)$$

A eficiência exergética (rs_x) do ciclo relaciona o trabalho real, ou seja, a diferença

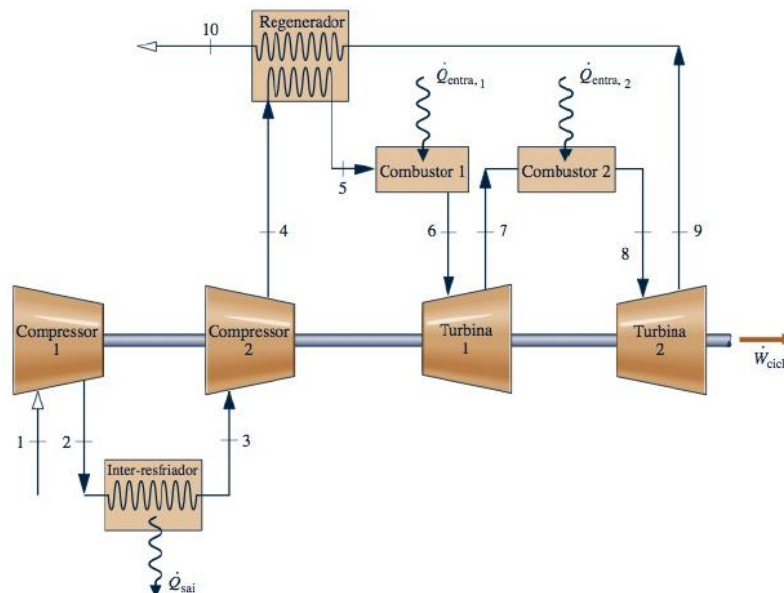
entre o trabalho real da turbina (w_{realt}) e o trabalho real do compressor (w_{realc}), em razão do calor da câmara de combustão (q_{cc}) relacionado com a temperatura de estado morto (t_{0k}) e temperatura do fluido após combustão (t_{4k}), conforme equação (13).

$$rsx = \frac{(w_{realt} - w_{realc})}{q_{cc} \times (1 - (\frac{t_{0k}}{t_{4k}}))} \quad (13)$$

2.4.3. Ciclo Brayton com resfriamento intermediário, reaquecimento e regeneração

Conforme Moran (2002), o ciclo Brayton com resfriamento intermediário, reaquecimento e regeneração, dispõem de um reaquecimento entre os estágios de turbina e um inter-resfriamento entre estagios de compressor, conforme figura 7, e fornecem duas vantagens: o trabalho líquido produzido é aumentado e o potencial para regeneração também. Obtendo uma melhora substancial no desempenho.

Figura 7. Ciclo Brayton com resfriamento intermediário, reaquecimento e regeneração.



Fonte: Moran (2002)

Com isso, o presente software nomeado TAS (abreviação de Thermodynamics Analysis Software) proporcionará a análise dos ciclos com base nos valores de propriedades termodinâmicas definidas em determinados estados do processo. Serão realizadas análises energética, exergética e termoeconômicas para os diferentes tipos

de ciclos tanto no TAS quanto a partir de modelos matemáticos baseados em bibliografias específicas. Para avaliação dos processos foram consideradas algumas hipóteses, tais como: processos em regime permanente, sistema estacionário e processos adiabáticos em compressores e turbinas. Espera-se, através das análises dos resultados dos dados termodinâmicos extraídos do TAS, a possibilidade de simular ciclos de potência a gás Brayton com dados de precisão acima de 95% de confiabilidade e desenvolver um software para simulação didática.

Se tratando do método de modelagem desse ciclo, as equações que regem esse modelo pode ser descrita a partir das equações da modelagem do ciclo Brayton Simples e o ciclo Brayton com Regeneração, com acrescimo da efetividade do resfriador e o reaquecedor. O calculo da eficiência do resfriador intermediário (n_{resf}) relaciona a razão da diferença entre a temperatura de saída (T_3) e a temperatura de entrada real (T_2) do resfriador com a diferença de temperatura de entrada do fluido refrigerante (T_{2f}) e a temperatura de entrada real do resfriador (T_2), conforme equação (14).

$$n_{resf} = \frac{T_3 - T_2}{T_{2f} - T_2} \quad (14)$$

O calculo da eficiência do reaquecedor (n_{reaq}) relaciona a razão da diferença entre a temperatura de saída (T_f) e a temperatura de entrada real (T_i) do reaquecedor com a diferença de temperatura da fonte quente (T_{ff}) e a temperatura de entrada real do reaquecedor (T_i), conforme equação (15).

$$n_{reaq} = \frac{T_f - T_i}{T_{ff} - T_i} \quad (15)$$

Quanto ao cálculo do calor do resfriador (Q_{resf}), este é mensurado por meio da multiplicação da vazão mássica (m) pela diferença da entalpia de entrada (h_i) e saída (h_f) do resfriador, vezes o rendimento do resfriador (n_{resf}), conforme equação (16).

$$Q_{resf} = m * (h_f - h_i) * n_{resf} \quad (16)$$

Quanto ao cálculo do calor do reaquecedor (Q_{reaq}), este é mensurado por meio da multiplicação da vazão mássica (m) pela diferença da entalpia de saída (h_f) e entrada (h_i) do resfriador, vezes o rendimento do resfriador (n_{reaq}), conforme equação (17).

$$Q_{reaq} = m * (h_i - h_f) * n_{reaq} \quad (17)$$

No quesito exergia, a exergia do resfriador (ex) é calculado por meio da razão das temperaturas de estado morto (t_0) pela temperatura de saída do resfriador (t_f), multiplicado pelo calor do resfriador (Q). A exergia do reaquecedor (ex) é calculado por meio da razão das temperaturas de estado morto (t_0) pela temperatura de saída do

reaquecedor (t_f), multiplicado pelo calor do reaquecedor (Q). Conforme equação (18).

$$ex = \left(1 - \frac{t_0}{t_f}\right) * Q \quad (18)$$

3. METODOLOGIA

Segue a metodologia, por partes, do software, destacando os três ciclos de potência a gás Brayton: Ciclo Brayton Simples, Ciclo Brayton com Regeneração e Ciclo Brayton com Resfriamento Intermediário, Reaquecimento e Regeneração.

3.1. Software do ciclo brayton simples

O software de simulação de análise do ciclo Brayton simples se configura como um programa, voltado para análises acadêmicas, capaz de efetuar análises energéticas e exergéticas de ciclos termodinâmicos do tipo Brayton simples, que possuem em sua estrutura um compressor, uma câmara de combustão e uma turbina.

O programa foi desenvolvido utilizando a IDE do Borland C++Builder 6 em linguagem C++. No software foi utilizado apenas componentes nativos da IDE sem a utilização de componentes terceiros, o que permite realizar as manutenções e atualizações de forma simples e fácil, sem que haja necessidade de instalação de um outro programa. O software possibilita um fácil manuseio utilizando apenas uma tela gráfica dispostas de duas abas e uma caixa com os dados de entrada, onde os dados de entrada são inseridos pelo usuário.

Na figura 8 pode ser vista a tela principal do programa de simulação de análise do ciclo Brayton simples. Na tela principal está disposto as regiões de dados de entrada, abas de análises termodinâmicas, autores do programa, ano do programa, versão e siglas das universidades e institutos parceiros no desenvolvimento do software.

Figura 8. Software de simulação do ciclo Brayton simples.

Fonte: Autoria própria (2019).

A tela principal permite que o usuário preencha os dados de entrada para análise dos resultados termodinâmicos da simulação.

Os dados de entrada fornecidos pelo usuário no programa são fixos, sendo necessário preencher os seguintes dados: Temperatura de estado morto (K), Temperatura de entrada ($^{\circ}\text{C}$), Pressão de entrada (Kpa), Temperatura de combustão (Kpa), Pressão de combustão (Kpa), Rendimento do compressor (%), Rendimento da turbina (%), Rendimento do gerador (%), Rendimento da câmara de combustão (%), Vazão mássica (Kg/s), Vazão com combustível (Kg/s) e custo do KWh (US\$). Inserido os dados de entrada se faz necessário o usuário apertar em “Calcular”, onde o software calcula os dados necessários para análise energética e exergética.

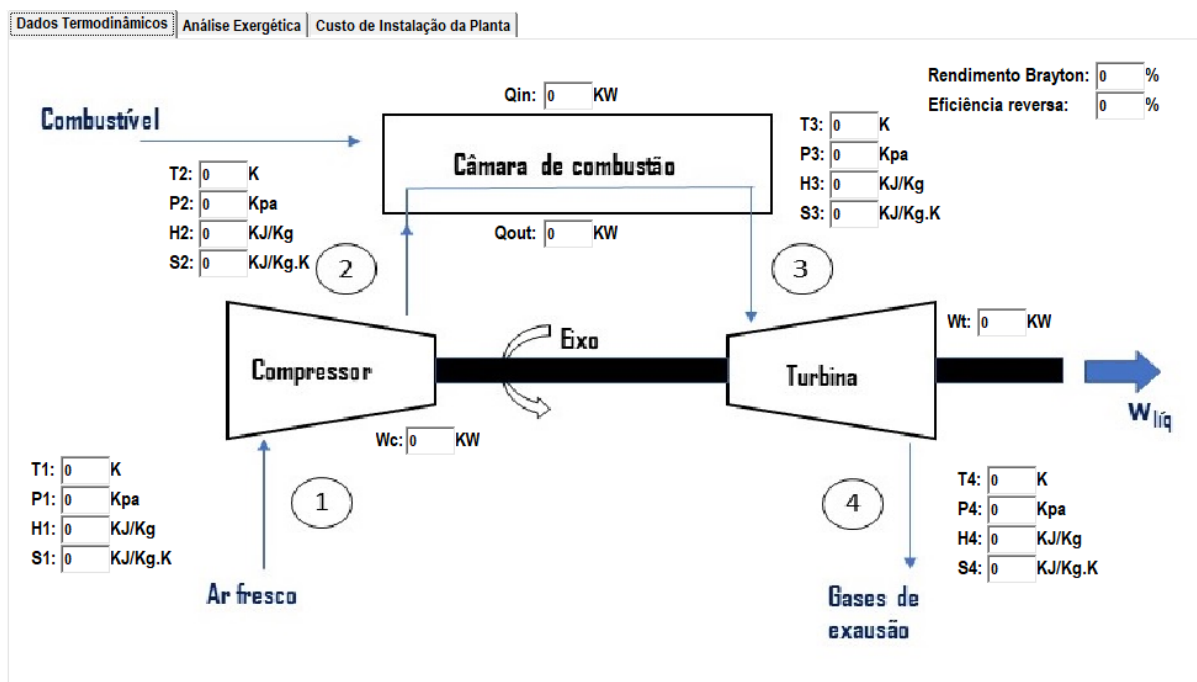
O software calcula dos dados de análise energética e exergética por meio dos dados de entrada, o qual as avaliações estão separadas em duas abas: **Dados termodinâmicos e Análise exergética**.

Na aba denominada **Dados termodinâmicos** está disposto uma figura representando o ciclo termodinâmico Brayton Simples, composta por um compressor, câmara de combustão e uma turbina, onde são calculados, com base nos dados de entrada, os seguintes dados: Temperatura – T1 (K), Pressão – P1 (Kpa), Entalpia – H1 (KJ/Kg) e Entropia – S1 (KJ/Kg.K) na entrada do compressor; Temperatura – T2 (K),

Pressão – P_2 (Kpa), Entalpia – H_2 (KJ/Kg) e Entropia – S_2 (KJ/Kg.K) na saída do compressor; Temperatura – T_3 (K), Pressão – P_3 (Kpa), Entalpia – H_3 (KJ/Kg) e Entropia – S_3 (KJ/Kg.K) na saída da câmara de combustão; e Temperatura – T_4 (K), Pressão – P_4 (Kpa), Entalpia – H_4 (KJ/Kg) e Entropia – S_4 (KJ/Kg.K) na saída da turbina.

Além dos citados, também são calculados o Trabalho do compressor – W_c (KW), Trabalho da turbina – W_t (KW), calor de entrada – Q_{in} (KW), calor rejeitado – Q_{out} (KW), o Rendimento de Brayton (%) e a Eficiência reversa (%), conforme figura 9.

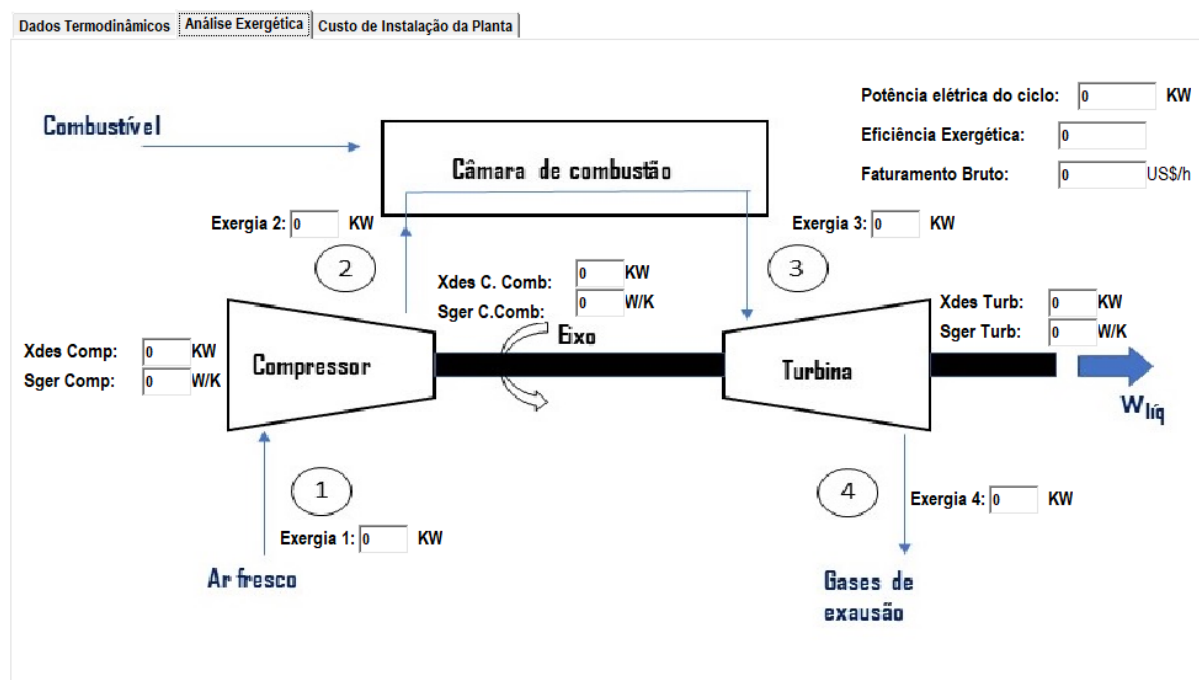
Figura 9. Aba de análise energética.



Fonte: Autoria Própria (2019).

Na aba denominada **Análise exergética** está disposto uma figura representando o ciclo termodinâmico Brayton Simples, composta por um compressor, câmara de combustão e uma turbina, onde são calculados, com base nos dados de entrada, os seguintes dados: Exergia 1 (KW) na entrada do compressor, Exergia destruída do compressor – $X_{des\ Comp}$ (KW) e Entropia gerada do compressor – $S_{ger\ Comp}$ (W/K); Exergia 2 (KW) na saída do compressor, Exergia destruída da câmara de combustão – $X_{des\ C. Comb}$ (KW) e Entropia gerada da câmara de combustão – $S_{ger\ C. Comb}$ (W/K); Exergia 3 (KW) na saída da câmara de combustão, Exergia destruída da turbina – $X_{des\ Turb}$ (KW), Entropia gerada da turbina – $S_{ger\ Turb}$ (W/K) e Exergia 4 (KW) na saída da turbina. Além desses dados são calculados a Potência elétrica do ciclo (KW), Eficiência Exergética (%) e Faturamento bruto (US\$/h), conforme figura 10.

Figura 10. Aba de análise exérgica.



Fonte: Autoria própria (2019).

3.2. Software do ciclo brayton simples com regeneração

O software de simulação de análise do ciclo Brayton com regeneração se configura como um programa, voltado para análises acadêmicas, capaz de efetuar análises energéticas e exérgicas de ciclos termodinâmicos do tipo Brayton com regeneração, que possuem em sua estrutura um compressor, um regenerador, uma câmara de combustão e uma turbina.

O programa foi desenvolvido utilizando a IDE do Borland C++Builder 6 em linguagem C++. No software foi utilizado apenas componentes nativos da IDE sem a utilização de componentes terceiros, o que permite realizar as manutenções e atualizações de forma simples e fácil, sem que haja necessidade de instalação de um outro programa. O software possibilita um fácil manuseio utilizando apenas uma tela gráfica dispostas de duas abas e uma caixa com os dados de entrada, onde os dados de entrada são inseridos pelo usuário.

Na figura 11 pode ser vista a tela principal do programa de simulação de análise do ciclo Brayton com regeneração. Na tela principal está disposto as regiões de dados de entrada, abas de análises termodinâmicas, autores do programa, ano do programa, versão e siglas das universidades e institutos parceiros no desenvolvimento do software.

Figura 11. Software de simulação do ciclo Brayton com regeneração.

Software de Simulação do Ciclo Brayton com Regeneração

Dados de Entrada:

- Temperatura Est. Morto: K
- Temperatura Entrada: °C
- Pressão Entrada: Kpa
- Pressão Combustão: Kpa
- Temperatura Descarga: °C
- Eficiência Compressor: %
- Eficiência Turbina: %
- Eficiência Regenerador: %
- Eficiência Gerador: %
- Eficiência Cam. Comb: %
- Vazão Comb.: Kg/s
- Vazão Mássica: Kg/s
- Custo KWH: US\$
- Temp. Combustão: K

Dados Termodinâmicos:

Diagrama do Ciclo Brayton com Regeneração:

- 1: Estado de entrada do compressor (T1, P1, H1, S1)
- 2: Estado de saída do compressor (T2, P2, H2, S2)
- 3: Estado de entrada da câmara de combustão (T3, P3, H3, S3)
- 4: Estado de saída da câmara de combustão (T4, P4, H4, S4)
- 5: Estado de saída da turbina (T5, P5, H5, S5)
- 6: Estado de entrada do regenerador (T6, P6, H6, S6)

Análise Exergética:

- Qreg: KW
- Qin: KW
- Qout: KW
- Wc: KW
- Wt: KW
- Wliq: KW

Resultados:

- Eficiência Térmica: %
- Rendimento Carnot: %
- Potência de geração: KW

Prof. Dr. Edilson Marinho da Silva Junior
 Prof. Msc. Anderson Fortes
 Prof. Dr. Cleiton Rubens Barbosa Formiga
 Prof. Dr. Efraim Pantaleon Matamoros

UFRN-IFPI-IFMA
 1.0.1
 Abril/2019

Fonte: Autoria própria (2019).

A tela principal permite que o usuário preencha os dados de entrada para análise dos resultados termodinâmicos da simulação.

Os dados de entrada fornecidos pelo usuário no programa são fixos, sendo necessário preencher os seguintes dados: Temperatura de estado morto (K), Temperatura de entrada (°C), Pressão de entrada (Kpa), Temperatura de combustão (Kpa), Pressão de combustão (Kpa), Eficiência do compressor (%), Eficiência da turbina (%), Eficiência do regenerador (%), Eficiência do gerador (%), Eficiência da câmara de combustão (%), Vazão mássica (Kg/s), Vazão com combustível (Kg/s), custo do KWh (US\$) e Temperatura de combustão (K). Inserido os dados de entrada se faz necessário o usuário apertar em “Calcular”, onde o software calcula os dados necessários para análise energética e exergética.

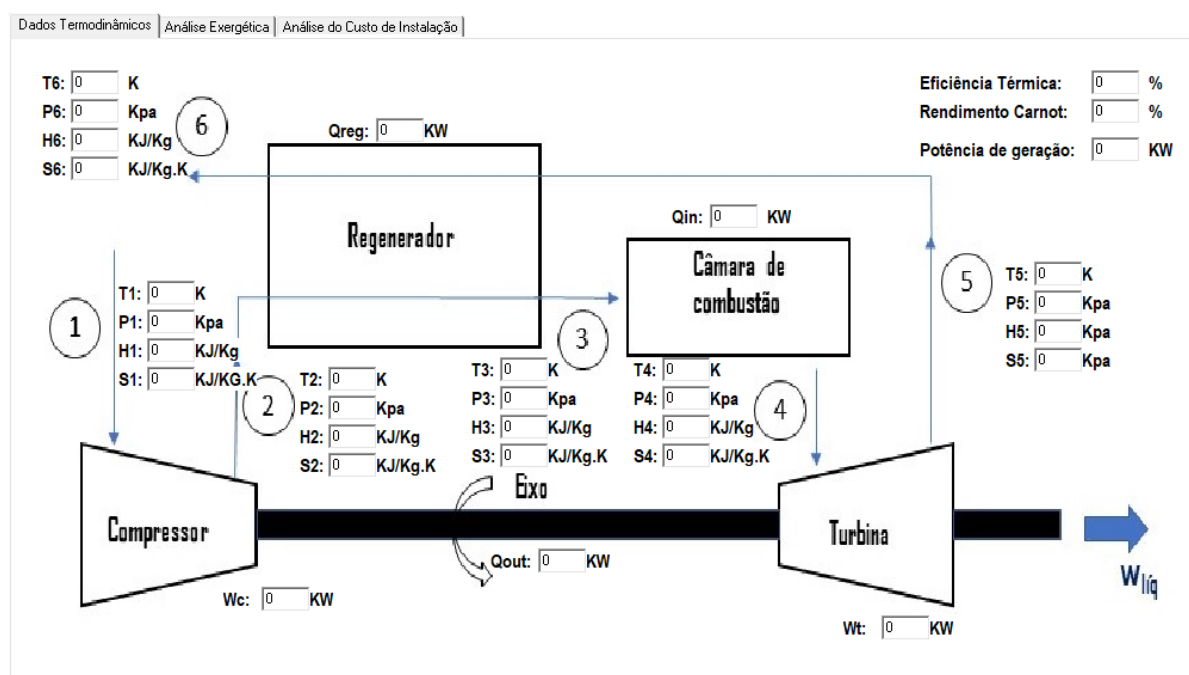
O software calcula dos dados de análise energética e exergética por meio dos dados de entrada, o qual as avaliações estão separadas em duas abas: **Dados termodinâmicos e Análise exergética**.

Na aba denominada **Dados termodinâmicos** está disposto uma figura representando o ciclo termodinâmico Brayton Simples, composta por um compressor, câmara de combustão e uma turbina, onde são calculados, com base nos dados de entrada, os seguintes dados: Temperatura – T1 (K), Pressão – P1 (Kpa), Entalpia – H1 (KJ/Kg) e Entropia – S1 (KJ/Kg.K) na entrada do compressor; Temperatura – T2 (K),

Pressão – P_2 (Kpa), Entalpia – H_2 (KJ/Kg) e Entropia – S_2 (KJ/Kg.K) na saída do compressor; Temperatura – T_3 (K), Pressão – P_3 (Kpa), Entalpia – H_3 (KJ/Kg) e Entropia – S_3 (KJ/Kg.K) na entrada da câmara de combustão; Temperatura – T_4 (K), Pressão – P_4 (Kpa), Entalpia – H_4 (KJ/Kg) e Entropia – S_4 (KJ/Kg.K) na saída da câmara de combustão; Temperatura – T_5 (K), Pressão – P_5 (Kpa), Entalpia – H_5 (KJ/Kg) e Entropia – S_5 (KJ/Kg.K) na saída da turbina; e Temperatura – T_6 (K), Pressão – P_6 (Kpa), Entalpia – H_6 (KJ/Kg) e Entropia – S_6 (KJ/Kg.K) na saída do regenerador para o ambiente.

Além dos citados, também são calculados o Trabalho do compressor – W_c (KW), Trabalho da turbina – W_t (KW), calor do regenerador – Q_{reg} (KW), calor de entrada – Q_{in} (KW), calor rejeitado – Q_{out} (KW), o Eficiência térmica (%), Eficiência de Carnot (%) e Potência de geração (KW), conforme figura 12.

Figura 12. Aba de análise energética.

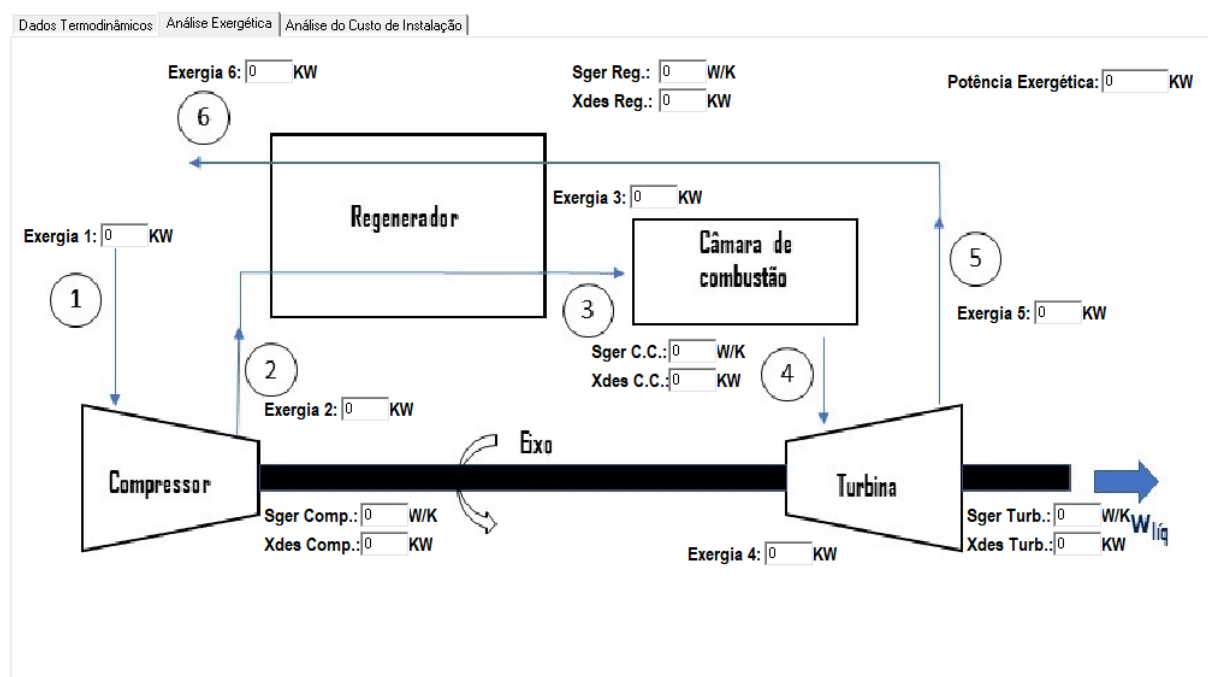


Fonte: Autoria própria (2019).

Na aba denominada **Análise exergética** está disposto uma figura representando o ciclo termodinâmico Brayton Simples, composta por um compressor, regenerador, câmara de combustão e uma turbina, onde são calculados, com base nos dados de entrada, os seguintes dados: Exergia 1 (KW) na entrada do compressor, Exergia destruída do compressor – $X_{des\ Comp}$ (KW) e Entropia gerada do compressor – $S_{ger\ Comp}$ (W/K); Exergia 2 (KW) na saída do compressor; Exergia 3 (KW) na entrada do

regenerador, Exergia destruída do regenerador – $X_{des\ Reg.}$ (KW) e Entropia gerada do regenerador – $S_{ger\ Reg}$ (W/K); Exergia 4 (KW) na entrada da câmara de combustão, Exergia destruída da câmara de combustão – $X_{des\ C. C}$ (KW) e Entropia gerada da câmara de combustão – $S_{ger\ C. C}$ (W/K); Exergia 5 (KW) na entrada da turbina, Exergia destruída da turbina – $X_{des\ Turb}$ (KW), Entropia gerada da turbina – $S_{ger\ Turb}$ (W/K) e Exergia 6 (KW) na saída do regenerador para o ambiente. Além desses dados é calculado a Potência exergética (KW), conforme figura 13.

Figura 13. Aba de análise exergética.



Fonte: Autoria própria (2019).

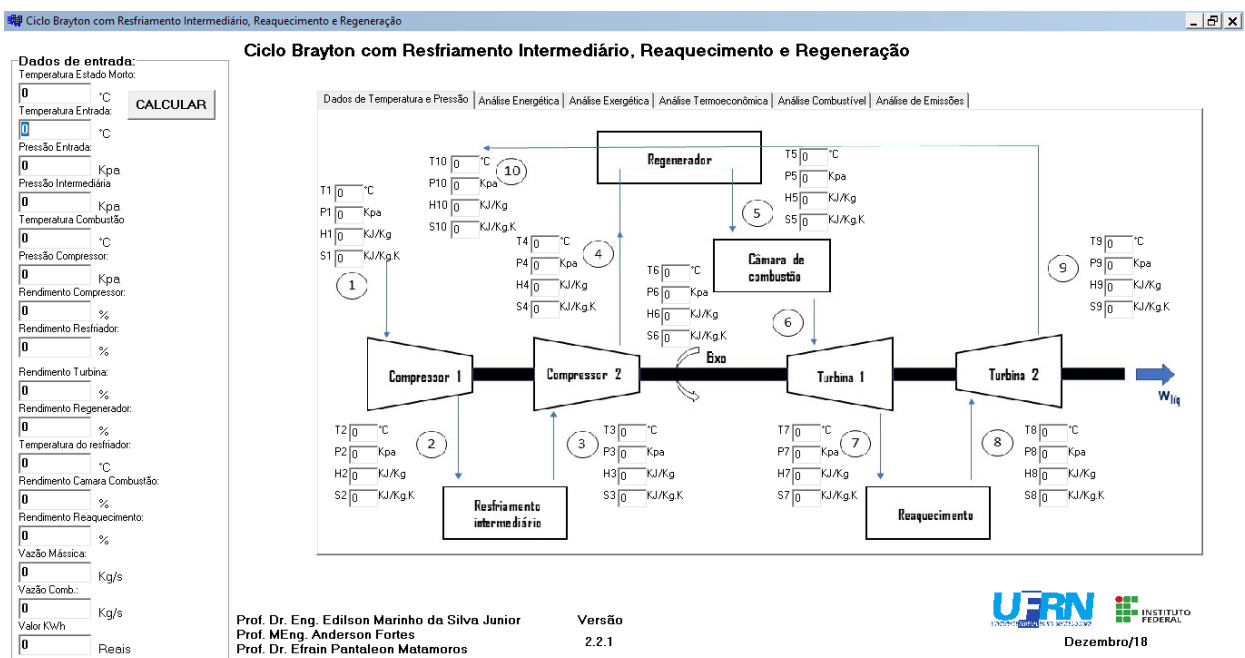
3.3. Software do ciclo brayton simples com resfriamento intermediário, regeneração e reaquecimento

O software de simulação de análise do ciclo Brayton com resfriamento intermediário, reaquecimento e regeneração se configura como um programa, voltado para análises acadêmicas, capaz de efetuar análises energéticas, exergéticas e termoeconômica de ciclos termodinâmicos do tipo Brayton com resfriamento intermediário, reaquecimento e regeneração, que possuem em sua estrutura dois compressores, um resfriador intermediário entre os compressores, um regenerador, uma câmara de combustão, duas turbinas e um reaquecedor entre as turbinas.

O programa será desenvolvido utilizando a IDE do Borland C++Builder 6 em linguagem C++. No software será utilizado apenas componentes nativos da IDE sem a utilização de componentes terceiros, o que permite realizar as manutenções e atualizações de forma simples e fácil, sem que haja necessidade de instalação de um outro programa. O software possibilita um fácil manuseio utilizando apenas uma tela gráfica dispostas de duas abas e uma caixa com os dados de entrada, onde os dados de entrada são inseridos pelo usuário.

O sistema será elaborado em uma única tela, chamada tela principal. Na tela principal está disposto as regiões de dados de entrada, abas de análises termodinâmicas, autores do programa, ano do programa, versão e siglas das universidades e institutos parceiros no desenvolvimento do software. Conforme evidenciado na figura 14.

Figura 14. Software de simulação do ciclo Brayton com regeneração.



Fonte: Autoria própria (2019).

A tela principal permitirá que o usuário preencha os dados de entrada para análise dos resultados termodinâmicos da simulação.

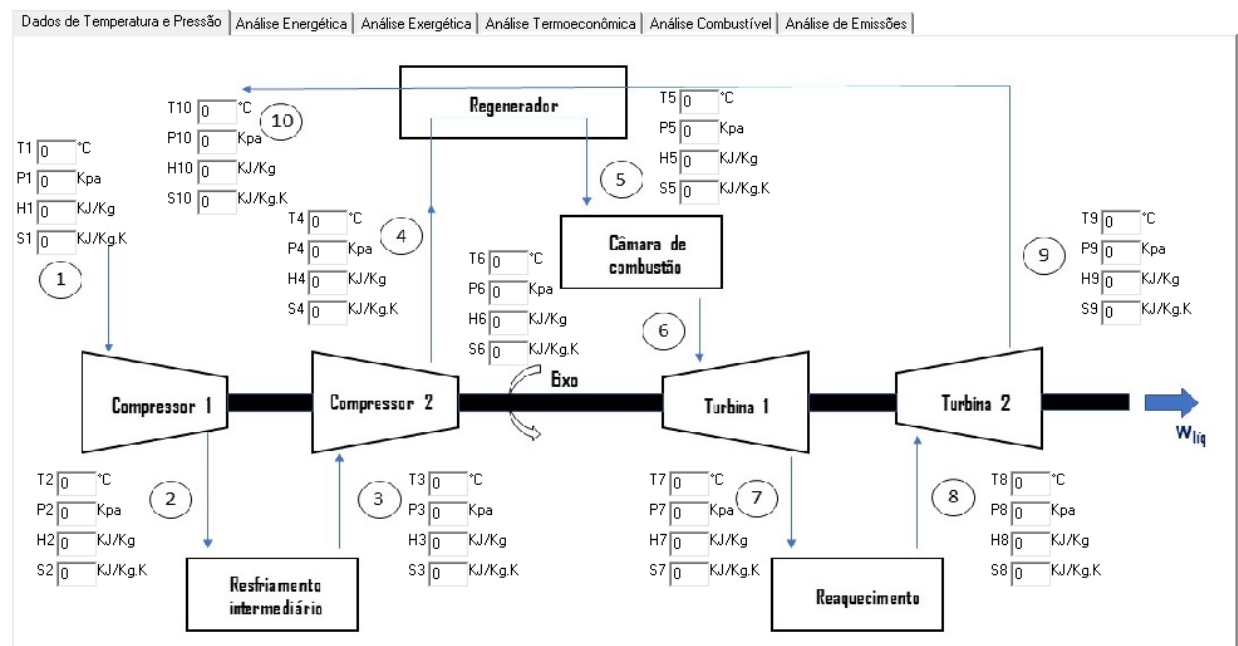
Os dados de entrada fornecidos pelo usuário no programa serão fixos, sendo necessário preencher os seguintes dados: Temperatura de estado morto (K),

Temperatura de entrada ($^{\circ}\text{C}$), Pressão de entrada (Kpa), Temperatura de combustão (Kpa), Pressão de combustão (Kpa), Eficiência do compressor (%), Eficiência da turbina (%), Eficiência do regenerador (%), Eficiência do resfriador (%), Temperatura do fluido resfriador ($^{\circ}\text{C}$), Eficiência do reaquecedor, Eficiência do gerador (%), Eficiência da câmara de combustão (%), Vazão mássica (Kg/s), Vazão com combustível (Kg/s), custo do KWh (US\$). Inserido os dados de entrada se fará necessário o usuário apertar em “Calcular”, onde o software calculará os dados necessários para análise energética e exergética.

O software calculará os dados de análise energética e exergética por meio dos dados de entrada, o qual as avaliações estarão separadas em duas abas: Dados termodinâmicos e Análise exergética.

Na aba denominada **Dados termodinâmicos** estará disposta uma figura representando o ciclo termodinâmico Brayton com resfriamento intermediário, regenerador e reaquecimento, composta por dois compressores, câmara de combustão, um regenerador, um resfriador intermediário, um reaquecedor e duas turbinas, onde serão calculados, com base nos dados de entrada, os seguintes dados: Temperatura – T_1 (K), Pressão – P_1 (Kpa), Entalpia – H_1 (KJ/Kg) e Entropia – S_1 (KJ/Kg.K) na entrada do compressor 01; Temperatura – T_2 (K), Pressão – P_2 (Kpa), Entalpia – H_2 (KJ/Kg) e Entropia – S_2 (KJ/Kg.K) na saída do compressor 01; Temperatura – T_3 (K), Pressão – P_3 (Kpa), Entalpia – H_3 (KJ/Kg) e Entropia – S_3 (KJ/Kg.K) na saída do resfriador intermediário; Temperatura – T_4 (K), Pressão – P_4 (Kpa), Entalpia – H_4 (KJ/Kg) e Entropia – S_4 (KJ/Kg.K) na saída do compressor 02; Temperatura – T_5 (K), Pressão – P_5 (Kpa), Entalpia – H_5 (KJ/Kg) e Entropia – S_5 (KJ/Kg.K) na saída do regenerador para a câmara de combustão; Temperatura – T_6 (K), Pressão – P_6 (Kpa), Entalpia – H_6 (KJ/Kg) e Entropia – S_6 (KJ/Kg.K) na saída da câmara de combustão; Temperatura – T_7 (K), Pressão – P_7 (Kpa), Entalpia – H_7 (KJ/Kg) e Entropia – S_7 (KJ/Kg.K) na saída da turbina 01; Temperatura – T_8 (K), Pressão – P_8 (Kpa), Entalpia – H_8 (KJ/Kg) e Entropia – S_8 (KJ/Kg.K) na saída do reaquecedor; Temperatura – T_9 (K), Pressão – P_9 (Kpa), Entalpia – H_9 (KJ/Kg) e Entropia – S_9 (KJ/Kg.K) na saída da turbina 02; e Temperatura – T_{10} (K), Pressão – P_{10} (Kpa), Entalpia – H_{10} (KJ/Kg) e Entropia – S_{10} (KJ/Kg.K) na saída do regenerador para o ambiente. Conforme pode ser visto na figura 15.

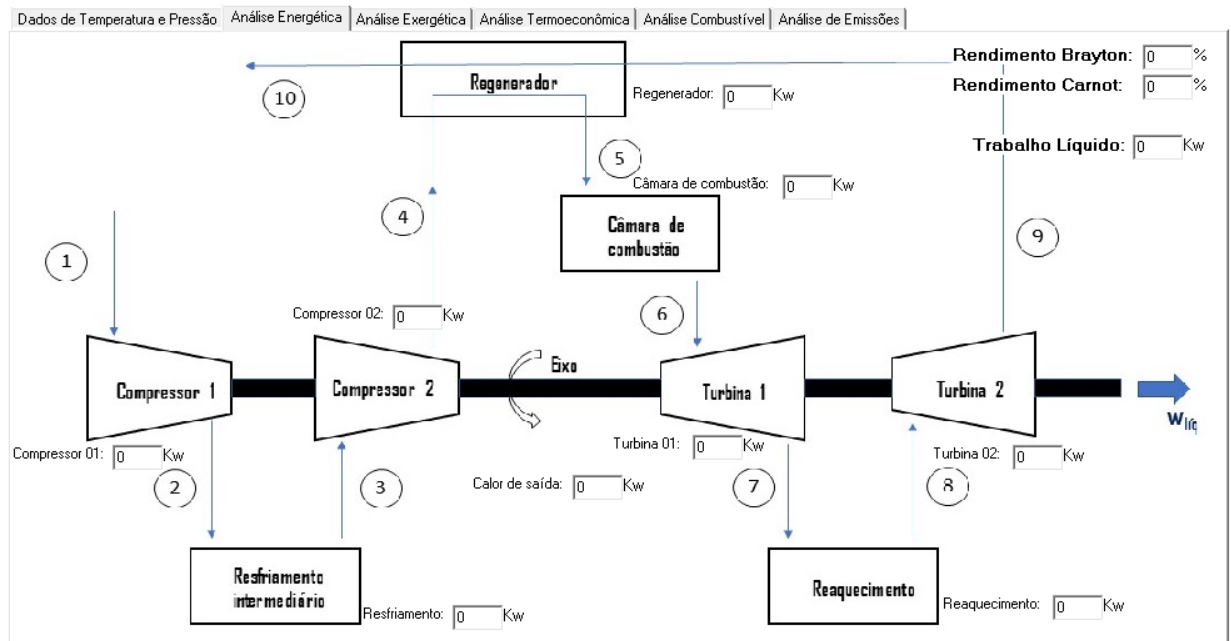
Figura 15. Aba de dados de temperatura e pressão.



Fonte: Autoria própria (2019).

Além dos citados, também serão calculados o Trabalho do compressor 01 – W_{c1} (KW), Calor do resfriador intermediário – Q_{resf} (KW), Trabalho do compressor 02 – W_{c2} (KW), Calor do regenerador – Q_{reg} (KW), Calor de entrada – Q_{in} (KW), Trabalho da turbina 01 – W_{t1} (KW), Calor do reaquecedor – Q_{reaq} (KW), Trabalho da turbina 02 – W_{t2} (KW), Calor rejeitado – Q_{out} (KW), o Eficiência térmica (%), Eficiência de Carnot (%) e Potência de geração (KW). Conforme figura 16.

Figura 16. Aba de análise energética.



Fonte: Autoria própria (2019).

Na aba denominada **Análise exergética** estará disposta uma figura representando o ciclo termodinâmico Brayton com resfriamento intermediário, reaquecedor e regenerador, composta por dois compressores, um resfriador intermediário, um regenerador, câmara de combustão, um reaquecedor e duas turbinas, onde serão calculados, com base nos dados de entrada, os seguintes dados: Exergia (KW), Exergia destruída – X_{des} (KW) e Entropia gerada – S_{ger} (W/K) em cada etapa de entrada e saída dos sistemas que compõem o ciclo. Além desses dados será calculado a Potência exergética (KW).

4.0 RESULTADOS

4.1. Software do ciclo brayton simples

Coforme necessidade de validação do programa elaborado de ciclo Brayton Simples, faz-se necessário obter um padrão comparativo com outras análises do mesmo tema.

Com isso, foi realizado inicialmente um comparativo entre o Software desenvolvido e os cálculos do software EES.

A tabela 2 ilustra os dados de entrada padrão para comparação e validação do software.

Tabela 2. Dados de entrada do Software ciclo Brayton Simples

DADOS DE ENTRADA		
Variáveis	Valores	Unidades
Temperatura Estado Morto	273	K
Temperatura Entrada	30	°C
Pressão entrada	100	Kpa
Temperatura Combustão	1127	°C
Pressão Combustão	900	Kpa
Rendimento Compressor	92	%
Rendimento Turbina	95	%
Rendimento Gerador	95	%
Rendimento Câmara combustão	90	%
Vazão Mássica	1	Kg/s
Vazão Combustível	0	Kg/s
Custo KWH	0	US\$

Fonte: Autoria própria (2019).

Levando aos seguintes resultados, como mostrado na tabela 3. Em que nessa tabela contem cinco colunas, os quais, a primeira enumera os dados termodinâmicos, a segunda a quantificação do software desenvolvido, a terceira os dados do software de comparação, a quarta o erro baseado na diferença dos dados do software e do software de comparação dividido pelo dado do software de comparação, e a quinta coluna a confiabilidade em percentual.

Tabela 3 Dados de resultados comparativos do ciclo Brayton Simples

Dados de resultados				
Dados	Software	EES	Erro	Confiabilidade
Temperatura 01	303	303	0,00	100,00
Pressão 01	100	100	0,00	100,00
Entalpia 01	303,11	303,5	0,13	99,87
Entropia 01	0,3167	5,715	99,99	-
Temperatura 02	590,64	585	-0,96	99,05
Pressão 02	900	900	0,00	100,00
Entalpia 02	591,91	592	-0,04	99,96
Entropia 02	2,39	5,756	99,96	-
Temperatura 03	1400	1400	0,00	100,00
Pressão 03	900	900	0,00	100,00
Entalpia 03	1404,5	1515	7,29	92,71
Entropia 03	9,025	6,734	-34,02	-
Temperatura 04	779,94	840	7,15	92,85
Pressão 04	100	100	0,00	100,00
Entalpia 04	781,97	866,6	9,77	90,23
Entropia 04	46,503	6,775	-586,39	-
Trabalho Compressor	288,79	288	-0,27	99,73
Trabalho Turbina	622,53	648	3,93	96,07
Calor Entrada	902,87	923	2,18	97,82
Calor Saida	478,85	0	0,00	-
Eficiência	41,07	39	-5,31	94,96
Exergia 01	1,51	1,54	1,95	98,05
Xdes Compressor	10,98	10,96	-0,18	99,82
Sger Compressor	0,04	0,04	0,00	100,00
Exergia 02	279,3	278,9	-0,14	99,86
Xdes Câmara Combustão	151	87,08	-73,40	57,67
Sger Câmara Combustão	0,22	0,32	31,25	68,75
Exergia 03	855	935	8,56	91,44
Xdes turbina	11,65	11,29	-3,19	96,91
Sger turbina	0,042	0,041	-2,44	97,62
Exergia 04	220,95	275	19,65	80,35
Eficiencia exergética	45,9		0,00	-
Confiabilidade Total				94,37

Fonte: Autoria própria (2019).

O programa mostrou uma confiabilidade de 94,37% quando comparado com o programa *EES*, estando em conformidade com o esperado.

Valores da exergia destruída e entropia gerada da câmara de combustão, se

mostram com uma confiabilidade muito abaixo do esperado, necessitando serem investigadas e corrigidas, pois apresentam um valor de confiabilidade menor que 85%, limite máximo estipulado.

4.2. Software do ciclo brayton com regeneração

Coforme necessidade de validação do programa elaborado de ciclo Brayton com regeneração, faz-se necessário obter um padrão comparativo com outras análises do mesmo tema.

Com isso, foi realizado inicialmente um comparativo entre o Software desenvolvido e os cálculos do software EES.

A tabela 4 ilustra os dados de entrada padrão para comparação e validação do software.

Tabela 4 Dados de entrada do Software ciclo Brayton com regeneração

DADOS DE ENTRADA		
Variáveis	Valores	Unidades
Temperatura Estado Morto	310	K
Temperatura Entrada	37	°C
Pressão entrada	100	Kpa
Temperatura Descarga	877	°C
Temperatura Combustão	1150	K
Pressão Combustão	700	Kpa
Rendimento Compressor	75	%
Rendimento Turbina	82	%
Rendimento Regenerador	65	%
Rendimento Gerador	100	%
Rendimento Câmara combustão	100	%
Vazão Mássica	1	Kg/s
Vazão Combustível	0	Kg/s
Custo KWH	0	US\$

Fonte: Autoria própria (2019).

Levando aos seguintes resultados, como mostrado na tabela 5. Em que nessa tabela contem cinco colunas, os quais, a primeira enumera os dados termodinâmicos, a segunda a quantificação do software desenvolvido, a terceira os dados do software de comparação, a quarta o erro baseado na diferença dos dados do software e do software de comparação dividido pelo dado do software de comparação, e a quinta

coluna a confiabilidade em percentual.

Tabela 5 Dados de resultados comparativos do ciclo Brayton com regeneração

Dados de resultados				
Dados	Software	EES	Erro	Confiabilidade
Temperatura 01	310	310	0,00	100,00
Pressão 01	100	100	0,00	100,00
Entalpia 01	310,14	310,5	0,12	99,88
Temperatura 02	617,35	611,1	-1,02	98,99
Pressão 02	700	700	0,00	100,00
Entalpia 02	618,72	618,67	-0,01	99,99
Temperatura 03	691,23	723,3	4,43	95,57
Pressão 03	700	700	0,00	100,00
Entalpia 03	703,88	738,7	4,71	95,29
Temperatura 04	1150	1150	0,00	100,00
Pressão 04	700	700	0,00	100,00
Entalpia 04	1153,5	1219	5,37	94,63
Temperatura 05	747,83	782,6	4,44	95,56
Pressão 05	100	100	0,00	100,00
Entalpia 05	749,73	803,2	6,66	93,34
Temperatura 06	654,43	671,9	2,60	97,40
Pressão 06	100	100	0,00	100,00
Entalpia 06	664,58	683,5	2,77	97,23
Trabalho Compressor	308,57	308,5	-0,02	99,98
Trabalho Turbina	403,77	416,2	2,99	97,01
Calor Entrada	449,62	480,6	6,45	93,55
Calor do Regenerador	85,15	119,8	28,92	71,08
Eficiência	21,17	22,41	5,86	94,47
Exergia 01	0	0	0,00	100,00
Xdes Compressor	41,48	41,67	0,46	99,54
Sger Compressor	0,1338	0,1235	-8,34	92,30
Exergia 02	267,09	266,8	-0,11	99,89
Xdes Regenerador	28	-	-	-
Sger Regenerador	0,2476	-	-	-
Exergia 03	317,02	330,8	4,17	95,83
Xdes Câmara Combustão	37,387	31,84	-18,84	84,14
Sger Câmara Combustão	0,1206	0,1027	-17,43	85,16
Exergia 04	608,06	650,1	6,47	93,53
Xdes Turbina	39,05	38,3	-1,96	98,08
Sger Turbina	0,1259	0,1235	-1,94	98,09
Exergia 05	165,23	195,6	15,53	84,47
Exergia 06	121,64	127	4,22	95,78
Confiabilidade Total				95,74

Fonte: Autoria própria (2019).

O programa mostrou uma confiabilidade de 95,74% quando comparado com o programa EES, estando em conformidade com o esperado.

Deve-se atentar os valores do calor do regenerador e da exergia destruída da câmara de combustão, que obtiveram valores de confiabilidade abaixo de 85%, devendo ser futuramente investigados e corrigidos.

4.3. Software do ciclo brayton com resfriamento intermediário, regeneração e reaquecimento

Coforme necessidade de validação do programa elaborado de ciclo Brayton com resfriamento intermediário, regeneração e reaquecimento, faz-se necessário obter um padrão comparativo com outras análises do mesmo tema. Com isso, foi realizado inicialmente um comparativo entre o Software desenvolvido e os cálculos do software EES.

A tabela 6 ilustra os dados de entrada padrão para comparação e validação do software.

Tabela 6 Dados de entrada do Software ciclo Brayton com resfriamento intermediário, regeneração e reaquecimento

DADOS DE ENTRADA		
Variáveis	Valores	Unidades
Temperatura Estado Morto	310	K
Temperatura Entrada	37	°C
Pressão entrada	100	Kpa
Pressão intermediária	300	Kpa
Temperatura Combustão	927	°C
Pressão Combustão	900	Kpa
Rendimento Compressor	75	%
Rendimento Turbina	85	%
Rendimento Regenerador	70	%
Rendimento Resfriador	100	%
Temperatura Resfriador	37	°C
Rendimento Gerador	100	%
Rendimento Câmara combustão	100	%
Rendimento Reaquecimento	100	%
Vazão Mássica	1	Kg/s
Vazão Combustível	0	Kg/s
Custo KWH	0	US\$

Fonte: Autoria própria (2019).

Levando aos seguintes resultados, como mostrado na tabela 7. Em que nessa tabela contem cinco colunas, os quais, a primeira enumera os dados termodinâmicos, a segunda a quantificação do software desenvolvido, a terceira os dados do software de comparação, a quarta o erro baseado na diferença dos dados do software e do software de comparação dividido pelo dado do software de comparação, e a quinta coluna a confiabilidade em percentual.

Tabela 7 Dados de resultados comparativos do ciclo Brayton ciclo Brayton com resfriamento intermediário, regeneração e reaquecimento

Dados de resultados				
Dados	Software	EES	Erro	Confiabilidade
Temperatura 01	310	310	0,00	100,00
Pressão 01	100	100	0,00	100,00
Entalpia 01	310,1	310,5	0,13	99,87
Temperatura 02	462,4	461,3	-0,24	100,24
Pressão 02	300	300	0,00	100,00
Entalpia 02	463,1	463,6	0,11	99,89
Temperatura 03	310	310	0,00	100,00
Pressão 03	300	300	0,00	100,00
Entalpia 03	310,1	310,5	0,13	99,87
Temperatura 04	462,4	461,3	-0,24	100,24
Pressão 04	900	900	0,00	100,00
Entalpia 04	463,1	463,6	0,11	99,89
Temperatura 05	786,3	710	-10,75	90,30
Pressão 05	900	900	0,00	100,00
Entalpia 05	788,4	724,3	-8,85	91,87
Temperatura 06	1200	1200	0,00	100,00
Pressão 06	900	900	0,00	100,00
Entalpia 06	1203	1278	5,87	94,13
Temperatura 07	925	956	3,24	96,76
Pressão 07	300	300	0,00	100,00
Entalpia 07	927,8	996,3	6,88	93,12
Temperatura 08	1200	1200	0,00	100,00
Pressão 08	300	300	0,00	100,00
Entalpia 08	1203	1278	5,87	94,13
Temperatura 09	925	812,6	-13,83	87,85
Pressão 09	100	100	0,00	100,00
Entalpia 09	927,8	836,1	-10,97	90,12
Temperatura 10	601,2	569,5	-5,57	94,73
Pressão 10	100	100	0,00	100,00
Entalpia 10	602,5	575,3	-4,73	95,49
Trabalho comp.1	153,1	153,1	0,00	100,00

Trabalho comp.2	153,1	153,1	0,00	100,00
Trabalho turb.1	275,87	281,7	2,07	97,93
Trabalho turb.2	275,87	441,9	37,57	62,43
Calor resfriador	153,1	153,1	0,00	100,00
Calor reaquecedor	275,87	281,7	2,07	97,93
Calor câmara	415,27	553,6	24,99	75,01
Calor regenerador	325,27	260,7	-24,77	80,15
Rendimento	35,5	38,2	7,07	92,93
Rendimento total				95,77

Fonte: Autoria própria (2019).

O programa mostrou uma confiabilidade de 95,77% quando comparado com o programa EES, estando em conformidade com o esperado, quando comparado apenas valores energéticos.

Os valores da confiabilidade do trabalho da turbina 2 e o calor do regenerador se mostram muito abaixo do exigido, 85%, necessário avaliar e corrigir os mesmos.

5.0 CONCLUSÃO

Em vista de todo o exposto nos tópicos de revisão bibliográfica, metodologia e resultados, o proposto projeto alcança, com ressalvas, o objetivo principal e geral do trabalho que é: *“Elaborar um software de simulação didática dos ciclos de potência a gás Brayton, de modo a determinar os principais dados termodinâmicos e exergéticos dos ciclos e dos dispositivos que os compõem”*.

O programa de ciclo Brayton Simples mostrou uma confiabilidade de 94,37% quando comparado os valores energéticos e exergéticos com o programa *EES*, estando em conformidade com o esperado.

O programa de ciclo Brayton com Regeneração mostrou uma confiabilidade de 95,74% quando comparado os valores energéticos e exergéticos com o programa *EES*, estando em conformidade com o esperado.

O programa de Ciclo Brayton com Resfriamento Intermediários, Regeneração e Reaquecimento mostrou uma confiabilidade de 95,77% quando comparado apenas os valores energéticos com o programa *EES*, estando em conformidade com o esperado.

O projeto ainda trás consigo uma notória significância devido a sua multidisciplinaridade, na sinergia entre conceitos da pedagogia, por meio das metodologias ativas, do universo da indústria 4.0, ferramentas computacionais, através de compiladores de programação orientada a evento, e os próprios conceitos da termodinâmica aplicada a engenharia mecânica, mais especificamente o estudos de termelétricas a gás natural utilizando turbinas a gás.

No entanto, esse trabalho se configura como um projeto inicial e, por isso, possui algumas limitações quanto a estética do programa, a precisão dos dados e o uso de aproximações numéricas.

Como proposta de trabalhos futuros, sugere-se o desenvolvimento de programas com uso de bancos de dados, de modo a diminuir expressivamente os erros de precisão. Outro tema que pode ser estudado é a elaboração de programas utilizando ciclos combinados e ciclos Rankine.

REFERÊNCIAS

ABREU, F. et al. Métodos, técnicas e ferramentas para o desenvolvimento de software educacional: um mapeamento sistemático. In: Simpósio Brasileiro de Informática na Educação, 23., 2012, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: UERJ, 2012.

ÁFIO, A. C. E. et al. Análise do conceito de tecnologia educacional em enfermagem aplicada ao paciente. Rev Rene, v. 15, n. 1, p. 158-165, jan./fev. 2014.

ALBUQUERQUE, D. B. L. As tecnologias da informação e comunicação e o professor de fisioterapia: interações para a construção de práticas pedagógicas. 2011. 176 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Educação) – Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias, Lisboa, 2011.

AZEVEDO, Arthur Vinicius Ribeiro de Freitas et al. Desenvolvimento de software de monitoramento em tempo real de propriedades termodinâmicas em sistemas de escoamento. Disponível em: <https://editorarealize.com.br/revistas/conapesc/trabalhos/TRABALHO_EV107_MD1_SA28_ID582_30052018194724.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2019.

BEANS, E. W. Comparative Thermodynamics for Brayton and Rankine Cycles, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, vol 112, pp 94-99, 1990.

BOROS, Laslo André Djevi; KRÄHENBÜHL, Maria Alvina. Desenvolvimento de softwares para verificação da consistência termodinâmica de dados de equilíbrio líquido-vapor de sistemas binários. Disponível em: <<https://www.prp.unicamp.br/pibic/congressos/ixcongresso/cdrom/pdfN/312.pdf>>. Acesso em: 21 nov. 2019.

BOYCE, M. P. Gas Turbine Engineering Handbook. 2ª. ed. Woburn: Gulf Professional Publishing, 2002.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. Termodinâmica. 5ª. ed. São Paulo: McGrawHill, 2006.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e

aplicações. 3ª. ed. Porto Alegre: AMGH, 2015.

CHIESA, P., LOZA, G., MACCHI, E., CONSONNI, S. An Assessment of the Thermodynamic Performance of Mixed Gas-Steam Cycles: Part A - Intercooled and Steam-Injected Cycles, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol 117, pp. 489-498, 1995.

CHENG, C.-Y.; CHEN, C.-K. Ecological optimization of an irreversible Brayton heat engine. *Journal of Physics D: Applied Physics*, v. 32, p. 350–357, 1999.

COVIZZI, U. D. S.; LOPES DE ANDRADE, P. F. Estratégia para o ensino do metabolismo dos carboidratos para o curso de farmácia, utilizando metodologia ativa de ensino. *Revista Brasileira de Ensino de Bioquímica e Biologia Molecular*, v.10, n. 1, p. 10-22, dez. 2012.

PINTO, Daniel Vieira. Análise comparativa do desempenho de turbocompressores veiculares com câmara de combustão tubular na microgeração de energia. 2017. 176 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2017.

GAETA, C.; MASETTO, M. Metodologias ativas e o processo de aprendizagem na perspectiva da inovação. Congresso internacional aprendizagem baseada em problemas, 1., 2010, São Paulo. Anais... São Paulo: PBL, 2010.

HUANG, F. F. Performance Evaluation of selected Combustion Gas Turbine Cogeneration Systems based on First and Second-law Analysis, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol 112, pp. 117-121, 1990.

KAM, W. Availability Analysis of Engineering Cycles, Thermodynamics and The Design Analysis and Improvement of Energy Systems, ASME 1995.

KHALIQ, A.; KUMAR, R. Finite-time heat-transfer analysis and ecological optimization of an endoreversible and optimization of an endoreversible and regenerative gas-turbine power-cycle. *Applied Energy*, v. 81, p. 73-84, 2005.

LEAL, Marcelo de Campos Franco et al. Desenvolvimento de um software para modelagem termodinâmica do equilíbrio líquido-vapor a baixa pressão. Disponível em: <<https://www.prp.unicamp.br/pibic/congressos/xcongresso/pdfN/159.pdf>>. Acesso em: 21 nov. 2019.

MIQUILIN, Michel Angelis; KRÄHENBÜHL, Maria Alvina. Desenvolvimento de software para cálculo de equilíbrio químico através da minimização da energia livre de Gibbs. Disponível em: <<https://www.prp.unicamp.br/pibic/congressos/xiicongresso/cdrom/pdfN/85.pdf>>. Acesso em: 21 nov. 2019.

MARINHO, E.S.J. Técnica de diagnóstico de falhas em motores a combustão interna utilizando aprendizagem de máquina. 2018. 158 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

MORAN, M., SCIUBBA, E. Exergy Analysis - Principles and Practice, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol 116, pp. 285-290, 1994.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. Princípios de Termodinâmica para Engenharia. 4ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

NIEMANN, F. A., BRANDOLI, F. Jean Piaget: um aporte teórico para o construtivismo e suas contribuições para o processo de ensino e aprendizagem da língua portuguesa e da matemática. In: Seminário de pesquisa em educação da região sul, 9., 2015, Caxias do Sul. Anais... Caxias do Sul: ANPED SUL, 2012.

OH, S.D., PANG, H.S., KIM, S.M., KWAK, H.Y. Exergy analysis for gas turbine cogeneration systems, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol 118, pp. 782-791, 1996.

PASQUALINI, E.; GIMENEZ-PASCHOAL, S. R. Uso de software educativo no ensino superior da área da saúde e avaliação dos efeitos para os alunos. RETEC, Ourinhos, v. 6, n. 1, p. 62-71, jan./jul. 2013.

PRESSMAN, R. S. Engenharia de software: uma abordagem profissional. 8. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

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

SILVA, Alexandre Marcial da; BARBOSA JÚNIOR, Elviro Pereira; BRAGA JÚNIOR, Wilson. Utilização do software ees no auxílio ao desenvolvimento de trabalhos acadêmicos e de projetos de P&D. 2009. Disponível em:

<<http://www.abenge.org.br/cobenge/arquivos/10/artigos/704.pdf>>. Acesso em: 21 nov. 2019.

SOUSA, Francisco José Rocha, A Geração Termelétrica: A Contribuição das Térmicas a Gás Natural Liquefeito, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2005. 131 p. Dissertação (Mestrado).

TOLMASQUIM, M. (coordenador), Geração de Energia Elétrica no Brasil, Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2005.

TUSIANI, M., SHEARER, G., LNG: A Nontechnical Guide, Editora Penwell, 1ª ed., 2007, 433p.

VALENTE, J. A. O computador na sociedade do conhecimento. Campinas: Unicamp, 1999.

VALERO, A., LOZANO, M., SERRA, L., TORRES, C. Application of the exergetic cost Theory to the CGAM Problem, Energy, The Intl. Journal, pp 1-17, 1994.