

BRUNO BRITTO MELO

**SIMULAÇÃO DOS CICLOS DE POTÊNCIA COMBINADOS DE BRAYTON E
RANKINE NO SOFTWARE COCO (CAPE OPEN TO CAPE OPEN)**

ARARAQUARA

2022

BRUNO BRITTO MELO

**SIMULAÇÃO DOS CICLOS DE POTÊNCIA COMBINADOS DE BRAYTON E
RANKINE NO SOFTWARE COCO (CAPE OPEN TO CAPE OPEN)**

Trabalho apresentado a Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química, sob a orientação do Prof. Dr. Gustavo Nakamura Alves Vieira.

ARARAQUARA

2022

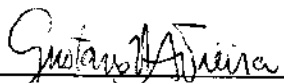
Bruno Britto Melo

**Simulação do Ciclo de Potência Combinado de Brayton e Rankine no Software
COCO (Cape Open to Cape Open)**

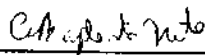
**Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Instituto de Química de
Araraquara da UNESP, como parte das
exigências para a obtenção do título em
Bacharel em Engenharia Química.**

Araraquara, 04 de agosto de 2022.

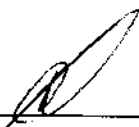
Banca examinadora:



Prof. Dr. Gustavo Nakamura Alves Vieira (orientador)
Instituto de Química de Araraquara – UNESP



Prof. Dr. Álvaro de Baptista Neto
Faculdade de Ciências Farmacêuticas – UNESP



Prof. Dr. Elias de Souza Monteiro Filho
Instituto de Química de Araraquara – UNESP

AGRADECIMENTOS

A minha família que sempre esteve ao meu lado me incentivando nos momentos difíceis, compartilhando comigo minhas conquistas e sendo apoio durante toda minha graduação.

A Bianca Rocha, minha amada namorada, que me acompanhou ao longo de toda a minha graduação e fora dela, me mobilizando a sempre buscar ser a melhor versão de mim mesmo.

Aos professores, pelos ensinamentos que me permitiram ter um melhor desempenho no meu processo de formação, de maneira especial ao Prof. Dr. Gustavo Nakamura Alves Vieira pela orientação e conselhos os quais me guiaram para que este trabalho fosse realizado.

Aos meus colegas de curso, com quem convivi durante todos esses anos agradeço pelo companheirismo e pela troca de experiências. Especialmente a Henrique Tempesta, João Paulo Garcez e Airton Dias pela amizade sincera desenvolvida e por compartilharem comigo toda essa jornada.

RESUMO

A mudança de paradigma causada pelas mudanças climáticas e pela crise dos apagões de 2001 fizeram o governo brasileiro repensar a sua matriz elétrica de geração. A partir dessa ruptura desencadeada na década de 2000 a participação das usinas termoelétricas a gás natural aumentou, substituindo o uso de outros combustíveis fósseis mais poluentes no entretempo. O presente trabalho tem o propósito de simular no software COCO (Cape Open to Cape Open) o funcionamento de uma usina termoelétrica a gás natural que usa o ciclo combinado de Brayton e Rankine para gerar eletricidade, bem como avaliar a sua eficiência térmica de acordo com as premissas de eficiências isentrópicas de equipamentos estabelecidas. Os resultados revelam uma eficiência térmica do ciclo combinado de 63,82%, de acordo com a literatura e com maior eficiência que o ciclo termodinâmico de Brayton, com 39,65%.

Palavras-chave: Simulação, Brayton, Rankine.

ABSTRACT

The paradigm shift caused by climate change and the 2001 blackout crisis made the Brazilian government rethink its electricity generation matrix. From this rupture triggered in the 2000s, the share of natural gas thermoelectric plants increased, replacing the use of other more polluting fossil fuels in the meantime. The present work aims to simulate in COCO software (Cape Open to Cape Open) the operation of a natural gas thermoelectric plant that uses the combined Brayton and Rankine cycle to generate electricity, as well as to evaluate its thermal efficiency according to the assumptions of isentropic equipment efficiencies established. The results reveal a combined cycle thermal efficiency of 63.82%, according to the literature and with greater efficiency than the Brayton thermodynamic cycle, with 39.65%.

Keywords: Simulation, Brayton, Rankine.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: População brasileira urbana e rural por década de 1950 a 2010	13
Figura 2: PIB brasileiro em trilhões de reais de 1996 a 2019	14
Figura 3: Consumo de eletricidade por consumidor de 1970 a 2020	15
Figura 4: Geração de eletricidade no Brasil de 1970 a 2020	18
Figura 5: Geração de eletricidade no Brasil por tipo de 1970 a 2020	19
Figura 6: Matriz Energética do Brasil no ano de 2020	20
Figura 7: Composição da geração térmica no Brasil por combustível (1970- 2020)	21
Figura 8: Esquema do Ciclo de Brayton	25
Figura 9: Diagrama T-S do ciclo ideal de Brayton	27
Figura 10: Diagrama T-S do ciclo ideal de Rankine	29
Figura 11: Ciclo combinado gás-vapor	30
Figura 12: Ciclo combinado simulado no COCO (Cape Open to Cape Open)	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição do gás natural usado na simulação	32
Tabela 2 - Composição do ar atmosférico usado na simulação	32
Tabela 3: Entalpias de combustão dos hidrocarbonetos presentes no gás natural	33
Tabela 4: Correntes de entrada e saída do compressor de ar	34
Tabela 5: Correntes de entrada e saída do misturador	35
Tabela 6: Correntes de entrada e saída do queimador	36
Tabela 7: Correntes de entrada e saída da turbina a gás	36
Tabela 8: Correntes de entrada e saída da caldeira de recuperação	37
Tabela 9: Correntes de entrada e saída da turbina a vapor	37
Tabela 10: Correntes de entrada e saída do condensador	38
Tabela 11: Correntes de entrada e saída da bomba de condensado	38
Tabela 12: Potências geradas pelas turbinas a gás e a vapor	39
Tabela 13: Potências consumidas pelas turbinas a gás e a vapor	39

NOMENCLATURA

Siglas

tep	Toneladas equivalentes de petróleo
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
PIB	Produto Interno Bruto
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
SI	Sistema Isolado
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrica

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1. PERFIL SOCIOECONÔMICO DO BRASIL.....	13
2.2. HISTÓRICO DA GERAÇÃO ELÉTRICA NO BRASIL	15
2.3. MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA	18
2.4. GERAÇÃO TÉRMICA	20
2.5. SISTEMAS ISOLADOS	23
2.6. O CICLO DE BRAYTON	24
2.7. O CICLO DE RANKINE.....	27
2.8. O CICLO COMBINADO	29
3. MATERIAIS E MÉTODOS	32
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1. COMPRESSOR DE AR	34
4.2. MISTURADOR (FICTÍCIO)	34
4.3. QUEIMADOR	35
4.4. TURBINA A GÁS.....	36
4.5. CALDEIRA DE RECUPERAÇÃO.....	37
4.6. TURBINA A VAPOR.....	37
4.7. CONDENSADOR.....	38
4.8. BOMBA DE CONDENSADO.....	38
4.9. CÁLCULO DE EFICIÊNCIA TÉRMICA DO CICLO COMBINADO	39
5. CONCLUSÃO	41

1. INTRODUÇÃO

Usinas Termoelétricas são instalações industriais dedicadas para a geração de energia elétrica a partir de uma fonte de calor. Essa origem pode ser um combustível fóssil ou uma fonte renovável: como exemplos da primeira classe tem-se o carvão, os óleos combustível e diesel, o gás natural ou o urânio enriquecido; o bagaço de cana e o licor negro de indústrias celulósicas são os arquétipos mais comuns da segunda categoria.

Os sistemas utilizados para aproveitar o calor das fontes escolhidas operam em ciclo, de forma que as transformações para a geração de energia ocorram em regime permanente e uma potência seja gerada. Esses ciclos termodinâmicos são chamados de ciclos de potência. Eles podem ser categorizados pela fase do fluido de trabalho que opera no ciclo. Nos ciclos a gás, esse fluido passa pelas transformações se mantendo sempre no estado gasoso; nos ciclos a vapor, o fluido existe na fase de vapor em algumas etapas e na fase de líquido em outras.

Outra classificação que pode ser feita em relação aos ciclos termodinâmicos é a de ciclos abertos ou fechados. No primeiro caso, o fluido de trabalho é renovado ao final de cada ciclo, em vez de circular novamente. No segundo, o fluido retorna à condição inicial em todo final de ciclo, recomeçando as transformações no próximo. (ÇENGEL 2013)

Para ciclos de potência a gás, o ciclo de Brayton é o mais utilizado. Porém, o calor rejeitado à atmosfera no final do ciclo poderia ser aproveitado para aumentar a eficiência do processo. Um ciclo combinado a gás de Brayton e a vapor de Rankine pode fazer uso desse calor que seria descartado e ter maior eficiência que os ciclos separados.

O objetivo desse trabalho é modelar no software COCO (Cape Open to Cape Open) o funcionamento de uma usina termoelétrica operando com os ciclos combinados de Brayton e Rankine, no qual os gases exauridos da turbina a gás do ciclo de Brayton têm o seu calor aproveitado para fazer aquecer o líquido do ciclo de Rankine. Além da modelagem deve-se também calcular a eficiência térmica do ciclo combinado.

O documento é composto por essa breve introdução ao tema, seguida de uma revisão bibliográfica. Nela se encontra um apanhado geral do Brasil e os seus

aspectos socioeconômicos relevantes no contexto de geração de eletricidade. Em seguida, o histórico de geração de energia elétrica no Brasil revela as políticas seguidas desde o século XX para a produção, transmissão e consumo desse insumo tão importante para a economia do país, bem como os planos para o futuro relacionados a transição energética e economia de baixo carbono. A revisão continua com a análise da matriz elétrica brasileira e o peso de cada tipo de geração no montante ao longo de uma série histórica. As tendências são identificadas e discutidas na mesma seção. Uma breve discussão sobre os Sistemas Isolados e o fornecimento a eles finaliza a revisão bibliográfica.

Nos materiais e métodos são apresentadas as premissas utilizadas para compor a simulação, como os modelos termodinâmicos e as equações de estado selecionadas, as composições do gás natural e do ar atmosférico, a temperatura e pressão ambientes e as eficiências isentrópicas consideradas para os equipamentos.

Os resultados e discussão exibem os resultados da simulação de acordo com as premissas escolhidas. Cada equipamento dos ciclos de potência tem as suas correntes descritas e os seus parâmetros revelados e discutidos e o cálculo da eficiência térmica do ciclo combinado mostra a porcentagem de calor aproveitado para a geração de eletricidade.

Finalmente, a conclusão retoma todos os aspectos do documento para sintetizar o desfecho da análise: se é possível aproveitar ainda mais o calor do gás natural ao empregar um ciclo combinado para gerar eletricidade.

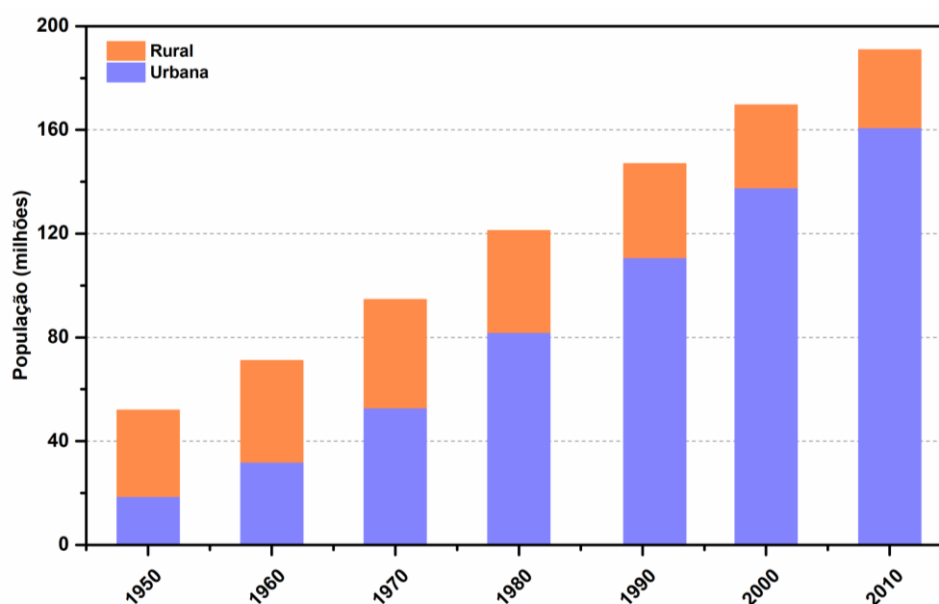
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. PERFIL SOCIOECONÔMICO DO BRASIL

O Brasil é um país localizado na América do Sul, com 8.510.295.914 km² de extensão. O seu tamanho o torna o quinto maior país do mundo, com uma população igualmente grande de 194.892.682 pessoas, de acordo com o censo de 2010. Em 2021, se estimou um aumento de 9,4% da população brasileira, atingindo 213.317.639 pessoas. (IBGE, 2022)

A evolução do crescimento populacional e da sua distribuição no território está na Figura 1 abaixo:

Figura 1: População brasileira urbana e rural por década de 1950 a 2010

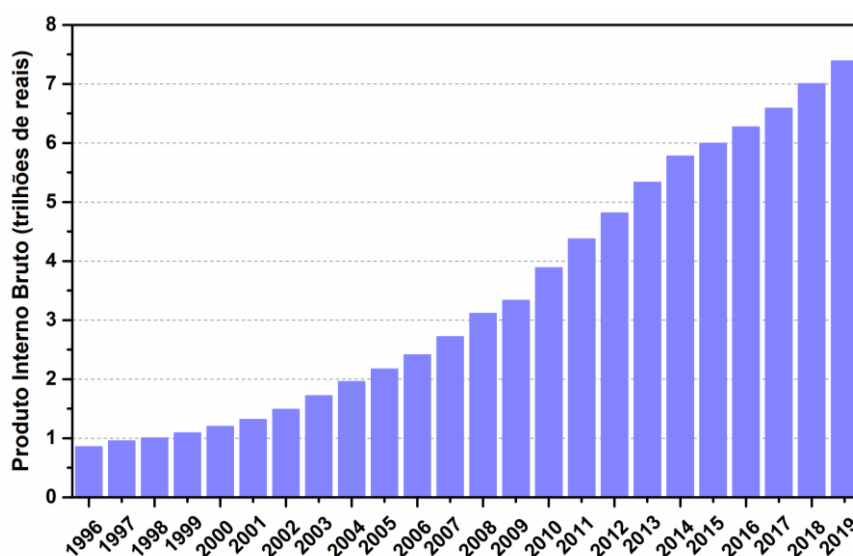


Fonte: IBGE, 2022; elaboração própria

Ao longo dos anos a densidade populacional também aumentou: de 6,10 pessoas por km² em 1950 para 22,43 pessoas por km² em 2010, evidenciando o processo de aglomeração em grandes centros urbanos descrita na Figura 1. (IBGE, 2022)

O Produto Interno Bruto (PIB) do Brasil o torna parte do G20, o grupo seletivo dos vinte países que mais geram riquezas no mundo. Em 2019 o PIB brasileiro foi de US\$ 1,839 trilhões. A evolução do PIB brasileiro ao longo das décadas, desde o início da série histórica está na Figura 2: (IBGE, 2022)

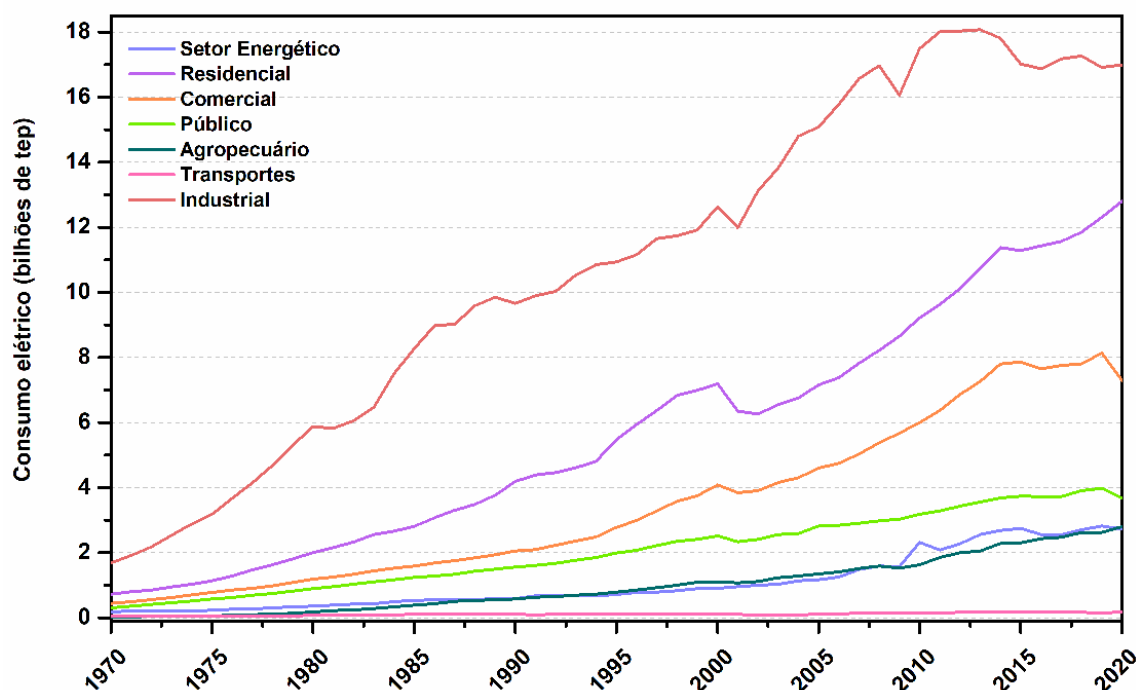
Figura 2: PIB brasileiro em trilhões de reais de 1996 a 2019



Fonte: IBGE, 2022; elaboração própria

A evolução do PIB brasileiro coincidiu com o aumento da demanda por energia elétrica para o país. Esse progresso, somado ao crescimento populacional, aumento da urbanização, ocupação do território e aumento no ritmo de aquisição de eletrodomésticos por parte da população gerou pressão de demanda por energia elétrica. (LAMPIS, 2022) A Figura 3 mostra uma série histórica do consumo de eletricidade dos diversos setores consumidores do insumo:

Figura 3: Consumo de eletricidade por consumidor de 1970 a 2020



Fonte: EPE, 2021; elaboração própria

A Figura 3 mostra o quão impactante são os pesos do consumo industrial e residencial de eletricidade, se comparados aos outros setores. Também é notável o aumento no gasto dessas instâncias durante as décadas de 1970 e 2000, que coincidem com os períodos de maior crescimento econômico no Brasil. (LAMPIS, 2022)

2.2. HISTÓRICO DA GERAÇÃO ELÉTRICA NO BRASIL

Para fornecer energia elétrica a uma população crescente e a uma economia que necessitava do insumo para gerar as riquezas, foi optado por transformar o setor elétrico num monopólio estatal a partir dos anos 1950. Até então, multinacionais atuavam no país, gerenciando todos os aspectos do setor. O crédito privado de empresas, principalmente a Light e a Amforp era o que financiava os projetos de energia elétrica no país. A centralização dos serviços de geração, transmissão e distribuição numa *holding* ocorreu como forma escolhida para garantir o aumento da oferta e o acesso à eletricidade a um país em desenvolvimento econômico. Nessa organização o estado controlava todos os aspectos produtivos do setor numa estrutura vertical e hierarquizada.

A situação se manteve até os anos 1990, quando uma pressão pela liberalização da economia e reestruturar o setor energético foi exercida pelo então presidente da

república, Fernando Henrique Cardoso (FHC). O processo de desmantelamento da máquina estatal ocorreu através de alterações de leis de concessões, abrindo o setor elétrico à iniciativa privada via privatizações. O objetivo era obter um novo arranjo com estrutura horizontal, onde vários *players* participariam dos três elementos do setor de eletricidade (geração, transmissão e distribuição).

No entanto, o que ocorreu nos anos seguintes foi aquém das expectativas: apesar de haver avanços na privatização nas três partes do setor, apenas a distribuição de energia atingiu as metas desejadas. Tanto a geração quanto a transmissão continuaram fortemente nas mãos do estado, seja por falta de interesse nas empresas sendo vendidas ou pela dificuldade em cindir grandes empresas de geração de eletricidade. Estima-se que no campo da distribuição a privatização tenha atingido cerca de 80% do setor, enquanto na geração a porcentagem foi de aproximadamente 20%. Junto aos fatores estratégicos do plano a deflagração do “apagão” brasileiro de 2001 agravou ainda mais a situação do setor e inviabilizou por completo as iniciativas de privatização.

As mudanças causadas pela crise no setor energético e pela mudança de governo nos anos seguintes resultaram na revisão das estratégias de fornecimento de eletricidade no país. Essa segunda reforma na esfera de energia elétrica brasileira passou a visar a redução dos custos de energia, a inclusão social através da universalização do acesso à eletricidade e a segurança energética. O estado voltou a ter papel concedente no setor elétrico, reassumindo o seu papel como planejador em médio e longo prazo para todos os aspectos de eletricidade. (LEME, 2009)

Desde então, após a sua criação em 2002, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) usou estimativas e projeções de crescimento do PIB em cenários otimistas, neutros e pessimistas para modelar a demanda por eletricidade no país. Quando se percebe a necessidade futura de geração, os empreendimentos que EPE julga serem necessários vão a leilão, para que empresas interessadas possam exercer o direito de produzir a eletricidade. (GOLDEMBERG, 2007)

Os momentos de escassez energética de 2001 revelaram ao governo a necessidade de diversificação e exploração de fontes complementares de energia para a geração elétrica. Para o Brasil, fez-se necessária a exploração de fontes além da hidrelétrica para garantir a segurança energética do país. (DE CARVALHO, 2022;

TEIXEIRA, 2021) As usinas termoeletricas se tornaram opções mais preferíveis para trazer essa segurança à matriz energética brasileira. Por causa da sua geração não ser afetada por regimes de chuvas abaixo do esperado como a geração hidráulica é, o seu papel complementar em períodos de pico de demanda foi aproveitado. (DE CARVALHO, 2022). O tipo de geração escolhida foi a termoeletrica, alimentada por óleo diesel ou óleo combustível. São usinas com ação de caráter emergencial, com baixa eficiência, alto nível de emissões de CO₂ e custo elevado de geração. Os contratos firmados têm vigência de até vinte anos e não há planos para renová-los. (TEIXEIRA, 2021)

Os desafios relacionados a transição energética de fontes de origem fóssil para fontes renováveis são – e serão – um desafio imenso para a humanidade do século XXI. O principal objetivo a ser atingido foi o definido durante a 21ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas, em 2015. A meta é manter o aquecimento médio da Terra em no máximo 2°C até o fim do século. Para se completar esse objetivo seria necessário que os países neutralizassem integralmente as emissões de CO₂ até 2050. O setor energético desses países, como agente emissor de gases de efeito estufa, necessitaria então passar por reformas na sua matriz de geração para cumprir as metas estabelecidas.

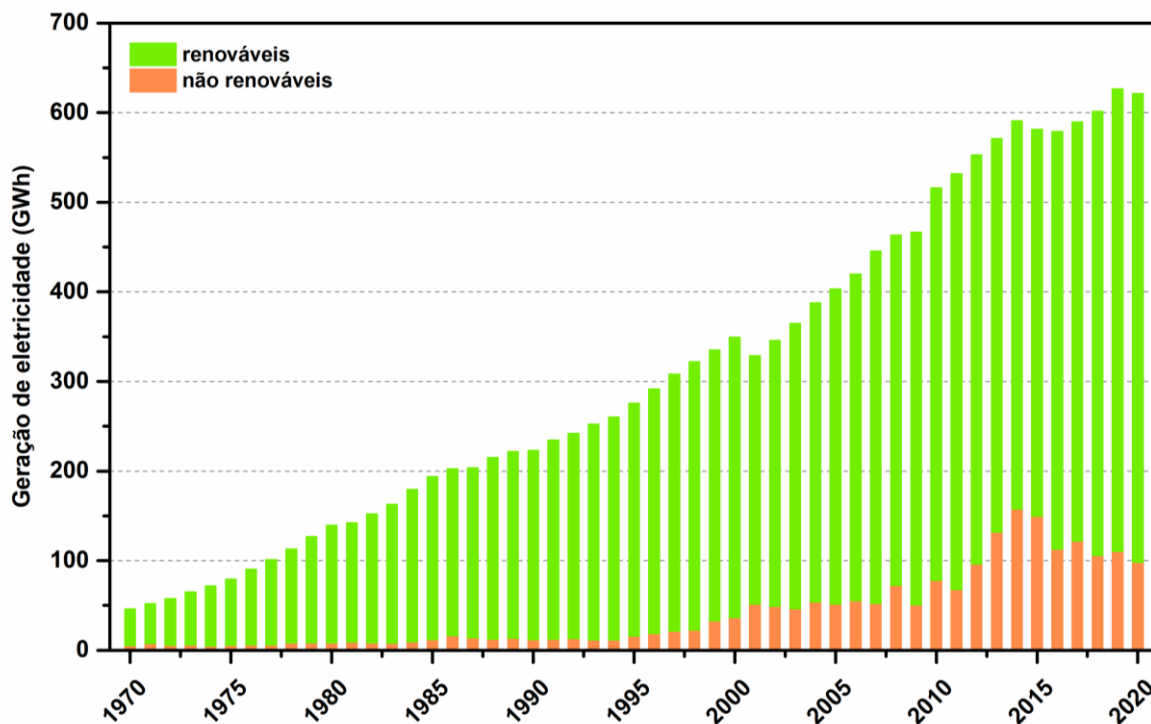
Esses governos, compromissados a meta estabelecida enfrentam hoje um dilema: por um lado, há a necessidade de redução das emissões de carbono para combater as mudanças climáticas. Por outro lado, a demanda energética necessária para sustentar as economias só aumentou e continua a aumentar. Os dois fatores culminam na preferência pelo uso de fontes energéticas limpas e renováveis, porém a geração de origem fóssil ainda é dominante na matriz energética global e deverá exercer papel central nas próximas décadas para suprir a demanda existente. O progresso científico e econômico infelizmente não ocorre de forma disruptiva e rápida o suficiente para que as tecnologias renováveis se desenvolvam e atinjam as metas de neutralidade de emissões por si só.

Portanto, os combustíveis fósseis serão indispensáveis para caminhar em rumo às economias neutras em carbono. Nesse contexto, o gás natural poderá exercer esse papel de ponte entre uma economia positiva em emissões de carbono para uma neutra. (TEIXEIRA, 2021)

2.3. MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA

O Brasil possui uma matriz de geração de energia elétrica predominantemente composta por fontes renováveis de energia, como mostra a Figura 4:

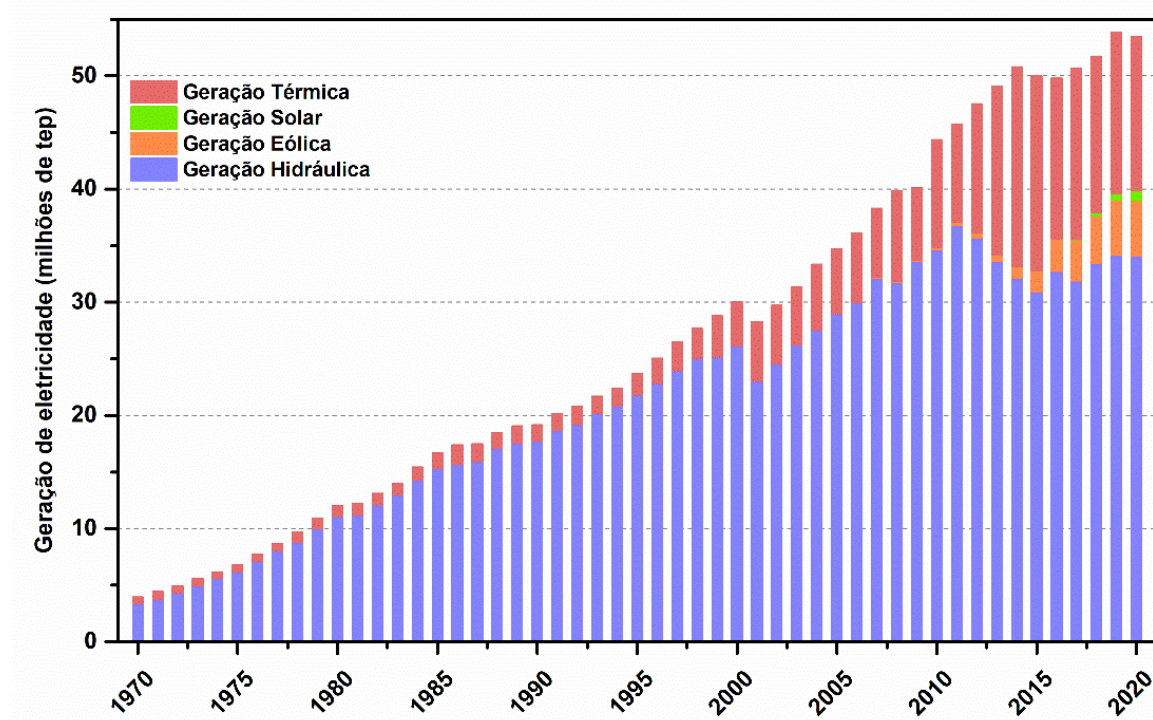
Figura 4: Geração de eletricidade no Brasil de 1970 a 2020



Fonte: EPE, 2021; elaboração própria

O Brasil sempre teve um espaço proeminente para a geração renovável de eletricidade. Isso se deve a geração hidrelétrica, a modalidade de maior peso entre as gerações renováveis durante toda a série histórica. A abundância de corpos hídricos no país com potencial de geração hidráulica tornou o país um dos maiores aproveitadores desse tipo de geração no mundo. (GOLDEMBERG, 2007). A Figura 5 abaixo mostra a mesma série histórica de geração de energia elétrica, desta vez dividida por tipo de geração:

Figura 5: Geração de eletricidade no Brasil por tipo de 1970 a 2020



Fonte: EPE, 2021; elaboração própria

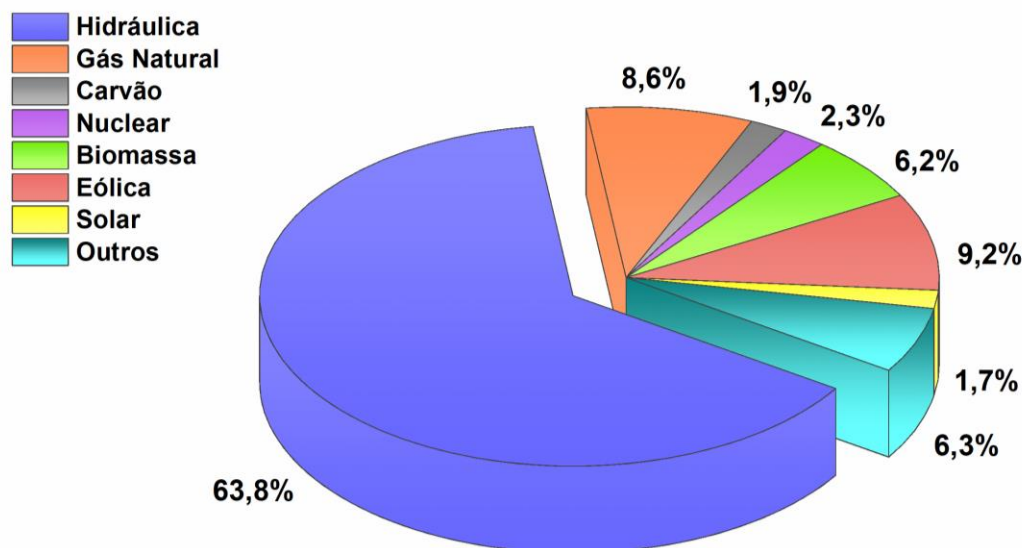
A geração hidrelétrica esteve no topo em termos de contribuição durante toda a série histórica, porém a partir da década de 2000 o seu peso diminuiu. (TEIXEIRA, 2021). Há duas causas para esse comportamento: a primeira é o avanço de outras fontes renováveis. A geração eólica ganhou espaço a partir da década de 2000 devido a criação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) em 2002, que incentivou a geração de eletricidade a partir dessa fonte. (GOLDEMBERG, 2007) A geração solar cresceu na matriz energética brasileira a partir da década de 2010. O Brasil, por possuir taxas de radiação solar relativamente altas e relativamente uniformes ao longo do seu território, possui um potencial alto de geração que está começando a ser aproveitado recentemente. (DA CUNHA, 2016)

A segunda razão é a mudança de foco após a crise energética de 2001. As instabilidades e riscos associados à sazonalidade da geração hidráulica fizeram o governo brasileiro mudar o foco para a geração elétrica no país para as usinas termelétricas, mais capazes de trazer segurança à matriz elétrica. O tipo de geração escolhida foi a termelétrica, movida por óleo diesel ou óleo combustível. (GOLDEMBERG, 2007; TEIXEIRA, 2021). Durante a década de 2000 houve um aumento no número de usinas termelétricas e consequentemente um aumento na

capacidade de geração térmica (GOLDEMBERG, 2007), possível de se notar na Figura 5.

De acordo com o Balanço Energético Nacional de 2021, que tem como ano base 2020, a matriz elétrica do Brasil é a da Figura 6:

Figura 6: Matriz Energética do Brasil no ano de 2020



Fonte: EPE, 2021; elaboração própria

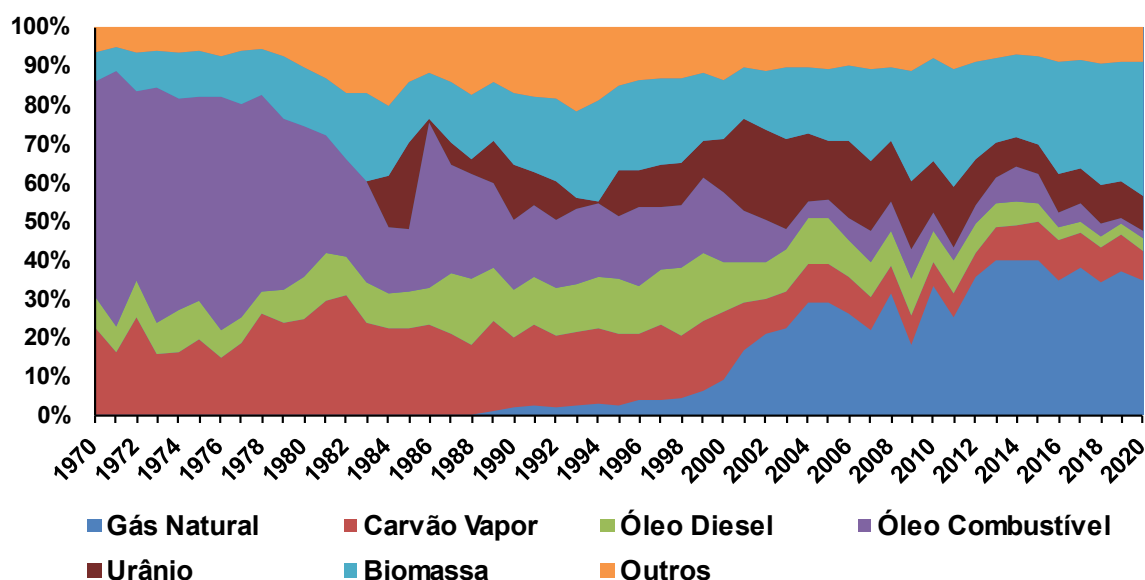
Hoje, a geração hidráulica compõe quase dois terços da geração total do país. Em seguida, a contribuição da geração térmica tem papel secundário na matriz brasileira, com aproximadamente 19% de participação. Ela é composta principalmente pelo uso de gás natural e biomassa como fontes de calor para gerar a eletricidade. A biomassa é um termo generalista que envolve vários tipos de combustíveis de origem renovável, com maior participação do bagaço de cana-de-açúcar, licor negro de indústrias de papel e celulose e carvão vegetal, respectivamente. (GOLDEMBERG, 2007). Além das duas fontes energéticas, o urânio para usinas nucleares e o carvão mineral também contribuem, mesmo que em menor escala, para os números da geração térmica. Por fim, com papel terciário na geração, as fontes renováveis eólica e solar contribuem com cerca de 11% para a geração de eletricidade nacional.

2.4. GERAÇÃO TÉRMICA

Apesar de a Figura 5 mostrar que a capacidade de geração e o espaço da geração térmica no Brasil ter aumentado ao longo das décadas, o tipo de combustível utilizado para alimentar as unidades geradoras mudou com o tempo. A Figura 7 mostra a

evolução do uso de combustíveis para a geração térmica ao longo das décadas, em porcentagem de participação.

Figura 7: Composição da geração térmica no Brasil por combustível (1970- 2020)



Fonte: EPE, 2021; elaboração própria

A participação de todos os combustíveis para usinas termoeletricas flutuou bastante na matriz elétrica devido a diversas razões econômicas e sociais ao longo das décadas, mas padrões gerais ainda podem ser identificados. O aproveitamento da biomassa como combustível renovável para geração não é recente, mas a sua contribuição aumentou desde o início da série histórica. Entre os combustíveis fósseis, o carvão, o óleo diesel e o óleo combustível cederam espaço ao gás natural. A mudança ocorreu por uma miríade de razões, mas dentre elas, as vantagens econômicas, ambientais e de segurança relacionadas a troca para o gás natural foram as principais nessa transição. (BONFIM, 2008)

O gás natural é definido como uma mistura de gases hidrocarbonetos compostos principalmente por metano, etano, propano e butano, podendo haver presença de outras substâncias. Ele pode ocorrer na natureza associado ou não ao petróleo bruto em reservatórios geológicos. Caso esteja, é considerado gás associado. Caso não haja petróleo ou água no reservatório, é considerado não-associado. (DA SILVA, 2021)

A segurança energética é imprescindível para o Brasil como um todo, permeando nas esferas econômica e social. Como já foi discutido, a sazonalidade da geração

hidráulica forçou a o governo brasileiro a agir na contramão da busca de fontes renováveis e neutras em carbono, buscando fontes fósseis, principalmente usinas movidas a carvão e óleo combustível. A confiabilidade e a estabilidade da geração elétrica no Brasil foram conquistadas em detrimento ao meio ambiente.

A troca da fonte de calor para o gás natural pode mitigar os impactos. O seu principal triunfo em relação aos outros combustíveis de origem fóssil é a sua taxa de emissões, medida por emissões por unidade de energia. Enquanto o gás natural emite cerca de 53kg de CO₂ para cada milhão de BTU produzido, o carvão e o petróleo emitem 95kg e 73kg, respectivamente. Mesmo os derivados de petróleo mais nobres como o óleo combustível, o gás liquefeito de petróleo, a gasolina e o óleo diesel possuem maiores taxas de emissões. A substituição dos outros combustíveis fósseis em favor do gás natural seria a oportunidade para diminuir as emissões de CO₂ para a atmosfera, visto que ainda há haver espaço ocupado por outras fontes fósseis na matriz elétrica brasileira, como mostram as figuras 6 e 7.

Outra vantagem adicional do uso de gás natural como combustível para geração elétrica é a sua queima limpa, se comparado aos outros combustíveis fósseis. O gás praticamente não emite material particulado fino, um grave causador de problemas respiratórios na população, ou compostos sulfurados, os causadores da chuva ácida. A única desvantagem do gás natural no comparativo é o maior teor de compostos nitrogenados poluentes (NO_x) nos gases de combustão. Esse problema, no entanto, pode ser contornado pelo uso de equipamentos mais modernos durante a geração, capazes de diminuir as taxas de emissão para níveis aceitos pelas legislações ambientais.

O uso do gás natural como combustível para a transição energética pode trazer a vantagem de diminuir as emissões de CO₂ e material particulado para a atmosfera, desde que sua função seja a de substituir outras gerações termoelétricas de origem fóssil com maiores taxas de emissão. Caso mais usinas termoelétricas a gás natural sejam inauguradas apenas para expandir a oferta de energia no país, não haverá queda nas emissões.

As gerações limpas e renováveis, que são o destino para atingir uma economia neutra em carbono têm pouca participação na geração elétrica atual e precisarão se tornar mais viáveis e presentes na matriz energética para se atingir a neutralidade em

carbono almejada. Até lá, o uso do gás natural para geração elétrica serve como uma ponte entre as duas situações, freando as emissões de carbono. (TEIXEIRA, 2021)

2.5. SISTEMAS ISOLADOS

Outro papel estratégico para o país que a geração a gás natural pode desempenhar é o atendimento a sistemas isolados. Segundo a EPE, “Sistemas isolados são sistemas elétricos de serviço público de distribuição de energia elétrica que, em sua configuração normal, não estejam eletricamente conectadas ao Sistema Interligado Nacional – SIN, por razões técnicas ou econômicas”.

O ciclo de planejamento de 2021, referente aos anos de 2018, 2019 e 2020 apontam há 251 sistemas isolados no Brasil, espalhados em oito estados e sendo atendidos por nove distribuidoras de energia.

O atendimento a essas comunidades isoladas do Sistema Interligado Nacional varia de desde comunidades pequenas com quinze habitantes a até cidades como Cruzeiro do Sul (AC) e Boa Vista (RR), com 89 mil e 436 mil habitantes, respectivamente.

A maior concentração dos sistemas isolados ocorre nos estados da Região Norte, ocorrendo ao longo das calhas dos rios da Amazônia, principalmente nos estados do Amazonas e Roraima. Para esses sistemas, o modal fluvial representa o principal meio de transporte para garantir o abastecimento das unidades geradoras. Os estados do Acre e Rondônia, no entanto apresentam poucas localidades com acesso exclusivamente fluvial. Outras regiões do país também possuem sistemas isolados, mas em quantidades menores, como Guariba no Mato Grosso e Fernando de Noronha no Pernambuco.

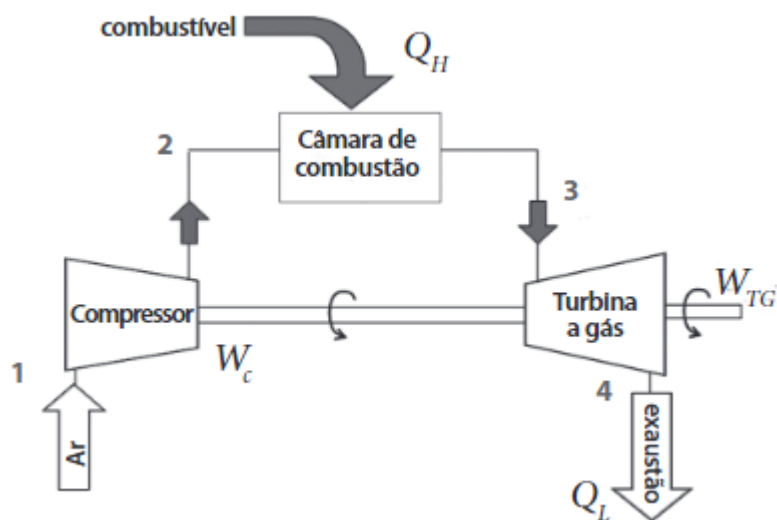
Nesses SI há a predominância da geração termelétrica a partir do óleo diesel (94,6%). Como papel secundário há a geração termelétrica por gás natural (4,3%) e biomassa (0,7%) e a geração hidrelétrica (0,4%). Portanto, o suprimento de energia elétrica a maioria dessas regiões depende do fornecimento do combustível às unidades geradoras. Como essa distribuição depende da navegabilidade dos rios nas regiões onde não há possibilidade de acesso além do modal fluvial, estiagens podem causar interrupção do fornecimento de energia elétrica. Para a maioria desses SI a única alternativa é dispor de tanques de armazenamento de combustível que garantam o funcionamento das unidades geradoras nos meses de seca (EPE, 2021).

Como forma proposta para gerar energia elétrica para esses sistemas isolados de forma que haja menos problemas de suprimento de combustíveis, a geração termelétrica a gás natural se mostra uma opção possível e economicamente mais viável que a geração a óleo diesel. A mudança em direção a essa fonte de energia mais vantajosa já ocorreu em alguns sistemas isolados do Estado do Amazonas: os municípios de Anamã, Anori, Caapiranga, Coari e Codajás já possuem usinas termoelétricas a gás natural, funcionando em ciclo combinado (Brayton e Rankine) alimentando os sistemas isolados dos respectivos municípios. O combustível é fornecido a essas UTEs por meio do gasoduto Urucu-Coari-Manaus. As termelétricas instaladas substituíram a geração a diesel anterior, diminuindo os custos relacionados a logística de suprir o combustível às unidades geradoras e ao custo de geração. Como vantagens associadas a essa substituição pode-se enumerar também o uso de um combustível com queima mais limpa, que não emite particulados e que necessita apenas do tratamento de NO_x nos gases de exaustão no caso de ultrapassar as legislações vigentes (BONFIM, 2008).

2.6. O CICLO DE BRAYTON

O ciclo de Brayton é composto por um compressor de ar, um queimador, onde nele ocorre a combustão e uma turbina de expansão. Comumente o compressor e a turbina estão ligados no mesmo eixo, de forma que o trabalho de eixo gasto pelo primeiro é fornecido pelo segundo. A Figura 8 mostra o esquema de funcionamento do ciclo:

Figura 8: Esquema do Ciclo de Brayton



Fonte: UBERTI (2015)

Por haver uma entrada e uma saída do ciclo, ele é considerado aberto. O ar atmosférico é admitido pelo compressor, onde tem a sua pressão e temperatura elevadas. De lá, ele é encaminhado ao queimador, onde ele reage com o combustível admitido e o calor da combustão é liberado. Os gases de combustão quentes e pressurizados são dirigidos à turbina a gás, que faz uso da pressão do fluido para gerar trabalho de eixo. Dela saem os gases a pressão atmosférica, mas ainda a temperaturas elevadas.

Apesar de ser aberto, o funcionamento do ciclo pode ser modelado em quatro etapas distintas como se fosse fechado. Num ciclo ideal, onde os processos são internamente reversíveis as quatro partes seriam:

- 1 – 2: Compressão isentrópica no compressor;
- 2 – 3: Fornecimento de calor a pressão constante no queimador;
- 3 – 4: Expansão isentrópica na turbina de expansão;
- 4 – 1: Rejeição de calor a pressão constante, ao invés de exaustão dos gases.

Caso a análise seja feita num ciclo real, as etapas do ciclo são as mesmas, apesar de haver perdas associadas a irreversibilidades durante todo o processo. As operações não isentrópicas do compressor e da turbina geram perdas de eficiência no processo, se comparadas com o ciclo ideal. (ÇENGEL, 2013)

O ciclo é realizado de em regime permanente, de forma que o balanço de energia é dado como

$$(q_{ENTRA} - q_{SAI}) + (w_{ENTRA} - w_{SAI}) = h_{SAI} - h_{ENTRA} \quad (1)$$

onde q_{ENTRA} é o calor fornecido à turbina, q_{SAI} é o calor rejeitado por ela, w_{ENTRA} é o trabalho consumido pelo compressor, w_{SAI} é o trabalho produzido pela turbina, h_{ENTRA} é a entalpia dos gases que entram na turbina e h_{SAI} é a entalpia dos gases exauridos. O calor transferido respectivamente para e do fluido de trabalho é:

$$q_{ENTRA} = h_3 - h_2 = c_p(T_3 - T_2) \quad (2)$$

$$q_{SAI} = h_4 - h_1 = c_p(T_4 - T_1) \quad (3)$$

Usando as equações acima é possível reescrever a eficiência térmica do ciclo:

$$\eta_{BRAYTON} = \frac{w_{SAI} - w_{ENTRA}}{q_{ENTRA}} = 1 - \frac{q_{SAI}}{q_{ENTRA}} = 1 - \frac{c_p(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{T_2(T_3/T_2 - 1)} \quad (4)$$

Idealmente, a compressão e a expansão do ar são isentrópicas e os processos de aquecimento e resfriamento são isobáricos. Dessa forma, $P_2 = P_3$ e $P_4 = P_1$:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(k-1)/k} = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{(k-1)/k} = \frac{T_3}{T_4} \quad (5)$$

Onde k é a razão entre calores específicos do fluido de trabalho, definida como:

$$k = \frac{c_p}{c_v} \quad (6)$$

Ao aplicar a relação anterior na equação de eficiência térmica do ciclo de Brayton, temos:

$$\eta_{BRAYTON} = 1 - \frac{1}{r_p^{(k-1)/k}} \quad (7)$$

O termo r_p se refere à razão de pressão entre a entrada na turbina a gás e a pressão na sua saída:

$$r_p = \frac{P_2}{P_1} \quad (8)$$

Dessa forma, a eficiência térmica do ciclo depende da razão entre calores específicos do fluido de trabalho e da razão das pressões de entrada e saída na

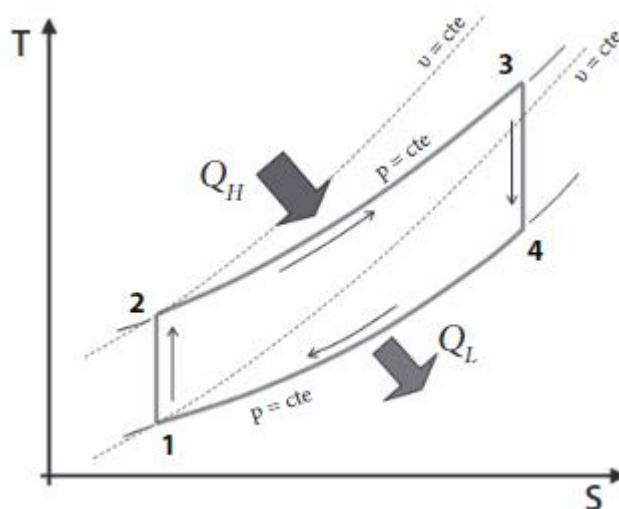
turbina. A razão entre calores específicos para o ar é de aproximadamente 1,4; diferentes fluidos de trabalho terão diferentes valores. Maiores razões de pressão geram eficiências maiores, porém há limitações: conforme se aumentam as pressões de operação, as temperaturas também acompanham esse aumento. Logo, a razão de pressão é limitada pela temperatura máxima que os equipamentos podem suportar. Comumente se usam razões de pressão de 11 a 16 para turbinas a gás.

O ar usado nas turbinas possui duas funções além de ser usado como fluido de trabalho: ele fornece o oxidante necessário para que ocorra a combustão e a geração de calor, e serve também como refrigerante para os equipamentos. Como forma de manter a operação segura e dentro das temperaturas admitidas pelos equipamentos, um excesso de ar é admitido para o ciclo. Razões entre as massas de ar e combustível de 50 ou mais são usadas para esse fim. (ÇENGEL, 2013)

Os fatores, ao serem combinados, fazem com que a eficiência do ciclo de Brayton seja relativamente baixa, de cerca de 30 a 40% para as unidades geradoras atuais. (UBERTI 2015)

Quando representado num diagrama de temperatura por entropia ($T - S$), a área fechada no ciclo representa o trabalho líquido gerado, conforme a Figura 9:

Figura 9: Diagrama T-S do ciclo ideal de Brayton



Fonte: UBERTI (2015)

2.7. O CICLO DE RANKINE

O ciclo de Rankine é um ciclo de potência a vapor. Comumente se usa água como fluido de trabalho e essa foi a escolha para a simulação. Ele é composto por uma

bomba pressurizadora de líquido, uma caldeira, uma turbina de expansão de vapor e um condensador. Para o ciclo ideal, temos quatro etapas:

- 1 – 2: Compressão isentrópica na bomba;
- 2 – 3: Fornecimento de calor a uma pressão constante na caldeira;
- 3 – 4: Expansão Isentrópica na turbina;
- 4 – 1: Rejeição de calor a pressão constante no condensador.

A compressão ocorre na bomba de maneira isentrópica para a água líquida e saturada. Ela ganha pressão e temperatura, mas diferentemente do caso anterior de compressão do ar atmosférico, o aumento de temperatura é pequeno. Por estar no estado líquido durante a etapa de compressão (e não um gasoso, como o ar), a água se aproxima da incompressibilidade, mas ainda há uma diminuição no seu volume específico. Essa diminuição causa a mudança de temperatura.

O líquido pressurizado é encaminhado à caldeira, onde nela recebe o calor de uma fonte. O calor transferido ao líquido pode vir da combustão de combustíveis fósseis ou biomassa, de reações nucleares ou de gases de queima saídos de uma turbina a gás. Na caldeira a água muda de fase e superaquece a pressão constante, se transformando em vapor superaquecido.

Esse vapor superaquecido entra na turbina a vapor de expansão, onde tem a sua pressão exaurida conforme faz o eixo da turbina girar. Um gerador acoplado ao mesmo eixo gera a eletricidade desejada enquanto o vapor sai saturado da turbina a pressão e temperatura abaixo da entrada.

O vapor saturado passa pelo condensador antes de continuar o ciclo. Nele há a mudança de fase para líquido saturado ao fazê-lo rejeitar calor para outra fonte, comumente a água de algum corpo hídrico. Por fim, a água pode recomeçar o ciclo ao ser encaminhada para a bomba pressurizadora.

Idealmente, nas etapas do ciclo não há irreversibilidades que causem diminuição das eficiências dos equipamentos. No entanto, quando se transportam os processos para a operação real, as ineficiências são inevitáveis. Os processos de compressão e expansão não são isentrópicos, apesar de haver esforços para aproximar as operações para a ideal.

Assim como no ciclo de Brayton, o ciclo de Rankine ocorre em regime permanente. O balanço de energia é dado por

$$(q_{\text{ENTRA}} - q_{\text{SAI}}) + (w_{\text{ENTRA}} - w_{\text{SAI}}) = h_{\text{SAI}} - h_{\text{ENTRA}} \quad (9)$$

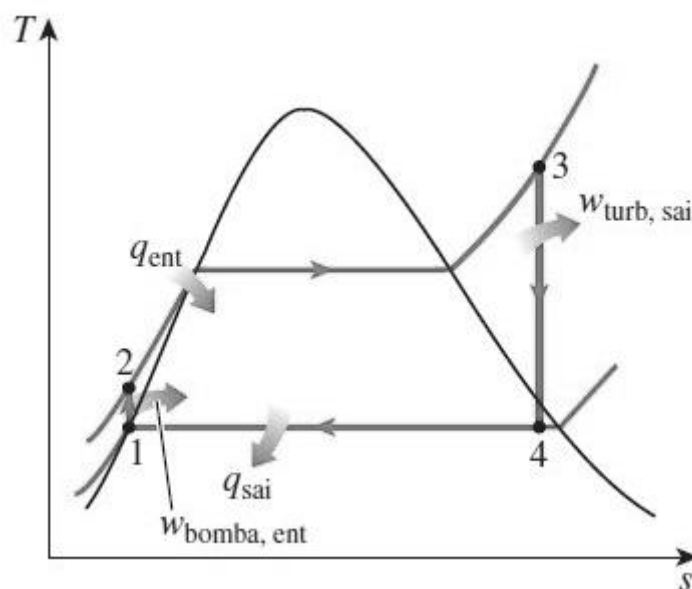
onde q_{ENTRA} é o calor fornecido à turbina, q_{SAI} é o calor rejeitado por ela, w_{ENTRA} é o trabalho consumido pela bomba, w_{SAI} é o trabalho produzido pela turbina, h_{ENTRA} é a entalpia do vapor que entra na turbina e h_{SAI} é a entalpia do vapor saturado. Não há trabalho sendo exercido na caldeira nem no condensador, logo tem-se que $w_{\text{CALDEIRA}} = w_{\text{COND}} = 0$. Assim, $w_{\text{LIQ}} = w_{\text{TURBINA}} - w_{\text{BOMBA}} = q_{\text{ENTRA}} - q_{\text{SAI}}$.

A eficiência térmica do ciclo é expressa como:

$$\eta_{\text{RANKINE}} = \frac{w_{\text{SAI}} - w_{\text{ENTRA}}}{q_{\text{ENTRA}}} = 1 - \frac{q_{\text{SAI}}}{q_{\text{ENTRA}}} \quad (10)$$

Quando representado num diagrama de temperatura por entropia (T – S), a área fechada do ciclo representa o trabalho líquido gerado, conforme a Figura 10:

Figura 10: Diagrama T-S do ciclo ideal de Rankine



Fonte: ÇENGEL (2013)

2.8. O CICLO COMBINADO

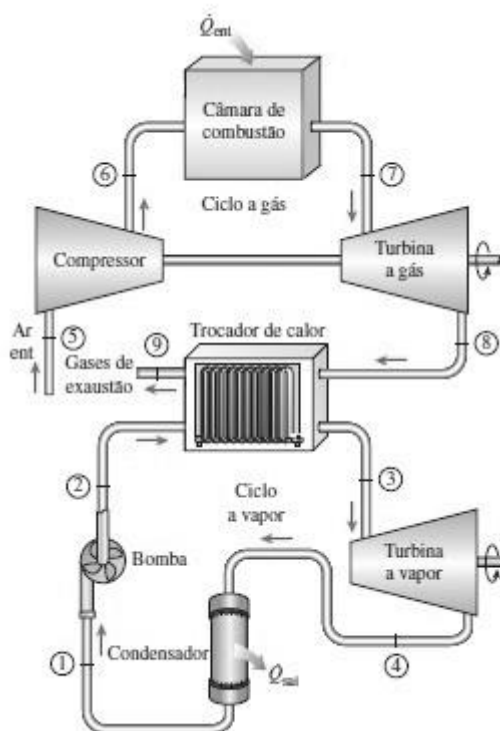
Os dois ciclos termodinâmicos podem ser combinados, de forma que a junção resultante tenha uma eficiência superior à dos ciclos separados. Essa possibilidade de cogeração existe pois os ciclos de turbinas a gás operam a temperaturas mais altas que os ciclos de turbinas a vapor. Enquanto a temperatura máxima de entrada numa

turbina a vapor seja de cerca de 620°C , a temperatura de entrada em turbinas a gás costuma ser de aproximadamente 1400°C .

A principal fraqueza do ciclo de Brayton é que apesar da temperatura alta de entrada na turbina tornar possíveis maiores eficiências térmicas, a temperatura de saída do equipamento também é relativamente alta – cerca de 500°C –, nulificando a vantagem do ciclo. Para se aproveitar essa corrente ainda com carga térmica considerável, o ciclo combinado de Brayton e Rankine pode ser empregado.

Como a temperatura dos gases que seriam lançados à atmosfera coincide com a faixa de temperatura que as turbinas a vapor operam, o uso desses gases para aquecer o líquido saturado do ciclo de Rankine é uma das formas de aproveitar esse calor que seria descartado. Assim, a Figura 11 representa o ciclo combinado:

Figura 11: Ciclo combinado gás-vapor



Fonte: ÇENGEL (2013)

Assim como nos ciclos separados, há um equipamento pressurizador – no caso um compressor para o ar atmosférico e uma bomba para a água –, um equipamento que age fornecendo calor (a câmara de combustão e a caldeira de recuperação), uma turbina de expansão e um equipamento usado para rejeitar calor (a caldeira de recuperação para o ciclo a gás e o condensador para o ciclo a vapor) do fluido de

trabalho. No entanto, a caldeira de recuperação já citada age como uma “ponte” entre os ciclos: ela funciona tanto como fornecedora de calor para a água quanto como mecanismo de rejeição do calor dos gases de combustão. O resultado da aplicação dessa tecnologia é uma eficiência térmica acima de 60% para o ciclo combinado. (ÇENGEL, 2013)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para que os parâmetros discutidos nos dois ciclos termodinâmicos possam ser levados em conta no dimensionamento de uma unidade geradora, a simulação dos processos foi escolhida como forma de apresentar resultados fidedignos à realidade. O software em questão usado para realizar as simulações dos ciclos termodinâmicos foi o COCO (Cape-Open to Cape-Open), na versão 3.5. Nele um ciclo combinado, com uma turbina a gás e uma turbina a vapor foi modelado.

Os modelos termodinâmicos escolhidos para a simulação foram os de EOS (Equation of State) para a definição de frações molares em misturas líquido-vapor e a equação de estado de Soave-Redlich-Kwong para a cálculos com gases.

O combustível escolhido para o ciclo de Brayton foi o gás natural, com o ar atmosférico como fluido de trabalho. O ciclo de Rankine teve a água como fluido de trabalho. As composições do gás natural e do ar atmosférico foram escolhidas de acordo com a literatura e estão nas Tabela 1 e Tabela 2: (FIOREZE, 2013; DE ABREU, 2003)

Tabela 1 - Composição do gás natural usado na simulação

Componente	%
Metano	90,8
Etano	6,1
Propano	1,2
CO ₂	0,5
N ₂	1,4

Fonte: FIOREZE, 2013; DE ABREU, 2003

Tabela 2 - Composição do ar atmosférico usado na simulação

Componente	%
O ₂	21,0
N ₂	78,0
Argônio	1,0

Fonte: FIOREZE, 2013

As temperaturas e pressões ambientes escolhidas foram de 25°C e 1,01325 bar, respectivamente. Assim, a corrente de ar atmosférico admitido pela unidade geradora tem essas propriedades.

Foi premissada a operação da unidade geradora em estado permanente, com alimentação de uma corrente de 80 ton/h de gás natural a 25°C e pressurizado a 12 bar. Esse é o combustível que fornece o calor para que o ciclo de Brayton ocorra. A água de resfriamento para o condensador do ciclo de Rankine é admitida a 25°C e deverá sair do condensador a no máximo 35°C. Os gases de exaustão devem sair da caldeira de recuperação a 90°C.

As reações de queima dos hidrocarbonetos presentes no gás natural foram modeladas num reator de conversão, onde a reação foi simulada consumiu todo o metano, etano e propano presentes na mistura. As entalpias de combustão foram retiradas da literatura de (PROSEN, 1945), conforme a Tabela 3.

Tabela 3: Entalpias de combustão dos hidrocarbonetos presentes no gás natural

Hidrocarboneto	Metano (CH₄)	Etano (C₂H₆)	Propano (C₃H₈)
Entalpia de Combustão (kJ/mol)	-890,35	-1559,90	-2204,00

Fonte: PROSEN, 1945

As eficiências isentrópicas do compressor e da turbina a gás foram definidas em 86%, de acordo com a literatura (BOEIRA, 2010). Para a turbina a vapor e a bomba foram consideradas eficiências isentrópicas de 80% e 90%, respectivamente também de acordo com a literatura (PANOSSO, 2003).

Como forma de garantir que as transferências de calor ocorram de forma satisfatória e com áreas de troca razoáveis, uma temperatura de aproximação entre as correntes quente e fria de 10°C foi escolhida nos trocadores de calor modelados. Além disso, não se considerou queda de pressão nos equipamentos de transferência de calor, como queimador, caldeira de recuperação e condensador.

equipamento imaginário une as duas correntes de entrada, realizando um balanço de massa e energia para definir as condições da corrente de saída. As linhas de entrada e de saída do equipamento, bem como as suas composições estão na Tabela 5.

Tabela 5: Correntes de entrada e saída do misturador

Corrente	Ar Pressurizado	Gás Natural	Mistura p/ Queima
Vazão (ton/h)	4000	80	4080
Pressão (bar abs)	12,159	12,159	12,159
Temperatura (°C)	374,26	25	357,39
O ₂ (% mol)	21,0	0,0	20,3
N ₂ (% mol)	78,0	1,4	75,6
Argônio (% mol)	1,0	0,0	1,0
CO ₂ (% mol)	0,0	0,5	0,0
Metano (% mol)	0,0	90,8	2,9
Etano (% mol)	0,0	6,1	0,2
Propano (% mol)	0,0	1,2	0,0

Fonte: Elaboração própria

4.3. QUEIMADOR

A combustão do gás natural gera o calor necessário para a operação do ciclo combinado. As reações químicas de combustão dos hidrocarbonetos foram simuladas em um reator de conversão, dadas as suas irreversibilidades. Para os balanços de massa e energia foram consideradas conversões de 100% para o metano, etano e propano e as entalpias de combustão da Tabela 3. Os resultados obtidos estão na Tabela 6.

Tabela 6: Correntes de entrada e saída do queimador

Corrente	Mistura p/ Queima	Gases de Combustão
Vazão (ton/h)	4080	4080
Pressão (bar abs)	12,159	12,159
Temperatura (°C)	357,39	1140,58
H ₂ O (% mol)	0,0	6,5
O ₂ (% mol)	20,3	13,6
N ₂ (% mol)	75,6	75,4
Argônio (% mol)	1,0	1,0
CO ₂ (% mol)	0,0	3,4
Metano (% mol)	2,9	0,0
Etano (% mol)	0,2	0,0
Propano (% mol)	0,0	0,0

Fonte: Elaboração própria

Nas condições propostas o queimador insere 895 MW na unidade geradora através da queima dos hidrocarbonetos. Esse calor será aproveitado para gerar potência nas turbinas a gás e a vapor.

4.4. TURBINA A GÁS

Os gases pressurizados e aquecidos entram na turbina e a fazem girar, gerando potência no eixo. A turbina foi modelada para rejeitar os gases exauridos com a mesma composição da entrada e a 1,01 bar abs, a pressão atmosférica considerada. Os resultados dos balanços de massa e energia para o equipamento estão na Tabela 7.

Tabela 7: Correntes de entrada e saída da turbina a gás

Corrente	Gases de Combustão	Gases Exauridos
Vazão (ton/h)	4080	4080
Pressão (bar abs)	12,159	1,013
Temperatura (°C)	1140,58	596,70

Fonte: Elaboração própria

Dadas as correntes de entrada e a eficiência isentrópica de 86% considerada, a operação da turbina a gás produz um trabalho de eixo de 754,39 MW.

4.5. CALDEIRA DE RECUPERAÇÃO

A caldeira de recuperação age retirando calor da corrente de gases saídos da turbina a gás e os fornecendo ao líquido saturado do ciclo de Rankine. As características das correntes que trocam calor no equipamento estão expostas na Tabela 8.

Tabela 8: Correntes de entrada e saída da caldeira de recuperação

Lado	Quente		Frio	
Corrente	Gases Exauridos	Gases de Chaminé	Condensado Pressurizado	Vapor Superaquecido
Vazão (ton/h)	4080		680	
Pressão (bar abs)	1,013	1,013	165	165
Temperatura (°C)	596,70	89,85	35,89	579,71

Fonte: Elaboração própria

A vazão de água para compor o ciclo de Rankine foi escolhida de forma que ela consiga resfriar os gases de combustão até a temperatura premissada de 90°C num arranjo em contracorrente do trocador de calor. A vazão de água a ser vaporizada no trocador foi determinada para que a temperatura de aproximação dos lados do trocador não fosse menor que 10°C.

Nas condições estabelecidas de troca de calor, há uma potência de 632,92 MW sendo transferida da corrente de gases do ciclo de Brayton para a corrente de líquido do ciclo de Rankine.

4.6. TURBINA A VAPOR

A turbina a vapor recebe o fluido superaquecido e pressurizado e o rejeita a uma pressão menor e saturado. Para que toda a maior parte possível do calor ofertado a turbina seja aproveitado, a pressão de saída do vapor escolhida foi de 0,09 bar abs, de forma que a corrente de vapor saturado tenha uma temperatura possível de ser resfriada no condensador seguindo a premissa de temperatura de aproximação de no mínimo 10°C. Os resultados obtidos estão na Tabela 9.

Tabela 9: Correntes de entrada e saída da turbina a vapor

Corrente	Vapor Superaquecido	Vapor Saturado
Vazão (ton/h)	680	680
Pressão (bar abs)	165	0,09
Temperatura (°C)	579,71	43,76

Fonte: Elaboração própria

Dada a eficiência isentrópica de 80% para o equipamento, a geração de potência de eixo observada é de 219,19 MW.

4.7. CONDENSADOR

O condensador rejeita calor do ciclo, condensando o vapor saturado em líquido próximo da saturação. O líquido que recebe esse calor foi simulado como água. Respeitando as premissas de temperatura de aproximação de água e a temperatura máxima da água a ser retornada e a operação a pressão constante, temos os resultados da Tabela 10:

Tabela 10: Correntes de entrada e saída do condensador

Lado	Quente		Frio	
Corrente	Vapor Saturado	Condensado	Água Resfr. Fria	Água Resfr. Quente
Vazão (ton/h)		680		37000
Pressão (bar abs)	0,09	0,09	-	-
Temperatura (°C)	43,76	35	25,00	34,71

Fonte: Elaboração própria

O condensador especificado da forma acima rejeita 417,21 MW do ciclo para a água de resfriamento.

4.8. BOMBA DE CONDENSADO

A bomba de condensado pressuriza o líquido saturado de volta para a pressão de entrada na turbina a vapor. Os parâmetros da turbina simulada estão na Tabela 11.

O compressor de ar atmosférico age fornecendo pressão e temperatura ao fluido conforme usa o trabalho recebido. A razão de pressão escolhida para o equipamento foi de 12, logo a pressão de saída será doze vezes maior que a de entrada. As correntes de entrada e saída do equipamento estão na Tabela 11.

Tabela 11: Correntes de entrada e saída da bomba de condensado

Corrente	Condensado	Condensado Pressurizado
Vazão (ton/h)	680	680
Pressão (bar abs)	0,09	165
Temperatura (°C)	35	35,89

Fonte: Elaboração própria

Nas condições especificadas acima, a bomba consome uma potência de 3,38 MW para manter o ciclo de Rankine funcionando.

4.9. CÁLCULO DE EFICIÊNCIA TÉRMICA DO CICLO COMBINADO

O ciclo combinado pode ter a sua eficiência térmica calculada pela seguinte forma:

$$\eta_{\text{CICLO COMB.}} = \frac{\dot{W}_{\text{LÍQUIDO}}}{\dot{Q}_{\text{ENTRA}}} = \frac{\dot{W}_{\text{SAI}} - \dot{W}_{\text{ENTRA}}}{\dot{Q}_{\text{ENTRA}}} \quad (11)$$

sendo a eficiência térmica do ciclo igual a razão entre a potência líquida gerada e a taxa de transferência de calor que entra na unidade geradora. A potência líquida é a diferença entre as potências geradas pelas turbinas e as potências consumidas pelo compressor e pela bomba. Esses dados estão nas Tabela 12 e Tabela 13 abaixo.

Tabela 12: Potências geradas pelas turbinas a gás e a vapor

Equipamento	Turbina a gás	Turbina a vapor
Potência Gerada (MW)	754,39	219,19

Fonte: Elaboração própria

Tabela 13: Potências consumidas pelas turbinas a gás e a vapor

Equipamento	Compressor de Ar	Bomba de Condensado
Potência Consumida (MW)	399,49	3,48

Fonte: Elaboração própria

Somando as potências geradas e subtraindo as potências consumidas para manter os ciclos funcionando, tem-se a potência líquida do ciclo combinado de 570,61 MW.

O calor que entra no sistema pode ser calculado a partir da diferença de entalpia entre as correntes de mistura para queima e os gases de combustão, antes e depois do queimador respectivamente. Como há um excesso de ar de cinquenta vezes a massa de gás natural sendo alimentado no sistema, é possível aproximar as duas correntes como ar atmosférico. Usando também a consideração de gás ideal para que o c_p do ar seja constante, temos:

$$\dot{Q}_{\text{ENTRA}} = \dot{Q}_{\text{ar}} \times c_{p_{\text{ar}}} \times (T_2 - T_1) \quad (12)$$

onde temos na fórmula a vazão do ar, o calor específico a pressão constante do ar e a diferença entre as temperaturas do ar após e antes da combustão,

respectivamente. Inserindo os dados já disponíveis, tem-se que a taxa de calor que entra nos ciclos é:

$$\dot{q}_{ENTRA} = 1133,33 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 1008,4 \frac{\text{J}}{\text{kg} \times ^\circ\text{C}} \times (1140,58 - 357,39)^\circ\text{C} = 895,07 \text{ MW} \quad (13)$$

Finalmente, calculando a razão entre as quantidades, obtém-se a eficiência térmica do ciclo combinado:

$$\eta_{\text{CICLO COMBINADO}} = \frac{\dot{w}_{\text{LÍQUIDO}}}{\dot{q}_{ENTRA}} = \frac{570,61 \text{ MW}}{895,07 \text{ MW}} = 63,82\% \quad (14)$$

Para efeito de comparação, o mesmo cálculo pode ser feito para o ciclo simples de Brayton, onde os gases de combustão quentes são diretamente rejeitados para a atmosfera:

$$\eta_{\text{CICLO BRAYTON}} = \frac{\dot{w}_{\text{LÍQUIDO}}}{\dot{q}_{ENTRA}} = \frac{754,39 \text{ MW} - 399,49 \text{ MW}}{895,07 \text{ MW}} = 39,65\% \quad (15)$$

A eficiência térmica obtida se mantém entre o intervalo relatado para usinas termelétricas operando com o ciclo simples de Brayton, de acordo com (UBERTI, 2015) O aproveitamento do calor que seria descartado à atmosfera gera um ganho de eficiência notável, quando se comparam os resultados entre os ciclos combinado e simples de Brayton: mais de vinte por cento de diferença através da aplicação de outro ciclo termodinâmico.

A eficiência térmica do ciclo combinado possui um valor dentro do esperado para esse tipo de geração, de acordo com a literatura por (ÇENGEL 2013). Mesmo assim, há espaço para aprimoramentos no processo que aumentariam ainda mais a eficiência da unidade geradora que não foram exploradas nesse estudo: a compressão do ar atmosférico em duas etapas com resfriamento intermediário, o reaquecimento da corrente de vapor para retorno à turbina a vapor e o exaurimento do vapor a ponto de haver uma proporção pequena de líquido saturado na saída da turbina são exemplos de modificações que podem ser aplicadas ao ciclo combinado base e que aprimorariam ainda mais a eficiência energética do processo.

5. CONCLUSÃO

O emprego de usinas termoeletricas a gás natural no Brasil é necessário devido a uma série de fatores estratégicos. Esses motivos envolvem a segurança energética que o tipo de usina traz ao país, o fornecimento de energia a comunidades isoladas do Sistema Interligado Nacional e a substituição do uso de outros combustíveis fósseis mais poluentes para a geração termoeletrica.

Não importando se o motivo do uso do gás natural para geração de eletricidade é para o complemento da geração de fontes hidráulicas, o abastecimento de sistemas isolados ou o combate às mudanças climáticas, o aproveitamento máximo do calor que a combustão do gás natural gera é essencial. Nesse contexto o uso de ciclos combinados se mostrou como uma ótima oportunidade para aumentar a eficiência térmica do ciclo de Brayton original ao aproveitar um calor que seria descartado à atmosfera e de uma forma que pouco impacta o ciclo original.

O ciclo combinado pode ser especialmente aplicado em usinas termoeletricas a gás natural que ainda não tenham aplicadas esse tipo de tecnologia.

A inovação de ciclos combinados pode ser aprimorada ainda mais ao inserir nele modificações que aproveitem ainda mais o calor do combustível queimado, como turbinas de múltiplos estágios para os dois ciclos e compressão em mais de um estágio e resfriamento intermediário do ar atmosférico. Essas alterações provavelmente irão fazer a eficiência térmica do ciclo combinado aumentar ainda mais.

REFERÊNCIAS

BOEIRA, Wagner da Silva. Análise do comportamento de uma turbina a gás operando com combustão enriquecida com oxigênio. 2010.

BONFIM, Marcelo dos Santos. **Considerações sobre a utilização do gás natural na geração de energia elétrica em Municípios da Região Amazônica**. 2008. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

Coordenação de Contas Nacionais, e Coordenação de População e Indicadores Sociais. IBGE, 2012. Disponível em: <<http://serieestatisticas.ibge.gov.br/series.aspx?no=12&op=0&vcodigo=ST18&t=produto-interno-brutobrvalores-constantas-1995>>. Acesso em: 03 abril 2022.

ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. **Termodinâmica**. 7ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

DA CUNHA KEMERICH, Pedro Daniel et al. Paradigmas da energia solar no Brasil e no mundo. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, p. 241-247, 2016

DA SILVA, Lucas Velloso Oliveira; DE ORNELLAS, Sérgio Allan Barbosa; DE SOUZA FERREIRA, Geraldo. Expectativas para o futuro do gás natural no Brasil: a abertura do mercado brasileiro de gás e seus efeitos Expectations for the future of natural gas in Brazil: the opening of the Brazilian gas market and its effects. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 10, p. 95517-95529, 2021.

DE ABREU, Percy Louzada; MARTINEZ, José Antônio. **Gás Natural: o combustível do novo milênio**. Plural Comunicação, 2003.

DE CARVALHO, Wallace Terra; VENDRAMETTO, Oduvaldo. Nova matriz de gás natural no Brasil: novas fronteiras, estímulo da oferta e desafios. **Exacta**, 2022.

Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional Interativo**. 2022. Disponível em: <http://shinyepe.brazilsouth.cloudapp.azure.com:3838/ben/>. Acesso em: 01 jun. 2022.

Empresa de Pesquisa Energética. **Planejamento do atendimento aos sistemas isolados. Horizonte 2022 a 2026 – Ciclo 2021**. 2021. Disponível em:

<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/planejamento-dos-sistemas-isolados-ciclo-2021>. Acesso em: 17 maio 2022.

FIGLIARELLI, Mariele et al. Gás natural: potencialidades de utilização no Brasil. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 10, n. 10, p. 2251-2265, 2013.

GOLDEMBERG, José; LUCON, Oswaldo. Energia e meio ambiente no Brasil. **Estudos avançados**, v. 21, p. 7-20, 2007.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Banco de Tabelas Estatísticas - SIDRA**. 2022. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/home/pms/brasil>. Acesso em: 19 jun. 2022.

LAMPIS, Andrea et al. Dossier de Energia 2022. Brasil: um foco no setor elétrico.

LEME, Alessandro André. A reforma do setor elétrico no Brasil, Argentina e México: contrastes e perspectivas em debate. **Revista de Sociologia e Política**, v. 17, p. 97-121, 2009.

Operador Nacional do Sistema Elétrico. Perguntas e respostas. 2021. Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/conhecimento/perguntas-e-respostas>. Acesso em: 23 junho 2022.

PANOSSO, Giancarlo Cerutti. Métodos de simulação para ciclos de Rankine. 2003.

PROSEN, Edward J.; ROSSINI, Frederick D. Heats of combustion and formation of the paraffin hydrocarbons at 25-degrees-c. **Journal of Research of the National Bureau of Standards**, v. 34, n. 3, p. 263-269, 1945.

UBERTI, Vinícius André; INDRUSIAK, Maria Luiza Sperb. Modelagem e estudo de rendimento termodinâmico de ciclos combinados de geração termelétrica. **Revista Liberato**, v. 16, n. 25, p. 7-20, 2015.