

**Avaliação de desempenho de usina termelétrica operando com cogeração de energia****Performance evaluation of a thermal power plant operating with cogeneration power**

DOI:10.34117/bjdv6n10-641

Recebimento dos originais:08/09/2020

Aceitação para publicação:28/10/2020

**Luiz Antônio de Oliveira Chaves**

Doutorando em Engenharia Química na Universidade Estadual do Rio de Janeiro  
Universidade Federal Fluminense  
Instituto de Ciência e Tecnologia (ICT/UFF)  
Endereço:Rua Recife, s/n, Jardim Bela Vista, Rio das Ostras, RJ 28895-532  
E-mail: luizchaves@gmail.com

**Lucas Neves de Almeida**

Graduando em Engenharia de Produção na Universidade Federal Fluminense  
Universidade Federal Fluminense  
Endereço:Avenida dos Trabalhadores, 179 - Verolme, Angra dos Reis - RJ  
E-mail: neveslucas07@hotmail.com

**Johny Soares Corrêa**

Mestre em Engenharia Química pela Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Universidade Estácio de Sá  
Endereço:Avenida Presidente Vargas, 2560 - Cidade Nova, Rio de Janeiro - RJ  
E-mail: johquim@yahoo.com.br

**Hugo Monstans Thurler dos Santos**

Graduando em Engenharia de Petróleo pela Universidade Estácio de Sá  
Universidade Estácio de Sá  
Endereço;Avenida Presidente Vargas, 2560 - Cidade Nova, Rio de Janeiro - RJ  
E-mail: hugo.thurler@gmail.com

**Mateus Carvalho Amaral**

Doutor em Engenharia e Ciência dos Materiais pela Universidade Estadual Norte Fluminense  
Universidade Federal Fluminense  
Instituto de Ciência e Tecnologia (ICT/UFF)  
Endereço: Rua Recife, s/n, Jardim Bela Vista, Rio das Ostras, RJ 28895-532  
E-mail: mateus\_amaral@id.uff.br

**Luis Gustavo Zelaya Cruz**

Doutor em Engenharia de Transportes pela Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Universidade Federal Fluminense  
Endereço:Rua Passo da Pátria, 156, São Domingos, Niterói – RJ, CEP: 24210-240  
E-mail: lgustavozelaya@gmail.com

**Stefhany Ramine Alves Nunes Da Silva**

Engenheira de Petróleo

Universidade Estácio de Sá

Pós-Graduanda em Engenharia Ambiental na Universidade Candido Mendes  
Endereço: Rua Conde De Bonfim, 743 - Tijuca, Rio de Janeiro - RJ, 20530-000

E-mail: stefhany.raminy@hotmail.com

**RESUMO**

Diferentes tecnologias são atualmente utilizadas para produzir energia, mas conforme o tipo de combustível utilizado a preocupação da poluição ambiental demanda diferentes ações para buscar alternativas viáveis de produção. Dentre as opções, as usinas termelétricas (UTE) podem admitir diferentes configurações de sistemas termodinâmicos cíclicos para recuperação de calor cedido pelo sistema, amplificando a disponibilidade de eletricidade. Quanto ao insumo, o gás natural (GN) apresenta menores efeitos ambientais quando comparado aos outros combustíveis fósseis, gerando menor taxa de emissão de poluentes, além de possuir menor custo associado. Desta forma, o atual artigo tenciona constatar a garantia da eficiência energética de uma UTE de 1772 MW de potência e avaliar as ponderações ambientais de emissão de gás carbônico (CO<sub>2</sub>), por meio de indicadores-chave de desempenho (KPI) e do estudo comparativo do projeto da planta modelo com dados da literatura. A metodologia do estudo de caso foi utilizada com aplicação da modelagem termodinâmica computacional em regime permanente por dois modelos analíticos para construção da planta de processo, contemplando o conjunto de equações de conservação de massa e energia. Os resultados obtidos demonstraram eficiência ao admitir o ciclo em cogeração constatando um desvio percentual na faixa de 0,1% a 3,2 % entre a planta original e os dois modelos propostos. Adicionalmente, os resultados apresentam uma diminuição de até 79,2 % da emissão de CO<sub>2</sub> quando confrontado a outras unidades geradoras de energia intensivas em carbono, gerando menor grau de impacto ambiental.

**Palavras-chave:** Usina termelétrica, Gás natural, Ciclo termodinâmico, Indicador chave de desempenho, Eficiência energética.

**ABSTRACT**

Different technologies are currently used to produce energy, but depending on the type of fuel used, the concern with environmental pollution demands different actions to seek viable production alternatives. Among the options, thermoelectric plants (TPPs) may admit different configurations of cyclic thermodynamic systems for recovery of heat ceded by the system, amplifying the availability of electricity. As for the input, natural gas (NG) presents lower environmental effects when compared to other fossil fuels, generating lower pollutant emission rates, besides having lower associated costs. Thus, the current article intends to verify the guarantee of energy efficiency of a 1772 MW power plant and evaluate the environmental weightings of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions, through key performance indicators (KPI) and the comparative study of the model plant project with data from the literature. The methodology of the case study was used with the application of computational thermodynamic modeling in permanent regime by two analytical models for the construction of the process plant, contemplating the set of conservation equations of mass and energy. The results obtained demonstrated efficiency when admitting the cycle in cogeneration, noting a percentage deviation in the range of 0.1% to 3.2% between the original plant and the two proposed models. Additionally, the results show a decrease of up to 79.2% in CO<sub>2</sub> emissions when compared to other carbon intensive energy generating units, generating a lower degree of environmental impact.

**Keywords:** Thermal power plant, Natural gas, Thermodynamic cycle, Key performance indicator, Energy efficiency.

## 1 INTRODUÇÃO

O crescimento exponencial da população nacional demandou diversos setores de produção de energia a buscar alternativas tecnológicas para atender a matriz energética, sem que afete seu armazenamento e transmissão (SALPINGIDOUA et al., 2017; WITTENBURG et al., 2019). Um dos modelos adotados é a geração de energia por centrais hidrelétricas que constitui a principal fonte, mas por questões meteorológicas, conforme a instabilidade no regime de chuvas e períodos de baixa pluviosidade, implica em novos planos estratégicos em virtude da demanda e disponibilidade para diferentes áreas geográficas (BELYAKOV, 2019; IBRAHIM & RAHMAN, 2012).

Outro modelo é baseado na queima de hidrocarbonetos e carvão. A implementação dessas unidades provoca forte impacto ao meio ambiente, os efeitos ambientais são negativos devido a degradação da localidade, alteração do ecossistema e poluição, e dessa forma são alvos de críticas. Mesmo com esses problemas, é adotado como o principal insumo da política brasileira os derivados de petróleo oriundos das operações de processamento de hidrocarbonetos e de gás natural (GN) (LEAL et al., 2019).

Desta forma, o GN apresenta influência na indústria e na matriz energética e pelo potencial de conversão energética e menor risco ambiental é alvo de pesquisas. Este insumo apresenta menor taxa de emissão de gás carbônico (CO<sub>2</sub>) quando comparado a outros combustíveis fósseis como o carvão, óleo combustível e diesel. Com isto, sua utilização em plantas com configurações inteligentes é notória para manter uma produtividade contínua e reduzir a emissão de gases de efeito estufa (GEE) (RAJESH & KISHORE, 2018; BĂLĂNESCU & HOMUTESCU, 2019).

Por essa razão, a geração de energia por meio do GN é adotada em usinas termelétricas (UTE) nos sistemas termomecânicos cíclicos adaptados para a conversão energética. A tecnologia abrange mecanismos como reatores de combustão onde o recurso primário reage com a entrada de ar comprimido, e turbinas a gás em que é obtido a potência do ciclo termodinâmico. Contudo, um ciclo termodinâmico operando de forma isolada emite calor pelos gases de exaustão suficiente para reutilização para acionar outros sistemas, e com isto aumentar a conversão de energia, diminuir custos financeiros com a injeção do GN e conseqüentemente amenizar a emissão de GEE. No entanto, é preciso projetar uma configuração inteligente da planta de processo (MOHAMMED et al., 2017; SHAMSHIRGARAN et al., 2016).

Dentre as configurações cabíveis na unidade, a integração de dois ciclos termodinâmicos em um único eixo (*single shaft*) com recuperação de calor (*Heat Recovery Steam Generation - HRSG*) favorece o rendimento do combustível, pois a energia de combustão produzida pelo sistema acresce na conversão da potência líquida gerada. Desse modo, a integração de ciclos termodinâmicos é descrita como ciclo combinado (CC), reconhecido e implementado na indústria por sua ampliação pela cogeração de energia e menor emissão de GEE ao comparar à um ciclo isolado. Esse tipo de projeto promove com resultados normalizados promove uma produção eficiente da energia e também menor impacto ambiental (MOIOLI & PELLEGRINI, 2020; YUAN-HU et al., 2019; NAKOMCIC-SMARAGDAKIS et al., 2014).

Portanto, ao admitir um sistema CC em uma unidade cogeneradora, as avaliações de métricas ambientais e operacionais são fatores relevantes atribuídos na gestão da unidade para uma constatação da eficiência energética e sustentabilidade ambiental. Dessa forma, os indicadores-chave de desempenho (do inglês, *Key Performance Indicator - KPI*) auxiliam no gerenciamento da planta de processo, pois demonstram parâmetros para análise da rentabilidade, viabilidade econômica e do potencial impacto ambiental (GABBAR & ZIDAN, 2016). Diante disso, para a avaliação da eficiência de projetos os KPI's são utilizados em diferentes condições de processo que contemplam métricas com critérios de desempenho para identificar possíveis melhorias (SOUZA, 2012).

Deste modo, o artigo tem por finalidade desenvolver uma modelagem termodinâmica de UTE à GN para análise comparativa de desempenho do sistema de geração de energia. A metodologia empregada de estudo de caso concebe a análise do sistema de cogeração com posterior simulação por meio de dois modelos analíticos para mediar a eficiência energética da planta. Adicionalmente, foram adotados KPI's, métricas ambientais e operacionais, assim como a estimativa da emissão de GEE junto ao método de Avaliação de Desempenho Ambiental (ADA).

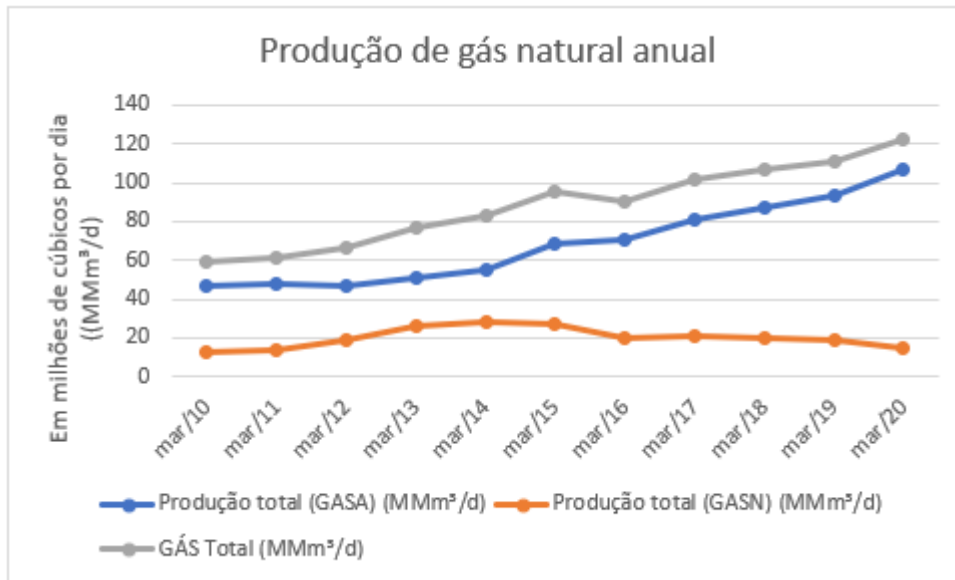
## **2 PRODUÇÃO DE GÁS NATURAL NO TERRITÓRIO BRASILEIRO**

A imposição do uso de fontes de energia eficientes com as questões ambientais requer *input* de combustível em uma unidade com fatores controlados sem que ocorra ao mesmo tempo interferências na produção e degradação do ecossistema. Justamente, o GN emite menor taxa de poluentes na atmosfera dentre outros combustíveis fósseis, e é vantajoso em sua capacidade exploratória (HUANG et al., 2019; SAUNDERS, 2015).

Conforme o relatório da ANP (2020), a produção do GN associado e não associado é constante e apresenta acréscimo de 50% conforme o registro histórico dos últimos 10 anos (Figura

1). Contudo, o GN apresenta impacto ambiental mesmo sendo o menos intensivo dos hidrocarbonetos em efeitos de poluição da atmosfera. Assim, são necessárias o uso de novas tecnologias adaptadas para controle e mitigação dos efeitos das emissões de GEE (WANG et al., 2019; QIAO et al., 2017).

Figura 1. Histórico de produção nacional de gás natural associado (GASA) e não associado (GASN)



Fonte: Adaptado de ANP em Dados estatísticos da Produção de Gás Natural (2020)

Dessa forma, dentre as principais soluções atribuídas à indústria energética, o emprego de combustíveis fósseis é ligado diretamente a capacidade da unidade geradora de possuir mecanismos capazes de constituir configurações inteligentes, nas quais a energia do sistema possa ser reutilizada para um maior fornecimento líquido e atenuar as emissões de GEE's (WANG et al., 2019; QIAO et al., 2017).

### 3 AVALIAÇÃO DA CONSERVAÇÃO DE ENERGIA EM SISTEMAS TERMODINÂMICOS

O desenvolvimento de pesquisas para suprir a matriz energética proporcionou vantagens econômicas e ambientais com novas metodologias para uma produção contínua e eficaz com menor emissão de GEE's, capazes de atender a indústria e órgãos controladores ambientais (KAUSHIK et al., 2011).

A capacidade de uma unidade térmica gerar eletricidade é associada à sua eficiência de englobar e converter no sistema a energia em forma de trabalho e calor por meio termomecânico. O estudo para avaliar sua eficácia é distinguido conforme sua energia e exergia (ALIYU et al., 2020; GAURAV et al., 2019).

A eficiência é então obtida por meio da solução das equações de conservação de massa e energia conforme a configuração do sistema térmico. Assim, na avaliação de desempenho é utilizada a 1ª Lei da Termodinâmica (Equação 1) e o balanço energético em regime estacionário (Equação 1.1) e em regime transiente (Equação 1.2).

$$\Delta E = \Delta Q - \Delta W \quad (1)$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum_{out} \dot{m} \cdot \left( h + \frac{v^2}{2} + g \cdot Z \right)_{out} - \sum_{in} \dot{m} \cdot \left( h + \frac{v^2}{2} + g \cdot Z \right)_{in} \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m} \cdot \left( \Delta h + \frac{\Delta v^2}{2} + g \cdot \Delta z \right) \quad (1.2)$$

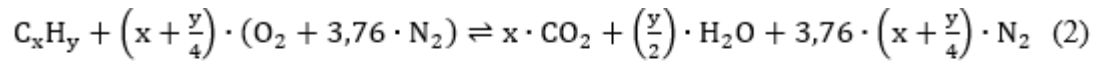
Onde  $\Delta E$  é a variação da energia [J/s],  $\Delta Q$  a variação do calor [J/s] e  $\Delta W$  a variação do trabalho [J/s],  $\partial E / \partial t$  é a variação da energia em relação ao tempo [J/s],  $\dot{Q}$  a taxa de calor [J/s],  $\dot{W}$  a taxa de trabalho,  $\dot{m}$  a taxa de massa [kg/s],  $\Delta h$  a variação da entalpia específica [kJ/kg],  $\Delta v^2 / 2$  a variação da energia cinética específica [ $m^2/s^2$ ] e  $g \Delta z$  a variação da energia potencial específica [ $m^2/s^2$ ].

Ao avaliar diferentes mecanismos de uma usina produtora de energia, a termodinâmica de processo é alternada conforme trabalho ou calor cedido ou gerado e apresenta por meio cíclico a eficiência do sistema (AHMADI et al., 2020). Diferentes ciclos termodinâmicos são utilizados para transformar calor em trabalho como o Brayton e o Rankine.

### 3.1 CICLO TERMODINÂMICO DE BRAYTON

A disponibilidade de um combustível como o insumo gás para operar um sistema destinado à conversão energética, o Ciclo Brayton (CB) é considerado um processo termodinâmico ideal. Nesse modelo, a entrada de ar atmosférico comprimido em elevado volume e pressão promove a reação completa com o GN no reator de combustão (Equação 2) para gerar os produtos de combustão. Após a queima, a energia dos gases liberados rotacionam as palhetas da turbina a gás, convertendo trabalho em energia líquida (IDRISSA & BOULAMA, 2019; ÇENGEL & BOLES, 2013).

Posteriormente, os gases de combustão são expelidos ao ambiente, em elevadas temperaturas e pressões. Como resultado, a eficiência térmica do CB é descrita por meio da taxa de trabalho da turbina a gás e do compressor, de acordo com a energia gerada no processo pela reação de combustão (Equação 3) (GOORDAZI, 2016).



$$\eta_{\text{Brayton}} = \frac{\dot{W}_{tG} - \dot{W}_c}{\dot{Q}_{rc}} \cdot 100 \quad (3)$$

Onde  $\eta_{\text{Brayton}}$  é a eficiência térmica do Ciclo Brayton [%],  $\dot{W}_{tG}$  é a taxa de trabalho da turbina a gás [J/s],  $\dot{W}_c$  é a taxa de trabalho do compressor de ar [J/s] e  $\dot{Q}_{rc}$  é a energia gerada no reator de [J/s].

Os gases de combustão oriundos da turbina ainda apresentam capacidade calorífica suficiente para acionamento de outro ciclo termodinâmico apesar do processo de expansão isentrópico. Desta forma, a construção de um modelo inteligente de planta de processo operando em *single shaft* para reintegrar a energia por acoplamento a outro ciclo aumenta a eficiência global de conversão energética (BĂLĂNESCU & HOMUTESCU, 2019).

### 3.2 CICLO TERMODINÂMICO DE RANKINE

O Ciclo Orgânico Rankine (CR) faz parte das unidades térmicas geradoras de energia por meio cíclico e baixa emissão de poluentes. Esse tipo de sistema operante a vapor, consiste no *input* de energia em forma de calor na caldeira modificando a fase aquosa para vapor supersaturado, realizando assim uma expansão adiabática na turbina para geração de energia (AGHAHOSSEINI & DINCER, 2013). No decorrer do processo, a corrente de fluxo tem o fluido vaporizado e expandido e assim o estado físico é modificado conforme os equipamentos das operações unitárias que incluem o condensador, vasos, bomba e a caldeira para fechamento do ciclo (WANG et al., 2012; GANJEHKAVIRI et al., 2015).

O sistema cíclico tem a possibilidade de adotar diferentes insumos para geração energética conforme a configuração de projeto. Assim, é possível uma adaptação do desenho para recuperação de energia no HRSG, pois o calor cedido pelos gases de combustão do CB pode ser incorporado no sistema Rankine com aproveitamento de calor (WANG et al., 2012).

A eficiência térmica deste ciclo é representada pela variação de energia em forma de trabalho em relação a energia calorífica (Equação 4). Entretanto, a energia de acordo com o conjunto de turbinas a vapor é análoga as turbinas a gás. Portanto, dentre as configurações adotadas para maior rendimento energético a recuperação do calor cedido e agrupado na HRSG (Equação 5) é capaz de ampliar sua eficiência em até 5% (ÇENGEL & BOLES, 2013; DINCER & BICER, 2020).

$$\eta_{\text{Rankine}} = \frac{\dot{W}_{tV} - \dot{W}_b}{\dot{Q}_{cd} - \dot{Q}_c} \cdot 100 \quad (4)$$

$$\eta_{\text{Rankine}} = \frac{\dot{W}_{tV} - \dot{W}_b}{\dot{Q}_{cd} - \dot{Q}_c + \dot{Q}_{xw}} \cdot 100 \quad (5)$$

As variáveis são  $\eta_{\text{Rankine}}$  a eficiência do Ciclo Orgânico Rankine [%],  $\dot{W}_{\text{TV}}$  é a taxa de trabalho exercido pela turbina a vapor [J/s],  $\dot{W}_{\text{b}}$  é a taxa de trabalho exercido pela bomba,  $\dot{Q}_{\text{cd}}$  é a taxa de energia da caldeira [J/s],  $\dot{Q}_{\text{c}}$  a taxa de energia do condensador [J/s] e  $\dot{Q}_{\text{xw}}$  é o calor reaquecido da turbina no sistema [J/s].

### 3.3 COGERAÇÃO ENERGÉTICA COM A RECUPERAÇÃO DE ENERGIA CEDIDA/PERDIDA

A reutilização da energia descartada por um sistema é aproveitada em outro processo para aumentar a potência líquida da usina modelo em outra unidade cíclica. Adicionalmente, é viável de forma ambiental pois a recuperação da energia diminui o uso de combustíveis e, portanto, ocorre menor emissão de GEE (GULEN, 2019; KEHLHOFER et al., 2009). Com isto, a configuração de cogeração de energia de acordo com os ciclos termodinâmicos é descrita como Ciclo Combinado (CC) (ESQUIVEL-PATINO et al., 2017; LI et al., 2019).

A tecnologia é direcionada ao acoplamento dos ciclos Brayton e Rankine adotando um sistema de cogeração gás-vapor. Desta forma, a finalidade é interligar a energia expelida da turbina a gás junto aos gases de combustão na HRSG e assim acionar o COR, ambos operando em série. Outrossim, analisar a energia emanada pela turbina a vapor e reintegrá-la ao HRSG (Equação 6). Em síntese, a configuração da planta busca recuperar o máximo de energia, para aumentar a potência líquida produzida e eficiência energética do processo (AHMADI & TOGHRAIE, 2016; REDDY et al., 2014; GRIGORUK & TURKIN, 2010).

$$\eta_{\text{Combinado}} = \frac{\Sigma(\dot{W}_{\text{tRankine}} + \dot{W}_{\text{tBrayton}}) - (\dot{W}_{\text{b}} + \dot{W}_{\text{c}})}{\dot{Q}_{\text{HRSG}} + \dot{Q}_{\text{xn}}} \quad (6)$$

Onde  $\eta_{\text{Combinado}}$  é a eficiência do Ciclo Combinado [%],  $\dot{W}_{\text{tRankine}}$  é a taxa da potência na turbina do ORC [J/s],  $\dot{W}_{\text{tBrayton}}$  é a taxa da potência na turbina do CB [J/s] e  $\dot{Q}_{\text{xn}}$  a energia em determinados componentes reaquecidos [J/s].

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

O método proposto compõe a modelagem e simulação computacional da planta cogeneradora pelo simulador sequencial COCO (*CAPE-OPEN to CAPE-OPEN*) e pela modelagem numérica termodinâmica no software Matlab (*MATrix LABoratory*).

O componente do pacote COFE (*CAPE-OPEN Flowsheet Environment*) foi utilizado para a construção completa do processo incluindo o pacote CORN (*CAPE-OPEN Reaction Numerics*) para

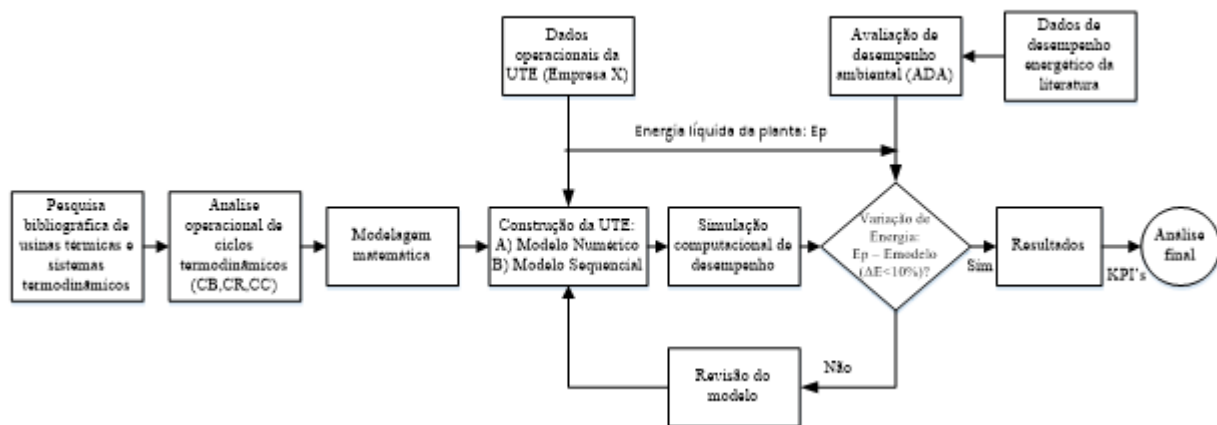


a reação de combustão. No caso da modelagem e simulação numérica foi realizada por meio do código escrito em Matlab para análise comparativa entre os resultados das simulações analíticas, simulador sequencial e os dados de energia da planta modelo.

A metodologia empregada contém o conjunto de simulações a reação de combustão completa em regime estacionário, fundamentado nos dados reais de processo cedidos da UTE. O método é delineado pela lei da conservação de massa e energia no sistema térmico junto a exergia recuperada no calor cedido e destruído do processo, para constatar sua eficiência energética, para posterior, efetuar o estudo da ADA.

O estudo da ADA é efetuado com métricas obtidas por Gaete-Morales et al. (2019), no qual seu projeto demonstra a taxa de emissão de GEE por usinas a carvão e óleo combustível. A proposta é avaliar o percentual de poluentes emitidos em relação a energia gerada entre as unidades por meio de KPI's, para examinar a rentabilidade ambiental e econômica da configuração adotada pelo modelo proposto.

Figura 2. Metodologia de pesquisa



Fonte: Autores

## 5 MODELAGEM DA UTE

### 5.1 DADOS DA UNIDADE COGERADORA

As informações da UTE compreendem as condições e características operacionais da unidade de processo. As referências de dados do projeto abrangem o *Process Flow Diagram* (PFD) (Figura 3), estrutura molecular do gás natural (Tabela 3), além de propriedades e métricas sobre a UTE Empresa X (Tabela 2).

Tabela 2. Informações técnicas sobre a UTE

Item de Projeto	Parâmetro de 2 turbinas	Valor	Unidade
Energia Elétrica	Geração Bruta	1.772,0	MW
	Consumo Interno	60,0	MW
	Geração Líquida	1.712,0	MW
Desempenho	Eficiência Bruta	60,2%	–
	Eficiência Líquida	58,2%	–
	Taxa Bruta de Energia	5.978,0	kJ/kWh
	Taxa Líquida de Energia	6.186,0	kJ/kWh
Combustível	Fluxo de Gás Natural @PCI 49.215 kJ/kg	52,9	t/h
		110,6	m <sup>3</sup> /d

Fonte: Empresa parceira

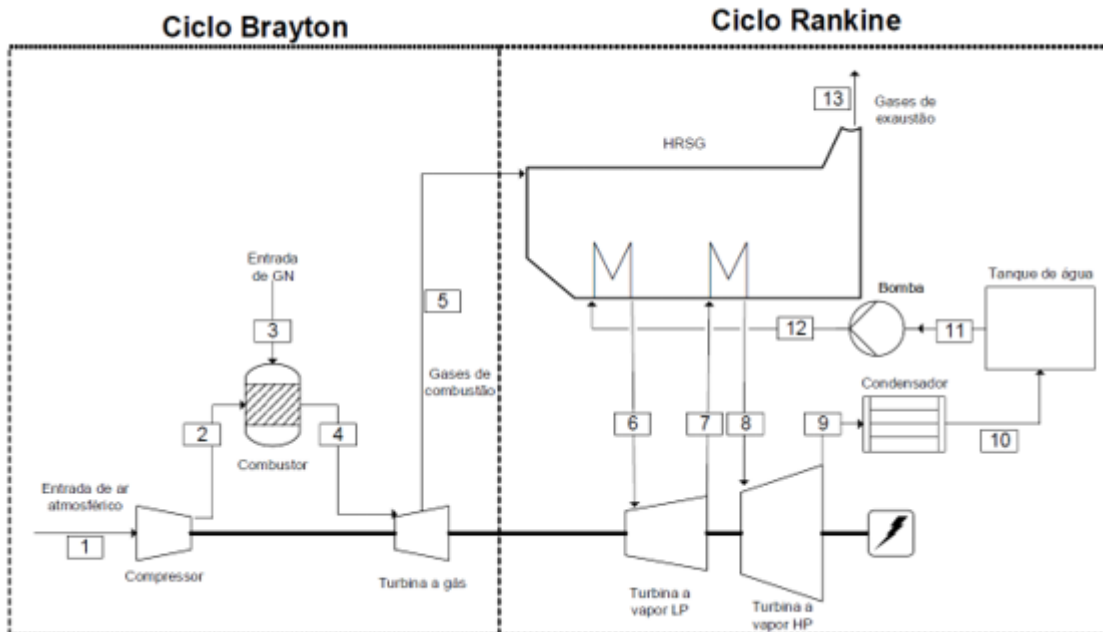
Tabela 3. Estrutura molar do gás natural

Componente	Percentual molar (%)
Metano	90,18
Etano	4,58
Propano	0,94
Isobutano	1,31
N-butano	0,63
Pentano	0,16
Nitrogênio	0,16
Dióxido de carbono	0,11

Fonte: Empresa parceira

O PFD do sistema é manuseado para modelar e simular de forma íntegra o sistema termomecânico, é cedido para o estudo o fluxo mássico nas principais correntes do processo, temperatura, pressão e estado de entalpia. As informações abrangem o reaproveitamento da energia perdida nos ciclos termodinâmicos CR e CB, juntamente a potência líquida obtida e eficiência do sistema. A adaptação dos dados do processo permite o estudo da eficiência do empreendimento.

Figura 4. PFD da planta de processo



Fonte: Empresa X

Tabela 4. Dados operacionais das correntes de fluxo da planta de processo

Corrente de fluxo	Fluxo (t/h)	Temperatura (°C)	Pressão (bar)	Entalpia específica (kJ/kg)
1	2.161,1	26,9	1,01	112,8
2	2.161,1	458,8	11,01	3.388,8
3	52,9	215,0	32,0	920,0
4	2214	441,2	11,01	424,7
5	2.214,0	657,0	11,01	749,0
6	290,2	580,0	174,0	3.508,1
7	288,0	367,4	45,0	3.125,6
8	336,3	580,0	40,0	3.628,9
9	378,3	42,2	0,003	2.007,2
10	382,4	42,2	0,083	176,9
11	382,4	42,2	0,083	176,9
12	382,4	42,2	9,0	177,7
13	2.214,0	83,0	1,01	410,5

Fonte: Empresa parceira

## 5.2 PARÂMETROS DA CONSERVAÇÃO DE MASSA E ENERGIA

Para modelagem numérica as equações do balanço de massa e energia foram estruturadas conforme os mecanismos e equipamentos do ciclo (Tabela 1). No caso da modelagem sequencial, o software COFE foi utilizado na completa construção da planta de processo e conforme a estrutura de cada dispositivo a simulação.

Tabela 1. Aplicação da conservação de massa e energia nos componentes de processo

Ciclo	Equipamentos	Balanco de energia
Brayton	Compressor	$\dot{W}_c = \dot{m} \cdot cp \cdot (T_{out} - T_{in})$
	Combustor	$\dot{Q}_{rc} = \dot{m} \cdot PCI$
	Turbina a gás	$\dot{W}_{tG} = (\dot{m}_{in} \cdot h_{in}) - (\dot{m}_{out} \cdot h_{out})$
Rankine	Caldeira	$\dot{Q}_{cd} = (\dot{m}_{in} \cdot h_{in}) - (\dot{m}_{out} \cdot h_{out})$
	HRSG	$\dot{Q}_{HRSG} = (\dot{m}_{in} \cdot h_{in}) - (\dot{m}_{out} \cdot h_{out})$
	Turbina a vapor	$\dot{W}_{tV} = (\dot{m}_{in} \cdot h_{in}) - (\dot{m}_{out} \cdot h_{out})$
	Condensador	$\dot{Q}_c = (\dot{m}_{in} \cdot h_{in}) - (\dot{m}_{out} \cdot h_{out})$
	Bomba	$\dot{W}_b = (\dot{m}_{in} \cdot V_{in} \cdot P_{in}) - (\dot{m}_{out} \cdot V_{out} \cdot P_{out})$
Combinado	Recuperação de energia (Turbina)	$\dot{Q}_{xW} = (\dot{m}_{in} \cdot h_{in}) - (\dot{m}_{out} \cdot h_{out})$
	Recuperação de energia (HRSG)	$\dot{Q}_{xQ} = (\dot{m}_{in} \cdot h_{in}) - (\dot{m}_{out} \cdot h_{out})$

Fonte: Adaptado de BEJAN et al. (2016); AHMADI et al., (2020)

Onde  $cp$  é a capacidade calorífica do fluido [kJ/kg °C],  $V$  é o volume na bomba [m<sup>3</sup>] e  $P$  é a pressão na bomba [bar], PCI é o poder calorífico inferior do gás natural [kJ/kg].

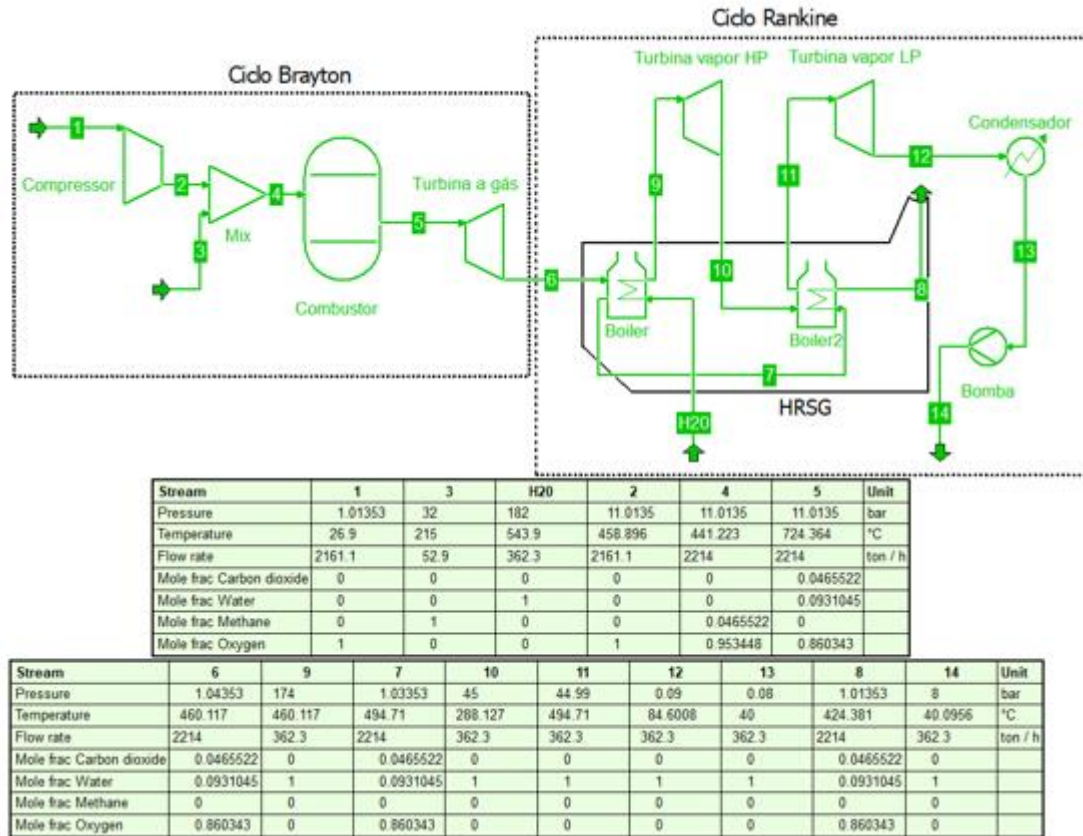
## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Posteriormente ao estudo das condições do sistema, insumo de operação e informações cedidas pela empresa parceira, é empregado conforme método proposto as simulações computacionais.

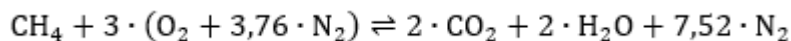
A modelagem pelo software COFE compõe de forma integrada o conjunto de equipamentos para a cogeração (Figura 3). A conversão do GN em energia ocorre pela reação de combustão completa realizada por um reator de Gibbs conforme os parâmetros da reação de combustão.

Durante o processo, para a reintegração do calor cedido pelas turbinas a vapor no CR, é reagrupado o vapor superaquecido na saída na HRSG. Contudo, por se tratar de uma primeira abordagem ao software, o sistema é modelado em ciclo aberto.

Figura 3. Processo de cogeração de energia no software COFE



De acordo com as equações estruturadas e descritas na Tabela 4 e Figura 4, a simulação numérica executada no software MATLAB resultou no grupo de informações para análise paramétrica da planta modelo. A energia da reação de combustão é efetuada com base na Equação 2, e nesse caso somente foi considerado o gás metano e oxigênio por ser predominante entre os outros componentes da corrente.



As equações de conservação de energia no sistema proporcionaram o cálculo da estimativa da potência líquida gerada pelas turbinas a gás e vapor isoladas. Portanto, em ambas simulações foi possível obter resultados satisfatórios sobre os KPI's escolhidos operacionais (Tabela 5).

Adicionalmente às avaliações de métricas do processo, é analisado o desempenho econômico financeiro, considerando o preço do gás natural para o setor industrial, com o valor de 0,567 R\$/m<sup>3</sup>, extraído do anuário da ANP (2020).

Tabela 5. KPI's operacionais e ambientais

Parâmetro	KPI (Simulação numérica - Matlab)	KPI (Simulação sequencial - COFE)	Capacidade operacional da UTE
Eficiência do Ciclo Rankine (CR)	18,2 %	23,1 %	21,2 %
Eficiência do Ciclo Brayton (CB)	51,9 %	45,0 %	40,2 %
Eficiência do Ciclo Combinado (CC)	58,2 %	60,3 %	60,2 %
Percentual de desvio da eficiência	3,2 %	0,1 %	-
Potência do Ciclo Combinado	1.894,6 MW	1.798,9 MW	1.772,0 MW
Percentual de desvio da potência	6,4 %	1,4 %	-
Energia gerada	526,3 kWh	499,7 kWh	492,2 kWh
Energia gerada por unidade de GN	9,9 kWh/kg/h	9,4 kWh/kg/h	9,3 kWh/kg/h
Custo do GN na unidade	49,5 R\$/m <sup>3</sup>	49,5 R\$/m <sup>3</sup>	49,5 R\$/m <sup>3</sup>
Custo de GN por dia na unidade	1.189,2 R\$ /dia	1.189,2 R\$/dia	1.189,2 R\$/dia
Custo de GN por unidade de energia gerada	94,0 R\$/mil m <sup>3</sup> /kWh	99,0 R\$/mil m <sup>3</sup> /kWh	100,5 R\$/mil m <sup>3</sup> /kWh
Fluxo de emissão de gases de combustão por unidade de energia gerada	4,4 kg/h/kWh	4,2 kg/h/kWh	4,5 kg/h/kWh

A eficiência obtida do ciclo combinado é oriunda dos trabalhos de Dev et al. (2015), Kotowicz e Brzeczek (2019) e Kwon et al. (2019), no qual apresentam uma faixa operacional entre 40 e 65%, conforme configuração e insumo adotado. Portanto, o resultado alcançado é adequado por se apresentar em um intervalo consistente de acordo com a fonte de literatura adotada (Tabela 5).

Desta forma, após a análise de desempenho operacional, é estabelecido a avaliação de desempenho ambiental (ADA). Esse estudo de validação da configuração demonstra a menor emissão de gás carbônico (CO<sub>2</sub>) que outras plantas que usufruem de combustíveis mais intensivos em carbono.

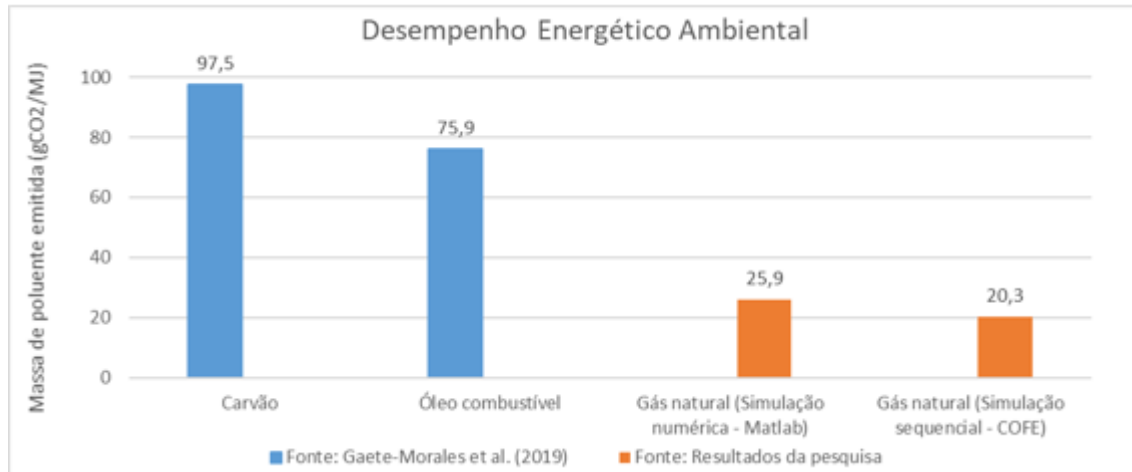
O estudo pelas métricas ambientais foi dividido em parâmetros de emissões de CO<sub>2</sub> (Tabela 6) e também por meio de dados da literatura. A avaliação é dissertada conforme informações retiradas e adaptadas de Gaete-Morales et al. (2019). Neste sentido, a pesquisa avaliou a emissão de GEE por meio de UTE's a carvão e óleo combustível, para comparação com os resultados da unidade a GN na forma gráfica (Figura 5).

Tabela 6. KPI's para avaliação de desempenho ambiental

Parâmetro	KPI (Simulação numérica - Matlab)	KPI (Simulação sequencial - COFE)
Emissão de CO <sub>2</sub>	195,93 t/h	145,12 t/h
Percentual de emissão de CO <sub>2</sub>	20,59 %	15,25 %
Taxa de CO <sub>2</sub> por energia gerada	0,29 t/h/kWh	0,37 t/h/kWh

Conforme os resultados do indicador de emissão por unidade de energia gerada é perceptível a menor descarga de poluente para o combustível GN ao comparar com outras unidades que operam com combustível carvão e óleo combustível.

Figura 5. Análise das emissões de CO2 em diferentes insumos



A avaliação de emissão CO<sub>2</sub> também é apresentada na Tabela 7 em relação a planta modelo para outros tipos de usinas que operam com combustíveis potencialmente poluentes. A partir dos modelos desenvolvidos na pesquisa, as respostas demonstram que a implantação do GN como recurso no sistema de cogeração representa uma redução da emissão da ordem de 65,9% de GEE's no caso do óleo combustível e de 73,5% para o carvão, conforme resultados extraídos da simulação sequencial – COFE.

Tabela 7. Comparação da emissão de CO<sub>2</sub> em relação a planta modelo (Empresa X)

Insumo combustível da unidade UTE	Percentual de emissão de CO <sub>2</sub> (Simulação numérica – Matlab)	Percentual de emissão de CO <sub>2</sub> (Simulação sequencial - COFE)
Óleo combustível	+ 73,3 %	+ 65,9 %
Carvão	+ 79,2 %	+ 73,5 %

## 7 CONCLUSÃO

A implementação ou adaptações de centrais termelétricas usufruindo do gás natural como principal insumo é discutida como um processo de qualidade operacional e ambiental. A produção constante de gás natural em território nacional (Figura 1) capacita o empreendimento de efetuar a conversão do insumo em energia de maneira eficiente e interrupta, com potencial para atender a demanda de eletricidade pelo setor energético.

Dessa forma, a pesquisa ressaltou a importância do GN no estudo de caso para produzir energia por cogeração onde foram empregados dois modelos para análise de desempenho da UTE. Assim, as simulações desenvolvidas pelo método numérico e sequencial, oportunizou obter as condições de funcionamento da usina em uma faixa operacional adequada.

As análises das simulações demonstraram semelhança pelos resultados alcançados em ambos modelos. O parâmetro de potência resultou um desvio de 1,4% a 6,4% em relação ao projeto operacional, enquanto a eficiência do ciclo termodinâmico gerou um desvio entre 0,1 a 3,2%. Portanto, é constatado a eficiência da cogeração de energia pela configuração do ciclo combinado.

Adicionalmente, os indicadores operacionais demonstraram um estudo detalhado da planta assim como a rentabilidade do processo (Tabela 5). De acordo com os indicadores ambientais, é confirmado o desempenho ambiental do uso do GN, pois apresenta menor impacto de emissão de GEE ao comparar com combustíveis intensivos em carbono (Figura 5; Tabela 7).

Portanto, o uso deste combustível interligado a configuração do ciclo combinado beneficiou o sistema ao produzir uma energia com quantidade satisfatória para atender a demanda, e maior qualidade ambiental. Por fim, o artigo ratifica futuros estudos para testar outras faixas e limites operacionais e também aperfeiçoar a modelagem da planta de processo para atender as configurações de ciclo fechado de Rankine.

#### **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES), a Universidade Federal Fluminense (UFF) e a Universidade Estácio de Sá (UNESA) pelo material cedido e apoio técnico de pesquisa para o atual estudo.



**REFERÊNCIAS**

- [1] AGHAHOSSEINI, S., DINCER, I., - Comparative performance analysis of low-temperature Organic Rankine Cycle (ORC) using pure and zeotropic working fluids. *Applied Thermal Engineering*, v. 54, pp. 35–37, 2013.
- [2] AHMADI, G. R., TOGHRAIE, D., Energy and exergy analysis of Montazeri Steam Power Plant in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 56, pp. 454-463, 2016.
- [3] AHMADI, A., JAMALI, D. H., EHYAEI, M. A., ASSAD, M. E. H., Energy, exergy, economic and exergoenvironmental analyses of gas and air bottoming cycles for production of electricity and hydrogen with gas reformer. *Journal of Cleaner Production*, v. 259, n. 120915, 2020
- [4] ALIYU, M., ALQUDAIHI, A., SAID, S., HABIB, M., Energy, exergy and parametric analysis of a combined cycle power plant. *Thermal Science and Engineering Progress*, v. 15, n. 100450, 2020.
- [5] ANP (Agência Nacional do Petróleo) – Anuário Estatístico 2020. Preços médios de referência do gás natural, segundo Unidades da Federação. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/publicacoes/anuario-estatistico/anuario-estatistico-2020>>. Acesso em: 08 de agosto de 2020.
- [6] ANP (Agência Nacional do Petróleo) - Boletim de Produção de Petróleo e Gás Natural. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/arquivos/publicacoes/boletins-anp/producao/2020-03-boletim.pdf>>. Acesso em: 08 de agosto de 2020.
- [7] BĂLĂNESCU, D. T., HOMUTESCU, V.M. Performance analysis of a gas turbine combined cycle power plant with waste heat recovery in Organic Rankine Cycle. *Procedia Manufacturing*, v. 32, pp. 520–528. 2019.
- [8] BEJAN, A., *Advanced Engineering Thermodynamics*, 4 th Edition. John Wiley & Sons, 2016.
- [9] BELYAKOV, N., Concept of a thermal power plant. *Sustainable Power Generation*, Vol.1, pp. 157-178, 2019.
- [10] ÇENGEL, A. Y., BOLES, M. A., *Termodinâmica*. 7 ed, pp. 70-74, 2013.
- [11] DEV, N., SAMSHER., KACHHWAHA, S. S., ATTRI, R., GTA modeling of combined cycle power plant efficiency analysis. *Ain Shams Engineering Journal*, v. 6, n. 1, pp. 217-237, 2015.
- [12] ESQUIVEL-PATINO, G. G., SERNA-GONZÁLEZ, M., NÁPOLES-RIVERA, F., Thermal integration of natural gas combined cycle power plants with CO2 capture systems and organic Rankine cycles. *Energy Conversion and Management*, v. 151, pp. 334-342, 2017.
- [13] GABBAR, H. A., ZIDAN, A., Modeling, evaluation, and optimization of gas-power and energy supply scenarios. *Frontiers in Energy*, v. 10, pp. 393-408, 2016.
- [14] GAETE-MORALES, C., GALLEGO-SCHMID, A., STAMFORD, L., AZAPAGIC, A., Life cycle environmental impacts of electricity from fossil fuels in Chile over a ten-year period. *Journal of Cleaner Production*, v. 232, pp. 1499-1512, 2019.
- [15] GANJEHKAVIRI, A., JAAFAR, M. N. M., HOSSEINI, S. E., Optimization and effect of steam turbine outlet quality on the output power of a combined cycle power plant. *Energy Conversion and Management*, v. 89, pp. 231-243, 2015.
- [16] GAURAV, G. K., SINGH, N., FRANCIS, B., - Energy Analysis of a Thermal Power Plant. *SSRN Electronic Journal*, 2019.

- [17] GOORDAZI, M., Comparative energy analysis on a new regenerative Brayton cycle. *Energy Conversion and Management*, v. 120, pp. 25-31, 2016.
- [18] GULEN, C. S., Gas Turbine Combined Cycle Power Plants. pp. 288-306, 2019.
- [19] GRIGORUK, D. G., TURKIN, A. V., Studies of the thermal circuit of an advanced integrated gasification combined-cycle power plant. *Thermal Engineering*, v. 57, pp. 125-128, 2010.
- [20] HUANG, W., CHEN, J., FU, C., HUANG, F., Approach for natural gas to be a primary energy source in China. *Frontiers of Engineering Management*, v. 6, pp. 467-476, 2019.
- [21] IBRAHIM, T. K., RAHMAN, M. M., Thermal impact of operating conditions on the performance of combined cycle gas turbine. *Journal of Applied Research and Technology*, v. 10, n. 4, pp. 567-577, 2012.
- [22] IDRISSE, A. K. M., BOULAMA, G. K., Advanced exergy analysis of a combined Brayton/Brayton power cycle. *Energy*, v. 166, pp. 724-737, 2019.
- [23] KAUSHIK, S. C., REDDY, V. S., TYAGI, S. K., Energy and exergy analyses of thermal power plants: A review. *Renewable Sustainable Energy Review*, v. 15, pp. 1857-1872, 2011.
- [24] KEHLHOFER, R., HANNEMANN, F., STIRNIMANN, F., RUKES, B., Combined-cycle Gas & Steam Turbine Power Plants. 3 ed, pp. 241-261, 2009.
- [25] KOTOWICZ, J., BRZECZEK, M., Comprehensive multivariable analysis of the possibility of an increase in the electrical efficiency of a modern combined cycle power plant with and without a CO<sub>2</sub> capture and compression installations study. *Energy*, v. 175, pp. 1100-1120, 2019.
- [26] KWON, H. M., MOON, S. W., KIM, T. S., KANG, D. W., SOHN, J. L., LEE, J., A study on 65 % potential efficiency of the gas turbine combined cycle. *Journal of Mechanical Science and Technology*, v. 33, pp. 4535-4543, 2019.
- [27] LI, D., HU, Y., LI, D., WANG, J., Combined-cycle gas turbine power plant integration with cascaded latent heat thermal storage for fast dynamic responses. *Energy Conversion and Management*, v. 183, pp. 1-13, 2019.
- [28] MOHAMMED, M. K., IBRAHIM, T. K., AWAD, O. I., RAHMAN, M. M., BASRAWI, F., ABD ALLA, A. N., MAMAT, R., The optimum performance of the combined cycle power plant: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 79, pp. 459-474, 2017.
- [29] MOIOLI, S., PELLEGRINI, L. A., Fixed and Capture Level Reduction operating modes for carbon dioxide removal in a Natural Gas Combined Cycle power plant. *Journal of Cleaner Production*, v. 254, n. 120016, 2020.
- [30] NAKOMCIC-SMARAGDAKIS, B., CEPIC, Z., CEPIC, M., STAJIC, T., Data analysis of the flue gas emissions in the thermal-power plant firing fuel oil and natural gas. *International Journal of Environmental Science and Technology*, v. 11, pp. 269-280, 2014.
- [31] QIAO, Z., GUO, Q., SUN, H., Optimal Gas Storage Capacity in Gas Power Plants Considering Electricity and Natural Gas Systems Constraints. *Energy Procedia*, v. 142, pp. 2983-2989, 2017.
- [32] RAJESH, R., KISHORE, P. S., Thermal Efficiency of Combined Cycle Power Plant. *International Journal of Engineering and Management Research*, v. 8, n. 3, pp. 229-234, 2018

- [33] REDDY, V. S., KAUSHIK, S. C., TYAGI, S. K., Exergetic analysis and evaluation of coal-fired supercritical thermal power plant and natural gas-fired combined cycle power plant. *Clean Technologies and Environmental Policy*, v. 16, pp. 489-499, 2014.
- [34] SALPINGIDOUA, C.; TSAKMAKIDOUA, D.; VLAHOSTERGIOSA, Z.; MISIRLISB, D.; FLOUROSC, M.; YAKINTHOSA, K. The Effect of Turbine Blade Cooling on the Performance of Recuperative Cycles for Gas Turbines Applications. *Chemical Engineering Transactions*, v. 61, 2017.
- [35] SAUNDERS, H. D., The unexploited potential for natural gas to greatly increase energy efficiency. *Energy Efficiency*, v. 8, pp. 403-415, 2015
- [36] SOUZA, G. F. M., Thermal power plant performance and analysis. *Springer Series in Reliability Engineering*, 2012.
- [37] SHAMSHIRGARAN, S. R., NOUZARI, M. M., ASSADI, M. K., NAJAFZADEH, K., BAYATI, G. R., The indicators and criteria of efficiency, water consumption and emission of Thermal Power Plants. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, v. 11, n. 22, pp. 13338-13343, 2016.
- [38] WANG, Y., WANG, Y., HUANG, Y., YANG, J., MA, Y., YU, H., ZENG, M., ZHANG, F., ZHANG, Y., Operation optimization of regional integrated energy system based on the modeling of electricity-thermal-natural gas network. *Applied Energy*, v. 251, n. 113410, 2019.
- [39] WANG, Z. Q., ZHOU, N. J., GUO, J., WANG, X. Y., Fluid selection and parametric optimization of organic Rankine cycle using low temperature waste heat. *Energy*, v. 40, n. 1, pp. 107-115, 2012.
- [40] WITTENBURG, R., HUBEL, M., PRAUSE, H., GIEROW, C., RIEBIG, R., HASSEL, E., Effects of rising dynamic requirements on the lifetime consumption of a combined cycle gas turbine power plant. *Energy Procedia*, v. 158, pp. 5717-5723, 2019.
- [41] YUAN-HU, L., KIM, J., KIM, S., HAN, H., Use of latent heat recovery from liquefied natural gas combustion for increasing the efficiency of a combined-cycle gas turbine power plant. *Applied Thermal Engineering*, v. 161, n. 114177, 2019.
- [42] LEAL, F. I., REGO, E. E., RIBEIRO, C. O., Natural gas regulation and policy in Brazil: Prospects for the market expansion and energy integration in Mercosul. *Energy Policy*, v. 128, pp. 817-829, 2019
- [43] DINCER, I., BICER, Y., *Integrated Energy Systems for Multigeneration*. Elsevier, 2020.