

WELLINGTON DAVIS ZORNETTA

**OTIMIZAÇÃO DA OPERAÇÃO DE CICLOS COMBINADOS COM MÚLTIPLOS
GASES SIDERÚRGICOS**

Zornetta, Wellington Davis
Z88o Otimização da operação de ciclos combinados com múltiplos gases siderúrgicos / Wellington Davis Zornetta – Guaratinguetá, 2017.
65 f : il.
Bibliografia: f. 63-65

Dissertação (Mestrado Profissional) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017.
Orientador: Prof. Dr. José Antônio Perrella Balestieri
Co-orientadora: Prof. Dr. João Andrade Carvalho Jr.

1. Gás - distribuição. 2. Combustíveis. 3. Siderurgia I. Título

CDU 621.6.02(043)

WELLINGTON DAVIS ZORNETA

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

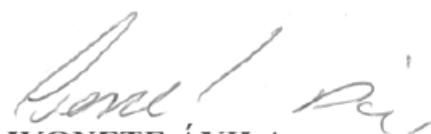
**PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: ENERGIA**

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. JOSÉ ANTONIO PERRELLA BALESTIERI
Orientador / UNESP-FEG


Prof. Dr. IVONETE ÁVILA
UNESP-FEG


Prof. Dr. CHRISTIAN JEREMI CORONADO RODRÍGUEZ
UNIFEI

Janeiro de 2017

DADOS CURRICULARES

Wellington Davis Zornetta

- NASCIMENTO** 07.10.1979 – SÃO CARLOS / SP
- FILIAÇÃO** Almir Donizetti Aparecido Zornetta
Mary Dalva Aversa Zornetta
- 2002/2006** Curso de Graduação
Engenharia Mecânica – Universidade Estadual do Rio de Janeiro
- 2007/2010** Curso de Graduação
Administração de Empresas Centro Universitário UNISEB.
- 2014/2016** Mestrado Engenharia Mecânica
Engenharia Mecânica – Faculdade Engenharia Guaratinguetá UNESP.

DEDICATÓRIA

de modo especial, à minha esposa Ruth, que
foi a grande incentivadora para que eu continuasse nos
estudos.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos,

ao meu orientador, *Prof. Dr. José Antônio Perrella Balestieri* que jamais deixou de me incentivar. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível.

aos meus pais *Almir* e *Dalva*, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos.

à minha esposa e meu filho que foram compreensivos nos momentos em que foi necessária minha dedicação aos estudos.

EPÍGRAFE

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis.”

José de Alencar

ZORNETTA, W.D. **Otimização da operação de ciclos combinados com múltiplos gases siderúrgicos**. 2016. 66 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

RESUMO

Os gases siderúrgicos disponíveis em empresas do setor como resultado de seus principais processos de transformação são o gás de coqueria (COG), o gás de alto forno (BFG) e o gás de aciaria (LDG); que são bastante valorizados pelo fato de minimizarem a necessidade de emprego de gás natural ou outra fonte combustível. As centrais termelétricas estão entre as principais consumidoras desses combustíveis, e a distribuição de combustíveis siderúrgicos para as mesmas é um problema discutido na literatura técnica como uma forma de minimizar os desequilíbrios entre a geração e o consumo dos mesmos. Ao mesmo tempo, busca-se maximizar a eficiência energética da empresa e a confiabilidade/disponibilidade do seu suprimento às unidades consumidoras sem queima direta nas torres de queima (*flares*). A presente proposta de pesquisa tem por objetivo modelar e propor soluções para a otimização da distribuição de gases combustíveis em centrais termelétricas em ciclo combinado gás/vapor considerando os impactos que a troca de combustíveis operam sobre o acionador principal (no caso, o conjunto a gás) em termos de sua resposta à intercambiabilidade entre combustíveis. As modificações propostas neste trabalho otimizam simultaneamente a distribuição de gases subproduto no sistema de gases siderúrgicos; foram avaliadas 56 combinações de combustíveis, o que resultou numa faixa de potência ideal para a aplicação do estudo entre 30 MW e 80 MW, e outra faixa entre 10 MW e 30 MW que deve ser evitada quando o objetivo é a receita líquida positiva. O estudo de caso mostra que o modelo proposto encontra a solução ideal em termos de redução de custo total quando se aplica o uso do COG na mistura com GN, bem como na substituição do GN por uma mistura de gases de processo COG e BFG, o que resultou nos três melhores resultados de receita líquida encontrados nesta análise.

PALAVRAS-CHAVE: Otimização; ciclos combinados; mistura de gases siderúrgicos.

ZORNETTA, W.D. **Optimization of combined cycles operation burning multiple steel mill gases**. 2016. 66 p. Dissertation (Master in Mechanical Engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

ABSTRACT

The steel gases available in companies in the sector because of their main transformation processes are coke oven gas (COG), blast furnace gas (BFG) and steel gas (LDG). These are highly valued for minimizing the need to use natural gas or other fuel source. The thermoelectric power plants are among the main consumers of these fuels and the distribution of steel fuels for them is a problem discussed in the technical literature as a way to minimize the imbalances between generation and consumption. At the same time, it is a way to maximize the energy efficiency of the company and the reliability / availability of its supply to the consumer units without direct burning in the flares. The present research proposal aims to model and propose solutions for the optimization of the distribution of fuel gases in thermoelectric power stations in combined gas / steam cycle considering the impacts that the exchange of fuels operate on the main driver (in this case, the gas turbine) In terms of its response to interchangeability between fuels. The modifications proposed in this work simultaneously optimize the by-product gas distribution in the cogeneration gas system, 56 combinations of fuels were evaluated, which resulted in an ideal power range for the application of the study between 30,000 and 80,000 kW and another between 10,000 and 30,000 kW which should be avoided when the objective is positive net revenue. The case study shows that the proposed model finds the ideal solution in terms of total cost reduction when applying the COG in the NG mixture as well as in the substitution of NG by a mixture of by-products COG and BFG, which resulted in the three best net income results found in this analysis.

KEYWORDS: Optimization; combined cycles; mixture of steel mill gas.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-----------|---|----|
| Figura 1 | Proposta para distribuição ótima de gases siderúrgicos..... | 16 |
| Figura 2 | Variabilidade de disp. de dif. gases siderúrgicos em escala temporal..... | 17 |
| Figura 3 | Esquema planta geração energia elétrica..... | 19 |
| Figura 4 | Esquema de distribuição de gases siderúrgicos..... | 25 |
| Figura 5 | Tela da planilha desenvolvida..... | 27 |
| Figura 6 | Matriz de valores coeficientes NASA..... | 29 |
| Figura 7 | Reprodução da tabela de valores dos coef. NASA em planilha Excel..... | 30 |
| Figura 8 | Cálculo balanço de massa..... | 31 |
| Figura 9 | Imagem tela Gaseq..... | 33 |
| Figura 10 | Esquema termodinâmico Ciclo Brayton..... | 33 |
| Figura 11 | Volume Controle Compressor..... | 34 |
| Figura 12 | Volume de Controle Combustor..... | 35 |
| Figura 13 | Volume de Controle Turbo gerador..... | 36 |
| Figura 14 | Esquema ciclo Rankine..... | 37 |
| Figura 15 | Volume Controle Caldeira HRSG..... | 38 |
| Figura 16 | Volume de controle Turbina a Vapor..... | 39 |
| Figura 17 | Volume de controle Condensador..... | 40 |
| Figura 18 | Representação modelagem..... | 42 |
| Figura 19 | Caixa de variáveis..... | 43 |
| Figura 20 | Esquema de análise do ciclo..... | 46 |
| Figura 21 | Comparativo melhores resultados..... | 56 |
| Figura 22 | Distribuição dos valores da análise..... | 58 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|-----------|--|----|
| Tabela 1 | Composição Molar dos Combustíveis | 28 |
| Tabela 2 | Energia dos combustíveis | 32 |
| Tabela 3 | Reprodução da tab de valores dos coeficientes NASA em planilha Excel.. | 30 |
| Tabela 4 | Método de combinação dos combustíveis | 45 |
| Tabela 5 | Combinação de análise dos combustíveis..... | 48 |
| Tabela 6 | Combinação de análise dos combustíveis (continuação)..... | 49 |
| Tabela 7 | Brayton Puro – Caso 1 ao 7 | 50 |
| Tabela 8 | Brayton + GN Caldeira..... | 51 |
| Tabela 9 | Brayton + COG Caldeira | 51 |
| Tabela 10 | Brayton + BFG Caldeira | 52 |
| Tabela 11 | Brayton + GN e COG Caldeira | 52 |
| Tabela 12 | Brayton + GN e BFG Caldeira | 53 |
| Tabela 13 | Brayton + COG e BFG Caldeira | 53 |
| Tabela 14 | Brayton + Caldeira de Recuperação | 54 |
| Tabela 15 | Comparativo com os melhores resultados | 55 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|------|---|
| BFG | Blast Furnace Gas |
| COG | Coke Oven Gas |
| EES | Engineer Equation Solver |
| GLP | Gás Liquefeito de Petróleo |
| GN | Gás Natural |
| HRSG | Heat Recovery Steam Generator |
| MILP | Mixed Integer Linear Programming |
| NASA | National Aeronautics and Space Administration |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|------------------------|--|
| a | Concentração de N ₂ nos produtos de combustão |
| BOI | Caldeira de vapor superaquecido |
| c | Concentração de O ₂ nos produtos de combustão |
| CM | Coefficiente molecular |
| CON | Condensador de Vapor |
| Cp | Capacidade térmica |
| CT | Torre de resfriamento |
| FE | Fator estequiométrico |
| FUEL | Combustível |
| GEN | Gerador de Energia Elétrica |
| GT | Turbina a gás |
| H | Entalpia |
| k | Cp/Cv |
| ṁ | Vazão em massa |
| P | Pressão |
| PC | Produto de combustão turbina a gás |
| Pot _{liq} | Potência líquida Total |
| PCI | Poder calorífico inferior |
| qh | Calor necessário para subir a temperatura ao desejável |
| Q _{inlet} | Energia térmica inserida na câmara de combustão |
| Receita _{Liq} | Receita Líquida da venda de energia elétrica |
| ST | Turbina a vapor |
| T | Temperatura |
| VC _{GN} | Valor de compra gás natural |
| VV _{EE} | Valor de Venda Energia Elétrica |
| y | Concentração de CO ₂ nos produtos de combustão |
| w | Concentração de H ₂ O nos produtos de combustão |
| W | Trabalho executado pela turbina a gás |
| W _{in} | Trabalho fornecido pela turbina a gás ao compressor |
| W _{NET} | Potência líquida da turbina |
| wt | Água |

LETRAS GREGAS

| | |
|----------|--------------------------|
| α | excesso de ar na mistura |
| η | rendimento |

SUBSCRITOS

| | |
|-------|---|
| GN | Gás Natural |
| in | Trabalho fornecido pela turbina a gás ao compressor |
| IN | Entrada |
| inlet | Energia térmica inserida na câmara de combustão |
| liq | Potência líquida Total |
| NET | Potência líquida Turbina |
| OUT | Saída |
| st | Vapor Superaquecido |

SUMÁRIO

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Introdução..... | 15 |
| 1.1 | Motivação para o Trabalho..... | 15 |
| 1.2 | Objetivos..... | 18 |
| 1.3 | Delimitação do Trabalho | 19 |
| 2 | Revisão Bibliográfica..... | 20 |
| 3 | Material e Método..... | 25 |
| 3.1 | Ciclo Brayton..... | 34 |
| 3.1.1 | Compressor..... | 34 |
| 3.1.2 | Câmara de Combustão | 35 |
| 3.1.3 | Turbina a Gás..... | 36 |
| 3.2 | Ciclo Rankine | 37 |
| 3.2.1 | Caldeira | 38 |
| 3.2.2 | Turbina a Vapor | 39 |
| 3.2.3 | Condensador / Torre de Resfriamento | 39 |
| 3.3 | Otimização do Ciclo..... | 41 |
| 3.3.1 | Modelagem | 41 |
| 3.3.2 | Restrições | 43 |
| 3.3.3 | Função Objetivo..... | 43 |
| 4 | Discussão de Resultados | 47 |
| 5 | Conclusão | 59 |
| 6 | Referências | 60 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO PARA O TRABALHO

A conservação de energia tem sido identificada em diferentes nichos industriais, mais recentemente processos, ciclos e etc. Os níveis de intervenção desta prática envolvem, sequencialmente, a redução dos desperdícios, a modificação do perfil de consumo, a melhoria dos sistemas de conversão de energia, a reutilização de recursos naturais, reciclagem e redução do conteúdo energético dos produtos, a discussão das relações centro/periferia que aumentam os deslocamentos de pessoas e produtos, além da mudança de padrões éticos e estéticos pela transformação dos indivíduos e da sociedade (DIAS et al. 2004).

A melhoria dos sistemas de conversão de energia, seja ela o projeto otimizado de um atomizador a ser empregado no queimador de uma caldeira ou a melhoria tecnológica de uma máquina térmica como um todo, apresenta um vasto campo de desenvolvimentos tecnológicos capaz de agregar valor econômico à atividade econômica à qual encontra-se envolvida. Isto não é diferente no setor siderúrgico, no qual a disponibilidade de gases combustíveis originados em seus principais processos podem representar a redução do emprego de fontes combustíveis mais caras e de caráter não renovável, tanto nos próprios processos quanto nas centrais termelétricas que autoproduzem energia (térmica e elétrica) para tais empresas.

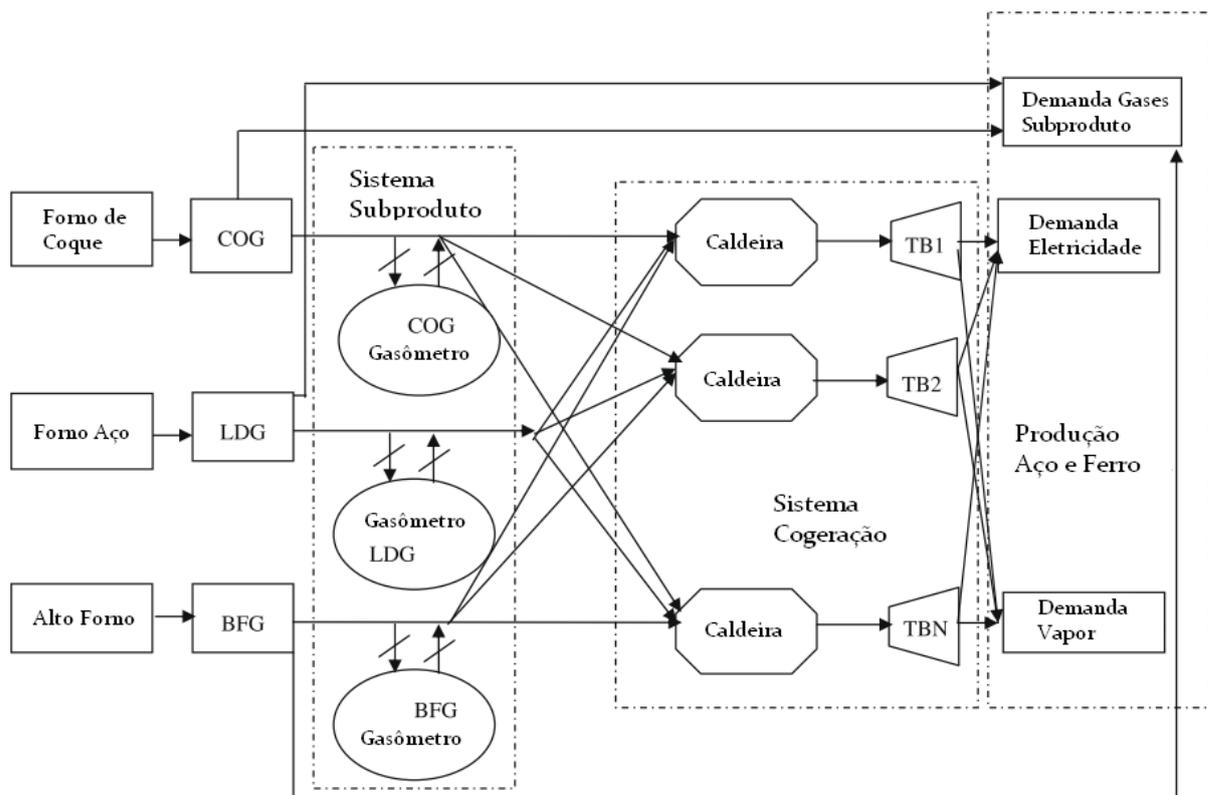
Os gases combustíveis produzidos em empresas do setor siderúrgicos resultantes de seus principais processos de transformação são o gás de coqueria (COG), o gás de alto forno (BFG) e o gás de aciaria (LDG). Em uma aplicação mais voltada à análise dos gases combustíveis em termos de sua possibilidade de intercâmbio, Caputo (2009) desenvolveu uma avaliação relativa ao uso de combustíveis gasosos alternativos (mistura de gás de coqueria com gases produzidos pela gaseificação de alcatrão e de gás natural com gás de alto forno) para reduzir o consumo de gás de coqueria em usinas siderúrgicas integradas.

No aspecto da modelagem de otimização do emprego de gases combustíveis, Kim et al. (2003) desenvolveram uma análise multi-período relativa ao controle do nível do gasômetro e da distribuição dos gases combustíveis de uma usina siderúrgica. Empregando variáveis contínuas e inteiras em um problema misto linear inteiro (*mixed integer linear problem*, MILP), determinaram a troca ótima entre os gases combustíveis disponíveis maximizando o uso eficiente dos combustíveis e minimizando, dentre outros, as emissões de determinados subprodutos e a condição liga/desliga dos queimadores das caldeiras.

A proposta de Larsson et al. (2006) considera aspectos energéticos, ambientais e econômicos em usina siderúrgica integrada. Pelo fato de ser o objeto de análise um sistema com múltiplas unidades de processo, técnicas de integração de processos (*process integration*, PI) como a análise Pinch, a análise exergetica e os métodos de programação matemática foram considerados como potencialmente recomendados para serem aplicados, sendo que os autores se decidiram pela última técnica, modelando a usina integrada como um problema de otimização MILP.

O modelo de otimização MILP também foi escolhido por Kong et al. (2010a) para a otimização multi-período de gases siderúrgicos em uma usina integrada de ferro e aço. A função objetivo proposta foi a redução do custo operacional de todo o sistema energético da usina para operação multi-período através da distribuição dos gases combustíveis gerados nos processos. Para este trabalho, os autores consideraram uma central de cogeração dotada de três caldeiras e três turbinas a vapor, podendo os gases siderúrgicos COG, LDG e BFG serem estocados em gasômetros ou queimados nas três caldeiras, conforme Figura. 1 (KONG et al., 2010a).

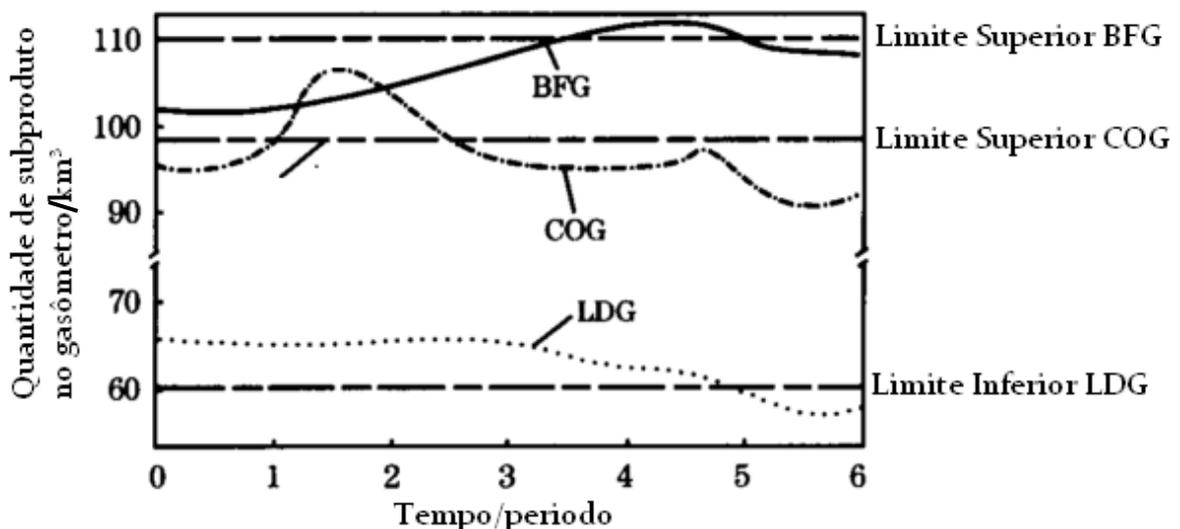
Figura 1 Proposta para distribuição ótima de gases siderúrgicos



Fonte: Adaptado de Kong *et al.* (2010a)

Em artigo do mesmo ano, Kong et al. (2010b) desenvolveram análise similar, empregando modelo de otimização MILP para a distribuição dos gases siderúrgicos, revelando uma redução de 6,2% nos custos operacionais pelo emprego do modelo em uma situação analisada, considerando central de cogeração idêntica à do caso anterior. A modelagem de otimização foi resolvida empregando o software Lingo 8.0 com 316 variáveis contínuas, 76 variáveis binárias e 392 restrições. Uma informação interessante, e aqui reproduzida na Figura. 2 (Kong et al., 2010b), corresponde aos valores mínimos (*lower bound*) e máximos (*upper bound*) de cada gás siderúrgico e as curvas de previsão de sua disponibilidade em seis períodos de tempo.

Figura 2 Variabilidade de disponibilidade de diferentes gases siderúrgicos em escala temporal



Fonte: Adaptado de Kong et al. (2010b)

Embora citado nos trabalhos anteriores e se constitua uma questão paralela ao problema que se pretende equacionar no presente projeto de pesquisa, o controle dos níveis dos gasômetros de COG, LDG e BFG foi objeto da análise de Zhang et al. (2011), revelando a importância da questão da distribuição dos gases siderúrgicos para o uso racional de tais produtos. Os autores utilizaram a técnica de aprendizado de máquinas e algoritmos de otimização para encontrarem o balanceamento ótimo dos três gasômetros em análise multi-período.

Pena et al. (2013) empregaram o modelo de otimização MILP para o problema de distribuição de gases siderúrgicos na usina integrada da Arcelor Mittal, considerando além dos já citados COG, BFG e LDG, o alcatrão, óleo viscoso produzido na coqueria e um gás misto (que inclui gás natural e os demais gases siderúrgicos). O problema foi resolvido empregando

o software MatLab 2013, contando com 310 variáveis contínuas e 400 variáveis inteiras, sendo 240 delas variáveis binárias. A situação analisada contemplou a distribuição dos gases siderúrgicos entre quatro caldeiras e quatro turbinas a vapor.

Devido ao rápido progresso da tecnologia relativa aos conjuntos a gás, projetos voltados à utilização dos gases siderúrgicos empregando ciclos combinados gás/vapor têm sido propostos em número significativo nas usinas siderúrgicas. Modesto e Nebra (2006, 2009) analisaram por meio de modelos termo econômicos, com dados relativos à Arcelor Mittal (na época, Companhia Siderúrgica de Tubarão), respectivamente, uma proposta de revitalização das termelétricas por meio da substituição da central térmica a vapor existente por ciclos combinados e a análise específica da central térmica a vapor existente.

De forma complementar às publicações anteriores, a análise desenvolvida em Chacartegui et al. (2013) se pauta no emprego de ciclos combinados gás/vapor para diferentes combustíveis de baixo poder calorífico (gás de síntese ou *syngas*). Neste caso, a análise não envolveu modelagem de otimização, mas sim uma análise de modelagem térmica e de comportamento de máquinas térmicas sob condições diversas do projeto original (para queima de gás natural); os autores demonstram que para manter condições similares de temperatura de entrada da turbina (TIT, *turbine inlet temperature*) e de eficiência térmica com combustíveis de baixo poder calorífico inferior é necessária maior vazão de combustível, um redesenho da câmara de combustão, bem como, no compressor.

1.2 OBJETIVOS

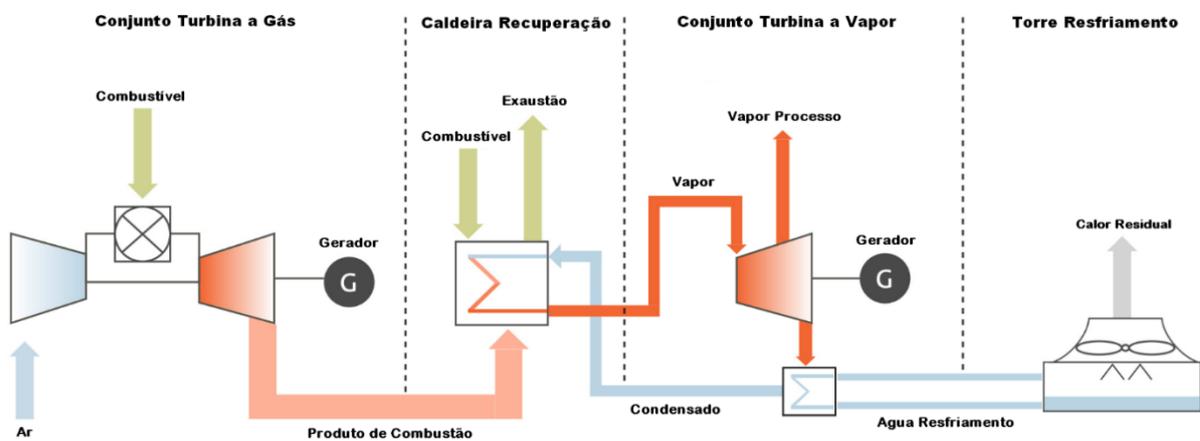
O objetivo desta dissertação é desenvolver uma análise energética de um ciclo combinado, porém, todo o modelamento pode também ser utilizado para um sistema de cogeração, que consiste num ciclo Brayton, queimando gases siderúrgicos, acoplada a uma caldeira de recuperação de calor com queima suplementar de combustível que produz vapor superaquecido para o ciclo Rankine. Além disso, a queima do gás siderúrgico (ou sua mistura) será comparada ao gás natural para identificar qual a melhor composição entre os combustíveis.

Posteriormente, a partir de uma análise econômica, calculam-se e comparam-se os custos de geração de energia e produção de vapor da instalação de geração de potência proposta com relação à receita líquida recebida pela venda de energia elétrica para concessionárias.

1.3 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

O ciclo combinado proposto para geração de energia elétrica baseado no consumo de gás siderúrgico consiste em um conjunto a gás, que se constitui de compressor, câmara de combustão, turbina a gás e gerador elétrico. O ciclo a vapor se constitui por uma caldeira de recuperação de calor com possibilidade de queima suplementar de combustível, turbina a vapor, condensador e torre de resfriamento. A Figura 3 exemplifica o modelo proposto.

Figura 3 Esquema planta geração energia elétrica.



Fonte: Adaptado http://www.repower.com/fileadmin/_migrated/pics/Kraftwerksschema_Grafik.jpg

O presente trabalho não analisa os desafios que o uso de gases siderúrgicos apresenta sobre os principais equipamentos de ciclo combinado, originalmente projetados para operação de gás natural. Em primeiro lugar, as restrições mais relevantes impostas pelos novos combustíveis para a central elétrica convencional precisam ser identificadas. Isto levaria à criação de uma lista dos pontos de restrição que impedem a planta de explorar plenamente o potencial dos novos combustíveis utilizados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nos últimos anos, a necessidade de uma utilização mais racional e eficiente da energia tem emergido como uma questão estratégica e urgente. Essa necessidade é particularmente percebida na produção de ferro e aço, não só devido aos custos crescentes de energia, mas também como consequência da competição do setor, que salienta algumas características do processo e seus produtos finais (por exemplo, custo e qualidade). Além disso, a utilização de fontes energéticas pode ser considerada como um duplo problema, envolvendo tanto a consciência por parte dos consumidores de que há uma disponibilidade limitada de energia como uma análise madura dos custos envolvidos para aquisição de energia.

Observa-se mais e mais um sentimento que sinaliza que o consumo de energia está intrinsicamente ligado às preocupações com sua conservação. As fontes de energia, além de caras e propensas a flutuações repentinas de preço são, em sua maioria, fontes não renováveis. Portanto, a conservação de energia é vital para se evitar o desperdício de recursos preciosos, desacelerando o rápido esgotamento de carvão, petróleo e gás natural do planeta. No entanto, com o grande crescimento da consciência ambiental dos últimos trinta anos, o uso de energia renovável já não está ligado a um fator puramente econômico.

Grande parte dos gases de efeito estufa (GEE) liberados na atmosfera é resultado direto da queima de combustíveis fósseis, o que faz com que a conservação de energia esteja intrinsecamente ligada às questões climáticas. Como abolir o uso de combustíveis fósseis ainda não é uma opção possível de ser prevista em curto e médio prazo, devido ao fato de que as fontes alternativas ainda não possuem volume e estabilidade suficiente para garantir a demanda da sociedade, o maior impacto na redução do consumo de energia e no gerenciamento das emissões se faz maximizando a eficiência no uso da energia.

O perfil da eficiência energética tem aumentado recentemente, devido ao aumento das preocupações sobre os impactos ambientais locais e globais de uso de energia. Desafios para a segurança energética também trouxeram a eficiência energética à tona, uma vez que contribuem diretamente para a redução do uso de energia.

A eficiência energética na produção de ferro e aço é crucial para assegurar a redução no custo de produção, a competitividade dos produtos siderúrgicos e para minimizar os impactos ambientais, tais como as emissões de GEE. As principais fontes energéticas de uma planta siderúrgica são combustíveis e energia elétrica. As fontes combustíveis são, em sua maioria, combustíveis sólidos (principalmente o carvão), seguido, em menor escala por combustíveis líquidos e gasosos.

Em uma planta de produção de ferro e aço, os combustíveis são utilizados basicamente como fonte de calor (energia térmica), bem como na redução do minério de ferro para a produção de ferro. A energia elétrica atende as necessidades do processo, acionando os motores e iluminação das instalações.

A primeira pessoa que deu forma à ideia de eficiência energética foi o físico e ativista ambiental norte-americano Amory Lovins (LOVINS, 1990). Com a economia abalada pela crise do petróleo de 1973, Lovins postulou e popularizou o conceito de “Negawatts”, um sistema para satisfazer as necessidades energéticas não através do aumento da produção de energia, mas através do aumento da eficiência em seu uso. Desde então, todos estão trabalhando para mudar a tecnologia existente, buscando-se aperfeiçoar as tecnologias existentes ou conceber novas soluções que maximizem o valor de cada unidade de energia.

A produção de ferro e aço usa a energia de forma intensiva, o que torna este setor o maior consumidor de energia entre todos os setores industriais e também o maior emissor de CO₂. Com isso, o custo com energia elétrica constitui uma parte significativa da produção do aço. Em porcentagem, o custo da energia elétrica está na faixa de 20% a 30% (KONG, 2010) dependendo da rota de produção, tipo de minério de ferro e carvão utilizado, o *mix* de produtos de aço, tecnologia de controle de operação e eficiência de material.

As fontes primárias de energia utilizadas no ferro e aço abrangem a produção de carvão de coque, óleos combustíveis líquidos e eletricidade. Em alguns casos nos quais há a disponibilidade de gás natural em abundância, este também é utilizado na produção de ferro. Enquanto o carvão de coque e óleos combustíveis líquidos são usados principalmente nas plantas de aço integradas, a eletricidade é a fonte de energia empregada em fornos de arco elétrico ou fornos de indução nas empresas siderúrgicas.

Na indústria de ferro e aço, gases são subproduto de energia importante. Por isso, é significativo o uso da otimização, na qual o objetivo é alcançar a redução do custo total. Para este trabalho, a abordagem de programação para otimização multi-período, com uma estrutura linear inteira mista (MILP), propõe a otimização e distribuição de gases de subproduto da produção de aço ao sistema de consumo gás, sistema este direcionado à cogeração e produção de energia elétrica para o consumo da planta e exportação do excedente para a rede elétrica.

Assim como no trabalho apresentado por Haining (2009), é de fundamental importância o uso de gases provenientes do processo fabril, pois o gasto com energia elétrica na produção de aço corresponde a 20% do total dos custos de produção. Esta energia contida nos gases pode ser convertida em várias formas de energia, sendo uma delas como vapor e posteriormente na geração de energia elétrica. Porém, na grande maioria das aciarias, a produção desses gases

acompanha a produção de cada tipo de aço, o que resulta em uma produção desbalanceada de subprodutos. Desta forma, se faz necessário a elaboração de um plano bem detalhado da otimização de uso dos possíveis combustíveis, pois tanto o excesso de combustível armazenado no gasômetro como a falta deste, impõem penalizações ao sistema.

Apesar de terem muitas pesquisas em torno deste assunto, pouco tem sido focado na otimização dos produtos do aço. Akimoto et al. (1996) propuseram um modelo MILP multi-período que implementou o controle de nível de segurança do gasômetro e a distribuição ideal em usuarios diferentes. Tendo em conta as restrições mais práticas tais como a capacidade de nível, capacidade de ajustável dos usuários, e os custos de operação,

Sinha et al. (2006) aplicaram a modelagem em uma usina, utilizado os recursos alocados para o atingimento de bons resultados. Antes de aplicar as técnicas de previsão, os dados são classificados e, em seguida, passam por uma filtragem para criar sequências de tendência e volatilidade separadas. Com base nisso, o modelo de programação foi construído para o excedente de exploração de gás, e tem sido utilizado para investigar as medidas abrangentes para a gestão do risco probabilístico operacional e otimizar o benefício econômico em várias condições de trabalho e implementações. A partir disso, ampliaram-se os conceitos de sistemas de despacho excedente de gás tradicionais, fornecendo um método para as empresas determinarem os horários ideais de operação.

A formulação de um modelo matemático por Kim et al. (2003) que tinha por objetivo minimizar o custo total no período multitemporal, e otimizar a demanda de combustíveis para diminuir a variação de preços, considerou também um custo adicional para a condição de ligar ou não os queimadores da caldeira. Com isso, o modelo de otimização proposto otimiza simultaneamente os níveis de subproduto dos gasômetros e de distribuição de gás entre objetivos conflitantes. Ambas integrais e as funções objetivos são usadas na determinação da mudança de carga de combustível ideal de acordo com os tipos de combustível.

Os objetivos incluem também a minimização da emissão desfavorável ou escassez de subproduto de gás, o consumo de petróleo, o número de partidas e paradas do queimador, manter os níveis normais e maximizando o combustível de uso eficiente. Resultados do estudo de caso mostram que o modelo proposto, encontrou a solução ideal em termos de redução de custo total e o modelo de otimização que torna a solução mais aplicável do que a abordagens anteriores.

Por outro lado, Mikael (2005) aposta no aprofundamento da modelagem de cada componente da planta e na integração dos itens entre si. Porém, as práticas operacionais para um sistema industrial são frequentemente afetadas por restrições externas relativas à economia,

eficiência energética e ambiental. Há várias formas de aumentar a eficiência do sistema, por exemplo, na instalação de novos equipamentos e mudanças no processo. No entanto, os sistemas industriais, tais como uma planta siderúrgica integrada consistem de vários processos ligados entre si com interações do produto e subproduto, onde mudanças de qualquer unidade podem resultar em mudanças no sistema como um todo. Uma abordagem simultânea foi adotada como método de integração de processos com foco no sistema total da planta siderúrgica.

O modelo desenvolvido e utilizado para estudar o efeito de mudanças no sistema de materiais e de energia existente, tendo como principal objetivo, ser utilizado para analisar a energia, aspectos ambientais e econômicos são de grande valia para tomada de decisão. Ainda com relação ao equacionamento, Mikael et al. (2005) utilizam um paralelo entre a produção de aço e a produção de subprodutos como o COG e BFG, para determinar o consumo de energia dos equipamentos.

Além das análises dos equipamentos já existentes na planta, foram consideradas novas tecnologias para a comparação com o processo atual. No entanto, o foco estava mais direcionado para a reutilização de energia de cada componente da planta, o que deixou um pouco de lado a produção e consumo dos gases residuais provenientes da produção de aço.

Em outra vertente, Xiaoping (2010) dedicou seu foco de análise apenas no gerenciamento do estoque de gases de siderurgia. De acordo com tal autor, para a otimização do gasômetro de forma segura e estável é crucial a regulagem da quantidade de combustível estocado em função da produção e consumo de gás no mesmo período de tempo. Desta forma, foi desenvolvido um algoritmo híbrido que atua em dois diferentes pontos: o primeiro atua na previsão futura da produção de novas bateladas e o segundo atua no consumo atual do combustível.

A condição de equilíbrio do gás de subproduto é uma tarefa importante na programação adequada de produção da indústria de aço. No entanto, esta previsão muitas vezes é influenciada por outros fatores, sendo difícil obter um modelo preciso para este tipo de análise. Dessa forma, foi sugerido um modelo para a previsão e ajuste na quantidade proposta de gás de subproduto, considerando os diferentes estilos de operação dos gasômetros, os modelos de previsão de nível e um algoritmo de otimização de parâmetros híbrido de elevada precisão. Em seguida, com base no nível gasômetro previsto, a quantidade de ajuste ideal foi calculada para garantir as condições de operação do gasômetro na zona de segurança.

Kong et al. (2010) concentraram as forças na pesquisa de um modelo de programação linear inteira mista dinâmico (MILP) que visa otimizar a distribuição de gás subproduto

otimizando simultaneamente o sistema de gás, sistema de cogeração e do sistema siderúrgicos. Com isso, procuraram alcançar a redução do custo operacional.

Manter o equilíbrio do balanço de gás de subproduto é uma tarefa importante na programação adequada de energia na indústria de aço. No entanto, esta tarefa é muitas vezes influenciada por fatores externos e é praticamente impossível obter um modelo preciso para análise. Neste trabalho, Zhang (2011) propõe um método para a previsão e ajuste no suporte de gás de subproduto. Considerando os diferentes estilos de operação de gasômetros, modelos de previsão simples e múltiplas, são estabelecidas pela metodologia de aprendizagem de máquina.

Um algoritmo de parâmetros híbrido foi desenvolvido para criar um modelo de elevada precisão. Em seguida, com base no nível previsto do gasômetro, a quantidade de ajuste ideal é calculada através de um método novo, desta forma é possível controlar o gasômetro na zona de segurança. Os resultados obtidos com o uso do modelo demonstraram que o método proposto pode prever com precisão e ajustar os níveis do gasômetro e proporcionar uma orientação notável para a programação razoável de gases de produtos secundários.

A utilização de combustíveis de baixo poder calorífico em turbinas a gás convencionais e equipamentos de ciclo combinado a gás e a vapor foram estudados por vários autores ao longo dos últimos anos. No trabalho proposto por Chacartegui (2013), o efeito do uso de diferentes combustíveis de baixo poder calorífico é analisado com relação ao desempenho na produção de gás (produto de combustão) e vapor nas plantas de ciclo combinado. As principais restrições encontradas quando se tenta explorar o potencial dos combustíveis de baixo poder calorífico considerados, também são identificados em algumas regras gerais no que diz respeito às modificações necessárias que precisariam ser implementadas em plantas padrão.

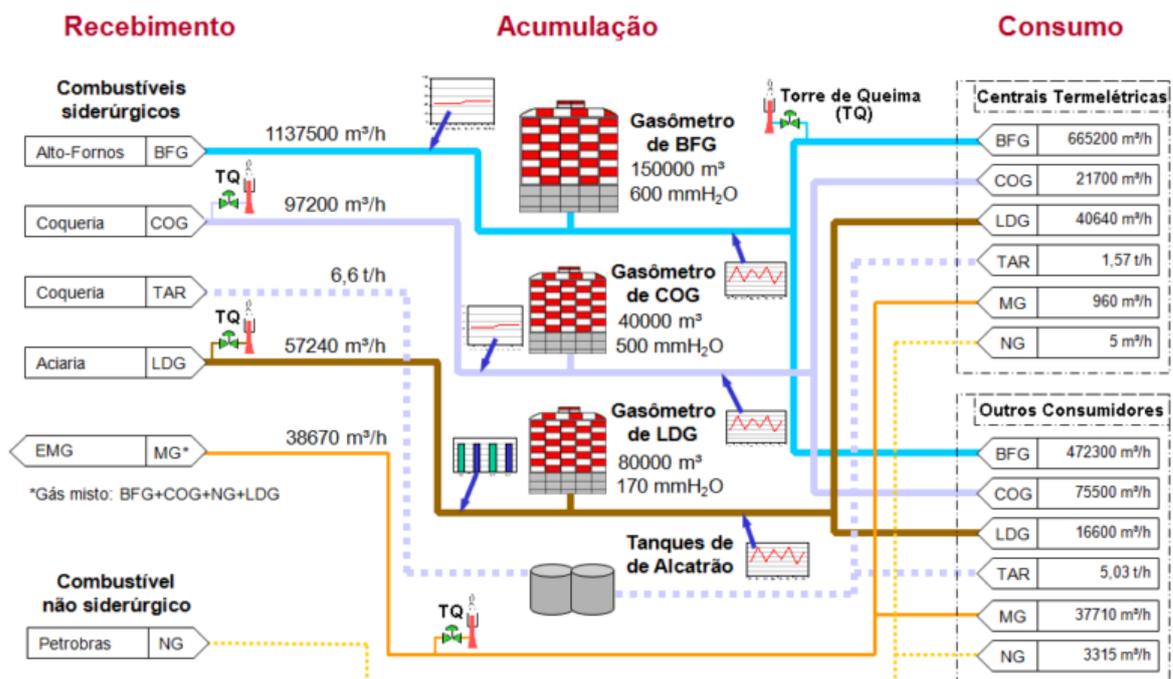
3 MATERIAL E MÉTODO

O projeto de pesquisa se estrutura sobre os dados referentes à disponibilidade de gases siderúrgicos de uma usina siderúrgica destinada às centrais termelétricas, as informações fornecidas pela empresa, referem-se a 2 dias de produção de uma liga de aço mais comum e de maior escala de produção na empresa. Porém, observou-se que a composição dos gases disponíveis durante todo o período de processamento da matéria prima se manteve estável, com base na disponibilidade de gases de subproduto e desta forma, adotou-se uma abordagem diferente para a verificação das melhores combinações de combustíveis.

No modelamento tradicional seriam utilizados os valores obtidos na siderúrgica para determinar uma melhor composição de acordo com a disponibilidade dos gases em questão, porém, neste trabalho, visou a determinar melhor faixas de potência gerada e receita líquida recebida pela venda de energia elétrica para rede de distribuição. Assim, tem-se as melhores faixas de operação para cada mix de combustível.

A tendência da disponibilidade de gases siderúrgicos COG, BFG e LDG observada na Figura 2 pode ser assumida como representativa do comportamento a ser modelado. Valores médios da disponibilidade dos gases siderúrgicos podem ser assumidos a partir das informações descritas em Pena et al. (2013) e reproduzidas na Figura 4.

Figura 4 Esquema de distribuição de gases siderúrgicos



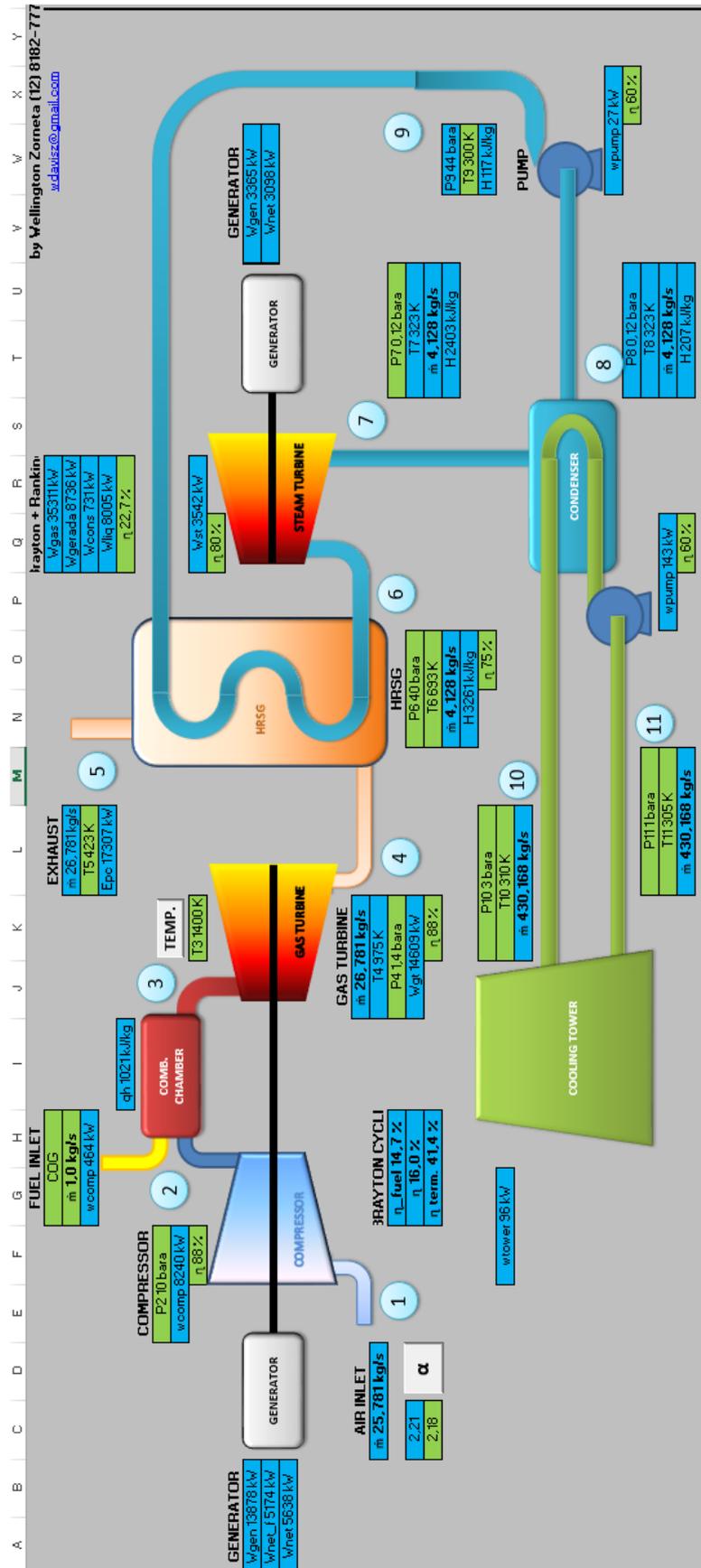
Fonte: Adaptado segundo Pena et al. (2013)

Para a otimização da operação do ciclo combinado, sujeito à flutuação da disponibilidade de gases combustíveis, será realizada a modelagem térmica de um ciclo combinado gás/vapor levando em conta aspectos termodinâmicos e tecnológicos, bem como a modelagem da combustão segundo os diferentes gases siderúrgicos submetidos à queima na câmara de combustão do acionador principal (conjunto a gás) e, no caso da caldeira com queima suplementar.

A análise da modelagem da combustão de alguns dos gases siderúrgicos na câmara de combustão do conjunto foi preliminarmente desenvolvida em formato de planilha, servindo de base para criação da modelagem no Engineering Equation Solver (EES) versão Professional e também como validação dos cálculos, uma vez que a planilha referente ao emprego de gás natural foi calibrada de acordo com o software de equilíbrio químico Gaseq. A Figura 5 ilustra a tela de operação da referida planilha, referente a um ciclo combinado gás/vapor queimando COG.

Inicialmente, na elaboração da primeira etapa foram considerados os combustíveis Gás Natural (GN), Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), Gás de Coqueria (COG), Gás de Alto-forno (BFG) e um combustível a partir de uma mistura de oito componentes, podendo variar entre os compostos a seguir – C_2H_4 , C_2H_6 , C_3H_4 , C_3H_6 , C_3H_8 , C_4H_{10} , C_5H_{12} , CH_4 , CO , CO_2 , H_2 , H_2O (estado líquido), H_2O (estado gasoso), H_2S , N_2 , O_2 e SO_2 .

Figura 5 Tela da planilha desenvolvida



Fonte: Autoria própria

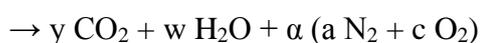
Com exceção ao combustível misto, foram utilizadas composições de acordo com dados colhidos da literatura, sendo adotados os seguintes coeficientes molares para cada item, segundo a Tabela 1.

Tabela 1 Composição Molar dos Combustíveis

| COMPOSIÇÃO CONSIDERADA DOS COMBUSTÍVEIS | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--------|--------|--------|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| | CH4 | C2H4 | C2H6 | C3H4 | C3H6 | C3H8 | C4H10 | C4H8 | C5H12 | CO | CO2 | H2 | N2 | O2 |
| GN | 0,9 | - | 0,05 | - | - | 0,02 | 0,01 | - | - | - | 0,02 | - | - | - |
| GLP | 0,0077 | - | - | 0,05 | 0,3125 | 0,2606 | 0,1983 | 0,1003 | 0,0707 | - | - | - | - | - |
| COG | 0,249 | 0,0194 | 0,0027 | - | - | - | - | - | - | 0,0603 | 0,0179 | 0,6041 | 0,0435 | 0,024 |
| BFG | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0,2357 | 0,2268 | 0,0349 | 0,5021 | - |

Fonte: Perry e Chilton (1973)

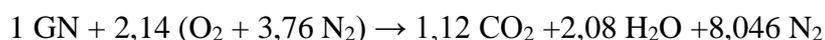
A sequência do trabalho deu-se a partir da elaboração de uma sistemática de cálculo de balanço de massa, referente a cada uma das composições. Essa sistemática visa encontrar a estequiometria para cada gás. A equação dos produtos de combustão para todos os combustíveis a serem analisados tem como base a seguinte formulação:



na qual y , w , a e c são as concentrações em base seca dos produtos de combustão e α é o excesso de ar normalizado, para atingimento de temperatura pré-determinado.

Sendo assim, para a combustão de 1 mol de GN com ar nas condições de temperatura de chama adiabática, e o ar atmosférico admitido com a composição de 21% de oxigênio (O_2) e 79% de nitrogênio (N_2), a título de simplificação, obtém-se a seguinte expressão:

Balanço estequiométrico da combustão do Gás Natural



O próximo passo para se determinar a modelagem termodinâmica é encontrar os valores de entalpia de formação e calor específico a pressão constante (C_p). Este procedimento será utilizado tanto para os reagentes quanto para os produtos da combustão em todas as formulações possíveis.

A Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço (National Aeronautics and Space Administration, NASA) desenvolveu um método eficaz para calcular entalpia e capacidade térmica dos elementos. Trata-se de um polinômio com 7 coeficiente, conforme descrito no Memorando Técnico 4513 (McBRIDE, 1993), dividido em duas faixas de operação: a primeira

para reações que ocorrem a uma temperatura entre 1.000 K e 6.000 K, que é a faixa importante para a combustão, e a segunda para uma faixa de baixa temperatura, entre 300 K e 1.000 K.

A matriz encontra-se distribuída da seguinte forma, referida à Figura 6: na margem esquerda e sem recuo, encontra-se o componente químico em análise, e ao lado, ainda na mesma linha, a faixa de operação a que os coeficientes podem ser submetidos. Nas três linhas seguintes, apresentam-se os coeficientes utilizados, e sua sequência se dá da esquerda para a direita e de cima para baixo. Os primeiros sete coeficientes correspondem aos coeficientes a_1 , a_2 , a_3 , a_4 , a_5 , b_1 e b_2 , para temperaturas entre 200 K e 1.000 K. Os próximos sete coeficientes, nomeados também como a_1 , a_2 , a_3 , a_4 , a_5 , b_1 e b_2 são utilizados para a faixa de temperatura entre 1000 K e 3.500 K.

Figura 6 Matriz de valores coeficientes NASA

| | | | | | | | | |
|------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------|----------|---|
| C2H3 | L 2/92C | 2H | 3 | G | 200.000 | 3500.000 | 1000.000 | 1 |
| | 3.01672400E+00 | 1.03302292E-02 | -4.68082349E-06 | 1.01763288E-09 | -8.62607041E-14 | | | 2 |
| | 3.46128739E+04 | 7.78732378E+00 | 3.21246645E+00 | 1.51479162E-03 | 2.59209412E-05 | | | 3 |
| | -3.57657847E-08 | 1.47150873E-11 | 3.48598468E+04 | 8.51054025E+00 | | | | 4 |
| C2H4 | L 1/91C | 2H | 4 | G | 200.000 | 3500.000 | 1000.000 | 1 |
| | 2.03611116E+00 | 1.46454151E-02 | -6.71077915E-06 | 1.47222923E-09 | -1.25706061E-13 | | | 2 |
| | 4.93988614E+03 | 1.03053693E+01 | 3.95920148E+00 | -7.57052247E-03 | 5.70990292E-05 | | | 3 |
| | -6.91588753E-08 | 2.69884373E-11 | 5.08977593E+03 | 4.09733096E+00 | | | | 4 |
| C2H5 | L12/92C | 2H | 5 | G | 200.000 | 3500.000 | 1000.000 | 1 |
| | 1.95465642E+00 | 1.73972722E-02 | -7.98206668E-06 | 1.75217689E-09 | -1.49641576E-13 | | | 2 |
| | 1.28575200E+04 | 1.34624343E+01 | 4.30646568E+00 | -4.18658892E-03 | 4.97142807E-05 | | | 3 |
| | -5.99126606E-08 | 2.30509004E-11 | 1.28416265E+04 | 4.70720924E+00 | | | | 4 |
| C2H6 | L 8/88C | 2H | 6 | G | 200.000 | 3500.000 | 1000.000 | 1 |
| | 1.07188150E+00 | 2.16852677E-02 | -1.00256067E-05 | 2.21412001E-09 | -1.90002890E-13 | | | 2 |
| | -1.14263932E+04 | 1.51156107E+01 | 4.29142492E+00 | -5.50154270E-03 | 5.99438288E-05 | | | 3 |
| | -7.08466285E-08 | 2.68685771E-11 | -1.15222055E+04 | 2.66682316E+00 | | | | 4 |

Fonte: (<<http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19940013151.pdf>>, 1993).

À primeira vista, o conjunto de números parece um pouco confuso e de difícil interpretação. Por este motivo, achou-se melhor a criação em uma aba na planilha de Excel, com uma matriz de dados referente a cada componente a serem utilizados nos cálculos (Tabela 2). Segundo o memorando técnico 4513 da NASA (1993), as equações que regem a modelagem de Entalpia (H) e Calor Específico (Cp), são referidos às equações (1) e (2).

$$\frac{H^o(T)}{RT} = a_1 + a_2 \frac{T}{2} + a_3 \frac{T^2}{3} + a_4 \frac{T^3}{4} + a_5 \frac{T^4}{5} + \frac{b_1}{T} \quad (1)$$

$$\frac{C_p^o(T)}{R} = a_1 + a_2 T + a_3 T^2 + a_4 T^3 + a_5 T^4 \quad (2)$$

Além dos coeficientes apresentados anteriormente, tanto a equação de entalpia quanto a de calor específico empregam temperatura como variável para determinar os resultados. Portanto, é necessário determinar os valores de C_p nos pontos T_1 , T_{2s} , T_2 , T_3 , T_{4s} e T_4 , pontos este referente ao cálculo termodinâmico do ciclo a gás.

Tabela 2 Reprodução da tabela de valores dos coeficientes NASA em planilha Excel

| | Temp. Range | | Mm | Temperatura >= 1000 K | | | | | | | Temperatura < 1000 K | | | | | | |
|--------|-------------|------|----------|-----------------------|----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | | | a1 | a2 | a3 | a4 | a5 | b1 | b2 | a1 | a2 | a3 | a4 | a5 | b1 | b2 |
| | | | | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
| C2H4 | 200 | 6000 | 28,05376 | 3,99E+00 | 1,05E-02 | -3,72E-06 | 5,95E-10 | -3,54E-14 | 4,27E+03 | -2,69E-01 | 3,96E+00 | -7,57E-03 | 5,71E-05 | -6,92E-08 | 2,70E-11 | 5,09E+03 | 4,10E+00 |
| C2H6 | 200 | 6000 | 30,06904 | 4,05E+00 | 1,54E-02 | -5,47E-06 | 8,78E-10 | -5,23E-14 | -1,24E+04 | -9,69E-01 | 4,29E+00 | -5,50E-03 | 5,99E-05 | -7,08E-08 | 2,69E-11 | -1,15E+04 | 2,67E+00 |
| C3H4 | 200 | 6000 | 40,06476 | 6,32E+00 | 1,11E-02 | -3,96E-06 | 6,36E-10 | -3,79E-14 | 2,01E+04 | -1,10E+01 | 2,61E+00 | 1,21E-02 | 1,85E-05 | -3,45E-08 | 1,53E-11 | 2,15E+04 | 1,02E+01 |
| C3H6 | 200 | 6000 | 42,08064 | 6,04E+00 | 1,63E-02 | -5,82E-06 | 9,36E-10 | -5,59E-14 | -7,42E+02 | -8,44E+00 | 3,83E+00 | 3,29E-03 | 5,05E-05 | -6,66E-08 | 2,64E-11 | 7,89E+02 | 7,53E+00 |
| C3H8 | 200 | 6000 | 44,09562 | 6,67E+00 | 2,06E-02 | -7,37E-06 | 1,18E-09 | -7,07E-14 | -1,63E+04 | -1,32E+01 | 4,21E+00 | 1,71E-03 | 7,07E-05 | -9,20E-08 | 3,65E-11 | -1,44E+04 | 5,61E+00 |
| C4H10 | 200 | 6000 | 58,1222 | 9,45E+00 | 2,58E-02 | -9,24E-06 | 1,49E-09 | -8,88E-14 | -2,01E+04 | -2,63E+01 | 6,14E+00 | 1,65E-04 | 9,68E-05 | -1,25E-07 | 4,98E-11 | -1,76E+04 | -1,08E+00 |
| C4H8 | 200 | 6000 | 56,10752 | 7,76E+00 | 2,31E-02 | -8,26E-06 | 1,33E-09 | -7,99E-14 | -1,18E+03 | -2,19E+01 | 3,81E+00 | -9,68E-03 | 1,28E-04 | -1,63E-07 | 6,48E-11 | 1,87E+03 | 8,61E+00 |
| C5H12 | 298,15 | 5000 | 72,15028 | 8,66E+00 | 3,36E-02 | -1,19E-05 | 1,91E-09 | -1,13E-13 | -2,35E+04 | -1,69E+01 | 1,00E+01 | -1,94E-02 | 1,48E-04 | -1,69E-07 | 6,29E-11 | -2,15E+04 | -1,21E+01 |
| CH4 | 200 | 6000 | 16,04246 | 1,91E+00 | 9,60E-03 | -3,38E-06 | 5,39E-10 | -3,19E-14 | -1,01E+04 | 8,48E+00 | 5,15E+00 | -1,37E-02 | 4,94E-05 | -4,92E-08 | 1,70E-11 | -1,02E+04 | -4,63E+00 |
| CO | 200 | 6000 | 28,0104 | 3,05E+00 | 1,35E-03 | -4,86E-07 | 7,89E-11 | -4,70E-15 | -1,43E+04 | 6,02E+00 | 3,58E+00 | -6,10E-04 | 1,02E-06 | 9,07E-10 | -9,04E-13 | -1,43E+04 | 3,51E+00 |
| CO2 | 200 | 6000 | 44,0098 | 4,64E+00 | 2,74E-03 | -9,96E-07 | 1,60E-10 | -9,16E-15 | -4,90E+04 | -1,93E+00 | 2,36E+00 | 8,98E-03 | -7,12E-06 | 2,46E-09 | -1,43E-13 | -4,84E+04 | 9,90E+00 |
| H2 | 200 | 6000 | 2,01588 | 2,93E+00 | 8,27E-04 | -1,46E-07 | 1,54E-11 | -6,89E-16 | -8,13E+02 | -1,02E+00 | 2,34E+00 | 7,98E-03 | -1,95E-05 | 2,02E-08 | -7,38E-12 | -9,18E+02 | 6,83E-01 |
| H2O(l) | 273,15 | 600 | 18,01528 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 7,26E+01 | -6,62E-01 | 2,56E-03 | -4,37E-06 | 2,78E-09 | -4,19E+04 | 1,53E+00 |
| H2O(v) | 200 | 6000 | 18,01528 | 2,68E+00 | 2,97E-03 | -7,74E-07 | 9,44E-11 | -4,27E-15 | -2,99E+04 | 6,88E+00 | 4,20E+00 | -2,04E-03 | 6,52E-06 | -5,49E-09 | 1,77E-12 | -3,03E+04 | -8,49E-01 |
| H2S | 300 | 5000 | 34,08109 | 2,98E+00 | 3,60E-03 | -1,23E-06 | 1,97E-10 | -1,17E-14 | -3,52E+03 | 6,78E+00 | 4,12E+00 | -1,88E-03 | 8,21E-06 | -7,06E-09 | 2,14E-12 | -3,68E+03 | 1,53E+00 |
| N2 | 200 | 6000 | 28,0134 | 2,95E+00 | 1,40E-03 | -4,93E-07 | 7,86E-11 | -4,61E-15 | -9,24E+02 | 5,87E+00 | 3,53E+00 | -1,24E-04 | -5,03E-07 | 2,44E-09 | -1,41E-12 | -1,05E+03 | 2,97E+00 |
| O2 | 200 | 6000 | 31,9988 | 3,46E+00 | 1,04E-03 | -2,80E-07 | 3,11E-11 | -8,56E-16 | 1,02E+04 | 4,15E+00 | 3,79E+00 | -3,22E-03 | 1,12E-05 | -1,17E-08 | 4,18E-12 | 1,03E+04 | 3,27E+00 |
| SO2 | 300 | 5000 | 64,0648 | 5,38E+00 | 1,68E-03 | -6,32E-07 | 1,08E-10 | -6,67E-15 | -3,76E+04 | -1,83E+00 | 3,67E+00 | 2,28E-03 | 8,47E-06 | -1,37E-08 | 5,76E-12 | -3,69E+04 | 7,97E+00 |

Fonte: Autoria própria

O primeiro ponto, T_1 , é a temperatura de formação dos reagentes e assumiu-se 300 K; os pontos T_{2s} e T_2 são utilizados para determinar a temperatura de saída do ar comprimido do compressor, sendo o primeiro a temperatura isentrópica e o segundo a temperatura politrópica, para determinar a potência necessária para comprimir o volume de ar.

Outra variável do problema trata-se da temperatura na saída da câmara de combustão, T_3 ; esta variável pode ser manipulada ou ser um valor pré-determinado de acordo com a tecnologia em questão da máquina térmica, ou ainda ser adicionada no equacionamento como uma variável a ser definida pelo problema.

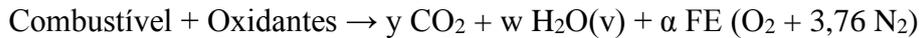
Passando o foco para a turbina a gás, têm-se T_{4s} e T_4 ; da mesma forma que no compressor, tem-se temperatura isentrópica da turbina e temperatura politrópica no ponto real de expansão para se determinar o potencial térmico contida nos gases de escape da turbina e que serão enviados à caldeira de recuperação para produção de vapor.

Com os valores de entalpia e calor específico calculados para os reagentes, o próximo passo é determinar o valor de C_p para os produtos de combustão referente a cada combustível estudado. Na sequência, determina-se o excesso de ar, podendo-se estipular a quantidade exata de ar (O_2 e N_2) nos reagentes; para este cálculo faz-se necessária a adoção de uma equação

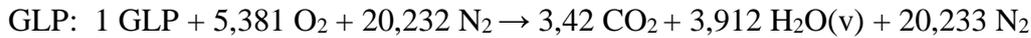
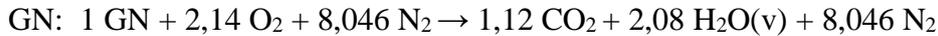
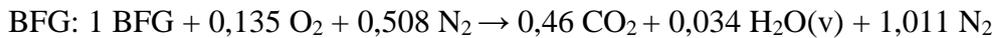
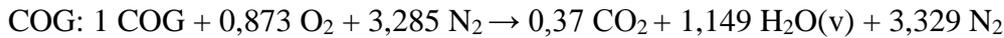
referente ao cálculo de temperatura de chama adiabática, válida para quaisquer dos gases em estudo (representado como GÁS), modelado para 1 kmol (CARVALHO JR, 2007).



De maneira genérica, levando em consideração os vários combustíveis estudados, tem-se uma equação padrão para o balanço de massa, que se apresenta a seguir:



sendo FE o Fator Estequiométrico, determinado para cada combustível de acordo com o balanço de massa; estes valores foram determinados levando se em consideração a temperatura de chama adiabática e estequiométrica, ou seja, α igual a 1. Com isso, são obtidas as seguintes equações de balanço de massa para cada combustível:



Todos esses cálculos foram previamente modelados e validados na planilha em Excel, neste caso, apresentado como exemplo o balanço de massa para o BFG conforme na Figura 7, em função da temperatura predeterminada na câmara de combustão do ciclo a gás.

Figura 7 Cálculo balanço de massa

| COMBUSTIVEL | | | | BALANÇO DE MASSA | | | | OXIDANTES | | 21% OXIGEN. | |
|-------------|---------------|------------|-----------|------------------|-----|-----|-----|-------------------------------|------------|-------------|------------|
| BFG | | | | | | | | 0,3312 O2 | | 1,2452 N2 | |
| 0,2357 CO | 0,2268 CO2 | 0,5021 N2 | 0,0349 H2 | | | | | 0,1353 | | | |
| 0,2357 C | 0,2268 C | 0 C | 0 C | 0 C | 0 C | 0 C | 0 C | | 0 C | | 0 C |
| 0 H | 0 H | 0 H | 0,0698 H | 0 H | 0 H | 0 H | 0 H | | 0 H | | 0 H |
| 0,2357 O | 0,4536 O | 0 O | 0 O | 0 O | 0 O | 0 O | 0 O | | 0,662318 O | | 0 O |
| 0 N | 0 N | 1,0042 N | 0 N | 0 N | 0 N | 0 N | 0 N | | 0 N | | 2,490314 N |
| 0 S | 0 S | 0 S | 0 S | 0 S | 0 S | 0 S | 0 S | | 0 S | | 0 S |
| PRODUTOS | | | | | | | | 1,70 ALFA | | | |
| | | | | | | | | 1300 TEMPERATURA PROCESSO [K] | | | |
| 0,46 CO2 | 0,0349 H2O(v) | 0,196 O2 | 1,747 N2 | | | | | 0,46 | 0,46 C | 0,4625 | |
| 0,4625 C | 0 C | 0 C | 0 C | | | | | 0,0349 | 0,07 H | 0,0698 | |
| 0 H | 0,0698 H | 0 H | 0 H | | | | | 0,675809 | 1,35 O | 0,9599 | 0,35 |
| 0,925 O | 0,0349 O | 0,391718 O | 0 O | | | | | 1,747257 | 3,49 N | 3,49 | |
| 0 N | 0 N | 0 N | 3,49 N | | | | | | | | |
| 0 S | 0 S | 0 S | 0 S | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | O2 | 1 |
| | | | | | | | | | | N2 | 3,76 |
| | | | | | | | | | | O2 | 2,447589 |
| | | | | | | | | | | N2 | 9,202935 |

Fonte: Autoria própria

A Tabela 3 apresenta os valores adotados para o Fator Estequiométrico (FE) e a quantidade de energia disponível considerada para cada combustível, em termos da diferença da entalpia de formação (ΔH).

Tabela 3 Energia dos combustíveis

| ENERGIA COMBUSTIVEIS | | |
|----------------------|------------------|---------|
| | ΔH [cal] | FE |
| GN | 205500 | 2,14 |
| GLP | 490216 | 5,381 |
| COG | 86878 | 0,87385 |
| BFG | 13200 | 0,1353 |

Fonte: Perry e Chilton (1973)

Considerando a energia disponível nos combustíveis (ΔH) e isolando o excesso de ar (α) da equação (3), representada para o metano (CARVALHO JR, 2007), obtém-se a equação (4).

$$\Delta H_{C,CH_4,25} = \int_{T_1}^{T_F} [1 \cdot c_{p,CO_2} + 2 \cdot c_{p,H_2O} + 7,52\alpha \cdot c_{p,N_2} + 2(\alpha - 1) \cdot c_{p,O_2}] dT, \quad (3)$$

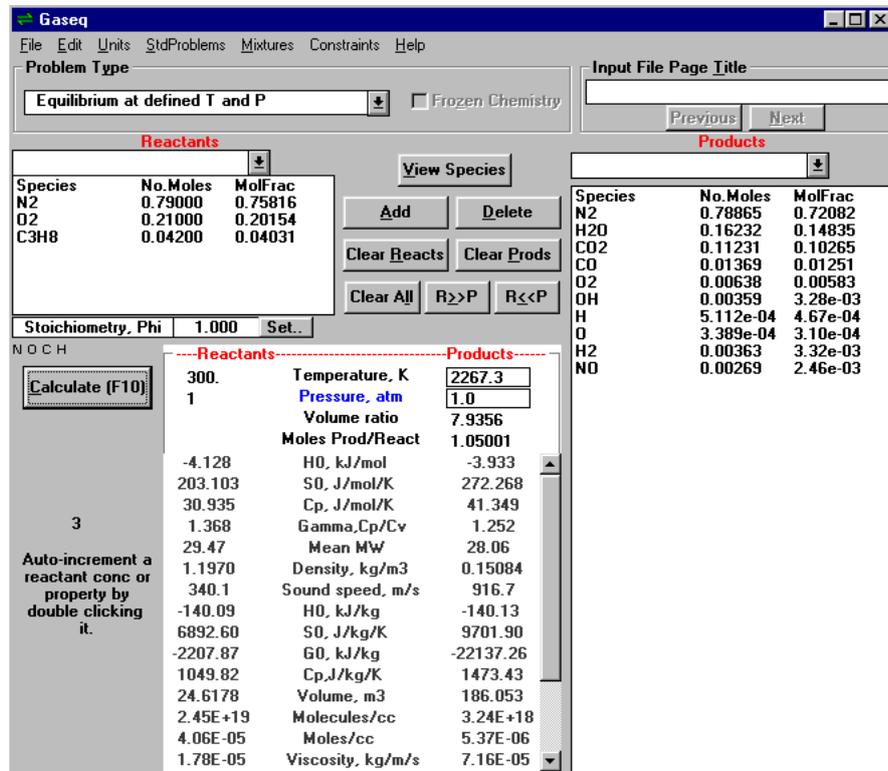
$$\alpha = \frac{\Delta H_{comb} - CM_{CO_2} \cdot h_{CO_2} - CM_{H_2O} \cdot h_{H_2O} + FE \cdot h_{O_2}}{FE \cdot h_{O_2} + 3,76 \cdot FE \cdot h_{N_2}} \quad (4)$$

sendo CM o coeficiente molar dos produtos de combustão e h a entalpia encontrada de acordo com o equacionamento descrito em NASA (1993).

Tendo em mãos o valor normalizado de α para cada combustível, para uma determinada temperatura T_3 basta multiplicar o fator estequiométrico (FE) pelo excesso de ar (α) e se obtém o coeficiente molar (CM) dos produtos de combustão (PC) do O_2 ; para encontrar o valor correspondente para o N_2 , basta multiplicar o valor encontrado para o CM do O_2 por 3,76 e encontra-se o valor para o nitrogênio.

Para validação dos valores encontrados na modelagem de balanço químico representados anteriormente, foi utilizado o software de equilíbrio químico Gaseq (GASEQ, 2016), cuja imagem de uma das telas é apresentada na Figura 8, com o qual é possível definir misturas ou simples substâncias, escolher os radicais do produto de combustão, calcular viscosidade e condutividade térmica, além de outras opções.

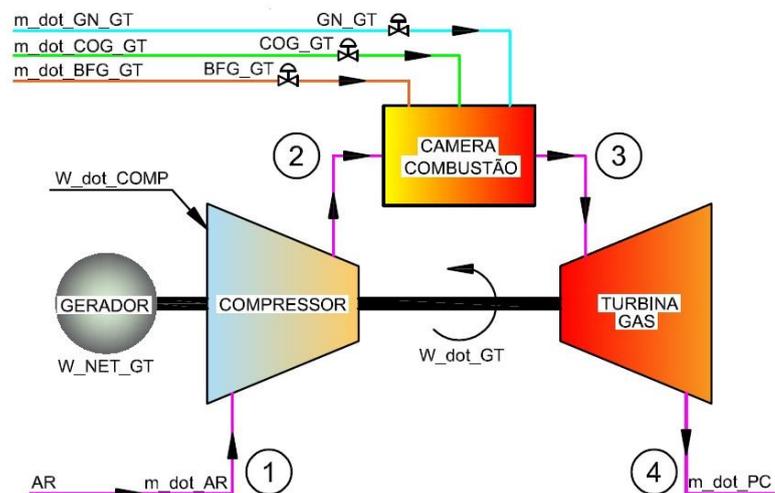
Figura 8 Imagem tela Gaseq



Fonte: Gaseq (2016)

A análise termodinâmica dos componentes do ciclo combinado é então apresentada; toda a modelagem foi desenvolvida para o ciclo Rankine e Brayton e baseia-se na 1ª Lei da Termodinâmica. A Figura 9 apresenta o conjunto a gás com as opções de entrada de três combustíveis (gás natural, COG e BFG).

Figura 9 Esquema termodinâmico Ciclo Brayton



Fonte: Autoria própria

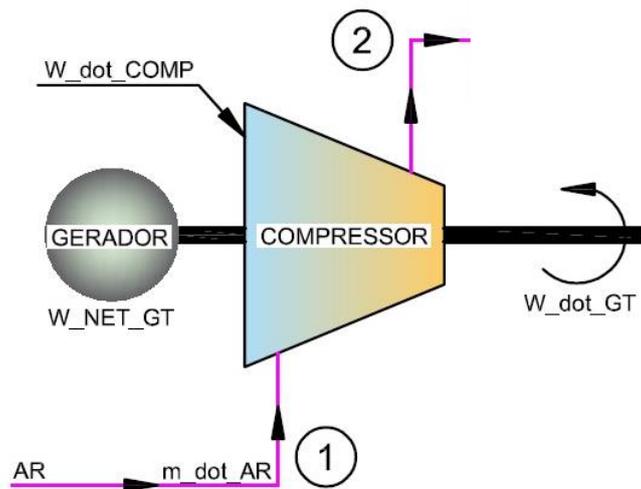
Considerando a primeira lei da Termodinâmica, toda energia será conservada; desta forma, será aplicado um volume de controle (VC) em cada componente, verificando-se as formas de energia que entram e saem através do mesmo.

3.1 CICLO BRAYTON

3.1.1 Compressor

Os parâmetros de modelamento do compressor são definidos por: admissão de ar no compressor nas condições de temperatura T_1 e pressão P_1 , e exaustão de ar nas condições de temperatura T_2 e pressão P_2 , bem como a potência de compressão do ar (\dot{W}_{comp}); a potência térmica liberada no processo de compressão e que cruza o volume de controle é desprezada. A Figura 10 ilustra o referido componente, com as variáveis referidas à modelagem realizada.

Figura 10 Volume Controle Compressor



Fonte: Autoria Própria

As equações (5) a (7) representam a modelagem do compressor isentrópico:

$$T_{2s} = T_1 \cdot \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (5)$$

sendo T_{2s} a temperatura isentrópica do compressor.

$$T_2 = \left(\frac{(T_{2S} - T_1)}{\left(\frac{\eta_{comp}}{100} \right)} \right) + T_1 \quad (6)$$

T_2 é a temperatura de saída do ar comprimido e η_{comp} é o rendimento do compressor expresso em valor percentual.

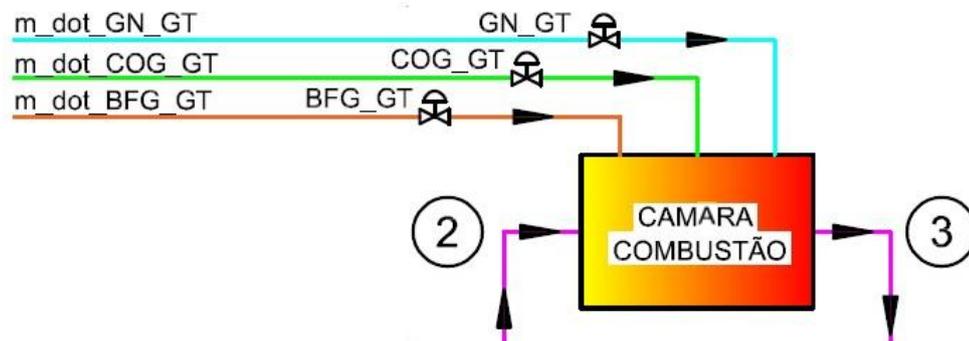
$$\dot{W}_{comp} = m_{AR} \cdot Cp_{AR} \cdot (T_2 - T_1) \quad (7)$$

\dot{W}_{comp} é a potência mecânica necessária para comprimir o ar.

3.1.2 Câmara de Combustão

O ar comprimido proveniente do compressor chega à câmara de combustão (Figura 11) aquecido devido ao processo de compressão do ar; desta forma, a energia necessária (qh) para que a temperatura atinja o valor esperado T_3 será expressa pela equação 8.

Figura 11 Volume de Controle Combustor



Fonte: Autoria própria

$$qh = \dot{m}_{AR} \cdot Cp_{PC}(T_3 - T_2) \quad (8)$$

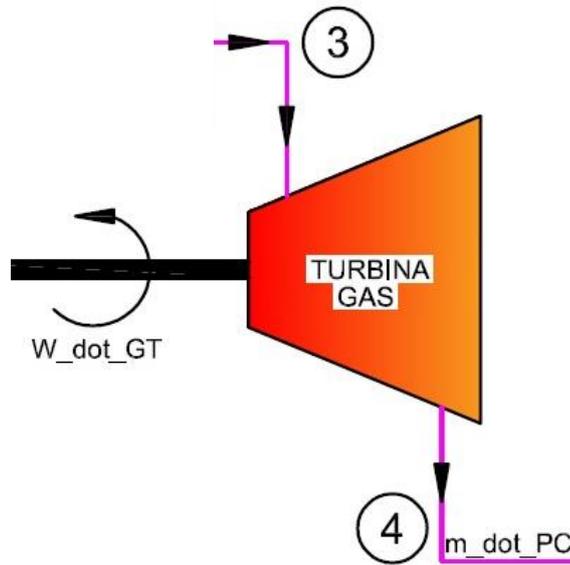
sendo que uma parcela de qh é composta pela energia contida no ar comprimido.

3.1.3 Turbina a Gás

No ciclo Brayton tem-se a turbina a gás (Figura 12), que realiza potência expandindo os gases provenientes do combustor; essa potência (\dot{W}_{turb}) pode ser calculada através da equação (11).

$$T_{4S} = \frac{T_3}{\left(\frac{P_2}{P_4}\right)^{\frac{k-1}{k}}} \quad (9)$$

Figura 12 Volume de Controle Turbo gerador



Fonte: Autoria própria

sendo T_{4S} a temperatura isentrópica da turbina

$$T_4 = -\frac{\eta_{turb}}{100}(T_3 - T_{4S}) + T_3 \quad (10)$$

T_4 é a temperatura de saída dos gases quentes da turbina

$$\dot{W}_{turb} = \dot{m}_{PC} \cdot C_{pPC} \cdot (T_3 - T_4) \quad (11)$$

e \dot{W}_{turb} é a potência mecânica gerada pela turbina

Encerrando as análises do ciclo Brayton, tem-se o gerador elétrico, que apresenta eficiência elevada para condição operacional compatível com a condição nominal da turbina a gás, sendo neste caso assumido 95%. Portanto, a potência líquida da turbina (Pot_{liq}) é o trabalho gerado pela turbina (\dot{W}_{turb}) menos o trabalho necessário para comprimir o ar (\dot{W}_{turb}) vezes o rendimento do gerador (η).

Ainda no sentido de determinar a eficiência do ciclo, aplica-se o consumo de combustível em função de quanto calor foi gerado, portanto, a função de rendimento térmico do ciclo é obtido a partir da equação (12).

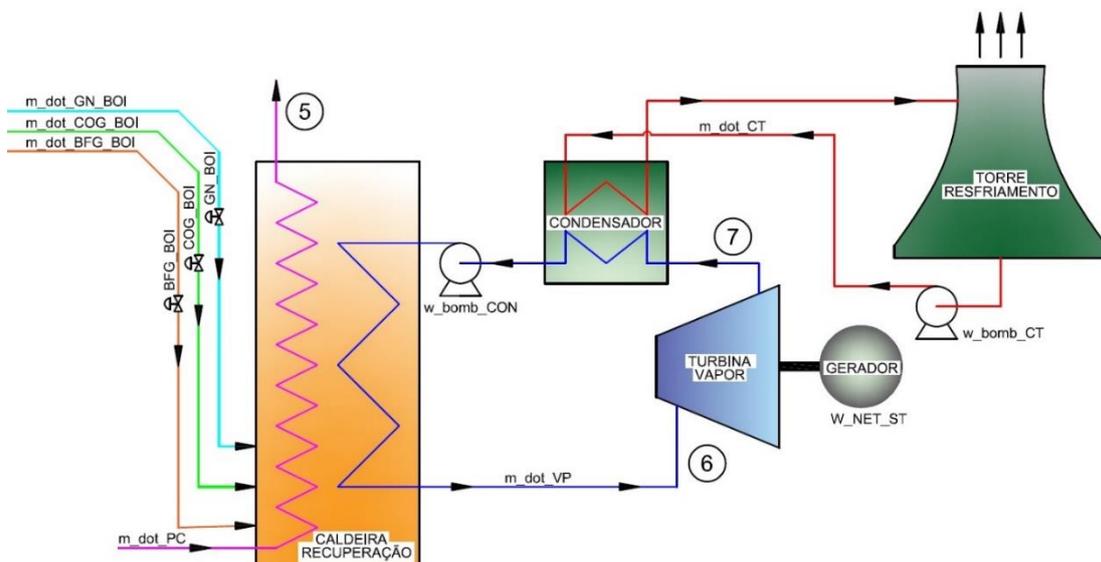
$$\eta_{term} = \frac{Pot_{liq}}{\dot{m}_{comb} \cdot PCI_{comb}} \quad (12)$$

sendo \dot{m} a vazão em massa de combustível utilizado no processo e PCI o poder calorífico inferior do gás.

3.2 CICLO RANKINE

O terceiro item a ser analisado é o ciclo Rankine (Figura 13); para este conjunto serão considerados na formulação da modelagem da caldeira, turbina vapor, condensador e torre de resfriamento.

Figura 13 Esquema ciclo Rankine

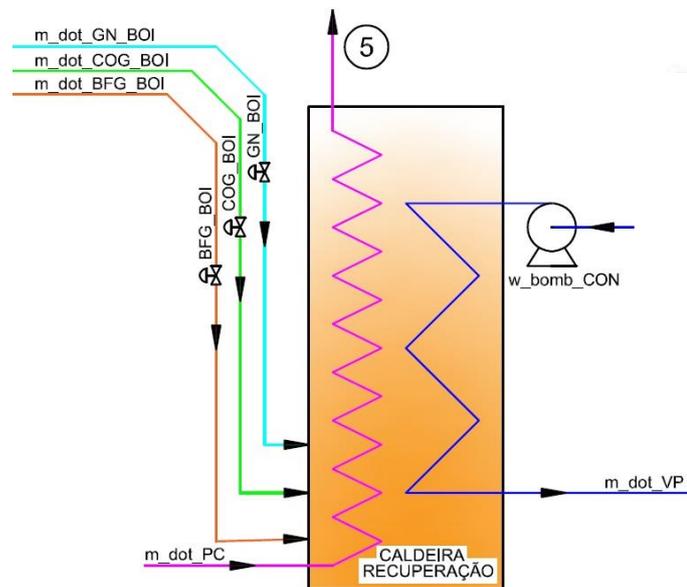


Fonte: Autoria própria.

3.2.1 Caldeira

Para este item considerou-se uma caldeira de recuperação de calor com queima suplementar (Figura 14); desse modo, será possível considerar consumos específicos de combustíveis para cada condição de queima e atingir pontos de potência e vazão desejados.

Figura 14 Volume Controle Caldeira HRSG



Fonte: Autoria própria

A equação 13 rege este item, recuperando parte da energia existente nos produtos de combustão proveniente da turbina a gás e em segundo ponto a adição de energia com uma queima suplementar.

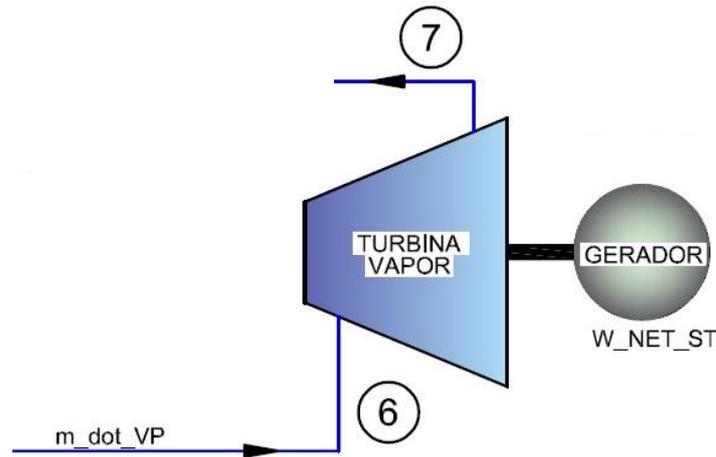
Na modelagem, cada combustível recebeu uma variável booleana (que apenas pode assumir o valor 0 ou 1) para anular a função caso o combustível não seja utilizado no cálculo, sendo para o Gás Natural empregada a variável GN_{BOI} , COG_{BOI} para o COG, e BFG_{BOI} para o BFG.

$$\frac{\eta_{HRSG}}{100} \cdot ((\dot{m}_{GN} \cdot PCI_{GN}) \cdot GN_{BOI} + (\dot{m}_{BFG} \cdot PCI_{BFG}) \cdot COG_{BOI} + (\dot{m}_{COG} \cdot PCI_{COG}) \cdot BFG_{BOI} + (\dot{m}_{PC\ GN} + \dot{m}_{PC\ BFG} + \dot{m}_{PC\ COG}) \cdot Cp(T_4 - T_8)) = \dot{m}_{VAPOR} \cdot (h_{ST_{P7T7}} - h_{WT_{P5T5}}) \quad (13)$$

3.2.2 Turbina a Vapor

No caso da turbina a vapor, será considerado apenas a potência resultante da energia contida no vapor, ou seja, será desconsiderado qualquer tipo de perda inerente ao processo.

Figura 15 Volume de controle Turbina a Vapor



Fonte: Autoria própria

A potência da turbina a vapor calcula-se a partir da equação 14.

$$\dot{W}_{ST} = \dot{m}_{STEAM} \cdot (h_{STP_6T_6} - h_{STP_7T_7}) \quad (14)$$

Assim como no ciclo Brayton, o rendimento do gerador elétrico foi assumido como sendo de 95%. Portanto, a potência líquida \dot{W}_{NET} da turbina a vapor é dada pela equação 15.

$$\dot{W}_{NET_{ST}} = \dot{W}_{ST} \cdot \eta_{GEN} \quad (15)$$

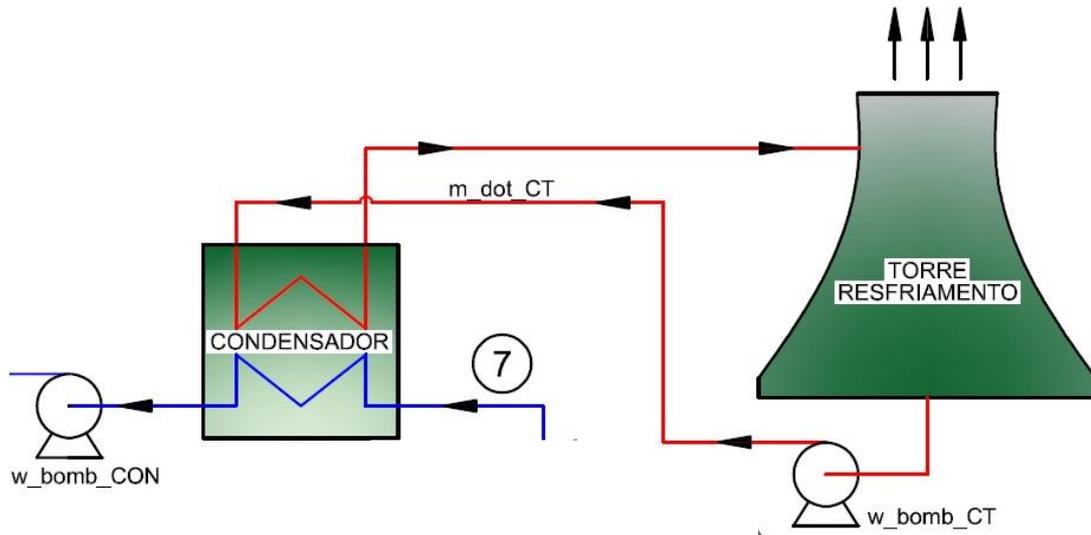
3.2.3 Condensador / Torre de Resfriamento

Neste último item do ciclo Rankine, será aplicada a análise em conjunto do condensador, torre de resfriamento e bomba (Figura 16). A torre de resfriamento é responsável por remover toda energia residual da massa de vapor, até que este volte a sua forma líquida e possa novamente ser recirculada e transformada em vapor na caldeira.

Desta forma, a potência contida no vapor saturado multiplicado pela quantidade de massa é igual à diferença da potência que a água consegue retirar do vapor. Seguindo os procedimentos para seleção da torre de resfriamento (CHEREMISINOFF, 1981), foram adotadas algumas considerações de maneira bem conservadora e baseadas nas condições climáticas do Brasil. Portanto, como temperatura de bulbo úmido adotar-se-á temperatura encontrada em Manaus, que de acordo com tabela disponível no site do fabricante de torres de resfriamento (ALPINA, s.d.) será de 28,5° C e umidade relativa entre 70 e 80%; com isso, pode-se determinar a temperatura de bulbo seco utilizando uma carta psicrométrica, chegando-se à temperatura de 32° C, que será adotada como a temperatura de saída da torre de resfriamento.

De maneira conservadora, a faixa de variação da temperatura, ou seja, a diferença entre a temperatura de água que entra na torre em relação à água resfriada que volta para o condensador, será de 5° C; segundo referências de fornecedores de equipamento (MARLEY, s.d.), a média a ser considerada é de 15° F, que convertido à unidade do Sistema Internacional resulta 9,5 °C; desta forma, pode-se determinar a vazão em massa de água necessária de acordo com a equação de conservação de energia descrita na equação 16.

Figura 16 Volume de controle Condensador



Fonte: Autoria própria

A equação (16) apresenta o balanço de energia no condensador.

$$\dot{m}_{STEAM} \cdot (h_{STCOND} - h_{WTCOND}) = \dot{m}_{WATERCT} \cdot (h_{WTINCT} - h_{WTOUTCT}) \quad (16)$$

Com o resultado da quantidade de água necessária para retirar a energia contida no vapor, pode-se calcular a potência requerida pela bomba d'água. Este procedimento se aplica tanto para a bomba que pressuriza água na caldeira quanto para a bomba que envia água para a torre de resfriamento.

O rendimento considerado para esse equipamento foi de 60% e a conversão para unidade de kW dá-se pela multiplicação a 0,746, conforme equação 17.

$$W_{CT} = \left(\dot{m}_{WT_{CT}} \cdot \frac{3,6}{60} \right) \cdot (\Delta T) \cdot (0,746) \quad (17)$$

Com isso, fecha-se o ciclo de cálculos para a modelagem termodinâmica e de balanço de massa e energia. A próxima etapa consiste na análise de maximização e minimização das variáveis para encontrar o melhor ponto de atuação para cada combustível.

3.3 OTIMIZAÇÃO DO CICLO

Neste tópico serão abordadas as variáveis que foram consideradas para otimizar o problema, as premissas da modelagem, algumas restrições de capacidade e quantidade dos equipamentos e a função objetivo que amarra as condições do problema.

3.3.1 Modelagem

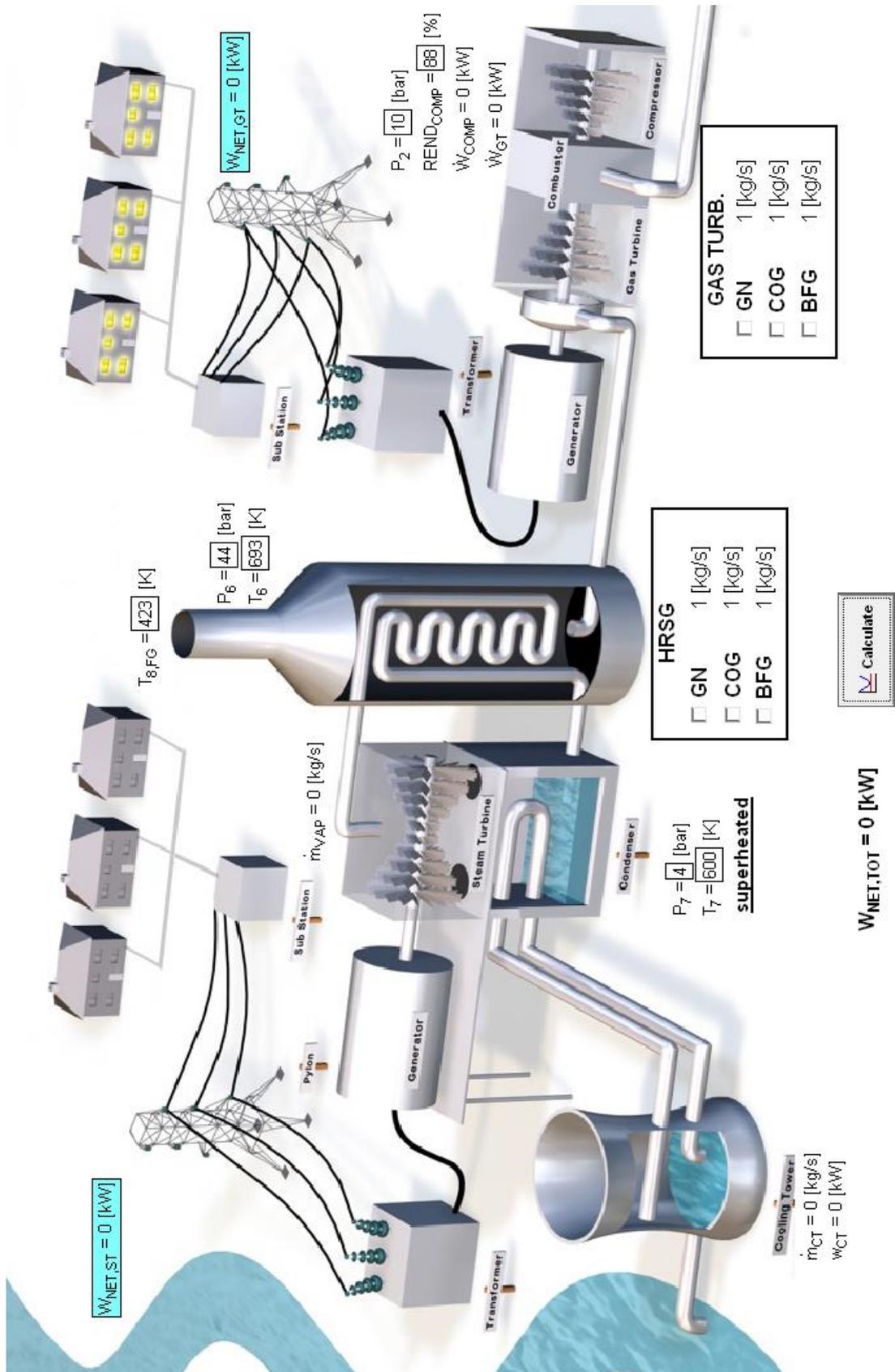
A modelagem final do problema foi criado no software EES (*Engineer Equation Solver*); a Figura 18 apresenta um desenho esquemático de uma planta de geração de energia, linhas de transmissão e o consumidor final, representado pelas residências.

Conforme se pode observar na Figura 17, existe a possibilidade de escolha entre três combustíveis, podendo-se selecionar cada um isoladamente ou uma mistura de todos ao mesmo tempo. Esta premissa se estende também à caldeira de recuperação. Caixas de seleção permitem definir os combustíveis na caldeira de recuperação e na turbina a gás.

As entradas passíveis de configuração são:

- a relação de pressão do compressor conjunto turbo gerador;
- rendimento do compressor de ar;
- temperatura T_3 na câmara de combustão;
- temperatura e pressão do vapor na caldeira;
- condição de operação, na turbina a vapor, sendo condensação ou contrapressão;
- a temperatura de exaustão da chaminé na caldeira.

Figura 17 Representação modelagem



Fonte: autoria própria

Ao lado de cada torre de transmissão nota-se um retângulo na cor ciano, que indica a quantidade de energia líquida que está sendo disponibilizada para as residências, tanto do lado do ciclo Brayton quanto do lado do ciclo Rankine. Por questão de facilidade de verificação do resultado final, ao lado do botão de cálculo apresenta-se a soma dos valores de potência líquida de cada ciclo disponibilizada para a rede.

3.3.2 Restrições

Como se trata de um modelo termodinâmico, as restrições utilizadas limitam-se apenas a ao tamanho dos equipamentos. Deste modo, é possível simular desde uma microusinha de energia até grandes centrais termoelétricas.

Os limites de potência do conjunto turbo gerador e turbina a vapor são configurados em um módulo próprio do software EES, no qual constam informações referentes às variáveis, conforme Figura 18. Dessa forma, é possível travar os limites inferiores e superiores a cada variável, de maneira fácil e rápida, podendo ser alterado de acordo com a necessidade de cada simulação.

Figura 18 Caixa de variáveis

| Variable | Guess | Lower | Upper | Display | Units | Key | Comment |
|------------|--------|------------|------------|---------|-------|-----|--------------------|
| w_CT | 1 | -infinity | infinity | A 1 | N kW | | |
| W_dot_COMP | 1 | 0,0000E+00 | infinity | A 1 | N kW | | |
| W_dot_GT | 1 | 0,0000E+00 | infinity | A 1 | N kW | | |
| W_dot_ST | 1 | 0,0000E+00 | infinity | A 1 | N kW | | |
| W_N2_BFG | 1,487 | -infinity | infinity | A 1 | N | | |
| W_N2_COG | 12,24 | -infinity | infinity | A 1 | N | | |
| W_N2_GN | 29,33 | -infinity | infinity | A 1 | N | | |
| W_NET_GT | 1 | 0,0000E+00 | infinity | A 1 | N kW | | |
| W_NET_ST | 1 | 0,0000E+00 | infinity | A 1 | N kW | X | Potencia Gerada TV |
| W_NET_TOT | 1 | 0,0000E+00 | 2,5000E+05 | A 1 | N kW | | |
| Z_O2_BFG | 0,3955 | -infinity | infinity | A 3 | N | | |
| Z_O2_COG | 3,256 | -infinity | infinity | A 3 | N | | |
| Z_O2_GN | 7,8 | -infinity | infinity | A 3 | N | | |

Fonte: Software EES, (2015).

3.3.3 Função Objetivo

A função objetivo visa a maximização do valor de venda de energia elétrica (VV_{EE}) para a rede de distribuição elétrica; em contrapartida, deseja-se a minimização do consumo de combustíveis, principalmente o GN, que impõe ao projeto uma penalidade do valor de compra do combustível quando é empregado, com isso tem-se a receita líquida (equação 18) uma das

condições que sara levada em consideração para análise e tomada de decisão do melhor mix de combustíveis.

$$Receita_{Liq} = W_{NETTOT} \cdot VV_{EE} - (\dot{m}_{GN} \cdot VC_{GN} \cdot 3600) \quad (18)$$

A redução no consumo dos combustíveis é aplicada aos dois ciclos, Brayton e Rankine, A função objetivo do problema é apresentada na equação 19.

$$\begin{aligned} potencia_{total} = W_{NETTOT} \cdot VV_{EE} - & \left((\dot{m}_{FUELGTGN} \cdot GN_{GT} \cdot VC_{GN}) \cdot GN_{GT} + \right. \\ & \left(\dot{m}_{FUELGTBFG} \cdot BFG_{GT} \right) \cdot BFG_{GT} + \left(\dot{m}_{FUELGTCOG} \cdot COG_{GT} \right) \cdot COG_{GT} + \\ & \left(\dot{m}_{BOIGN} \cdot GN_{BOI} \right) \cdot GN_{BOI} + \left(\dot{m}_{BOIBFG} \cdot BFG_{BOI} \right) \cdot BFG_{BOI} + \\ & \left. \left(\dot{m}_{BOICOG} \cdot COG_{BOI} \right) \cdot COG_{BOI} \right) \end{aligned} \quad (19)$$

Com análise dos resultados mapeadas, desenvolve-se a apresentação e análise dos resultados. Inicialmente serão consideradas faixas de potência para o conjunto a gás e caldeira de recuperação. A análise terá como objetivo verificar a condição do conjunto a gás com a atuação dos três combustíveis simultâneos e, em seguida, a alternância de combustíveis para identificação do melhor objeto de experimento que atenda à função objetivo.

A título de exemplo, no primeiro caso apenas o GN estará disponível no ciclo Brayton, os demais combustíveis estarão inoperantes. Na Figura 19, as linhas tracejadas representam aquelas que não contam com vazão de combustível, associadas a válvulas de acionamento de abertura e fechamento de linha. Assim, para identificar a abertura da válvula será considerado valor 1 e para identificar o fechamento o valor 0, conforme identificado na Tabela 3.

No segundo caso, apenas o COG estará disponível para o ciclo Brayton, e assim por diante, conforme demonstração na Tabela 3. Após a primeira rodada com sete possíveis combinações será acrescentado o GN na caldeira, serão apresentadas mais sete combinações e assim sucessivamente, descrevendo-se todas as possibilidades possíveis do uso dos combustíveis.

A Figura 19 apresenta o esquema gráfico para os casos 1 e 56 respectivamente analisados, sendo que o caso 1 apenas a queima de gás natural na turbina a gás, o que pode ser observado pela linha contínua, que indica a utilização da linha e o não uso pela linha tracejada. O mesmo acontece com o caso 56, porém desta vez com todas as linhas contínuas indicando o uso de

todos os combustíveis simultâneos. O objetivo desse cruzamento é encontrar o caso que apresenta a maior potência líquida disponibilizada para a rede elétrica com o menor consumo de GN, ou seja, a maior receita contra o menor custo de operação.

Para a decisão de qual o melhor caso, serão tomadas como pontos para análise as seguintes informações:

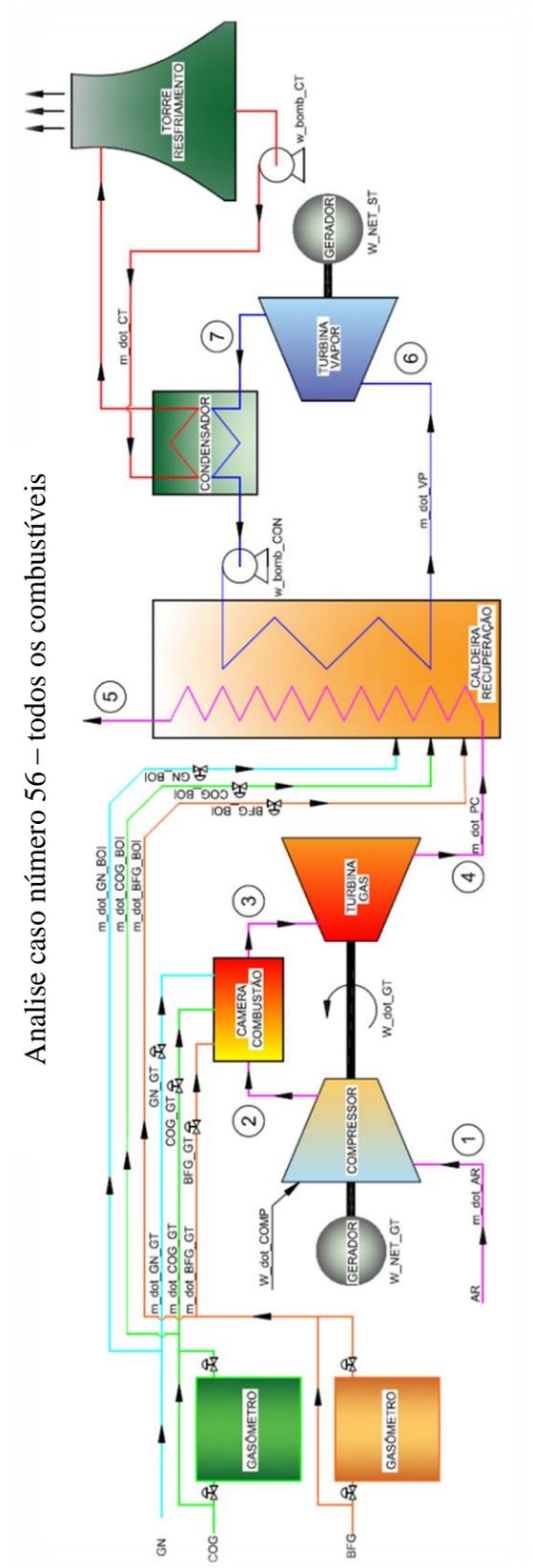
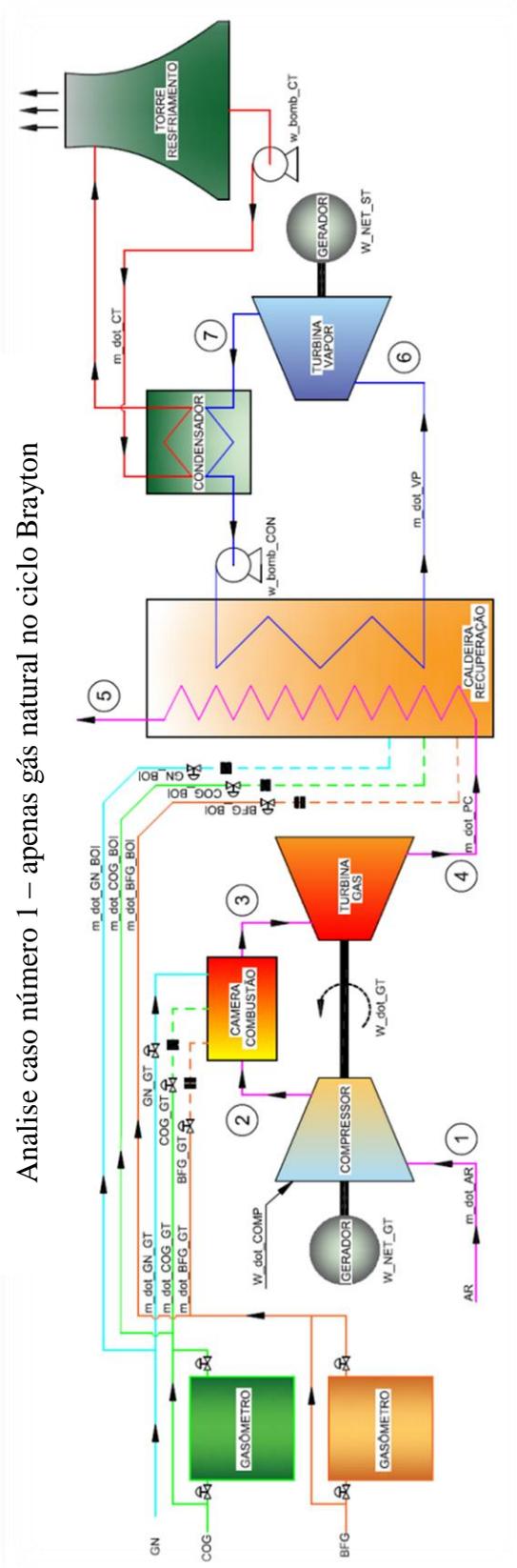
- temperatura T_3
- soma das potências líquidas disponibilizadas W_{NET_TOT}
- massa de GN no ciclo Brayton m_{GN_GT}
- massa de COG no ciclo Brayton m_{COG_GT}
- massa de BFG no ciclo Brayton m_{BFG_GT}
- massa de GN no ciclo Rankine m_{GN_BOI}
- massa de COG no ciclo Rankine m_{COG_BOI}
- massa de BFG no ciclo Rankine m_{BFG_BFG}
- custo de operação R\$/kg_GN
- receita líquida com a venda para rede elétrica $RECEITA_LIQ$

Tabela 4 Método de combinação dos combustíveis

| MÉTODO DE COMBINAÇÃO DE COMBUSTÍVEIS | | | | | | |
|--------------------------------------|---------------|-----|-----|---------------|-----|-----|
| CASO | CICLO BRAYTON | | | CICLO RANKINE | | |
| | GN | COG | BFG | GN | COG | BFG |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |

Fonte: Autoria própria

Figura 19 Esquema de análise do ciclo



Fonte: Autoria própria

4 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Todas as análises foram executadas sob as mesmas condições de temperatura e pressão do vapor na caldeira; mesma temperatura de saída de chaminé, e foi considerada uma turbina a vapor de condensação, sendo que todo o vapor produzido pela caldeira passou pelo condensador.

No ciclo Brayton, foi utilizada a mesma relação de pressão do ar no compressor, no caso da temperatura T_3 na câmara de combustão, deixou-se que o software encontrasse a melhor temperatura para os ciclos, acrescentando uma restrição de temperatura com mínimo 900 K e máximo 1500 K, devido ao limite tecnológico.

O modelo apresenta a possibilidade de três combustíveis no ciclo Brayton e mais três no ciclo Rankine, desta forma tem-se 56 possibilidades diferentes de cruzamentos das condições de operação do modelo. A Tabela 4 indica as sequências de utilização em cada caso analisado, considerando-se a alternância de valores 0 e 1 para a função booleana que é associada ao combustível que está sendo utilizado em cada uma das 56 opções.

A título de maior compreensão da Tabela 4, as rodadas de 1 a 7 registram o emprego de composições entre o uso do gás natural, do COG e do BFG na turbina a gás sem qualquer queima suplementar na caldeira de recuperação (marcado na cor laranja). Nas primeiras sete rodadas, o combustível será alternado apenas na turbina a gás, sendo marcado na cor azul o combustível que está habilitado para queima e na cor amarela o que não está habilitado naquela ocasião. Com isso, fecha-se o primeiro ciclo de possibilidades de análise na turbina a gás.

Nas rodadas de 8 a 14 é mantido o mesmo padrão de alternância dos combustíveis habilitados que se registrou na turbina a gás das sete rodadas anteriores, com a adição de um combustível na queima suplementar da caldeira, indicado pela cor violeta (no caso, o gás natural). Assim sucessivamente, os combustíveis de queima suplementar da caldeira se alternarão até completar todas as possibilidades de cruzamento. Desta forma, a primeira análise a ser estudada é com a adição apenas de GN na turbina a gás e a última condição é com todos os combustíveis possíveis em cada ciclo.

A quantidade máxima de combustível foi limitada a uma faixa entre 0 kg/s e o máximo de 5 kg/s para todas as 56 combinações. Devido à quantidade de possibilidades, as análises serão separadas em rodadas de sete casos, que coincidem exatamente com o cruzamento de possibilidades de uso de combustíveis no ciclo Brayton.

Tabela 5 Combinação de análise dos combustíveis

| COMBINAÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS | | | | | | |
|-----------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| CASO | CICLO BRAYTON | | | CICLO RANKINE | | |
| | m_GT_GN [kg/s] | m_GT_COG [kg/s] | m_GT_BFG [kg/s] | m_BOI_GN [kg/s] | m_BOI_COG [kg/s] | m_BOI_BFG [kg/s] |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 11 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 12 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 13 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 14 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 15 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 16 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 17 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 18 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 19 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 20 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 21 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 22 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 23 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 24 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 25 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 26 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 27 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 28 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |

Tabela 6 Combinação de análise dos combustíveis (continuação)

| COMBINAÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS | | | | | | |
|-----------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| CASO | CICLO BRAYTON | | | CICLO RANKINE | | |
| | m_GT_GN [kg/s] | m_GT_COG [kg/s] | m_GT_BFG [kg/s] | m_BOI_GN [kg/s] | m_BOI_COG [kg/s] | m_BOI_BFG [kg/s] |
| 29 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 30 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 31 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 32 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 33 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 34 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 35 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 36 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 37 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 38 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 39 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 40 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 41 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 42 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 43 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 44 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 45 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 46 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 47 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 48 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 49 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 50 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 51 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 52 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 53 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 54 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 55 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 56 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Fonte: Autoria própria

Para a primeira rodada de testes (Tabela 7), apenas o ciclo Brayton teve alteração de combustíveis. Com isso, o ciclo Rankine operou apenas como recuperação de calor dos gases de escape da turbina a gás.

O modelo de otimização selecionou a vazão dos combustíveis de acordo com a melhor receita líquida para cada caso. Da mesma forma, a temperatura da câmara de combustão é uma variável automatizada na modelagem.

Tabela 7 Brayton Puro – Caso 1 ao 7

| RESULTADO DAS ANALISES | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|----------|------------------|--------------------|---------------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|-------------------|----------------------|
| CASO | TEMP [K] | W_NET TOTAL [Kw] | W_NET TURBINA [Kw] | W_NET CALDEIRA [Kw] | m_GT_GN [kg/s] | m_GT_COG [kg/s] | m_GT_BFG [kg/s] | m_BOI_GN [kg/s] | m_BOI_COG [kg/s] | m_BOI_BFG [kg/s] | R\$_GN [R\$/kg/h] | RECEITA LIQ. [R\$/h] |
| 1 | 1400 | 6468 | 3809 | 2658 | 0,8333 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 16500 | -11945 |
| 2 | 1400 | 42568 | 28023 | 14563 | 0 | 4,167 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 17034 |
| 3 | 1400 | 4204 | 3188 | 1016 | 0 | 0 | 4,167 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1682 |
| 4 | 1400 | 53973 | 35485 | 18488 | 0,8333 | 4,167 | 0 | 0 | 0 | 0 | 16500 | 5089 |
| 5 | 1400 | 15592 | 10650 | 4942 | 0,8333 | 0 | 4,167 | 0 | 0 | 0 | 16500 | -10263 |
| 6 | 1400 | 46789 | 31211 | 15579 | 0 | 4,167 | 4,167 | 0 | 0 | 0 | 0 | 18716 |
| 7 | 1400 | 56496 | 37398 | 19098 | 0,833 | 4,167 | 4,167 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6771 |

Fonte: Autoria própria

Observa-se que, as duas simulações em que o gás natural foi queimado na turbina a gás, a receita líquida se revelou negativa ou apresentou os menores valores da mesma. Isto se explica pelo fato de tal combustível ser uma *commodity* de mercado, sujeita a preços diferenciados em relação aos gases siderúrgicos autoproduzidos pela empresa; além disso, sobre o consumo de gás natural incide uma penalidade de custo no modelo que força o emprego de outros gases recuperados. Os maiores valores de receita líquida foram registrados para as rodadas com queima de COG (com ou sem BFG) na turbina a gás.

Um comentário adicional a ser feito na Tabela 7 diz respeito ao fato de as maiores potências líquidas serem registradas com a queima do gás natural na turbina a gás, sem, contudo, representar as maiores receitas líquidas. Este fato evidencia que, a despeito das menores potências alcançadas com os gases recuperados do processo, devido aos menores custos envolvidos são alcançados maiores valores da receita líquida.

Na Tabela 8 observa-se a mesma variação de combustíveis do ciclo Brayton, porém desta vez com a adição de apenas um combustível, como queima suplementar na caldeira de recuperação; nesta rodada em específico o GN será o combustível de análise.

Tabela 8 Brayton + GN Caldeira

| RESULTADO DAS ANALISES | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|----------|------------------|--------------------|---------------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|-------------------|----------------------|
| CASO | TEMP [K] | W_NET TOTAL [Kw] | W_NET TURBINA [Kw] | W_NET CALDEIRA [Kw] | m_GT_GN [kg/s] | m_GT_COG [kg/s] | m_GT_BFG [kg/s] | m_BOI_GN [kg/s] | m_BOI_COG [kg/s] | m_BOI_BFG [kg/s] | R\$_GN [R\$/kg/h] | RECEITA LIQ. [R\$/h] |
| 8 | 1400 | 16149 | 6106 | 10044 | 0,8333 | 0 | 0 | 0,833 | 0 | 0 | 33000 | -25791 |
| 9 | 1400 | 49220 | 28023 | 21197 | 0 | 4,167 | 0 | 0,833 | 0 | 0 | 16500 | 3188 |
| 10 | 1400 | 7475 | 637,5 | 6838 | 0 | 0 | 4,167 | 0,833 | 0 | 0 | 16500 | -12165 |
| 11 | 1467 | 51887 | 32544 | 19343 | 0,2778 | 4,722 | 0 | 0,2778 | 0 | 0 | 11000 | 11533 |
| 12 | 1400 | 22226 | 10650 | 11576 | 0,833 | 0 | 4,167 | 0,833 | 0 | 0 | 33000 | -24100 |
| 13 | 1400 | 51742 | 29935 | 21807 | 0 | 4,167 | 4,167 | 0,833 | 0 | 0 | 16500 | 4869 |
| 14 | 1467 | 55393 | 35552 | 19841 | 0,2778 | 4,722 | 4,722 | 0,2778 | 0 | 0 | 11000 | 13518 |

Fonte: Autoria própria

Na análise anterior, as maiores receitas negativas líquidas são resultantes da queima exclusiva de gás natural, tanto no conjunto a gás quanto na caldeira de recuperação. Um fato interessante observado diz respeito ao consumo de gás natural no qual, por mais que tenha a incidência de custo do combustível e a incidência de penalidade, ainda é possível o retorno de receita líquida positiva, demonstrado no caso 11 e caso 14. Outra observação sobre a Tabela 8, na qual são empregados o uso de gases de processo, por mais que a utilização do GN acarrete uma penalidade a receita líquida, é possível obter o equilíbrio quando se adiciona a mistura de gases o COG e BFG, conforme caso 9 e 13.

Na Tabela 9 observa-se a mesma variação de combustíveis do ciclo Brayton; a única diferença dá-se pela alternância como queima suplementar de COG na caldeira de recuperação.

Tabela 9 Brayton + COG Caldeira

| RESULTADO DAS ANALISES | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|----------|------------------|--------------------|---------------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|-------------------|----------------------|
| CASO | TEMP [K] | W_NET TOTAL [Kw] | W_NET TURBINA [Kw] | W_NET CALDEIRA [Kw] | m_GT_GN [kg/s] | m_GT_COG [kg/s] | m_GT_BFG [kg/s] | m_BOI_GN [kg/s] | m_BOI_COG [kg/s] | m_BOI_BFG [kg/s] | R\$_GN [R\$/kg/h] | RECEITA LIQ. [R\$/h] |
| 15 | 1400 | 36281 | 7462 | 28819 | 0,833 | 0 | 0 | 0 | 4,167 | 0 | 16500 | -1988 |
| 16 | 1400 | 50667 | 23049 | 27618 | 0 | 4,167 | 0 | 0 | 4,167 | 0 | 0 | 26992 |
| 17 | 1400 | 29097 | 3188 | 25909 | 0 | 0 | 4,167 | 0 | 4,167 | 0 | 0 | 11639 |
| 18 | 1400 | 68909 | 35485 | 33424 | 0,833 | 4,167 | 0 | 0 | 4,167 | 0 | 16500 | 15047 |
| 19 | 1467 | 37122 | 8100 | 29022 | 0,2778 | 0 | 4,722 | 0 | 4,722 | 0 | 16500 | 9350 |
| 20 | 1400 | 51386 | 23601 | 27785 | 0 | 4,167 | 4,167 | 0 | 4,167 | 0 | 0 | 28673 |
| 21 | 1400 | 72296 | 30809 | 41487 | 0,833 | 4,167 | 4,167 | 0 | 4,167 | 0 | 16500 | 16728 |

Fonte: Autoria própria

Novamente se verifica o comportamento observado anteriormente, no qual o retorno de receita líquida mais expressivo dá-se pela queima de combustíveis provenientes de processo siderúrgico. No caso 20 da Tabela 9 foram empregados COG e BFG no ciclo gás e COG na caldeira de recuperação, obtendo-se o melhor resultado de receita com a terceira maior potência líquida gerada.

Pode se ainda ser analisado, na Tabela 9, que os dois casos com maiores potências líquida geradas (casos 21 e 18) contém em sua composição de queima o combustível gás natural e que se obteve receita positiva mediana. Isso acontece por conter uma grande quantidade de COG e BFG na composição da mistura de gases do ciclo a gás e pelo fato da queima suplementar estar operando com COG próximo da vazão mássica limite estipulada.

Na Tabela 10 foi empregada novamente a mesma combinação de combustíveis na câmara de combustão da turbina a gás executada nas rodadas anteriores e como queima suplementar na caldeira de recuperação a queima única do BFG.

Tabela 10 Brayton + BFG Caldeira

| RESULTADO DAS ANALISES | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|----------|------------------|--------------------|---------------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|-------------------|----------------------|
| CASO | TEMP [K] | W_NET TOTAL [Kw] | W_NET TURBINA [Kw] | W_NET CALDEIRA [Kw] | m_GT_GN [kg/s] | m_GT_COG [kg/s] | m_GT_BFG [kg/s] | m_BOI_GN [kg/s] | m_BOI_COG [kg/s] | m_BOI_BFG [kg/s] | R\$_GN [R\$/kg/h] | RECEITA LIQ. [R\$/h] |
| 22 | 1400 | 7726 | 3809 | 3917 | 0,833 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4,167 | 16500 | -11441 |
| 23 | 1400 | 35983 | 23049 | 12934 | 0 | 4,167 | 0 | 0 | 0 | 4,167 | 0 | 17538 |
| 24 | 1400 | 5462 | 3188 | 2275 | 0 | 0 | 4,167 | 0 | 0 | 4,167 | 0 | 2185 |
| 25 | 1400 | 54729 | 35485 | 19243 | 0,833 | 4,167 | 0 | 0 | 0 | 4,167 | 16500 | 5593 |
| 26 | 1400 | 12984 | 8100 | 4884 | 0,833 | 0 | 4,167 | 0 | 0 | 4,167 | 16500 | -9760 |
| 27 | 1400 | 39146 | 25703 | 14442 | 0 | 4,167 | 4,167 | 0 | 0 | 4,167 | 0 | 19219 |
| 28 | 1400 | 57754 | 37398 | 20356 | 0,833 | 4,167 | 4,167 | 0 | 0 | 4,167 | 16500 | 7274 |

Fonte: Autoria própria

Pode se observar que nesta análise os dois resultados que obtiveram resultado negativo na receita líquida foram os que empregaram o uso de gás natural em conjunto com o BFG, sendo a queima da mistura na câmara de combustão da turbina a gás e como queima suplementar na caldeira de recuperação. Em contrapartida, os casos que obtiveram maior receita foram os que tiveram em sua composição o COG no ciclo a gás.

Na Tabela 11 apresenta-se a combinação de combustíveis na câmara de combustão da turbina a gás e queima suplementar na caldeira de recuperação da mistura de gás natural e COG.

Tabela 11 Brayton + GN e COG Caldeira

| RESULTADO DAS ANALISES | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|----------|------------------|--------------------|---------------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|-------------------|----------------------|
| CASO | TEMP [K] | W_NET TOTAL [Kw] | W_NET TURBINA [Kw] | W_NET CALDEIRA [Kw] | m_GT_GN [kg/s] | m_GT_COG [kg/s] | m_GT_BFG [kg/s] | m_BOI_GN [kg/s] | m_BOI_COG [kg/s] | m_BOI_BFG [kg/s] | R\$_GN [R\$/kg/h] | RECEITA LIQ. [R\$/h] |
| 29 | 1400 | 28038 | 3809 | 24229 | 0,833 | 0 | 0 | 0,833 | 4,167 | 0 | 33000 | -15834 |
| 30 | 1400 | 64156 | 28023 | 36133 | 0 | 4,167 | 0 | 0,833 | 4,167 | 0 | 16500 | 13145 |
| 31 | 1400 | 34050 | 1913 | 32137 | 0 | 0 | 4,722 | 0,833 | 4,722 | 0 | 16500 | 8655 |
| 32 | 1400 | 52489 | 18348 | 34141 | 0,2778 | 4,722 | 0 | 0,2778 | 4,167 | 0 | 33000 | 20666 |
| 33 | 1400 | 37162 | 10650 | 26512 | 0,833 | 0 | 4,167 | 0,833 | 4,167 | 0 | 33000 | -14152 |
| 34 | 1400 | 57920 | 17451 | 40468 | 0 | 4,167 | 4,167 | 0,833 | 4,167 | 0 | 16500 | 14827 |
| 35 | 1400 | 76385 | 36123 | 40262 | 0,2778 | 4,167 | 4,167 | 0,833 | 4,167 | 0 | 33000 | 20076 |

Fonte: Autoria própria

Os casos 32 e 35 apresentaram bons resultados de receita líquida, apesar de ambos utilizarem gás natural em sua composição de combustíveis. No primeiro caso, o modelo definiu a vazão de gás natural no limite inferior tanto para o ciclo a gás quanto para a caldeira de recuperação e o restante da energia necessária foi proveniente da combustão do COG. Isso rendeu a melhor receita líquida da combinação de combustíveis da Tabela 11 para o caso 32. O caso 35 obteve a maior potência líquida gerada pelo ciclo combinado.

No próximo ciclo de análises, a Tabela 12 apresenta a combinação de combustíveis no ciclo Brayton com adição de GN e BFG na caldeira de recuperação (Rankine)

Tabela 12 Brayton + GN e BFG Caldeira

| RESULTADO DAS ANALISES | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|----------|------------------|--------------------|---------------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|-------------------|----------------------|
| CASO | TEMP [K] | W_NET TOTAL [Kw] | W_NET TURBINA [Kw] | W_NET CALDEIRA [Kw] | m_GT_GN [kg/s] | m_GT_COG [kg/s] | m_GT_BFG [kg/s] | m_BOI_GN [kg/s] | m_BOI_COG [kg/s] | m_BOI_BFG [kg/s] | R\$_GN [R\$/kg/h] | RECEITA LIQ. [R\$/h] |
| 36 | 1400 | 19281 | 7462 | 11818 | 0,833 | 0 | 0 | 0,833 | 0 | 4,167 | 33000 | -25288 |
| 37 | 1400 | 49975 | 28023 | 21952 | 0 | 4,167 | 0 | 0,833 | 0 | 4,167 | 16500 | 3691 |
| 38 | 1400 | 11486 | 2757 | 8729 | 0 | 0 | 4,167 | 0,833 | 0 | 4,167 | 16500 | -11661 |
| 39 | 1400 | 49684 | 30510 | 19173 | 0,2778 | 4,722 | 0 | 0,2778 | 0 | 4,722 | 11000 | 12104 |
| 40 | 1400 | 19115 | 8100 | 11015 | 0,833 | 0 | 4,167 | 0,833 | 0 | 4,167 | 33000 | -23606 |
| 41 | 1400 | 43336 | 23601 | 19735 | 0 | 4,722 | 4,167 | 0,2778 | 0 | 4,167 | 16500 | 16875 |
| 42 | 1400 | 64397 | 40322 | 24076 | 0,2778 | 4,722 | 4,722 | 0,2778 | 0 | 4,722 | 22000 | 14089 |

Fonte: Autoria própria

Novamente pode ser observado que o modelo selecionou uma vazão inferior para o gás natural nos casos 39, 41 e 42. Essa redução no consumo de gás natural, somada à utilização de gases de baixo poder calorífico, permitiu o atingimento de receitas líquidas positivas, sendo tais casos os que obtiveram o melhor resultado de receita líquida.

Foi mantida a variação de combustíveis no ciclo gás na Tabela 13, alternando-se os combustíveis para a caldeira de recuperação com queima suplementar para o COG e BFG.

Tabela 13 Brayton + COG e BFG Caldeira

| RESULTADO DAS ANALISES | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|----------|------------------|--------------------|---------------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|-------------------|----------------------|
| CASO | TEMP [K] | W_NET TOTAL [Kw] | W_NET TURBINA [Kw] | W_NET CALDEIRA [Kw] | m_GT_GN [kg/s] | m_GT_COG [kg/s] | m_GT_BFG [kg/s] | m_BOI_GN [kg/s] | m_BOI_COG [kg/s] | m_BOI_BFG [kg/s] | R\$_GN [R\$/kg/h] | RECEITA LIQ. [R\$/h] |
| 43 | 1400 | 33267 | 2487 | 30779 | 0,2778 | 0 | 0 | 0 | 4,722 | 4,722 | 5500 | 7936 |
| 44 | 1400 | 68737 | 28023 | 40714 | 0 | 4,167 | 0 | 0 | 4,167 | 4,167 | 0 | 27495 |
| 45 | 1400 | 27811 | 1289 | 26522 | 0 | 0 | 4,167 | 0 | 4,167 | 4,167 | 0 | 12142 |
| 46 | 1400 | 70391 | 29155 | 41237 | 0,833 | 4,167 | 0 | 0 | 4,167 | 4,167 | 16500 | 15550 |
| 47 | 1400 | 36816 | 7760 | 29056 | 0,2778 | 0 | 4,722 | 0 | 4,722 | 4,722 | 16500 | 9921 |
| 48 | 1400 | 54900 | 20001 | 34899 | 0 | 4,167 | 4,167 | 0 | 4,167 | 4,167 | 0 | 29176 |
| 49 | 1400 | 72177 | 29706 | 42411 | 0,833 | 4,167 | 4,167 | 0 | 4,167 | 4,167 | 16500 | 17232 |

Fonte: Autoria própria

Pela primeira vez, pode-se observar que o valor de receita líquida não retornou nenhum resultado negativo; de modo similar aos casos anteriores, alguns dos casos analisados na Tabela 13 com queima de gás natural encontram-se em seu limite inferior, sendo eles correspondentes aos dois menores resultados de receita líquida. Em contrapartida, os casos com melhores resultados foram os que utilizaram apenas gases de processo siderúrgico em sua composição, sendo o de melhor resultado o que queimou COG e BFG na câmara de combustão da turbina a gás e COG e BFG na queima suplementar da caldeira de recuperação.

Finalizando a rodada de testes na Tabela 14 tem-se a combinação de combustíveis no ciclo Brayton com adição de GN, COG e BFG na caldeira de recuperação

Tabela 14 Brayton + Caldeira de Recuperação

| RESULTADO DAS ANALISES | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|----------|------------------|--------------------|---------------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|--------------------|----------------------|
| CASO | TEMP [K] | W_NET TOTAL [Kw] | W_NET TURBINA [Kw] | W_NET CALDEIRA [Kw] | m_GT_GN [kg/s] | m_GT_COG [kg/s] | m_GT_BFG [kg/s] | m_BOI_GN [kg/s] | m_BOI_COG [kg/s] | m_BOI_BFG [kg/s] | R\$__GN [R\$/kg/h] | RECEITA LIQ. [R\$/h] |
| 50 | 1400 | 43671 | 7462 | 36208 | 0,833 | 0 | 0 | 0,833 | 4,167 | 4,167 | 33000 | -15330 |
| 51 | 1400 | 64911 | 28023 | 36888 | 0 | 4,167 | 0 | 0,833 | 4,167 | 4,167 | 16500 | 13649 |
| 52 | 1400 | 35372 | 2757 | 32615 | 0 | 0 | 4,722 | 0,2778 | 4,722 | 4,722 | 16500 | 9225 |
| 53 | 1400 | 68719 | 24276 | 44443 | 0,2778 | 4,167 | 0 | 0,2778 | 4,167 | 4,167 | 33000 | 18899 |
| 54 | 1400 | 44887 | 8862 | 36025 | 0,833 | 0 | 4,167 | 0,833 | 4,167 | 4,167 | 33000 | -13649 |
| 55 | 1400 | 68611 | 31211 | 37401 | 0 | 4,167 | 4,167 | 0,833 | 4,167 | 4,167 | 16500 | 15330 |
| 56 | 1400 | 76636 | 36123 | 40514 | 0,2778 | 4,167 | 4,167 | 0,2778 | 4,167 | 4,167 | 33000 | 20579 |

Fonte: Autoria própria

A maior potência elétrica atingida com a composição de gases analisada nos 56 casos deu-se com o consumo de todos os combustíveis simultaneamente e que, nesta rodada, resultou no melhor resultado de receita líquida. O intuito da função objetivo era a maximização do lucro da venda de energia elétrica para rede de transmissão e a diminuição do consumo de GN (Gás natural) pela planta.

Após rodar o modelo com as 56 possíveis combinações de combustíveis, identificaram-se casos que obtiveram melhores resultados do ponto de vista do retorno econômico do empreendimento. Esses números foram distribuídos em ordem decrescente em função dos valores de receita líquida na Tabela 15.

Apesar da temperatura T_3 estar livre dentro de suas restrições e ser uma das variáveis incluídas na modulação do problema, nota-se que raramente existe uma mudança no seu valor e que, ainda assim, quando houve alteração, esta passou de 1400 K para 1467 K, o que indica que a melhor faixa de operação da câmara de combustão do conjunto a gás encontra-se entre 1400 K a 1470 K.

Um detalhe interessante observado dentre os resultados com maior atratividade econômica é que a faixa de potência líquida WNET_TOT variou entre 4000 kW até próximo de 77000 kW, indicando o melhor ponto de otimização do consumo de combustível para cada faixa de potência.

Tabela 15 Comparativo com os melhores resultados

| RESULTADO DAS ANALISES | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|----------|------------------|--------------------|---------------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|-------------------|----------------------|
| CASO | TEMP [K] | W_NET TOTAL [Kw] | W_NET TURBINA [Kw] | W_NET CALDEIRA [Kw] | m_GT_GN [kg/s] | m_GT_COG [kg/s] | m_GT_BFG [kg/s] | m_BOI_GN [kg/s] | m_BOI_COG [kg/s] | m_BOI_BFG [kg/s] | R\$_GN [R\$/kg/h] | RECEITA LIQ. [R\$/h] |
| 48 | 1400 | 54900 | 20001 | 34899 | 0 | 4,167 | 4,167 | 0 | 4,167 | 4,167 | 0 | 29176 |
| 20 | 1400 | 51386 | 23601 | 27785 | 0 | 4,167 | 4,167 | 0 | 4,167 | 0 | 0 | 28673 |
| 44 | 1400 | 68737 | 28023 | 40714 | 0 | 4,167 | 0 | 0 | 4,167 | 4,167 | 0 | 27495 |
| 16 | 1400 | 50667 | 23049 | 27618 | 0 | 4,167 | 0 | 0 | 4,167 | 0 | 0 | 26992 |
| 32 | 1400 | 52489 | 18348 | 34141 | 0,2778 | 4,722 | 0 | 0,2778 | 4,167 | 0 | 33000 | 20666 |
| 56 | 1400 | 76636 | 36123 | 40514 | 0,2778 | 4,167 | 4,167 | 0,2778 | 4,167 | 4,167 | 33000 | 20579 |
| 35 | 1400 | 76385 | 36123 | 40262 | 0,2778 | 4,167 | 4,167 | 0,833 | 4,167 | 0 | 33000 | 20076 |
| 27 | 1400 | 39146 | 25703 | 14442 | 0 | 4,167 | 4,167 | 0 | 0 | 4,167 | 0 | 19219 |
| 6 | 1400 | 46789 | 31211 | 15579 | 0 | 4,167 | 4,167 | 0 | 0 | 0 | 0 | 18716 |
| 2 | 1400 | 42568 | 28023 | 14563 | 0 | 4,167 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 17034 |
| 41 | 1400 | 43336 | 23601 | 19735 | 0 | 4,722 | 4,167 | 0,2778 | 0 | 4,167 | 16500 | 16875 |

Fonte: Autoria própria

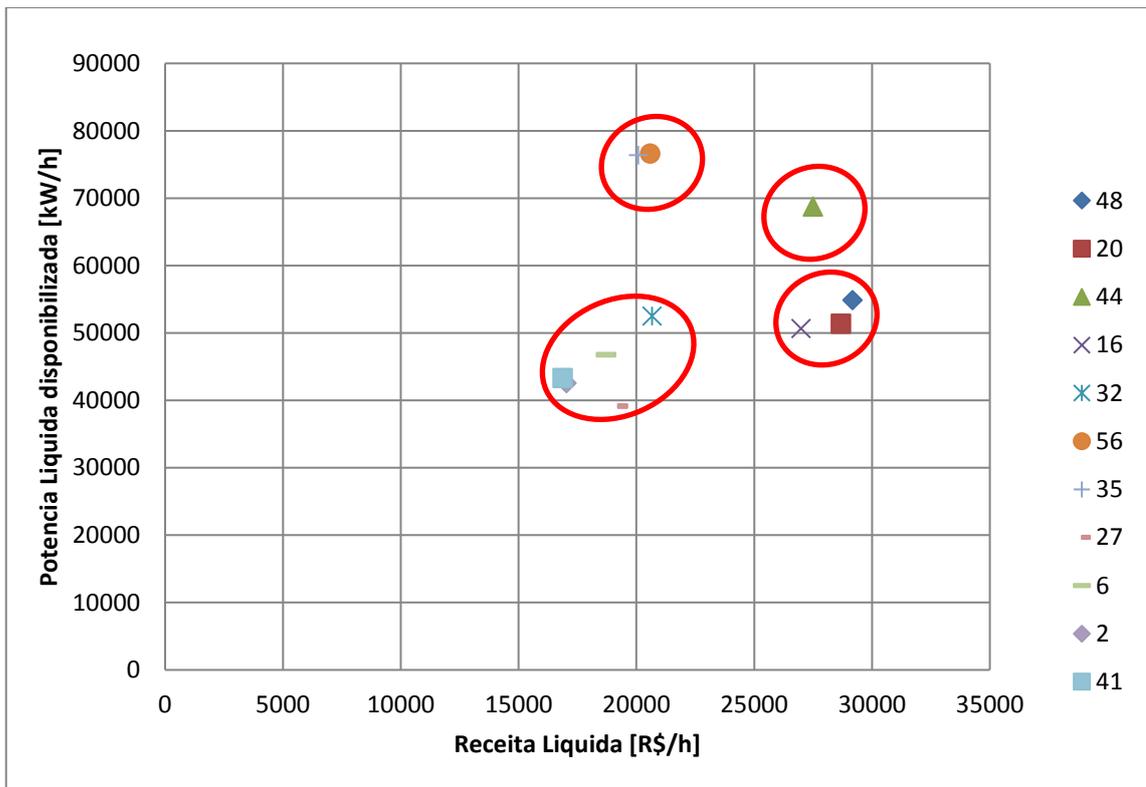
Verificando-se os dados constantes na Tabela 14, nota-se que as condições que mais retornam lucro para a empresa são as que não utilizam GN na composição. Isso é explicado pelo fato de haver uma penalidade imposta para o consumo do gás natural. Porém, apesar do enquadramento na faixa de maior retorno financeiro, tais soluções não são as que atingem os maiores níveis de produção de energia, como pode ser observado na mesma tabela. Entretanto, existem alguns casos que utilizam o GN na composição e que, mesmo com a incidência do custo desse combustível, alcançam bons resultados de receita financeira.

As formulações que contém em sua composição somente gases de baixo poder caloríficos não conseguem atingir grandes níveis de geração de potências elétricas, o que é facilmente atingido quando se adiciona GN à mistura dos combustíveis, como se observa nos casos 56 e 35 da Tabela 14. Isso significa que a utilização dos combustíveis de baixo poder calorífico torna-se uma solução viável e robusta, e que, caso haja a necessidade de aumento de potência, pode-se acrescentar uma pequena parcela de gás natural, mantendo-se ainda uma receita líquida positiva.

A Figura 20 apresenta a distribuição dos melhores resultados em relação à receita líquida; observa-se que existem quatro regiões bem definidas com relação à potência produzida e a receita gerada pela venda de energia elétrica para concessionária.

Com base na distribuição de valores da Figura 20, pode-se definir qual o caso que mais se viabiliza economicamente de acordo com a necessidade momentânea de geração de energia e/ou disponibilidade de combustível. A título de exemplo, caso se necessite mais de geração de potência elétrica, pode-se optar pelo caso 56, porém haveria sacrifício em termos da receita líquida gerada; caso a necessidade de geração de energia elétrica diminuísse, poder-se-ia trabalhar no padrão do caso 48, com o qual se obteria a maior receita líquida.

Figura 20 Comparativo melhores resultados



Fonte: Autoria própria

Na Figura 21, apresentam-se todos os 56 pontos encontrados para os casos simulados, de acordo com a função objetivo para cada composição de combustível estudada (Tabela 4). A distribuição apresenta regiões bem definidas em função de receita líquida e potência elétrica gerada.

Em uma análise preliminar, pode-se identificar faixas de potência em que a função objetivo retorna valores negativos referentes à receita líquida; isso indica que na faixa de potência entre 10.000 kW e 30.000 kW, praticamente todos os valores obtidos com a função objetivo geraram receitas negativas, não sendo, portanto, recomendável a utilização desta faixa quando o objetivo for a venda de energia elétrica para a rede.

A faixa de potência entre 40.000 kW e 70.000 kW concentra parte significativa dos resultados gerados a partir da otimização da função objetivo, e a receita líquida na maioria dos resultados encontrados conta com valor positivo, entre 0,00 e 20.000,00 R\$/h.

A faixa de melhor operação, considerando-se que o objetivo é a venda de energia elétrica para a rede elétrica, compreende a faixa de potência de 50.000 kW a 60.000 kW e tem como receita o valor máximo obtido na faixa de 29.000,00 R\$/h; também se observa um caso isolado de melhor relação receita/potência, correspondente ao caso 44, com potência elétrica gerada de 68.000 kW e receita líquida de 27.500,00 R\$/h.

Figura 21 Distribuição dos valores da análise



Fonte: Autoria própria

5 CONCLUSÃO

Em se tratando de aspectos energéticos, a cogeração vem ganhando importância no cenário brasileiro. Suas vantagens e benefícios creditam aos seus empregadores ganhos diretos em termos econômicos e ambientais. As siderúrgicas, por sua vez, aproveitam de seus próprios processos internos, gases residuais combustíveis para geração de diferentes formas de energia que serão consumidas de acordo com a demanda da usina. Com isso, além de se enquadrarem no conceito de cogeração, essas usinas se mostram uma boa oportunidade para estudo e aplicação de análises termo econômicas.

Foi desenvolvida uma análise energética de um sistema baseado em ciclo combinado, queimando gases siderúrgicos e gás natural, isoladamente ou em misturas diversas, acoplada a uma caldeira de recuperação de calor com queima suplementar de combustível que produz vapor superaquecido para o ciclo de turbina a vapor. Gases siderúrgicos ou sua mistura também foram contemplados na queima suplementar da caldeira de recuperação para efeito de comparação ao gás natural visando identificar a melhor composição entre os combustíveis.

Após a análise de todos os casos, em especial os que obtiveram melhor resultado, pode-se afirmar que a otimização de um ciclo combinado em uma planta siderúrgica, segundo a função objetivo previamente determinada e, ainda que de maneira preliminar, pode gerar lucro para a empresa, tendo em vista uma dinâmica de análise ponto a ponto.

Foram identificadas as faixas operacionais recomendadas, sendo entre 40.000 kW e 70.000 kW encontra-se parte significativa das soluções com atratividade econômica, sendo que as soluções que alcançaram os melhores resultados de receita líquida encontram-se na faixa de potência de 50.000 kW a 60.000 kW. Não são recomendadas soluções com potência líquida entre 10.000 kW e 30.000 kW, faixa em que os valores alcançaram receitas negativas.

6 REFERÊNCIAS

ALPINA EQUIPAMENTOS, Tabela de Temperatura Bulbo Úmido, Estrada Marco Polo, 840, São Bernardo do Campo; Disponível em: <<http://www.alpinaequipamentos.com.br/artigos/4/tabela-de-temperatura-de-bulbo-umido>>. Acesso em: 26/10/2016

CAPUTO, P. D. **Utilização de syngas em substituição a combustíveis gasosos em processos siderúrgicos**, 2009. Universidade Estadual Paulista.

CARVALHO JUNIOR, J. A., MCQUAY, M. Q. **Princípios de Combustão Aplicada**. Florianópolis: Editora da UFSC, 2007.

CHACARTEGUI, R.; SÁNCHEZ, D.; MUÑOZ DE ESCALONA, J. M.; MUÑOZ, A.; SÁNCHEZ, T. Gas and steam combined cycles for low calorific syngas fuels utilisation. **Applied Energy**, v. 101, p. 81–92, 2013. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261912001407>>. Acesso em: 23/9/2014.

CHEREMISINOFF, N. P.;CHEREMISINOFF, P N.; **Cooling Towers: selection, design and practice**. Michigan. Ann Arbor Science. 1981. 347 p. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/file.PostFileLoader.html?id=57b7f1e5615e27c99d05b9d1&assetKey=AS%3A397039901921280%401471673097057>>. Acesso em: 26/10/2016

DIAS, R. A.; MATTOS, C. R.; BALESTIERI, J. A. P. Energy education: breaking up the rational energy use barriers. **Energy Policy**, v. 32, n. 11, p. 1339–1347, 2004. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421503001009>>. Acesso em: 17/10/2014.

ENGINEER EQUATION SOLVER ACADEMIC PROFESSIONAL; V9.908-3D 15/07/2015; F-Chart Software Box, Madison www.fchart.com

GASEQ; **Chemical Equilibria in Perfect Gases**; Version 0.79 <<http://www.gaseq.co.uk>>

INDUSTRIAL LINGO; Release 10.0 09/05/2007; Lindo System Inc, 1415 North Dayton Street Chicago, IL <http://lindo.com>

KIM, J. H.; YI, H.; HAN, C. A novel MILP model for plantwide multiperiod optimization of byproduct gas supply system in the iron- and steel-making process. **Transactions of the Institution of Chemical Engineers**, v. 81, p. 1015–1025, 2003.

KONG, H.; QI, E.; LI, H.; LI, G.; ZHANG, X. An MILP model for optimization of byproduct gases in the integrated iron and steel plant. **Applied Energy**, v. 87, n. 7, p. 2156–2163, 2010a. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261909005182>>. Acesso em: 17/10/2014.

KONG, H.; QI, E.; LI, H.; LI, G.; ZHANG, X. MILP Model for Plant-Wide Optimal By-Product Gas Scheduling in Iron and Steel Industry. **Journal of Iron and Steel Research, International**, v. 17, n. 7, p. 34–37, 2010b. Central Iron and Steel Research Institute. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1006706X10601537>>. Acesso em: 17/10/2014.

LARSSON, M.; WANG, C.; DAHL, J. Development of a method for analysing energy, environmental and economic efficiency for an integrated steel plant. **Applied Thermal Engineering**, v. 26, n. 13, p. 1353–1361, 2006. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431105002085>>. Acesso em: 17/10/2014.

LOVINS, AMORY B. The negawatt revolution. *Across the Board*, v. 27, n. 9, p. 18-23, 1990. Elsevier Ltd. Disponível em: <http://www.rmi.org/Knowledge-Center/Library/E90-20_NegawattRevolution4>. Acesso em: 26/10/2016

MARLEY, Cooling Tower Performance, SPX Cooling Technologies, Inc, 7401 West 129 Street, Kansas; Disponível em: <<http://spxcolling.com/pdf/CTII-01A.pdf>>. Acesso em: 26/10/2016

MCBRIDE, BONNIE J.; GORDON, SANFORD; RENO, MARTIN A. **Coefficient for calculating thermodynamic and transport properties of individual species**. NASA Technical Memorandum 4513, p. 94, 1993. NASA em: <<https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19940013151>>. Acesso em: 26/10/2016

MODESTO, M.; NEBRA, S. A. Analysis of a repowering proposal to the power generation system of a steel mill plant through the exergetic cost method. **Energy**, v. 31, n. 15, p. 3261–3277, 2006. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544206000995>>. Acesso em: 20/10/2014.

MODESTO, M.; NEBRA, S. A. Exergoeconomic analysis of the power generation system using blast furnace and coke oven gas in a Brazilian steel mill. **Applied Thermal Engineering**, v. 29, n. 11-12, p. 2127–2136, 2009. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431108005012>>. Acesso em: 19/6/2013.

PENA, J. G. C.; SALLES, J. L. F.; OLIVEIRA JR., V. B. **Otimização do sistema de distribuição de gases na usina siderúrgica integrada**. Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. **Anais...** p.1021–1032, 2013. Natal/RN.

R.H. Perry, C.H. Chilton (Eds.), *Chemical Engineers' Handbook*, fifth ed., McGraw-Hill, New York, 1973

ZHANG, X.; ZHAO, J.; WANG, W.; CONG, L.; FENG, W. An optimal method for prediction and adjustment on byproduct gas holder in steel industry. **Expert Systems with Applications**, v. 38, n. 4, p. 4588–4599, 2011. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0957417410010894>>. Acesso em: 17/10/2014.