



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

DIEGO SALMIN COSTA

**BALANÇO TÉRMICO COMO PARÂMETRO DE CONTROLE DO PROCESSO
DE COQUEIFICAÇÃO**

FORTALEZA

2018

DIEGO SALMIN COSTA

BALANÇO TÉRMICO COMO PARÂMETRO DE CONTROLE DO PROCESSO DE
COQUEIFICAÇÃO

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Jeferson Leandro Klug.

Coorientador: Luiz Cláudio Costa.

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C871b Costa, Diego Salmin.
Balanço térmico como parâmetro de controle do processo de coqueificação / Diego Salmin Costa. – 2017.
83 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2017.

Orientação: Prof. Dr. Jeferson Leandro Klug.

Coorientação: Prof. Me. Luíz Cláudio Costa.

1. Coqueria. 2. Consumo de gás. 3. Balanço térmico. I. Título.

CDD 669

DIEGO SALMIN COSTA

BALANÇO TÉRMICO COMO PARÂMETRO DE CONTROLE DO PROCESSO DE
COQUEIFICAÇÃO

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Jeferson Leandro Klug.

Coorientador: Luíz Cláudio Costa.

Aprovada em ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. -Ing. Jeferson Leandro Klug

Prof^ª. Dra. Janaina Gonçalves Machado

Eng. MSc. Luíz Cláudio Costa

A Deus, o grande realizador desse trabalho.

A minha família, principalmente minha avó Walentina que sempre me incentivou e me deu suporte nessa intensa jornada da graduação.

À minha futura esposa.

Aos meus futuros filhos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, em primeiro de tudo, pois sem sua graça eu não teria chegado até aqui. Toda glória e honra ao autor da minha fé por ter me sustentado até então e pelo sustento que irá me fortalecer nos meus projetos futuros de vida.

A Adna Silveira, por ter me acompanhado em cada passo, cada frustração e cada alegria no desenvolvimento desse trabalho.

A toda minha família – principalmente minha avó Walentina Salmin que me abrigou, consolou e incentivou durante toda minha graduação.

Aos meus amigos da UFC – Otílio Freire que sempre me acompanhou nos meus projetos me dando toda força necessária pra continuar; Emmanuel de Sousa, Joshua Alyson, Roberto Abreu, Davi Alves, Pedro Guilherme, Guilherme Gadelha, Pedro Ícaro e Raí Bernardo por estenderem os laços de amizade além da universidade; Hana Livia e Carlos Eduardo por serem um incentivo pessoal e contribuírem fortemente desde o primeiro semestre da graduação para que esse sonho se realizasse; Amós Guerrato, Emanuel Oliveira, Lucas Pires e Hiago Martins pelas orações.

Aos meus amigos do estágio – Lara Timbó e Renato Braga por sempre estarem presentes nas dificuldades e regozijos referentes à vivência industrial; Thiago Pontes, Carlos Duarte, Gustavo Lopes, Élide Sousa, Márcio Santos, Israel Rodrigues e Fernando Cunha por tudo que me ensinaram e por toda paciência que tiveram comigo como estagiário da coqueria.

Aos meus irmãos – Davi Magno e Guilherme Puskas que compartilharam comigo alegrias e tristezas em toda essa caminhada.

Aos professores da UFC – Jeferson Klug e Janaína Gonçalves por me orientarem nesse trabalho.

Por último, mas que merece um parágrafo destacado – Ao Luiz Cláudio Costa que acreditou em mim nesse período de estágio. Por muitas vezes agiu pacientemente e me ensinou coisas que vão além do ambiente industrial, transformando-me em um profissional melhor e com muito ímpeto para estar sempre em busca do crescimento.

“Portanto, meus amados irmãos, mantenham-se firmes, e que nada os abale. Sejam sempre dedicados à obra do Senhor, pois vocês sabem que, no Senhor, o trabalho de vocês não será inútil. ”

(1 Coríntios 15:58)

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	IX
LISTA DE QUADROS	X
RESUMO	XI
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1 OBJETIVO GERAL.....	3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1 CARVÃO MINERAL E COQUE	4
3.2 COQUEIFICAÇÃO	6
3.2.1 PROCESSOS DE COQUEIFICAÇÃO	6
3.2.2 PIRÓLISE DO CARVÃO	8
3.2.3 TEMPO LÍQUIDO E TEMPO BRUTO.....	10
3.3 SUBPRODUTOS E GÁS DE COQUERIA.....	11
3.4 CÂMARAS DE COMBUSTÃO E SISTEMA DE REGENERAÇÃO.....	17
3.5 BALANÇO TÉRMICO	19
3.5.1 ELEMENTOS DO BALANÇO	20
3.5.2 VISÃO GERAL DO BALANÇO	20
3.5.3 EFICIÊNCIA TÉRMICA DO PROCESSO	21
3.5.4 ESTRUTURAÇÃO DO MODELO.....	21
3.5.5 ALGUNS FATORES IMPORTANTES QUE INFLUENCIAM O BALANÇO.....	24
4. METODOLOGIA.....	26
4.1 CONHECIMENTO DO PROCESSO	26
4.2 ANÁLISE E TRATAMENTO DOS DADOS	27
4.2.1 DADOS DA SALA DE CONTROLE DA COP (COKE OVEN PLANT)	28
4.2.2 DADOS DA SALA DE CONTROLE DA GTP	32
4.2.3 DADOS DO LABORATÓRIO AMBIENTAL.....	33
4.2.4 DADOS COLETADOS EM ACERVOS EXTERNOS.....	35
4.3 ESTRUTURAÇÃO DO MODELO.....	35
4.3.1 BALANÇO DE GASES.....	36
4.3.2 BALANÇO DE CARVÃO/COQUE	39
4.3.3 BALANÇO BY PRODUCTS	40
4.3.4 CÁLCULO DO CALOR DE ENTRADA E CALOR DE SAÍDA	43
4.3.4.1 CALOR INJETADO	43

4.3.4.2	CALOR EJETADO	46
4.3.4.3	PREMISSAS	51
4.3.5	COMPARAÇÃO DE DADOS	52
4.4	COMPARAÇÃO COM A TEMPERATURA DA CÂMARA E O TEMPO LÍQUIDO DE COQUEIFICAÇÃO	53
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
5.1	COMPARAÇÃO ENTRE A LITERATURA, O SOFTWARE E O TRABALHO.	56
5.2	ANÁLISE DE PARETO DO CALOR INJETADO E EJETADO DA BATERIA	57
5.3	INFLUÊNCIA DA UMIDADE, DA MATÉRIA VOLÁTIL E DO OXIGÊNIO NA FUMAÇA	60
5.4	ANÁLISE DA TEMPERATURA DA CÂMARA DE COMBUSTÃO, TEMPO LÍQUIDO DE COQUEIFICAÇÃO E BALANÇO TÉRMICO.	63
6.	CONCLUSÃO	70
7.	REFERÊNCIAS	72

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Visão geral de uma coqueria.	7
FIGURA 2: Reações de Craqueamento e Aromatização.....	9
FIGURA 3: Progressão da frente de coqueificação em relação ao perfil de temperatura no forno.....	10
FIGURA 4: Parâmetros geométricos típicos de uma placa de orifício concêntrico.	12
FIGURA 5: Ilustração de equipamento de cromatografia gasosa. 1- Cilindro de CO ₂ , 2 – Válvula, 3 – Bomba para pressurizar o CO ₂ , 4 – Forno, 5 – Injetor, 6 – Coluna, 7 – Restritor, 8 – Detector.	14
FIGURA 6: Sistema de alongamento de chama.	18
FIGURA 7: Da esquerda para a direita: Variação no perfil da temperatura do forno durante o ciclo de coqueificação; Variação do perfil de temperatura na câmara durante o tempo de reversão; Variação do perfil de temperatura ao longo da parede do forno.	18
FIGURA 8: Forno de uma bateria jumbo localizada no território brasileiro.	27
FIGURA 9: Gráficos da vazão de gás.	30
FIGURA 10: Relatório da cromatografia gasosa.....	34
FIGURA 11: Tela de início do Modelo.	35
FIGURA 12: Esquema do balanço térmico da Bateria.....	52
FIGURA 13: Comparação dos dados.	53
FIGURA 14: Comparação entre a literatura, o trabalho e o software.	57
FIGURA 15: Gráfico de Pareto do calor injetado.	59
FIGURA 16: Gráfico de Pareto para o calor ejetado.	59
FIGURA 17: Influência do Ar em Excesso no Balanço.	61
FIGURA 18: Influência da Matéria Volátil no Balanço.	62
FIGURA 19: Influência na produção de coque devido a geração de gás bruto.	62
FIGURA 20: Influência da umidade no balanço.	63
FIGURA 21: Influência da umidade no carregamento dos fornos.	63
FIGURA 22: Inspeção visual de um forno não coqueificado.	65
FIGURA 23: Inspeção visual de um forno coqueificado.....	66
FIGURA 24: Influência da temperatura com o balanço.	66
FIGURA 25: Relação do tempo líquido com a temperatura da câmara de combustão.....	67
FIGURA 26: Relação do Balanço Térmico com o Tempo Líquido de Coqueificação.....	67
FIGURA 27: Influência do consumo de calor por tonelada de carvão enforado com o balanço térmico.	69

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1: Comparação entre carvão vegetal e coque.	5
QUADRO 2: Poder calorífico dos gases.....	16
QUADRO 3: Parâmetros dos gases.	37
QUADRO 4: Balanço de Massa dos gases.	37
QUADRO 5: Balanço Carvão/Coque.....	40
QUADRO 6: Balanço de By Products.....	41
QUADRO 7: Balanço de Calor.	43
QUADRO 8: Calor Sensível do Gás de Combustão.....	45
QUADRO 9: Calor sensível da fumaça.....	49
QUADRO 10: Balanço Térmico.....	50

RESUMO

Em uma indústria siderúrgica semi-integrada a coque, a planta da coqueria tem um papel fundamental desde o processamento do carvão mineral como matéria prima até a entrega do coque para uso no alto forno. A coqueria produz coque a partir da pirólise do carvão, onde o gás de coqueria (GCO) ou *Coke Oven Gas* (COG) é injetado em uma câmara adjacente ao forno e produz energia térmica ao processo pela combustão com o ar atmosférico. Sabe-se que o COG é o segundo maior fator que mais agrega custo ao processo de coqueificação, ficando atrás somente do preço da mistura de carvão carregada no forno. Por se tratar de uma estrutura de refratário, um controle térmico refinado é desejado para que a bateria possa ter a sua vida útil estendida e o consumo de calor em cada ciclo de coqueificação seja o suficiente para garantir que não haja desperdícios e nem haja massa de carvão não coqueificado. Esse trabalho visa desenvolver, validar e aplicar a ferramenta Balanço Térmico a fim de otimizar o consumo de calor por tonelada de carvão seco enornado em uma bateria de 50 fornos localizada em uma usina siderúrgica brasileira. A ferramenta servirá como auxílio para manter a variação de temperatura da bateria dentro de uma faixa pré-determinada garantindo um coque com ótimas condições de produção e preservação da bateria. O desenvolvimento do modelo consta com a análise de todos os fatores que contribuem com a injeção e dissipação da energia térmica do volume de controle. Estruturado em planilhas eletrônicas espera-se, também, como resultado ter um indicativo à equipe de controle térmico o ajuste ideal da vazão de COG no processo, culminando em uma redução de custos e aumento da qualidade do coque.

Palavras-chave: Coqueria; Consumo de gás; Balanço térmico.

ABSTRACT

In a semi integrated mill steel industry that iron ore reduction is by coke, the coke plant has a fundamental role since this mineral coal processment as raw material until this coke be delivered to the use in the Blast Furnace. Coke Plant produces coke from coal pyrolysis, where coke oven gas (COG) is injected in a chamber next to the oven and generates termal energy to process from combustion with atmospheric air. It has been known COG is the second highest factor that most adds cost to coking process, standing behind from coal blend price. Since the structure is made of refractory, a refined thermal control is desired in order that the plant may have its lifespan extended and the heat consumption at each coking cycle might be enough to ensure that does not exist waste nor bulk of coal not pyrolyzed. This work aims develop, validate and aplicate the Heat Balance in order to optimize the heat consumption per tonne of dry coal charged in a plant composed by 50 ovens localized at brazilian territory. This tool will work as support for maintain Coke battery's temperature changes inside of a region pre-determined certifying a coke with great production condition and great battery preservation. The model development contain all factors analysis that contribute with the thermal energy injection or thermal energy lost at the control volume. Structured on eletronical woorkbooks it was expected, also as result, indicate to thermal control staff the ideal settings of COG flux on the process, leading to costs reductions and coke quality increase.

Key words: Coke Plant; Gas consumption; Thermal balance.

1. INTRODUÇÃO

Presente em produtos da linha branca, na indústria automobilística e em dispositivos eletrônicos, estima-se que em 2016 a produção mundial de aço tenha chegado ao patamar de 1.629,6 milhões de toneladas (World Steel, 2018). Diante de um cenário tão desafiador, a indústria brasileira se vê no desafio de produzir aço com qualidade, porém com preços competitivos e sem abrir mão da sustentabilidade. O consumo de aço *per capita* de um país é uma das diversas variáveis usadas para analisar o desenvolvimento de uma nação. Em 2012, 7 das 10 maiores economias mundiais estavam entre os 10 maiores produtores de aço do mundo (Instituto de Pesquisa de Relações Internacionais, 2017).

Apesar do avanço e das oportunidades proporcionadas pela indústria siderúrgica (RIZZO, 2009), a quantidade de energia necessária para produzir 1 tonelada de aço pode atingir a escala de 20 GJ. As empresas mais desenvolvidas têm buscado reduzir esse consumo energético e estima-se que desde as operações em 1960 até hoje o consumo já foi reduzido em 60% no processo como um todo (World Steel, 2018).

Cerca de 2 bilhões de toneladas de minério de ferro, 1 bilhão de toneladas de carvão metalúrgico e 520 milhões de toneladas de sucata são necessárias para produzir 1,6 bilhões de toneladas de aço por ano. Por exercer tão grande influência no processo, a máxima redução de custos no preço do carvão metalúrgico impacta positivamente o processo como um todo (World Steel, 2018). O carvão mineral possui duas aplicações principais no Brasil: utilização na geração de energia elétrica (carvão energético) e na produção de coque para fins metalúrgico (carvão metalúrgico). Na atual conjuntura nacional, as atuais reservas brasileiras de carvão mineral serão autossuficientes por mais de 500 anos (OSÓRIO, VILELA e SAMPAIO, 2008). Apesar do Brasil possuir a 13ª maior reserva mundial de carvão mineral, o carvão metalúrgico (carvão próprio para o processo de coqueificação) é importado em sua totalidade (COSTA, 2008).

O coque é usado como redutor no processo de redução do minério de ferro. Na planta da coqueria, a mistura de carvão é carregada em uma bateria de vários fornos (podendo chegar a 50 fornos ou mais) com a finalidade de ser aquecido, liberando a

matéria volátil e se decompor em coque. O aquecimento, realizado na ausência de oxigênio, é proveniente do calor de combustão de um gás em câmaras adjacentes aos fornos. Esse gás pode ser gás de coqueria (GCO) ou *Coke Oven Gas* (COG), gás de alto forno (GAF) ou *Blast Furnace Gas* (BFG) ou gás misto (GM) ou *Mixed Gas* (MG). Segundo Loison (1989, p. 462), de uma forma geral, o calor gerado pela combustão fornece cerca de 90% da energia necessária para a coqueificação do carvão. Tendo em primeiro lugar na lista de custos o preço pela compra do carvão metalúrgico, no segundo lugar ocupam os gastos referentes ao consumo do gás para queima no processo de coqueificação. Desta forma, um balanço térmico bem definido evita o uso demasiado desse gás, otimizando o consumo de matérias primas e também, gerando um processo menos dispendioso (Loison, 1989, p. 453).

Este trabalho visa desenvolver um modelo de balanço térmico, usufruindo das ferramentas eletrônicas para análises de dados, para o processo de coqueificação do carvão em uma usina siderúrgica brasileira. Espera-se como resultado, tenha-se um balanço fidedigno que possa informar, com precisão, ao operador industrial a quantidade de gás a ser injetada na bateria de coqueificação a fim de que o processo seja otimizado e o coque seja produzido com qualidade a um menor custo.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

- Desenvolver um modelo de balanço térmico aplicável às condições operacionais de uma coqueria composta por baterias de 50 fornos situada no território brasileiro para reduzir o desperdício de gás de combustão injetado na bateria.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver e validar o modelo de balanço térmico da bateria;
- Analisar os meios de coleta de dados a fim de realizar o tratamento das informações de uma maneira eficiente;
- Comparar o modelo térmico proposto com outros encontrados na literatura;
- Analisar o balanço térmico da bateria com a alteração de alguns parâmetros de controle.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 CARVÃO MINERAL E COQUE

Na produção de ferro gusa-para a então fabricação do aço, é realizado, basicamente, nos altos-fornos, o emprego do carvão metalúrgico ou carvão vegetal como combustível e redutor no processo de redução do minério de ferro. Altos-fornos a carvão vegetal são mais comuns no território brasileiro, pois devido a políticas públicas da década de 60, a importação de carvão metalúrgico foi enfraquecida, fazendo com que as usinas locais produzissem ferro-gusa por meio do carvão vegetal extraído de suas próprias zonas de reflorestamento. Nesse trabalho, o foco de estudo será no carvão metalúrgico, pois a importação dessa matéria-prima já não se encontra enfraquecida, entretanto há alta taxa de tributação na compra dessa matéria-prima. Além disso, a empresa onde o estudo foi realizado utiliza o carvão metalúrgico no processo de coqueificação (destilação do carvão mineral) (RIZZO, 2009).

O motivo principal ao se usar carvão mineral em altos-fornos para a redução do minério de ferro é explicado nos seguintes tópicos:

Combustível: Calor e $\text{CO}_{(g)}$ (monóxido de carbono) são liberados devido a queima do coque (carvão metalúrgico após o processo de coqueificação) sob a ação das altas temperatura do processo, acarretando na fusão da carga. Calor também é fornecido na reação do óxido de ferro e outros elementos com o gás CO_2 .

Redutor: O $\text{CO}_{(g)}$ também é responsável por ser o redutor da reação com o minério de ferro, produzindo então ao fim do processo o ferro metálico. Si e Mn também são reduzidos paralelamente.

Permeabilizador e agente estrutural da carga: O coque tem o papel de permitir que os gases produzidos no processo entrem em contato com a carga metálica e saiam pelo topo do reator. Da mesma forma, o ferro líquido a ser produzido junto com a escória devem escorrer para o cadinho de modo que fiquem alojados na parte inferior do reator. O coque por si só tem a função de dar sustentação à carga no alto forno, mantendo o perfil térmico do forno, evitando que as cargas mais frias entrem em contato imediato com a carga mais aquecida. O carvão vegetal difere do coque nesse aspecto, pois sua

resistência é bem menor. Deste modo, carvões vegetais são utilizados em alto fornos menores, cuja altura de queda da carga e o peso da coluna de insumos são reduzidos.

Fornecedor de Carbono: O carbono presente no coque é transferido para o ferro-gusa, onde é possível manter a liga a uma temperatura menor que a temperatura de fusão do ferro puro, como também, o carbono, irá gerar energia química nas etapas posteriores durante a produção do aço.

QUADRO 1: Comparação entre carvão vegetal e coque.

Item	Unidade	Carvão Vegetal	Coque
Carbono Fixo	%	65-75	86-89
Materiais Voláteis	%	20-35	01 a 03
Cinzas	%	02 a 05	10 a 12
Enxofre	%	0,03-0,1	0,45-0,70
Umidade	%	0-6	01 a 02
Composição da cinza			
SiO ₂	%	05 a 10	50-55
CaO	%	37-56	4,5
MgO	%	05 a 06	4,5
Al ₂ O ₃	%	02 a 12	25-30
Fe ₂ O ₃	%	07 a 13	05 a 07
P ₂ O ₅	%	08 a 12	0,4-0,8
K ₂ O	%	15-25	02 a 04
Na ₂ O	%	02 a 03	01 a 03
Resistência à compressão	kgf/cm ²	10 a 80	130-160
Faixa granulométrica	mm	9-100	25-75
Tamanho médio	mm	40-50	45-60
Densidade	kgf/cm ²	180-350	550
Reatividade (a 950°C)	%	60	15
Resistência após a reação	%	-	60

FONTE: RIZZO, 2009

A utilização direta do carvão metalúrgico no alto-forno não é adequada devido principalmente a baixa resistência mecânica, como também, ao baixo poder calorífico do carvão, alto teor de enxofre e cinzas, baixa porosidade e características físicas e químicas heterogêneas (RIZZO, 2009). Deste modo, é realizada uma etapa de

coqueificação do carvão na planta da coqueria para o seu uso devido na redução do minério de ferro. Em 1709, na Inglaterra, houve na história a primeira utilização de coque metalúrgico na redução do minério de ferro em alto-forno (COELHO, DA SILVA, *et al.*, 2004). Adiante, serão discutidas as especificidades do processo de coqueificação em si.

3.2 COQUEIFICAÇÃO

3.2.1 PROCESSOS DE COQUEIFICAÇÃO

Há basicamente três tipos de fornos quando se trata de uma planta de coqueria: fornos *By-Products* (recuperação de subprodutos), Fornos *Heat Recovery* (recuperação de calor) e fornos *Non Recovery* (fornos de soleira aquecida, sem recuperação de subprodutos ou calor). Nesse estudo, o foco se dará nos fornos do tipo *By-Products* pelo fato da coqueria em análise ser desse tipo.

O número de fornos em uma bateria de coqueificação varia dependendo da região em que a usina foi instalada, podendo atingir um total de mais de 200 fornos (RIZZO, 2009). Os fornos basicamente possuem um formato de paralelepípedo para que a direção preferencial de coqueificação ocorra das paredes laterais para o centro do forno, fazendo com que a massa de coque produzida tenha propriedades homogêneas ao fim do processo. Cada forno possui em torno de 6 a 8 m de altura, dependendo da usina, onde a produção anual de coque pode chegar até 3 milhões de toneladas por ano ou mais. Destacando uma bateria de fornos *By-Products*, os fornos verticais têm suas paredes revestidas por refratário à base de sílica ou sílica-luminosos. Esse tipo de revestimento permite o isolamento do calor no interior do forno. Na parte superior do forno, existem 3 a 5 entradas responsáveis pela alimentação do compartimento interno com a mistura de carvão. Há uma passagem distinta responsável por coletar os gases e subprodutos gerados pela destilação do carvão. Esses fornos são aquecidos pela geração de energia de combustão proveniente da queima de gás em câmaras adjacentes aos fornos. Basicamente, entre um forno e outro há uma câmara de combustão, onde a queima do gás é realizada. Esse gás pode ser de três naturezas diferentes: COG, BFG e

MG (DE ARAUJO, 2005). A natureza desse gás e suas propriedades serão abordadas em um tópico mais adiante

FIGURA 1: Visão geral de uma coqueria.



FONTE: Paul Wurth, 2018.

Segundo Rizzo (2009), o fluxo do processo de uma bateria de coque se dá por:

- a) Preparação da Mistura de Carvões;
- b) Enfornamento;
- c) Aquecimento;
- d) Desenfornamento;
- e) Apagamento (Extinção);
- f) Preparação do Coque;
- g) Tratamento da Matéria Volátil.

A mistura de carvão já pré-processada (com a granulometria, umidade e quantidade desejadas) é carregada pelos orifícios superiores dos fornos pela máquina enfornadora. Após preencher o volume interno desejado do forno, o carvão é então aquecido e coqueificado, produzindo gás bruto proveniente da volatilização da matéria volátil. Esse gás é coletado por um tubo chamado tubo de ascensão e é destinado para tratamento e recuperação de subprodutos em uma planta de apoio chamada Carboquímica ou *Gas Treatment Plant* (GTP). Ao fim do processo de coqueificação, a

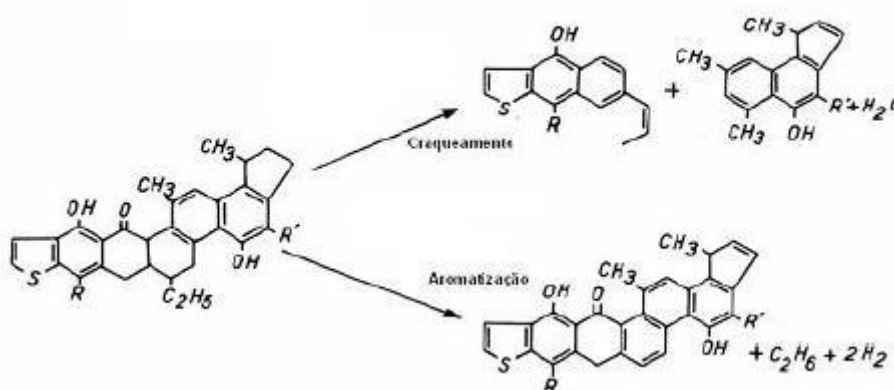
máquina desenformadora abre a porta do forno também chamada de lado *Push Side* (PS) e empurra o coque em direção a outra extremidade do forno também chamada de lado *Coke Side* (CS), onde a porta já está aberta e o vagão está pronto para o recebimento do coque incandescente. Este será transportado para resfriamento a fim de extinguir o coque incandescente e atingir uma temperatura final na faixa dos 100°C. Esse resfriamento pode ser por imersão do coque à água ou resfriamento por fluxo de nitrogênio. Já na temperatura desejada, o coque é despejado, onde será então transportado para seu beneficiamento (peneiramento e britagem) e armazenado em silos para a utilização no alto-forno (DE ARAUJO, 2005).

3.2.2 PIRÓLISE DO CARVÃO

O carvão metalúrgico possui características distintas no processo de coqueificação. Há a presença de componentes na sua constituição chamados macerais que associados a outros elementos, farão com que o carvão sob a influência da temperatura tenha maior ou menor capacidade de virar coque. O processo de pirólise do carvão em si é constituído por várias etapas, porém três se destacam. Durante o aquecimento até 350°C, há a vaporização da umidade e desvolatilização. Até 500°C, o carvão se decompõe em alcatrão e gases, formando uma pasta que envolve as partes ainda sólidas até que sejam diluídas pela fase líquida formada. Até os 1000°C, a fase pastosa começa a endurecer e trincar, formando o semicoque e então, por fim, o coque. (JÜNTGEN, 1984; KOCH et al., 1995).

Deste modo, durante a pirólise do carvão, ocorrem dois tipos de reações principais. As reações de craqueamento, onde há o rompimento das ligações de carbono (C-C), produzindo polímeros menores e no estado líquido. Essa reação é alimentada por hidrogênio que é fornecido pelo segundo tipo de reação. As reações de aromatização (e condensação), baseia-se na formação de cadeias aromáticas com anéis saturados, a desidrogenização dos anéis e a recombinação dos aromáticos com outros grupos. Por fim, o hidrogênio é liberado e o carbono sólido residual é formado. (LOISON, FOCH e BOYER, 1989)

FIGURA 2: Reações de Craqueamento e Aromatização.

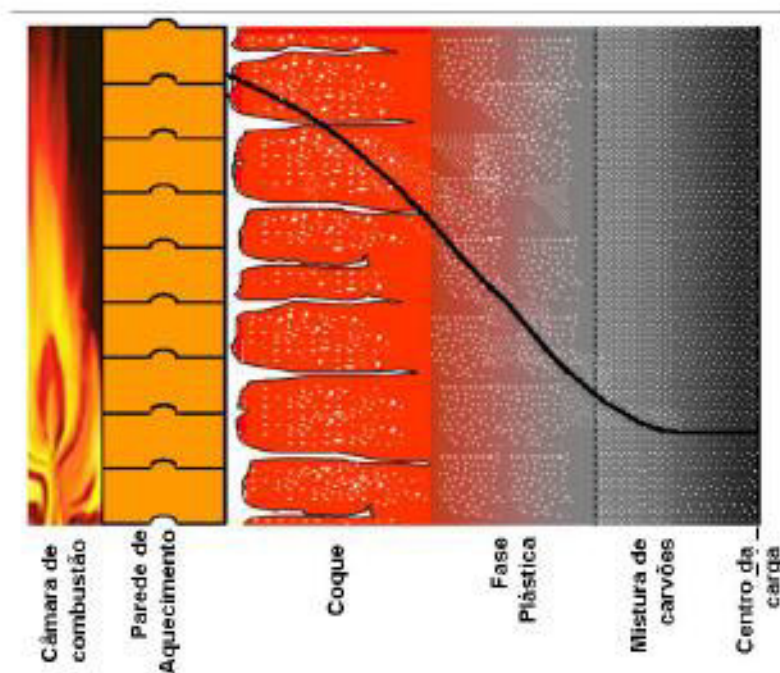


FONTE: LOISON, FOCH e BOYER, 1989.

Resumindo o processo descrito anteriormente, Rizzo (2009) afirma que ao ser aquecido, o carvão passa, pelas seguintes etapas de destilação:

- **Desgaseificação:** Até 200°C há a evaporação de toda umidade. Após atingir a marca de 300°C, há a liberação de matéria volátil por meio da evolução de hidrocarbonetos, decompondo termicamente o carvão. Ao atingir os 500°C, são então liberados os gases CO, CO₂ e H₂;
- **Amolecimento:** Ao exceder a temperatura de 350°C, o carvão começa a amolecer, aderindo então à forma plástica (fase plástica);
- **Inchamento:** Devido à transformação de fase do carvão para a fase plástica, há uma contração do carvão. Devido à produção dos gases brutos pela pirólise do carvão, há um inchamento;
- **Ressolidificação:** A viscosidade e a aparição de poros aumentam com o aumento da temperatura da massa plástica. Após atingir o valor de temperatura de 450°C, o carvão é convertido a um estado sólido de semicoque;
- **Contração:** Acima de 700°C, ocorrem as reações de craqueamento, grafitização que tornam a estrutura mais estável e então contraem o coque. A partir de 900°C, o coque é então produzido atingindo suas especificações desejadas.

FIGURA 3: Progressão da frente de coqueificação em relação ao perfil de temperatura no forno.



FONTE: COSTA, L. C., 2008.

3.2.3 TEMPO LÍQUIDO E TEMPO BRUTO

Há duas constantes essenciais quando se trata de processo de coqueificação: Tempo Líquido de Coqueificação (TL) e Tempo Bruto de Coqueificação (TB).

O TL é caracterizado pelo instante em que o carvão é completamente transformado em coque, ou seja, as duas frentes de coqueificação se encontram no meio da mistura, eliminando o carvão mineral, transformando-o por total em coque. Essa constante pode ser influenciada pela granulometria, umidade, natureza da mistura e taxa de aquecimento (COSTA, 2008). Quanto maior a taxa de aquecimento do carvão, maior será a taxa de coqueificação e isto acarretará em um coque mais frágil e menor. Por isso é necessário deixar o coque por mais tempo no forno e esse tempo de permanência garantirá ao coque mais qualidade para ser usado no processo de redução do minério de ferro. A soma do tempo líquido com o tempo de permanência do coque

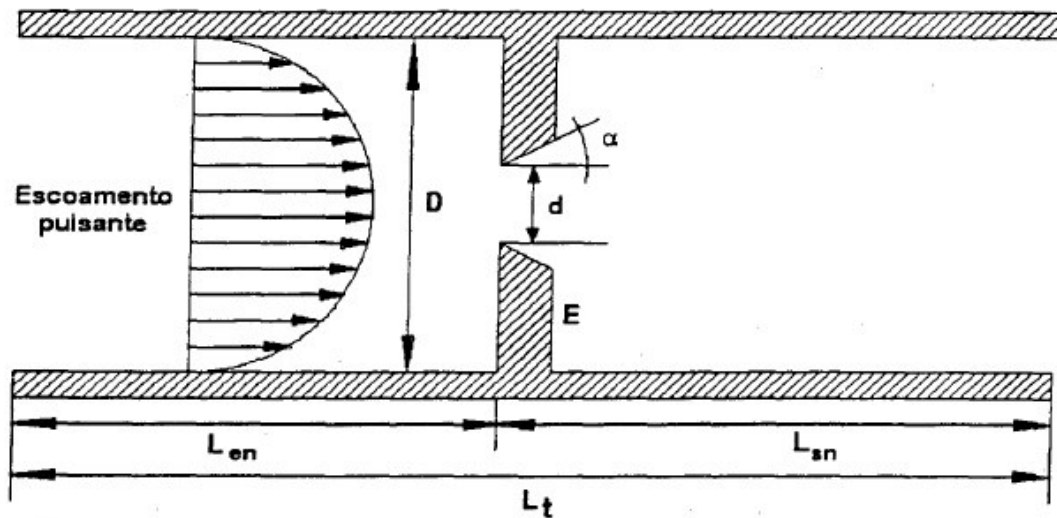
no forno é chamada de Tempo Bruto de Coqueificação ou TB e é comum que o TB de uma bateria supere as 24 horas. Quando se trata de produtividade da bateria (índice operacional), a tendência é diminuir o TB para que o coque permaneça menos tempo no processo e assim possa ser produzido mais matéria prima para o Alto Forno. Há usinas que podem trabalhar com um TB de até 32 horas quando não há uma demanda muito grande de coque. Um conhecimento dos valores dessas constantes e domínio das mesmas garantirá um processo mais estável para os especialistas da coqueria.

Como a produtividade da bateria é dada com base no TB estabelecido pela equipe de especialistas do processo, o conhecimento do TL é de extrema importância quando se quer reduzir o consumo de calor na bateria. Quando se aumenta o fluxo de calor da câmara de combustão para o forno, o TL tem a tendência de diminuir, aumentando o tempo de permanência ou *stay time* do coque no forno. Com a diminuição do fluxo térmico, acontece o contrário e o TL aumenta, diminuindo o tempo de permanência do coque no forno sem que o mesmo perca sua qualidade mecânica e física. Ou seja, aproximar o TL do TB é uma ação comum quando se deseja trabalhar com um consumo menor de calor no processo de coqueificação do carvão (COSTA, 2008).

3.3 SUBPRODUTOS E GÁS DE COQUERIA

Durante a pirólise do carvão, há a liberação de vários compostos aromáticos, volatilização da matéria volátil e geração de alcatrão. Esses subprodutos do carvão são arrastados pelo gás bruto formado e levados em direção ao tubo de ascensão, localizado na região superior do forno de coqueificação. O gás é então direcionado por uma tubulação, chamada de coletores que direcionam o fluido para ser tratado na GTP (DE ARAUJO, 2005). Antes de chegar na planta carboquímica, há uma placa de orifício na interface coqueira/GTP responsável por medir a vazão de gás bruto produzido. Essa placa parte do princípio de Bernoulli, forçando o fluido a passar por um orifício de área específica e então sofrer uma diferença de pressão (Pressão na entrada do orifício é diferente da pressão na saída do orifício). Deste modo, há um processador recebendo esses valores de diferença de pressão e realizando os devidos cálculos para retornar a resposta em vazão de gás (VALLE, 1995).

FIGURA 4: Parâmetros geométricos típicos de uma placa de orifício concêntrico.



FONTE: VALLE. 1995.

As matérias voláteis no estado gasoso são constituídas por misturas de vários hidrocarbonetos e compostos:

- Gasosos à temperatura ambiente: Gás Hidrogênio (H_2), Metano (CH_4), Etano (C_2H_6), Propano (C_3H_8), Butano (C_4H_{10}), Etileno (C_2H_4), Propileno (C_3H_6), Acetileno (C_2H_2), Dióxido de Carbono (CO_2), Monóxido de Carbono (CO), Gás Sulfídrico (H_2S), Amônia (NH_3), Oxigênio (O) e Nitrogênio (N);
- Líquidos à temperatura de trabalho (processo): Benzeno (C_6H_6), Tolueno ($C_6H_5CH_3$), Xileno ($C_6H_4(CH_3)_2$), Dissulfeto de Carbono (CS_2);
- Sólidos à temperatura ambiente: Naftaleno ($C_{10}H_8$), Fenol (C_6H_5OH), Antraceno ($C_{14}H_{10}$), e compostos pesados, como os alcatrões de pavimentação e os piches.

Na realidade industrial brasileira, 1 tonelada de carvão enfiado proporciona aproximadamente:

- 750 kg de coque (690 kg de coque metalúrgico + 60 kg de moinha);
- 36 kg de alcatrão, (o que inclui: 2,5 kg de naftaleno, 15 kg de óleos leves e 15,5 kg de piche);
- 7,28 kg de benzol total (compreendendo: 5,35 kg de benzeno, 1,25 kg de tolueno e 0,68 kg de xileno);
- 12 kg de sulfato de amônio.

Desta forma, esses subprodutos são beneficiados na GTP e comercializados no intuito de reduzirem os custos do processo. O gás da coqueria que antes era rico em sua composição, agora retorna à bateria para ser usado como gerador de energia para o processo de coqueificação. O gás produzido, também é direcionado para ocupar o volume de gasômetros que tem por função manter a estabilidade da pressão na rede, compensar variações entre os meios de produção e consumo e assegurar a distribuição constante de gás na linha de tubulação. (DE ARAUJO, 2005).

O gás de coqueria tem, por sua vez, que atender uma série de especificações e critérios de qualidade para ser consumido pela bateria. Dentre as especificações, podemos destacar o Poder Calorífico Inferior (PCI) do gás, os componentes do gás e a temperatura.

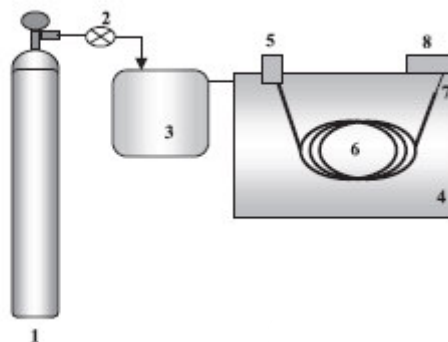
O processo de coqueificação tem como fonte térmica a energia exotérmica do gás combustível com o ar na câmara de queima. Usualmente o gás utilizado é o COG, mas também pode-se usar o MG. O COG é rico em hidrocarbonetos, como metano, benzeno, tolueno, xileno, entre outras espécies químicas, como monóxido de carbono, dióxido de carbono, gás nitrogênio, gás hidrogênio, sulfeto de hidrogênio etc. Esses componentes do gás são beneficiados na GTP e vendidos para os mais diversos fins industriais, como a indústria de produtos de limpeza, indústria de reagentes químicos, indústria de fertilizantes e indústria de energia. A composição remanescente retorna em forma de gás para ser queimado nas câmaras de combustão, gerando energia para o processo de coqueificação ou poderá ser usado na termelétrica para gerar energia para a usina.

Para realizar a análise e verificar a composição do gás tratado, após a passagem pela GTP, são coletadas amostras a fim de realizar ensaios em equipamentos de cromatografia gasosa e separação por óleos leves.

O princípio da cromatografia gasosa é definido como uma coluna preenchida com um gás estacionário (N_2). O gás a ser analisado é injetado e percorre a coluna sofrendo interação cinética com as moléculas do o gás previamente presente. Cada componente terá uma interação com o gás de tal forma que ocorrerá uma separação dos componentes. Por fim, há um sensor no final da coluna que gerará dados para um

processador, à medida que cada componente for sendo detectado. Com a cromatografia gasosa é possível detectar as composições de hidrocarbonetos e alguns gases na mistura (CARRILHO, TAVARES e LANÇAS, 2002).

FIGURA 5: Ilustração de equipamento de cromatografia gasosa. 1- Cilindro de CO₂, 2 – Válvula, 3 – Bomba para pressurizar o CO₂, 4 – Forno, 5 – Injetor, 6 – Coluna, 7 – Restritor, 8 – Detector.



FONTE: CARRILHO, TAVARES e LANÇAS. 2002.

Para avaliar a quantidade de energia gerada por queima de Nm³ de gás, é necessário compreender o conceito de poder calorífico do gás. O poder calorífico de um gás pode ser expresso de duas formas superior ou inferior (PCS ou PCI). O PCI pode ser expresso pela quantidade de kcal geradas devido à combustão de um metro cúbico de uma substância onde a água resultante ao fim da combustão encontra-se no estado gasoso. Já o PCS pode ser expresso pela quantidade de kcal geradas devido à combustão de um Nm³ do gás onde a água resultante ao fim da combustão encontra-se no estado líquido. Quando se tem uma mistura de gases e não uma substância única, o poder calorífico da mistura é calculado pelo somatório do poder calorífico individual de cada componente do gás. O quadro 2 mostra a diferença entre os valores de PCI e PCS para diferentes substâncias.

No caso do trabalho desenvolvido, foram usados os dados de PCI do gás de combustão. Para o COG, o PCI está próximo de 4200 kcal/Nm³ e esse dado é de extrema importância para o processo, pois vai inferir diretamente no consumo de calor da bateria. Ao utilizar COG de PCI muito alto há uma dificuldade em controlar o consumo de calor da bateria, como também é um indicativo de que a GTP não tratou

significativamente o gás bruto recebido. Com o aumento da composição de cada espécie química no gás, a contribuição no PCI será diretamente proporcional. Em comparação com o COG, o BFG possui um PCI de aproximadamente 940 kcal/Nm³. O uso do COG puro sem mistura com outro gás, traz uma desvantagem para o processo, pois devido à emissão de particulado na pirólise do carvão, esse gás acaba por obstruir as tubulações com um certo tempo. Uma alternativa para esse caso é utilizar o MG onde o gás encontra-se mais limpo (devido a presença de BFG) e o PCI pode ser balanceado (devido a presença do COG).

QUADRO 2: Poder calorífico dos gases.

Gás Combustível	Poder Calorífico Superior (MJ/Nm ³)	Poder Calorífico Inferior (MJ/Nm ³)
Monóxido de Carbono	11,97	11,97
Hidrogênio	12,11	10,23
Hidrocarbonetos Parafinados		
Metano	37,72	33,96
Etano	66,06	60,44
Propano	94,03	86,52
n-Butano	121,86	112,47
iso-Butano	121,51	112,11
n-Pentano	149,77	138,5
iso-Pentano	149,43	138,16
Neopentano	148,81	137,56
n-Hexano	177,66	164,51
Neo-Hexano	177,35	164,2
n-Heptano	203,4	188,38
Trieptano	202,87	187,86
n-Octano	233,24	216,33
isso-Octano	232,83	215,92
Séries Olefinas		
Eteno	59,75	56
Propeno	67,17	81,54
Buteno	114,91	107,49
isso-Buteno	114,35	106,86
n-Penteno	142,96	133,57
Séries Aromáticas		
Benzano	139,78	136,15
Tolueno	167,16	159,65
Xileno	194,6	186,21
Outros Gases Combustíveis		
Acetileno	55,01	53,14
Naftaleno	218,11	210,66
Álcool Metílico	32,34	26,58
Álcool Etílico	59,61	53,99
Amônia	16,43	13,56
Sulfito de Hidrogênio	24,07	22,17
Formaldeído	23,96	22,09
Ácido Fórmico	11,21	9,35
Acetaldeido	50,67	46,91
Óxido Nítrico	12,63	12,63
Teróxido de Nitrogênio	10,58	10,58

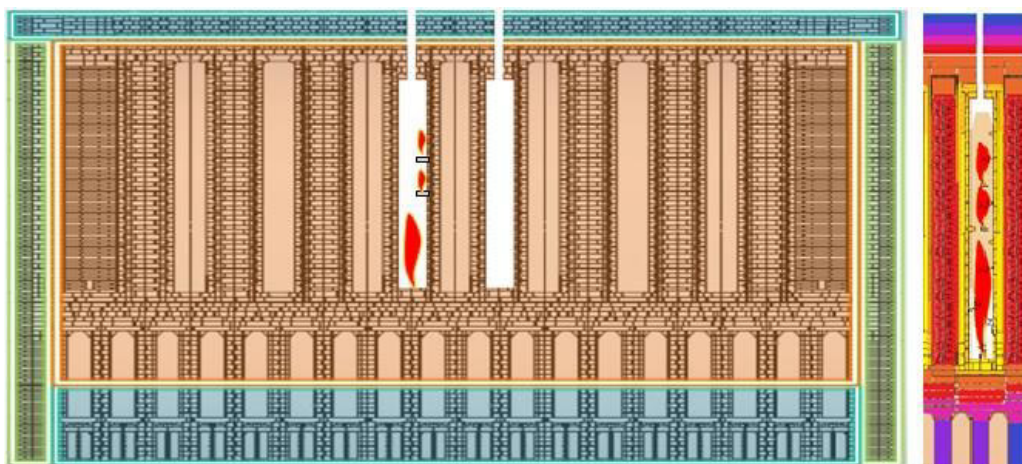
FONTE: Gas Engineers Handbook / SINDE

3.4 CÂMARAS DE COMBUSTÃO E SISTEMA DE REGENERAÇÃO

O COG é então controlado pela sua vazão na bateria como também o tempo em que o gás permanece queimando. O gás é injetado em cada câmara de combustão (de forma intercalada) por meio de *underjets* que percorrem toda bateria a nível subterrâneo. Ao entrar em contato com o ar atmosférico, há a combustão e então geração de energia para que ocorra o processo de coqueificação (DE ARAUJO, 2005).

As câmaras de combustão em si são grandes vãos construídos à base de refratários e com orifícios para entrada de gás (COG ou MG), ar, e saída de fumaça (produtos da combustão). Ao entrarem em contato, o gás e o ar geram uma fumaça cuja temperatura encontra-se muito elevada. Essa energia térmica contida na fumaça é aproveitada pelo sistema de regeneração da bateria. A fumaça sai pela parte superior da câmara e passa para a câmara adjacente, seguindo então para os regeneradores localizados no nível inferior à câmara. Esse sistema de regeneração é formado por tijolos que transmitem o calor contido na fumaça para o gás e o ar injetados. Para melhor entendimento, a fumaça recém-chegada nos regeneradores pode ter uma temperatura de aproximadamente 1200°C, ao ceder a energia térmica e seguir em direção à chaminé pelo efeito sucção, a temperatura da fumaça já se encontra em torno de 200°C aproximadamente (COSTA, 2008).

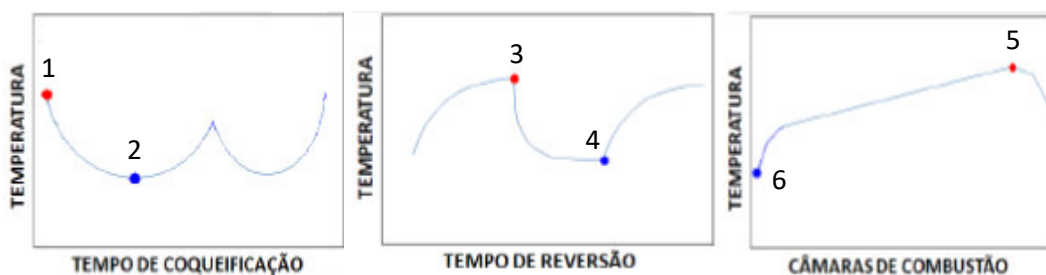
As câmaras, também possuem um sistema de alongamento da chama de aquecimento. Devido ao alto PCI do COG, a tendência é que a queima do gás com o ar permaneça na região inferior da câmara, desta forma, o calor seria mal distribuído no forno. O ar injetado na câmara passa por um processo de distribuição de tal forma que o gás de combustão possa alcançar as regiões superiores da câmara e assim ceder calor para o processo de uma forma mais homogênea. A figura 6 demonstra esquematicamente como é esse sistema de alongamento da chama (COSTA, 2008).

FIGURA 6: Sistema de alongamento de chama.

FONTE: COSTA, L. C., 2008.

Em termos de funcionamento, uma câmara pode ficar no estado de queima (queimando gás) durante aproximadamente de 20 a 30 minutos (ciclo de reversão). Após o término desse período, um novo ciclo se inicia e a câmara vizinha que antes estava recebendo os produtos da combustão começa a receber gás a fim de que sempre haja uma câmara em queima e uma câmara recebendo fumaça alternadamente. Esse sistema de reversão permite que todas as câmaras possam intercalar entre períodos de trabalho e *stand by* e, conseqüentemente, todos os fornos estejam sempre recebendo o calor da combustão, mantendo uma estabilidade térmica na bateria (COSTA, 2008).

FIGURA 7: Da esquerda para a direita: Variação no perfil da temperatura do forno durante o ciclo de coqueificação; Variação do perfil de temperatura na câmara durante o tempo de reversão; Variação do perfil de temperatura ao longo da parede do forno.



FONTE: COSTA, L. C., 2008.

A figura 7 traz um esquemático da variação da temperatura em diferentes situações do processo. Da esquerda para a direita, pode-se visualizar a variação do perfil da temperatura referente ao forno quando enforado (ponto 2) e, ao fim do ciclo,

desenformado (ponto 1). Na figura do meio, pode-se notar a variação da temperatura em uma câmara com o decorrer do tempo de reversão, ou seja, em estado de queima (ponto 3) e em estado de recebimento de fumaça (ponto 4). Por fim, nota-se o perfil de temperatura ao longo da parede do forno, chamada também de temperatura de *cross-wall*. Essa medição de temperatura mostra que mais próximo do lado CS (ponto 5) há uma necessidade de um consumo maior de calor devido à geometria do forno que é mais larga no lado de recebimento de coque. Desta forma, concentra-se mais carvão neste lado do forno e é preciso que mais calor seja fornecido a essa região para que haja uma coqueificação completa do material. Essa diferença na geometria se deve ao fato de que com esse perfil geométrico, evita-se o agarramento do coque nas paredes do refratário. Nota-se também um leve decréscimo da temperatura nas extremidades da parede do forno tanto no lado CS como no lado PS (Ponto 6). Essa queda no perfil térmico ocorre para preservar a estrutura metálica das portas do forno de coqueificação (COSTA, 2008).

3.5 BALANÇO TÉRMICO

Segundo Loison, Boyer e Foch (1989) a estruturação do balanço térmico de uma bateria de coqueificação traz imensos benefícios para o processo em si quando se deseja desenvolver projetos para redução de custo. Uma bateria tem como vida útil aproximadamente 50 anos de operação ou mais, porém para que esse marco seja atingido, é necessário conhecer intrinsecamente cada parâmetro do processo para que sua estrutura seja preservada e siga operando com eficiência durante toda sua vida útil. Devido à enorme variação no perfil térmico de uma bateria (principalmente quando o sistema de Desenformamento/Enfornamento é por séries intercaladas) é necessário trabalhar com um consumo ideal de calor para que o sistema de refratários não sofra tanto. A partir dessa necessidade o balanço térmico deve ser compilado. É interessante ressaltar que há uma dificuldade em comparar os balanços entre baterias de usinas diferentes, pois a mínima variação em algum parâmetro pode alterar os resultados finais por completo, deste modo, usa-se como parâmetro o consumo de calor por tonelada de carvão seco enfornado (Mcal/ton). Para que o balanço seja bem estruturado, um balanço de massa refinado deve ser feito previamente para dar suporte ao modelo.

3.5.1 ELEMENTOS DO BALANÇO

Basicamente há dois circuitos a serem considerados no balanço térmico (LOISON, FOCH e BOYER, 1989):

1. Circuito carvão-coque: Circuito referente ao enforamento do carvão, coqueificação deste e desenforamento do coque, considerando a produção de *by products*.
2. Circuito de aquecimento: Circuito referente ao suprimento de gás de combustão, ar atmosférico e liberação da fumaça pela chaminé.

Considerando o balanço estequiométrico, esses dois circuitos não se unem durante o processo (FERREIRA, BERNARDES e de ANDRADE, 2014).

3.5.2 VISÃO GERAL DO BALANÇO

O balanço é então dividido em duas seções:

1. Entradas

- L_c – Calor potencial do carvão. Calor referente à queima total do carvão;
- C_c – Calor sensível do carvão;
- L_g – Calor potencial do gás de combustão. Calor referente à queima total desse gás;
- C_g – Calor sensível do gás de combustão;
- C_a – Calor sensível do ar injetado.

2. Saídas

- L_k – Calor potencial do coque. Calor referente à queima total do coque;
- L_b – Calor potencial dos *by-products*. Calor referente à queima total dos *by-products*;
- C_k – Calor sensível do coque;
- C_b – Calor total dos *by-products* (i. e. calor sensível somado ao calor de vaporização);
- C_w – Calor sensível da fumaça;

- L_w – Calor potencial da fumaça. Calor referente à queima total dos componentes da fumaça que não sofreram combustão na etapa anterior;
- SHL – Perda de Calor pela Superfície.

Partindo então do princípio que toda a energia do processo é conservada, pode-se estabelecer a equação 1 sendo a geral do balanço:

$$Lc + Cc + Lg + Cg + Ca = Lk + Lb + Ck + Cb + Cw + Lw + SHL \quad (1)$$

3.5.3 EFICIÊNCIA TÉRMICA DO PROCESSO

A eficiência térmica do processo, segundo Loison, Foch e Boyer (1989) pode ser estipulada pela equação 2:

$$\eta = \frac{(Lg - Cw - SHL)}{Lg} \quad (2)$$

Esse é um parâmetro de extrema importância, pois a partir dele pode-se observar se o processo é eficiente ao aproximar-se de 1 (processo sem perda de energia) ou não ao aproximar-se de 0 (processo totalmente ineficiente). O termo C_w/L_g denota a perda de calor pela fumaça, já o termo SHL/L_g denota a perda de calor para a superfície da bateria propriamente dita.

3.5.4 ESTRUTURAÇÃO DO MODELO

O modelo é então representado por três grupos principais de constantes:

1. Quantidade de Massa: Carvão, coque, gás bruto, COG, etc. Essas quantidades são de extrema importância, pois um balanço de massa bem feito, acarretará em um balanço térmico coerente.
2. Temperatura: Temperatura dos itens de entrada e saída.

3. Constantes físicas: constantes de calor específico previamente estabelecidas. Pode-se afirmar que a constante para estimar o calor específico do carvão, do coque e o calor total dos *by products* segue o seguinte modelo:

- Carvão – Calor específico médio entre 0° e 40° é igual a 1.15 kJ/kg.K
- Coque – Calor específico médio entre 0°C e 1000°C é igual a 1.50 kJ/ kg.K
- *By-products* – Calor Total (calor sensível e calor de vaporização) entre 0°C e T°C é igual a:

$$\text{Alcatrão: } 335 + 1.05 \times T \text{ (kJ/kg)} \quad (3)$$

$$\text{Benzeno: } 335 + 1.90 \times T \text{ (kJ/kg)} \quad (4)$$

$$\text{Água: } 2500 + 2.0 \times T \text{ (kJ/kg)} \quad (5)$$

Para efeito de comparação, Loison, Foch e Boyer (1989) formularam balanços térmicos para diferentes situações em algumas usinas. Todo resultado foi expresso na tabela 1. Nota-se que dentre as 4 usinas estudadas, a que mais se assemelha à usina onde o trabalho de conclusão foi realizado, foi a usina C.

3.5.5 ALGUNS FATORES IMPORTANTES QUE INFLUENCIAM O BALANÇO

- **Natureza da mistura de carvão carregada:** Dependendo do *blend* injetado no forno, o consumo de gás será diferente, pois cada tipo de carvão irá se comportar de uma maneira diferente sob o efeito da temperatura. Há tipos de carvões que produzem mais gás, há outros que atingem a fase plástica mais rapidamente, há outros que permanecem inertes por boa parte do processo. Cada espécie irá influenciar no tempo líquido de coqueificação da mistura, como também no consumo de calor.
- **Influência da umidade da mistura:** A umidade presente na mistura é um fator importantíssimo quando se trata de balanço térmico. Devido à estadia do carvão mineral em pátios de matéria prima a céu aberto, o carvão sofre muito com a ação da natureza, principalmente das chuvas. Uma mistura com alto teor de umidade, influenciará de tal forma que quanto maior a umidade na mistura, mais energia térmica é necessária para evaporizar a água. Sem contar com o fato de que há uma produção maior de material gasoso que acaba por influenciar também nas condições de pressão interna da bateria.
- **Influência do modo de aquecimento:** É visto que a natureza do gás de combustão também interfere no balanço térmico. Quanto mais pobre o gás é (BFG), mais consumo térmico há no processo e mais gás é usado para abastecer a bateria. Em relação aos gases ricos (COG), menos gás é necessário e o consumo térmico se mostra menor em comparação com o primeiro caso. Vale salientar que o uso do COG puro, traz consequências para as tubulações de abastecimento, pois o COG é considerado um gás “sujo” (excesso de particulados). Muitas vezes, opta-se por usar o MG para evitar a obstrução na tubulação.
- **Influência do índice operacional:** Com o aumento na produtividade, há também um aumento no consumo de gás na bateria para suprir a necessidade de uma operação mais eficiente. O aumento do índice operacional deve ser estudado para que o aumento de temperatura na bateria não sobrecarregue a estrutura refratária e assim a vida útil da bateria seja preservada, fazendo com que as

perdas pela superfície continuem constantes e sem passagem de material para a atmosfera (LOISON, FOCH e BOYER, 1989).

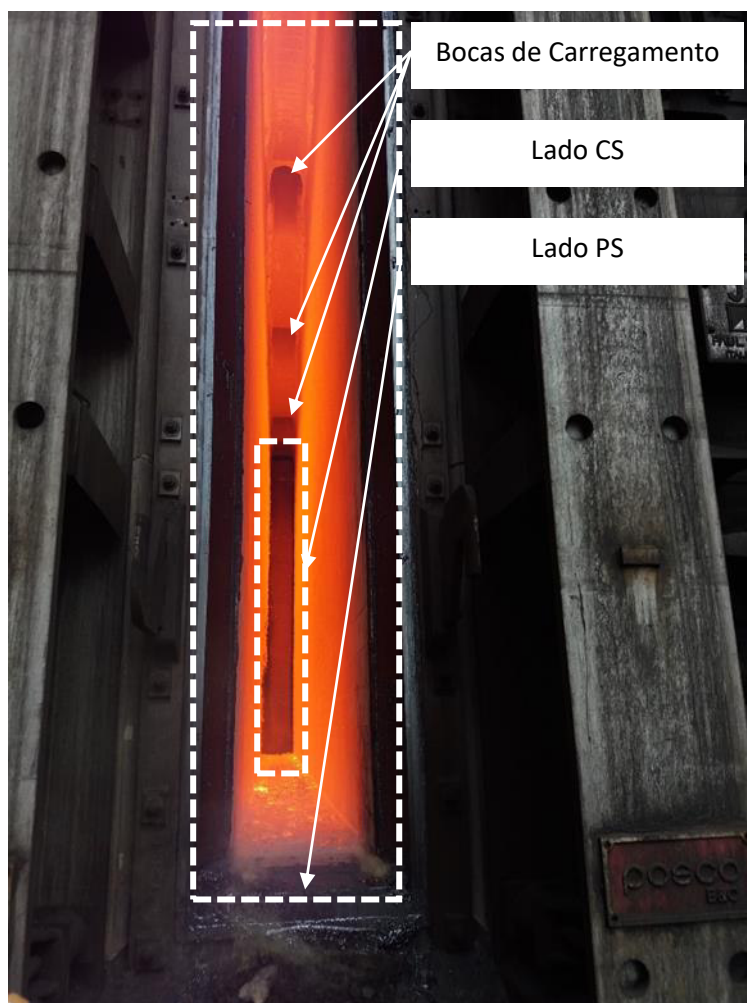
4. METODOLOGIA

Para tornar essa seção mais didática, a explicação foi dividida em tópicos de acordo com a progressão na estruturação do modelo. O modelo foi desenvolvido para ser aplicado em uma planta de coqueificação situada no território brasileiro e todas as premissas levantadas foram para respeitar e estar de acordo com as condições que a região proporciona ao processo industrial.

4.1 CONHECIMENTO DO PROCESSO

Para a aplicação do balanço térmico, foi necessário que o processo fosse bem compreendido, ocasionando em um volume de controle aplicado corretamente. A bateria de coque, onde o balanço foi estruturado, é uma bateria considerada jumbo cuja altura dos seus fornos é em torno de 8 m. A bateria é classificada como *by-products*, pois há também a recuperação dos subprodutos e o reuso do gás produzido para geração de energia para o processo. A mistura de carvão utilizada na planta, provém de um pátio de matérias primas a céu aberto (grande influência dos fatores climáticos). Todo carvão é beneficiado e transportado até que seja armazenado na coqueria. O coque produzido é então transportado para o devido tratamento e armazenagem nos silos de matéria-prima do alto-forno. Basicamente, essa é a linha de processo do carvão/coque. Paralelamente, há a linha de produção dos gases. Ao destilar o carvão, uma porcentagem da carga é volatilizada e destinada a uma planta de tratamento, onde os subprodutos são aproveitados e vendidos. O gás limpo retorna à bateria para ser queimado, gerando energia ao processo. Como produto, resta a fumaça que é succionada pela chaminé, sendo aquela responsável por levar consigo boa parte da energia térmica do processo. Foram levadas em consideração os fatores críticos que, segundo Loison, et al (1989) influenciam no balanço térmico, tais como a umidade da mistura de carvão, o índice operacional, as dimensões da bateria, o tipo de gás usado na combustão, entre outros. Foram destinados 2 meses de levantamento da revisão bibliográfica e acompanhamento de cada etapa do processo para então começar a definir cada elemento do balanço térmico.

FIGURA 8: Forno de uma bateria jumbo localizada no território brasileiro.



FONTE: Própria do autor, 2018.

4.2 ANÁLISE E TRATAMENTO DOS DADOS

Os operadores da sala de controle são submetidos a uma rotina de armazenamento dos dados do processo. A cada hora, mais de 100 dados referentes à planta de coqueificação são armazenados em uma planilha eletrônica. Para que o balanço térmico atuasse de forma eficaz, foi necessário refinar e coletar corretamente os dados relevantes ao modelo. Vale salientar que por se tratar de um processo industrial, há dados que fogem do cenário real e são classificados como inconsistentes. Foi usado para o tratamento das informações o conceito de *outliers* onde os dados que extrapolam um certo limite (inferior ou superior) são excluídos das análises a fim de preservar o resultado com amostras representativas. Para o cálculo dos limites superior e inferior do processo, bastou aplicar a equação 6:

$$LS \text{ ou } LI = \bar{X} \pm (2 * DesvPad) \quad (6)$$

Onde:

LS: Limite Superior. Acima desse valor, encontram-se os *outliers* superiores;

LI: Limite Inferior. Abaixo desse valor, encontram-se os *outliers* inferiores;

\bar{X} : Média das amostras analisadas;

DesvPad: Desvio Padrão das amostras analisadas.

A seguir são listados os tipos de informações colhidas para a estruturação do trabalho e também a devida justificativa da escolha de cada uma delas

4.2.1 DADOS DA SALA DE CONTROLE DA COP (COKE OVEN PLANT)

- **PCI do COG:** Valor referente ao PCI do gás COG após passar pela GTP em kcal/Nm³. Esse dado é de extrema importância para o balanço, pois informa quanto de calor será injetado na bateria ao queimar um normal metro cúbico de COG nas câmaras de combustão. O valor do PCI foi obtido pelo somatório da contribuição do poder calorífico de cada constituinte do gás de combustão.
- **Temperatura dos Tubos de Ascensão:** Valor referente à temperatura dos gases coletados provenientes da coqueificação do carvão em °C. Esse dado informa a que temperatura os gases estão deixando o processo, acarretando numa perda de calor no volume de controle.
- **Vazão do Gás Bruto:** Valor referente à quantidade de gás bruto que deixa a bateria em Nm³/h. Esse dado informa o quanto de matéria volátil está deixando a bateria e é destinada ao tratamento na GTP. Essa é uma informação essencial para compor o balanço de massa do processo e consequentemente o balanço de calor.
- **Vazão de COG:** Valor referente à quantidade de COG que é injetado nas câmaras de combustão em Nm³/h. Esse dado é de extrema importância para o trabalho, pois, como será visto mais a frente, a queima do COG é responsável pela maior parcela do calor injetado na bateria, mais de 90%.
- **Temperatura de COG:** Valor referente à temperatura do COG que é injetado na bateria em °C. Além de fornecer calor por meio da combustão, o COG também

contribui com o calor sensível desse gás. Apesar de ser uma parcela mínima no processo, é algo a ser considerado.

- **Temperatura do Canal de Fumaça:** Valor referente à temperatura dos produtos de combustão que deixam o volume de controle em °C. A fumaça gerada pelo processo é responsável por retirar grande parte do calor da bateria.
- **Oxigênio do Canal de Fumaça:** Valor referente à quantidade coletada por sonda de amostragem do oxigênio presente nos produtos de combustão do COG com o ar atmosférico em %vol. Esse dado informa, como será detalhado mais a frente, o quanto de ar atmosférico em excesso há na fumaça. Devido a impossibilidade de injetar na bateria somente a quantidade estequiométrica de ar para a combustão nas câmaras, por meio de equacionamento reverso, calcula-se o ar injetado em excesso partindo da quantidade de oxigênio presente na fumaça (demonstração nas equações 13, 14 e 15).
- **Fator de Reversão:** Valor referente ao fator de reversão dos cilindros de movimentação das tubulações de COG. Esse fator de reversão é um número compreendido entre 0 e 1 que informa por quanto tempo o COG foi queimado dentro de um ciclo de reversão do cilindro, ou seja, em 20 minutos. Esse fator é calculado pela equação 7:

$$F_r = 1 - \frac{(\sum t_c + \sum t_{po})}{3600} \quad (7)$$

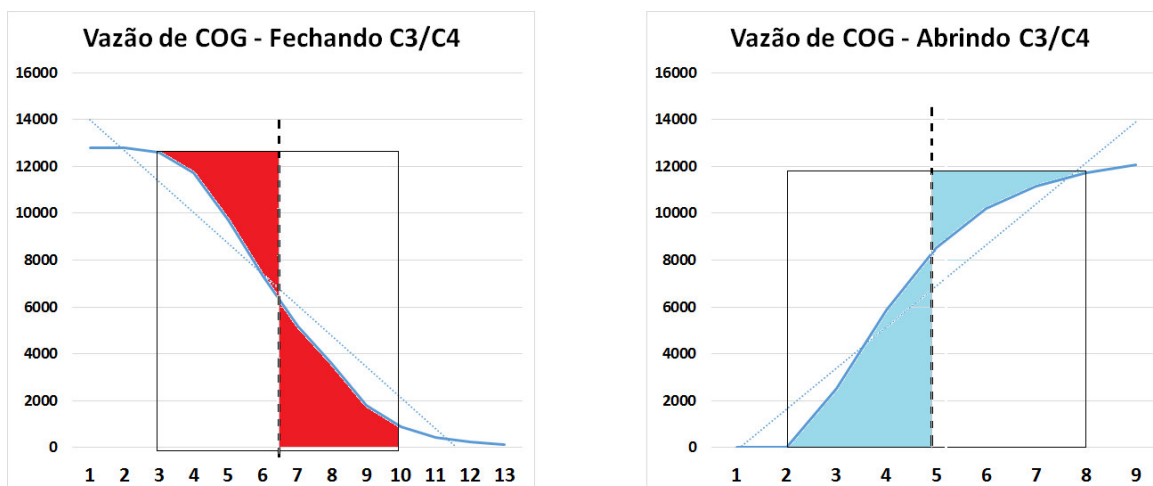
Onde:

F_r : Fator de reversão;

$\sum t_c$: Somatório do tempo decorrido pela abertura dos cilindros de gás em segundos;

$\sum t_{po}$: Somatório do tempo decorrido pelas paradas da operação e tempo de purga da tubulação em segundos.

FIGURA 9: Gráficos da vazão de gás.



FONTE: L. C. COSTA, 2008.

Devido o deslocamento dos cilindros não ser imediato, deve-se considerar além das pausas operacionais, a movimentação dos cilindros. Esse fato faz com que a queima real de COG nas câmaras de combustão seja menor que o valor instantâneo mostrado no sistema da sala de controle.

- **Fluxo Térmico:** Valor referente à quantidade de calor injetado no forno pela queima de COG nas câmaras de combustão em Mcal/h. Esse dado informa de uma forma bruta a quantidade de energia térmica fornecida pela queima de uma certa quantidade de COG com um devido PCI. Traduzindo esse conceito em equação, a fórmula 8 é expressa por:

$$FT = \frac{(V_{COG} * PCI_{COG} * F_R)}{1000} \quad (8)$$

Onde:

FT: Fluxo térmico em Mcal/h;

V_{COG} : Vazão de COG em Nm^3/h ;

PCI_{COG} : Poder calorífico inferior do COG em $kcal/Nm^3$;

F_R : Fator de reversão entre 0 e 1.

- **Total de Carvão Seco Enfornado:** Valor referente à quantidade de carvão seco enfornado em toda a bateria em toneladas. Esse é o principal insumo do

processo, sendo necessário o conhecimento real da sua grandeza a fim de que o balanço de massa seja bem estruturado e o calor injetado seja suficiente para transformar toda massa de carvão em coque.

- **Umidade do Carvão Enfornado:** Valor referente à quantidade de umidade presente no carvão enfornado em %wt. Essa informação influencia o processo como um todo, pois com um alto nível de umidade, há travamento das bocas de carregamento, há menos carvão seco enfornado e mais COG será necessário para volatilizar a água presente na mistura.
- **Total de Coque Desenfornado:** Valor referente à quantidade de coque desenfornado na bateria em toneladas. Estima-se que para calcular o rendimento de coque a partir de uma tonelada de carvão, aplica-se a equação 9 desenvolvida no processo:

$$\eta = 97,5 - \frac{5}{6} * \%MV \quad (9)$$

Onde:

η : Rendimento do coque em relação a uma tonelada de carvão;

%MV: Porcentagem de matéria volátil presente na mistura de carvões.

Esse rendimento flutua em torno dos 70%-75%, ou seja, ao enforar 1000 kg de carvão, há uma produção de 700-750kg de coque e o resto deixa o processo na forma de gás e óleos característicos do *blend*, como alcatrão.

Esse valor também pode ser calculado pelo balanço de cinzas presente no carvão e no coque, tendo em vista que as cinzas são elementos que permanecem no coque mesmo após o carvão sofrer a coqueificação. Esse não é um cálculo usual na usina, mas para comprovar a equação anterior, o balanço de cinzas foi realizado, comprovando a validação do primeiro. Abaixo, a equação 10 informa a formulação para realizar o balanço estequiométrico de cinzas:

$$\%Cinzas_{carvão} * M_{carvão} = \%Cinzas_{coque} * M_{coque} \quad (10)$$

Onde:

$\%Cinzas_{carvão}$: Porcentagem de cinzas presente no carvão;

$M_{carvão}$: Massa de carvão enfiado;

$\%Cinzas_{coque}$: Porcentagem de cinzas presente no coque;

M_{coque} : Massa de coque desfiado.

- **Índice Operacional:** Valor referente ao *Working Rate* da bateria em %. Esse dado informa basicamente quanto será o tempo de permanência da carga em cada forno, ou seja, aproximando o índice operacional a 100%, significa dizer que o ciclo de coqueificação acontece em 24h. Nesse trabalho foi possível acompanhar o processo com o índice variando de 75% até 87,5%

Além do uso desses dados até então citados, foram coletadas outras informações de fontes externas à operação da coqueria para que o balanço térmico fosse formulado.

4.2.2 DADOS DA SALA DE CONTROLE DA GTP

Devido à proximidade do processo realizado na GTP com o processo de coqueificação na coqueria, foi necessário acessar a sala de controle da GTP para coletar alguns dados. Abaixo seguem os tipos de informações cedidas pela GTP:

- **Quantidade de Alcatrão Gerada:** Valor referente à quantidade de alcatrão (subproduto do processo de coqueificação) produzido a partir de uma tonelada de carvão em quilogramas. Essa informação contribui tanto para o balanço de massa quanto para o balanço térmico, pois de certa forma o alcatrão produzido irá retirar calor durante o processo.
- **Quantidade de Gás Bruto Gerado:** Valor referente à quantidade de gás bruto gerado a partir de uma tonelada de carvão em Nm^3 /tonelada de carvão seco enfiado (tcse). Essa informação foi coletada com o intuito de comparar a informação fornecida pela sala de controle da COP. O corpo técnico da GTP parte das equações com base na matéria volátil da mistura de carvão, diferente da COP que obtém os valores com base nos resultados fornecidos pela placa de orifício.

A equação 11 é usada na GTP para estimar a vazão de gás bruto em função da matéria volátil a partir de uma tonelada de carvão:

$$Gás = 14,67 * \%MV * 100 \quad (11)$$

Onde:

Gás: Quantidade de gás bruto produzido a partir de uma tonelada de carvão em $Nm^3/tcse$;

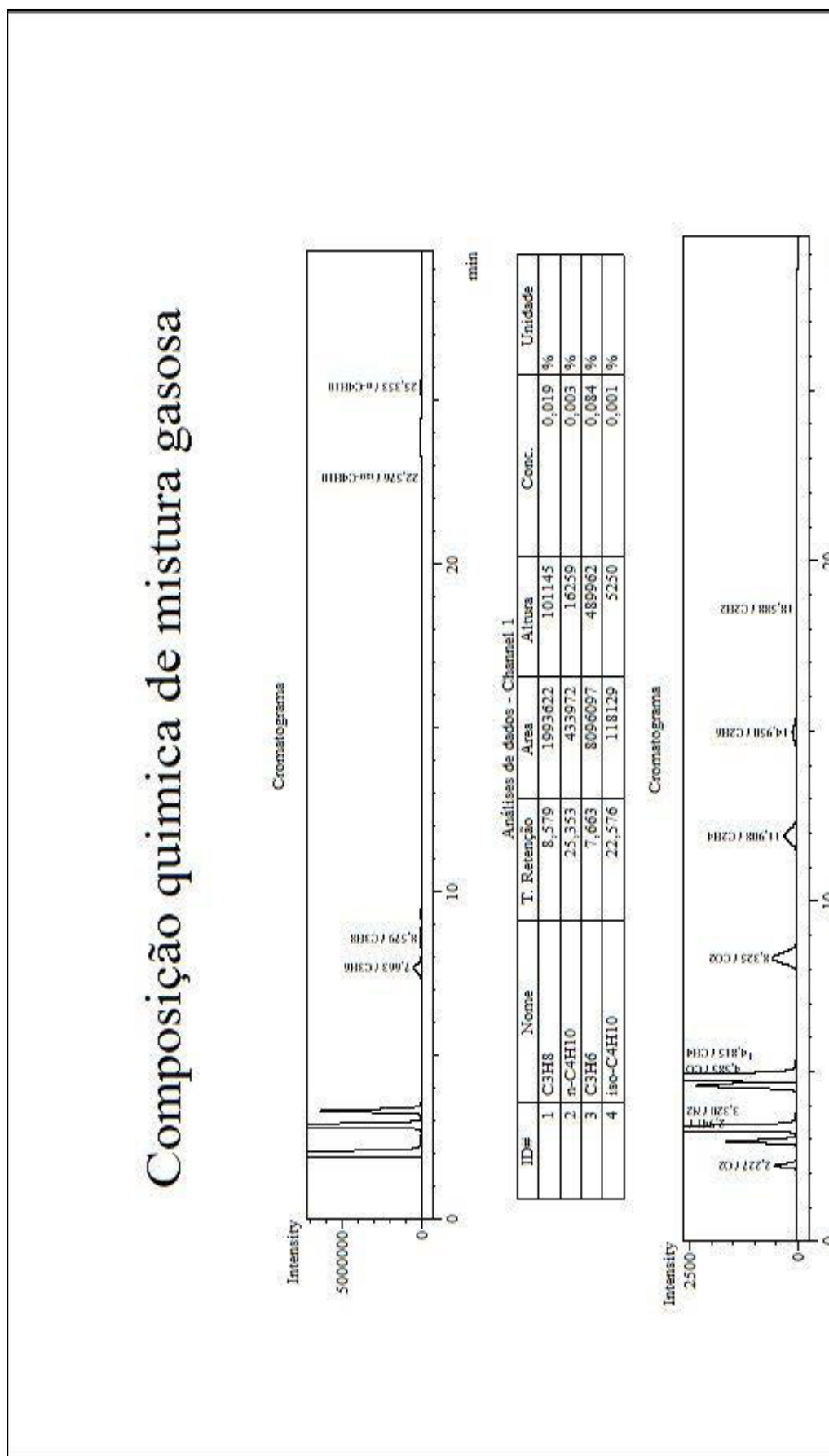
%MV: Quantidade de matéria volátil presente na mistura de carvão em %wt.

4.2.3 DADOS DO LABORATÓRIO AMBIENTAL

Tratando da parte de análise do gás, foram coletados dados dos ensaios de cromatografia gasosa realizados no laboratório ambiental. Foi investido um período exclusivo para acompanhar a análise realizada no laboratório e como o resultado final da composição do gás é obtido. O entendimento e acompanhamento do processo de análise contribui mais para a validação do trabalho do que apenas coletar os dados em si. A seguir são expressos em tópicos as informações cedidas pelo laboratório ambiental.

- **Composição do COG:** Valor referente à composição de cada componente químico presente no gás COG após passar pelo tratamento na GTP expresso em %vol. Essa informação é necessária para estruturar o balanço de massa em relação à produção de fumaça a partir da queima do COG com o ar.
- **Composição do COG Bruto:** Valor referente à composição de cada componente químico presente no gás COG bruto assim que ele é produzido pela coqueria no processo de coqueificação expresso em %vol. Essa informação faz parte do modelo a fim de calcular o calor sensível que cada componente do COG bruto contribui no balanço térmico na forma de retirada de calor por meio da produção de COG bruto.

FIGURA 10: Relatório da cromatografia gasosa.



FONTE: Própria do Autor, 2018.

4.2.4 DADOS COLETADOS EM ACERVOS EXTERNOS

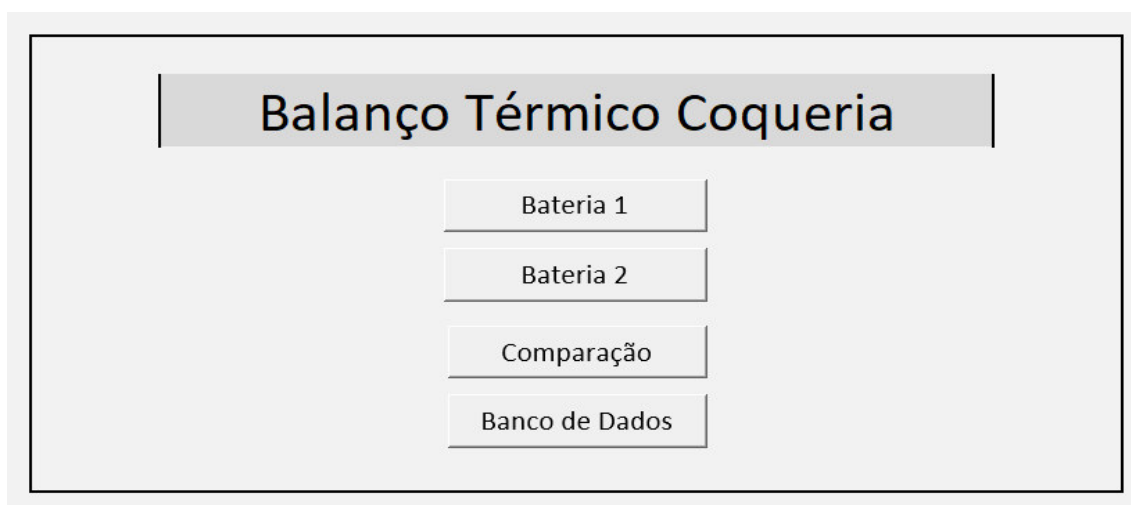
Alguns dados não foram fornecidos pela área operacional ou pelo processo em si, então foi necessário coletá-los em acervos externos, como referências bibliográficas ou acervos digitais. Logo abaixo são expressos em tópicos os dados coletados em acervos externos:

- **Massa Molar:** Valor referente à massa molar dos componentes químicos dos gases presentes no processo em kg/mol. Esses dados serão utilizados para o cálculo do calor sensível dos gases (Knovel Corporation, 2018).
- **Calor Específico:** Valor referente ao calor específico dos componentes químicos dos gases em kcal/kg.K. Esses dados serão utilizados para o cálculo do calor sensível dos gases, assim como o item anterior (Knovel Corporation, 2018).

4.3 ESTRUTURAÇÃO DO MODELO

Todo o balanço térmico foi estruturado em planilhas eletrônicas. Basicamente, o balanço é dividido em 3 planilhas nomeadas por “Balanço Térmico”, “Balanço dos Gases” e “Calor Sensível dos Gases”. Outras planilhas de apoio também foram desenvolvidas, como as planilhas de “Comparação” e “Banco de Dados”. Essas duas últimas serão descritas mais adiante em um tópico exclusivo. A seguir, serão abordados tópicos cujo objetivo seja descrever o conteúdo dessas planilhas.

FIGURA 11: Tela de início do Modelo.



FONTE: Própria do autor, 2018.

4.3.1 BALANÇO DE GASES

Nessa planilha, ficaram todos os equacionamentos referentes ao balanço de massa dos gases na linha de produção COG/Fumaça. Foram feitas duas tabelas principais para facilitar a realização e visualização dos cálculos:

O quadro 3 mostra exatamente como foram montados os parâmetros dos gases. Considerou-se que todo o COG ao entrar em combustão com o ar atmosférico produzirá produtos (fumaça), respeitando a Lei de Lavouisier de conservação da massa. Deste modo, como exemplifica a equação 12, nessa planilha, é feita a chamada no banco de dados da vazão de COG (Nm^3/h) e do índice operacional (h), para que então seja calculada a quantidade total de COG em Nm^3 durante todo o processo de coqueificação.

$$Qntde\ de\ COG = Vazão_{COG} * WR \quad (12)$$

Onde:

Qntde de COG: Quantidade total de COG injetado na bateria durante o processo de coqueificação em Nm^3 .

Vazão_{COG}: Vazão de COG injetado na bateria em Nm^3/h .

WR: Índice operacional em horas.

QUADRO 3: Parâmetros dos gases.

COG	
PCI (kcal/Nm ³)	4.111,64
Produtos da Combustão (Nm ³ /ciclo):	602.300,816
Fumaça Estequiométrica (Nm ³ /ciclo):	1.856.787,407
Quantidade de Oxigênio na Fumaça (%)	5,96%
Fumaça Total (Nm ³ /ciclo):	2.591.788,71
Ar em Excesso (Nm ³ /ciclo)	735.001,31
Ar Total (Nm ³ /ciclo):	2.322.959,016
Quantidade de Gás Injetado (Nm ³ /ciclo)	397.060,33
Quantidade de Ar Estequiométrico (Nm ³ /ciclo)	1.587.957,710
Quantidade de Oxigênio Estequiométrico (Nm ³ /ciclo)	333.471,119
Quantidade de Nitrogênio Estequiométrico (Nm ³ /ciclo)	1.254.486,591

FONTE: Própria do autor, 2018.

QUADRO 4: Balanço de Massa dos gases.

Balanço de Massa do Gás de Combustão						
	Quantidade do Componente no Gás (%)	Componente (Nm ³ /h)	O ₂ (Nm ³ /h)	CO ₂ (Nm ³ /h)	H ₂ O (Nm ³ /h)	N ₂ (Nm ³ /h)
H ₂	55,02%	218.462,59	109.231,30	-	218.462,59	-
CO	6,53%	25.928,04	12.964,02	25.928,04	-	-
CH ₄	24,22%	96.168,01	192.336,02	96.168,01	192.336,02	-
N ₂	8,96%	35.576,61	-	-	-	35.576,61
CO ₂	2,16%	8.576,50	-	8.576,50	-	-
C ₂ H ₄	1,59%	6.313,26	18.939,78	12.626,52	12.626,52	-
Total	98,5%	391.025,01	333.471,12	143.299,07	423.425,14	35.576,61

FONTE: Própria do autor, 2018.

Após calcular a quantidade de COG injetado na bateria, é necessário calcular a quantidade de ar atmosférico necessário para que haja a combustão completa do gás. Para isso, é chamado do banco de dados a composição do COG fornecida diariamente pelo laboratório ambiental. Por ser composto por mais de 18 componentes diferentes, usou-se apenas os principais (98,5% da composição total) para o balanço estequiométrico. Como resultado da análise estequiométrica, tem-se a quantidade de O₂ (Nm³/h) para que cada composto entre em combustão e a quantidade de CO₂ (Nm³/h) e H₂O (Nm³/h) como produtos da combustão da reação de cada composto com

o gás oxigênio. As espécies químicas N_2 e CO_2 não entram em combustão com o gás oxigênio, então foi considerado que toda a quantidade de ambos estará presente nos produtos da combustão finais.

Após ter todos os resultados dos cálculos estequiométricos, foi calculada por balanço de massa com base nos mols a quantidade exata (estequiométrica) de ar atmosférico para queimar todo o gás injetado. Semelhantemente, foi calculada a quantidade da fumaça exata (estequiométrica) formada pela combustão.

A partir disso, a porcentagem de oxigênio na fumaça final fornecida por um equipamento de amostragem, presente no canal de fumaça, indica que houve ar em excesso no sistema. Por meio de equacionamento reverso expresso na fórmula 13, é possível calcular a quantidade de ar em excesso:

$$Ar_T = Ar_{EX} + Ar_E \quad (13)$$

Tudo o que não for proveniente da combustão, ou seja, não for fumaça estequiométrica, é considerado como ar em excesso que não reagiu com o gás. Desta forma, pela equação 14:

$$Ar_{Ex} = F_T - F_E \quad (14)$$

Definiu-se que o ar atmosférico é composto por 21% de gás oxigênio e 79% de gás nitrogênio, então:

$$Ar_{Ex} = \frac{F_T * \%Ox}{21\%}$$

$$F_T = F_E + \frac{F_T * \%Ox}{21\%}$$

$$F_E = F_T \left(1 - \frac{\%Ox}{21\%} \right)$$

$$F_T = \frac{F_E}{\left(1 - \frac{\%Ox}{21\%}\right)} \quad (15)$$

Onde:

Ar_T : Ar atmosférico Total em Nm^3/h .

Ar_E : Ar atmosférico estequiométrico em Nm^3/h .

Ar_{EX} : Ar atmosférico em excesso em Nm^3/h .

F_T : Fumaça total em Nm^3/h .

F_E : Fumaça Estequiométrica em Nm^3/h .

$\%Ox$: Porcentual de gás oxigênio presente na chaminé em $\%vol$.

Por fim, ao realizar os equacionamentos descritos anteriormente, essa planilha informa, calculando o resultado do produto das vazões pelo índice operacional a quantidade de fumaça total produzida em um ciclo de coqueificação e a quantidade de ar atmosférico total que é injetado no sistema no período de um ciclo de coqueificação, tanto o estequiométrico (aquele que irá reagir com o COG) quanto a quantidade em excesso e que estará presente na fumaça. Ressalta-se que por se tratar de uma reação de combustão completa, a fumaça será composta por CO_2 e H_2O com a presença de O_2 e N_2 (esse último tido como inerte no processo) provenientes das quantidades em excesso no sistema.

4.3.2 BALANÇO DE CARVÃO/COQUE

O balanço de produtividade de Carvão/Coque foi calculado na planilha principal do balanço térmico. Foram então usadas as considerações e premissas já então utilizadas no processo da usina para os cálculos de produtividade.

QUADRO 5: Balanço Carvão/Coque.

Balanço Carvão/Coque	
Quantidade de Carvão Seco Enfornado (kg/ciclo)	2.527.325,13
Matéria Volátil da Mistura de Carvão (%)	26,66%
Rendimento Coque/Carvão (%)	75,28%
Quantidade de Coque Desenfornado (kg/ciclo)	1.902.691,44

FONTE: Própria do autor, 2018.

Nessa tabela, o modelo faz uma chamada do banco de dados à quantidade de carvão enfornado no estado seco, ou seja, ausente de qualquer umidade. A partir disso é calculada a quantidade de Matéria volátil na mistura de carvão, a quantidade de coque produzida e, como informação adicional, o modelo informa quanto foi o rendimento do processo. A equação 16 demonstra o cálculo desse rendimento:

$$\eta = \frac{Coque}{Carvão} * 100 \quad (16)$$

Onde:

Coque: Massa de coque produzida ao fim do processo em kg;

Carvão: Massa de carvão enfornada no início do processo em kg;

η : Rendimento do processo em %.

O Cálculo da matéria volátil é realizado pela equação 11 citada anteriormente. Com isso, essa tabela informa ao sistema valores que irão compor o balanço de massa do processo carvão/coque e conseqüentemente o balanço térmico.

4.3.3 BALANÇO BY PRODUCTS

Por se tratar de uma bateria by-products, o gás gerado é aproveitado pela GTP a fim de vender os subprodutos extraídos do COG bruto. Com isso, o modelo analisa

alguns fatores que alteram a produção de gás e conseqüentemente, o fluxo de calor devido à volatilização da matéria orgânica no processo.

QUADRO 6: Balanço de By Products

Balanço By Products	
Temperatura do Tudo de Ascensão (°C)	693,03
Quantidade de Gás Bruto Gerado (Nm³/ciclo)	948.177,23
Quantidade de Alcatrão Gerado (kg/ciclo)	88.456,38
Quantidade de Água Gerada (kg/ciclo)	198.042,57
Umidade da Mistura de Carvão (%)	7,27%

FONTE: Própria do autor, 2018.

Essa tabela está localizada na planilha principal do balanço térmico, nela são informados os valores da temperatura que o gás deixa o forno (Temperatura do Tubo de Ascensão), quantidade de gás bruto gerado por ciclo de coqueificação, quantidade de Alcatrão (subproduto do carvão de consistência viscosa), quantidade de água gerada e a umidade presente na mistura de carvão.

O modelo então faz uma chamada do banco de dados os valores da temperatura do tubo de ascensão, esse valor é importante para calcular o calor presente no gás ao sair do forno. Em relação à quantidade de gás bruto, foi convencionado que esse valor seria a metade da quantidade de gás bruto total produzida por hora pelas duas baterias. A justificativa é porque o banco de dados apenas armazena valores da vazão de gás bruto produzido pelas duas baterias. Esse valor é captado pela placa de orifício que fica na interface Coqueria/GTP. Deste modo, o valor informado pelo balanço de massa é a metade do valor medido pela placa de orifício, referente à uma única bateria.

A quantidade de Alcatrão gerado foi definida por convenção pela média dos valores de produção fornecidos pela GTP. No caso, são gerados em média 35 kg de Alcatrão por tonelada de carvão seco enforado.

A quantidade de água, também chamada de licor amoniacal, gerada pelo processo é um fator essencial para o balanço térmico, pois estima-se que a umidade presente na mistura de carvão seja um dos fatores que mais contribua para o consumo de calor durante a coqueificação do carvão. Para calcular a quantidade de licor amoniacal gerado, foi aplicado a equação 17:

$$Qtde\ de\ \acute{A}gua\ Gerada = \frac{TCSE}{(1-\%Umidade)} * \%Umidade \quad (17)$$

Onde:

Qtde de Água Gerada: Quantidade de água volatilizada no processo em kg/ciclo;

TCSE: Quantidade de carvão seco enornado em kg/ciclo;

%Umidade: % da umidade presente no carvão em wt%.

Por fim, a umidade da mistura é coletada do banco de dados para a devida aplicação no balanço.

4.3.4 CÁLCULO DO CALOR DE ENTRADA E CALOR DE SAÍDA

O balanço térmico é feito, basicamente, por meio do fluxo térmico do sistema.

Esse tópico será descrito por partes, detalhando o cálculo do calor de cada componente do balanço.

QUADRO 7: Balanço de Calor.

Heat Inputs		%
Calor Sensível do Carvão (kcal/ciclo)	20.732.027,29	1,3%
Calor Sensível do Gás Queimado (kcal/ciclo)	4.360.608,69	0,3%
Calor da Queima do Gás de combustão (kcal/ciclo)	1.597.393.508	97,3%
Calor Sensível do Ar (kcal/ciclo)	19.917.978,16	1,2%
Quantidade de Calor Total Injetado na Bateria 1 (Gcal/ciclo)	1,64E+03	100,0%
Heat Outputs		%
Calor Sensível do Coque (kcal/ciclo)	707.420.010,85	44,0%
Calor sensível do Gás Bruto (kcal/ciclo)	254.443.213,98	15,8%
Calor Sensível da Fumaça (kcal/ciclo)	198.469.152,75	12,3%
Calor Total Alcatrão (kcal/ciclo)	22.556.847,57	1,4%
Calor Total Água (kcal/ciclo)	233.475.070,24	14,5%
Calor Total BTX (kcal/ciclo)	3207275,033	0,2%
Surface Heat Losses (kcal/ciclo)	188.876.474,03	11,7%
Quantidade de Calor Total que Deixa a Bateria 1 (Gcal/ciclo)	1,61E+03	100,0%

FONTE: Própria do autor, 2018.

4.3.4.1 CALOR INJETADO

Como descrito anteriormente, na revisão bibliográfica, o calor injetado no volume de controle é feito por meio de:

- Calor sensível do carvão enforado;

- Calor sensível do gás queimado;
- Calor da queima do gás de combustão;
- Calor sensível do ar.

Para o cálculo do calor sensível do carvão enfiado é aplicada a equação 18:

$$Q_{carvão} = m * c_{carvão} * \Delta T \quad (18)$$

Onde:

$Q_{carvão}$: Calor sensível do carvão em kcal;

m : Massa de carvão seco enfiado em kg;

$c_{carvão}$: Calor específico do carvão em kcal/K*kg;

ΔT : Variação da temperatura partindo de 0°C até temperatura ambiente.

O cálculo do calor sensível do gás COG injetado é feito pelo somatório da contribuição do calor sensível de cada componente do gás. Considerou-se que os gases ocupam um volume de 22,4L (0,0224 m³). Ou seja, os gases estão submetidos à condição de CNTP:

$$Q_{COG} = \sum Q_{comp}$$

$$Q_{comp} = \frac{Q_{nCOG} * vol\% * MM}{(0,0224 \text{ m}^3)} * c_{comp} * \Delta T$$

(19)

Onde:

Q_{COG} : Calor sensível do COG injetado em kcal;

Q_{comp} : Calor sensível de cada componente em kcal;

Q_{COG} : Quantidade de COG em Nm^3 ;

vol%: Porcentagem do componente no gás em vol%;

MM: Massa molar do componente em kg/mol;

c_{comp} : Calor específico do componente;

ΔT : Variação da temperatura partindo de 0°C à temperatura de processo.

QUADRO 8: Calor Sensível do Gás de Combustão.

Calor Sensível do Gás de Combustão						
	Quantidade do Componente no Gás (%)	Componente (Nm^3/h)	Massa Molar (kg)	Massa (kg)	Calor Específico (kcal/kg.K)	Calor Sensível (kcal)
H2	55,02%	218.462,59	0,002	19.505,59	3,50	1.985.912,76
CO	6,53%	25.928,04	0,028	32.410,05	0,25	235.696,30
CH4	24,22%	96.168,01	0,016	68.691,44	0,55	1.099.001,66
N2	8,96%	35.576,61	0,028	44.470,76	0,25	323.405,64
CO2	2,16%	8.576,50	0,044	16.846,70	0,30	147.017,56
C2H4	1,59%	6.313,26	0,028	7.891,57	1,12	257.107,48
NH3	0,00%	-	0,017	-	0,50	-
O2	0,00%	-	0,032	-	0,20	-
Total	98,5%	391.025,01		189.816,11		4.048.141,41

FONTE: Própria do autor, 2018.

O calor fornecido pela combustão do COG é calculado pela equação 20:

$$Q_{\text{comb}} = Q_{\text{COG}} * PCI_{\text{COG}} * F_R \quad (20)$$

Onde:

Q_{comb} : Calor de combustão em kcal;

Q_{COG} : Quantidade de Gás COG em Nm^3 ;

PCI_{COG} : Poder calorífico do COG em kcal/ Nm^3 ;

F_R : Fator de Reversão.

Por fim, para calcular o calor sensível do ar atmosférico, foi aplicada a equação 21:

$$Q_{Ar} = c_{ar} * \rho * Z_{Ar} * \Delta T \quad (21)$$

Onde:

Q_{Ar} : Calor sensível do ar em kcal;

c_{ar} : Calor específico do ar em kcal/K.kg;

ρ : Densidade do ar em kg/Nm³

Z_{Ar} : Vazão de ar atmosférico injetado em Nm³/h;

ΔT : Variação da temperatura partindo de 0°C à temperatura ambiente.

A análise do calor injetado na bateria termina com o somatório de cada calor contribuinte.

4.3.4.2 CALOR EJETADO

O calor cedido pelo volume de controle é calculado de semelhante forma que o calor injetado, ou seja, pelo somatório de cada calor contribuinte. Como dito anteriormente, o calor é ejetado da bateria por meio de:

- Calor sensível do coque;
- Calor sensível do gás bruto;
- Calor sensível da fumaça;
- Calor total do Alcatrão;
- Calor total da água;
- Calor perdido pelas superfícies (SHL).

Cada item será detalhado ao decorrer desse tópico.

O calor sensível do coque é calculado pela fórmula 22:

$$Q_{coque} = m * c_{coque} * \Delta T \quad (22)$$

Onde:

Q_{coque} : Calor sensível do coque em kcal;

m : Massa de coque desenformado em kg;

$c_{carvão}$: Calor específico do coque em kcal/K*kg;

ΔT : Variação da temperatura partindo de 0°C até a temperatura de processo. Nesse caso, a temperatura de processo foi estabelecida como a média da temperatura medida em alguns fornos com o coque recém desenformado. Por não ser registrado no banco de dados essa informação, foi necessário medir com um pirômetro por medição de emissividade a temperatura do coque assim que despejado no vagão para extinção.

Para o cálculo do calor sensível do gás bruto, foi aplicada a seguinte fórmula semelhante à equação 19 do calor sensível do COG:

$$Q_{COG\ Bruto} = \sum Q_{comp}$$

$$Q_{comp} = \frac{Q_{nCOG\ Bruto} * vol\% * MM}{(0,0224\ m^3)} * c_{comp} * \Delta T$$

(23)

Onde:

$Q_{COG\ Bruto}$: Calor sensível do COG injetado em kcal;

Q_{comp} : Calor sensível de cada componente do gás bruto em kcal;

$Q_{nCOG\ Bruto}$: Quantidade de COG Bruto em Nm³;

vol%: Porcentagem do componente no gás em vol%;

MM: Massa molar do componente em kg/mol;

c_{comp} : Calor específico do componente;

ΔT : Variação da temperatura partindo de 0°C à temperatura de processo.

O calor sensível da fumaça é um fator essencial para o cálculo do calor ejetado, pois estima-se que a fumaça é um dos fatores que mais retira calor do volume de controle. Para o cálculo do calor sensível da fumaça, foi aplicada a fórmula 24:

$$Q_{Fumaça} = \sum Q_{comp}$$

$$Q_{Comp} = \frac{Q_{nFumaça} * vol\% * MM}{(0,0224 \text{ m}^3)} * c_{comp} * \Delta T$$

(24)

Onde:

$Q_{Fumaça}$: Calor sensível da fumaça injetada em kcal;

Q_{comp} : Calor sensível de cada componente da fumaça em kcal;

$Q_{nFumaça}$: Quantidade de Fumaça em Nm³;

vol%: Porcentagem do componente na fumaça em vol%;

MM: Massa molar do componente em kg/mol;

c_{comp} : Calor específico do componente;

ΔT : Variação da temperatura partindo de 0°C à temperatura de processo.

QUADRO 9: Calor sensível da fumaça.

Calor Sensível da Fumaça					
	Quantidade do Componente no Gás (%)	Massa do componente (kg)	Calor Específico do Componente (kcal/kg °C)	Temperatura	Calor Sensível (kcal)
O2	6,93%	220.500,392	0,200	229	10.120.022,980
H2O	10,70%	340.252,342	0,500	229	39.040.310,714
CO2	8,85%	281.480,323	0,250	229	16.148.425,596
N2	73,52%	2.338.392,785	0,250	229	134.152.758,932
Total	100%	3.180.625,842			199.461.518,223

FONTE: Própria do autor, 2018.

O calor total do alcatrão foi calculado de acordo com a equação 25:

$$Q_{\text{alcatrão}} = \frac{(335+1,05*\Delta T)}{4,186} * m \quad (25)$$

Onde:

$Q_{\text{alcatrão}}$: Calor total do alcatrão em kcal;

ΔT : Variação da temperatura partindo de 0°C à temperatura de processo;

m : Massa de alcatrão produzido em kg.

O calor total da água, ressaltando a importância desse fator na contribuição final, foi calculado aplicando a equação 26:

$$Q_{\text{água}} = \frac{(2500+2*\Delta T)}{4,186} * m \quad (26)$$

Onde:

$Q_{\text{água}}$: Calor total da água que deixa o processo em kcal;

ΔT : Variação da temperatura partindo de 0°C à temperatura de processo;

m: massa de água gerada em kg;

Por fim, o calor perdido pelas superfícies da bateria foi considerado que um valor razoável (partindo do pressuposto que a planta de coqueificação é uma planta nova, recém construída) seria entre 11%-12% do calor que sai da bateria.

Após realizar o cálculo de cada contribuinte, o modelo finaliza a análise do calor ejetado somando cada calor que deixa o volume de controle nas mais diversas formas.

Ao realizar todos os cálculos, o balanço térmico irá emitir ao operador de controle térmico, basicamente, duas informações principais para que então possa ser tomada alguma ação de correção. A primeira informação é o próprio balanço térmico que indica em escala porcentual (%) o quanto o processo está balanceado. Caso o resultado seja negativo, significa que há mais calor saindo da bateria do que entrando, então há calor em falta. Entretanto, se o resultado for positivo, significa dizer que há mais calor entrando no processo do que saindo. Sendo assim, o operador irá analisar a tendência da curva do balanço com o decorrer do tempo e fará ação de aumento do consumo de COG ou diminuição do mesmo para que o balanço seja estabilizado. A segunda informação dada é a eficiência do processo. Essa informação traduz o quanto de calor está sendo injetado no processo por meio da combustão do COG e o quanto está sendo perdido por meio da fumaça e *SHL*.

QUADRO 10: Balanço Térmico.

Balanço Térmico	
Balanço Térmico (%)	-0,206%
Eficiência Térmica	75,43%

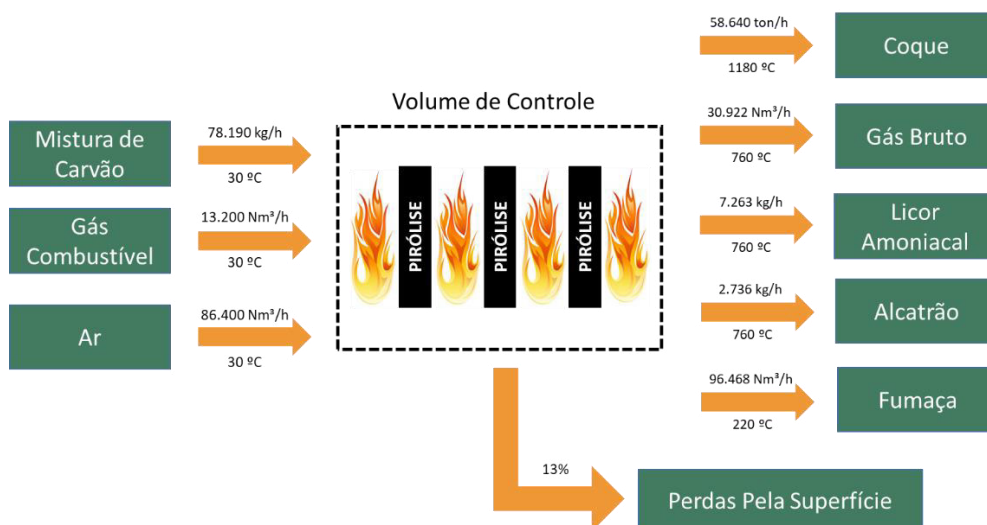
FONTE: Própria do autor, 2018.

4.3.4.3 PREMISSAS

Além das já citadas, algumas premissas foram levantadas para que os resultados fornecidos pelo balanço fossem coerentes:

- A calor da reação de coqueificação do carvão foi considerada como nula no seu somatório final;
- Todo COG é queimado, por isso não há calor retido pela queima não realizada de algum componente da fumaça. Ou seja, todos componentes da fumaça são considerados como produtos da combustão;
- Não foram considerados os valores de poder calorífico do carvão e do coque, pois esses valores não contribuem para o balanço térmico tendo em vista que essa energia permanece retida durante todo o processo de coqueificação e não interage com os outros elementos do balanço.
- Semelhante ao item anterior, não foi considerado o poder calorífico do gás bruto, pois ele sequer é queimado durante a sua produção. Não há troca de energia com os elementos do balanço.
- Todos os gases foram tratados nas equações em CNTP;
- O cálculo da perda de calor pela superfície foi feito por diferença. Após igualar os cálculos do balanço com os valores teóricos de entrada e saída de calor, estipulou-se um valor otimizado para as perdas térmicas até que o balanço chegasse a zero. Com isso, encontrou-se um valor entre 11% e 12%.

FIGURA 12: Esquema do balanço térmico da Bateria.



FONTE: Própria do autor, 2018.

4.3.5 COMPARAÇÃO DE DADOS

Uma planilha extra foi desenvolvida na pasta de trabalho do estudo para facilitar o manuseio e análise da equipe técnica sobre as condições térmicas da bateria. Essa planilha foi denominada “Comparação de Dados”. O seu funcionamento baseia-se na gravação de dados comparativos em dois períodos distintos do balanço térmico. O modelo grava conforme a ordem do usuário parâmetros, como calor de entrada, calor de saída, status do modelo, etc, referentes a dois períodos distintos. Com isso, é possível analisar as condições da bateria em situações com diferença nos índices operacionais, diferença na umidade das misturas de carvão, diferença na vazão de COG, assim por diante. Além da gravação dos dados em células paralelas, gráficos de barras são plotados instantaneamente.

FIGURA 13: Comparação dos dados.



FONTE: Própria do autor, 2018.

4.4 COMPARAÇÃO COM A TEMPERATURA DA CÂMARA E O TEMPO LÍQUIDO DE COQUEIFICAÇÃO

Com o balanço térmico estruturado, foi então feita a apuração dos dados das temperaturas das câmaras de combustão e o perfil do tempo líquido ao decorrer de um determinado período. O fato de escolher a temperatura medida na região inferior das câmaras de combustão (chamada medição de temperatura longitudinal da bateria) é que, durante a coqueificação, o carvão recebe o calor do processo a fim de que as reações de grafitização e craqueamento aconteçam, formando então o coque. Ao ter a massa de carvão totalmente convertida em coque, o produto da coqueificação atinge uma estabilidade térmica e inverte seu comportamento passando então a transmitir calor e não mais absorver.

O calor que antes era destinado à destilação do mineral, agora será transmitido para a estrutura refratária do forno, aumentando a temperatura das câmaras de combustão. Deste modo, a medição da temperatura da câmara se torna um ótimo indicativo do fluxo de calor na bateria. Por causa disso, devido à intensa rotina operacional somente a cada 8 horas é feita uma medição nas câmaras 12 e 23 de todos os fornos a fim de analisar o nível da temperatura, como também o perfil longitudinal. A unidade técnica estabelece um valor para manter a temperatura do processo, ou seja, quanto maior a necessidade de consumir calor devido ao alto índice operacional, maior deve se o valor da temperatura medido nas câmaras de combustão. Vale salientar que

a estrutura refratária da bateria deve operar em uma faixa de térmica bem definida, pois caso a temperatura decresça muito, o tijolo refratário sofrerá uma mudança de fase, comprometendo toda a estrutura da bateria.

Caso a temperatura seja excessivamente elevada, o refratário começará a fundir colocando a estrutura da bateria em risco. Sabendo disso, o modelo foi projetado para buscar no banco de dados os valores dessas temperaturas medidas a cada hora e lista-los juntamente com a data da medição e o valor de quanto o balanço térmico está fora do equilíbrio para aquela condição. Foi então plotado um gráfico dinâmico com periodicidade semanal para a análise de acompanhamento da curva de tendência do balanço com a curva de tendência da temperatura.

Em relação ao tempo líquido, há um software usado para calcular e informar o momento exato em que a massa de carvão foi completamente coqueificada em teoria (na prática sempre há variações no processo que inviabilizam a coqueificação por completo da mistura). Apesar de ter essa ferramenta eletrônica para monitorar o processo, era necessário também realizar uma inspeção paralela para validar os dados do software. A partir disso, foi levantado um plano de inspeção visual a fim de verificar a coloração do gás bruto. Sabe-se que ao atingir o ponto de coqueificação, a coloração do gás torna-se mais clara (branca), pois a concentração de hidrocarbonetos (responsáveis por dar uma coloração amarelada ao gás) diminui e começa a ter a predominância de hidrogênio na mistura gasosa.

Seguindo os dados mostrados pelo software, a informação era que os fornos estavam atingindo o tempo líquido com 2,5 horas em média antes de atingir o tempo bruto. A partir disso, foi verificado no plano de enforamento e desenforamento 10 fornos que estavam há 3h de atingir o tempo bruto. Com isso, os tubos de ascensão desses fornos foram abertos e a fumaça que antes estava sendo succionada pelo coletor e transportada para a GTP passou a ser liberada na atmosfera, tornando possível a visualização da coloração da fumaça. No primeiro momento da inspeção, o gás ainda possuía a coloração amarelada característica pela presença dos hidrocarbonetos. Esperou-se um momento até que a inspeção fosse realizada novamente. Em um segundo momento, ao liberar gás para a atmosfera, foi verificado uma fase no limiar da

mudança para a coloração mais clara. Esperou-se mais um período para fazer a terceira e última inspeção.

Por fim, foi realizado o último passo da verificação visual, analisando dessa vez a total mudança de fase do COG bruto, sinalizando a coqueificação da carga. O horário das três inspeções foi anotado para então comparar com os resultados do software. Ao realizar a comparação, os resultados foram satisfatórios com pequenos desvios de ± 10 minutos aceitáveis para o processo, validando os resultados fornecidos pela ferramenta eletrônica.

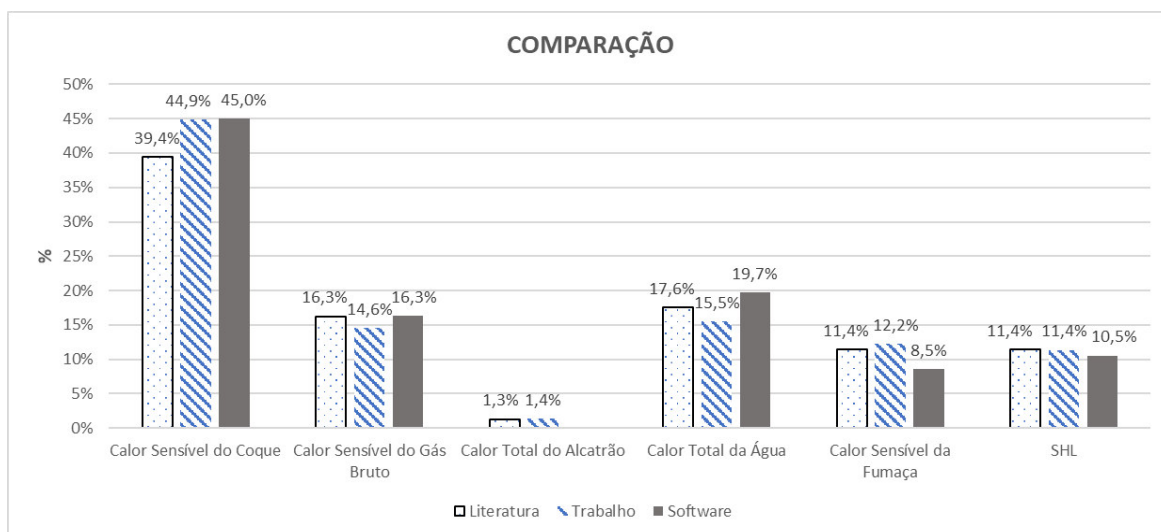
Com os dados do tempo líquido levantados, foi possível plotar um gráfico dinâmico para comparar a curva de tendência da evolução do tempo líquido, a curva de tendência do balanço térmico e a curva de tendência da média das temperaturas das câmaras de combustão. Para uma análise estatística mais refinada, os resultados considerados como *outliers* foram retirados dos cálculos a fim de se obter resultados mais coerentes.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nessa seção do trabalho, os resultados obtidos com a conclusão dos cálculos do balanço térmico serão discutidos e expressos graficamente.

5.1 COMPARAÇÃO ENTRE A LITERATURA, O SOFTWARE E O TRABALHO.

A fim de validar a ferramenta desenvolvida, foi feita uma comparação (figura 14) entre os resultados da literatura, os resultados de um software de balanço térmico estrangeiro usado no ambiente industrial e os resultados do presente trabalho. Os resultados englobam os fatores de saída de calor em porcentagem, como calor sensível do coque, calor sensível do gás bruto, calor sensível do Alcatrão, calor total da água, calor sensível da fumaça e perdas térmicas para a vizinhança. Pode-se observar que os resultados se encontram coerentes e com uma margem de erro aceitável diante de um processo industrial. Como afirma Loison, Boyer e Foch (1989), não se pode ter uma comparação perfeita entre os balanços térmico de baterias diferentes, pois há vários fatores que alteram o processo da região em que a indústria está instalada. Uma observação a ser feita é que o software não informa o resultado referente ao calor total do alcatrão, porém todos os outros fatores mostram resultados significativos e coerentes. Ter uma proximidade com o balanço proposto pela literatura e com o balanço de um software que já está estável no mercado, dá ao trabalho credibilidade para ser usado como ferramenta na rotina operacional da indústria acompanhada.

FIGURA 14: Comparação entre a literatura, o trabalho e o software.

FONTE: Própria do autor, 2018.

5.2 ANÁLISE DE PARETO DO CALOR INJETADO E EJETADO DA BATERIA

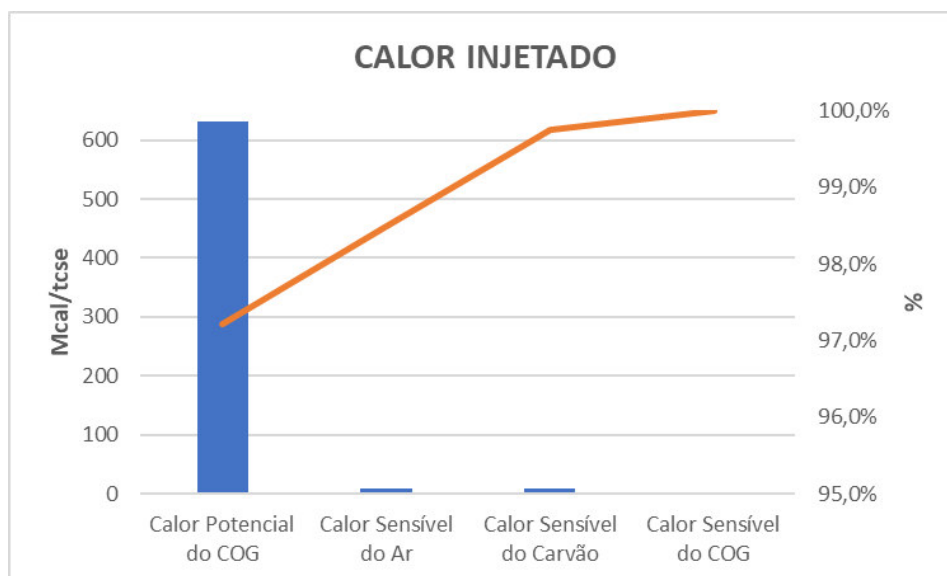
Com o balanço finalizado, foi feita uma análise de Pareto em cima dos fatores que contribuem para a injeção e ejeção de calor na bateria. A análise baseada no diagrama de Pareto, facilita a visualização dos fatores que mais afetam ao processo. Pode-se observar na figura 15 que a contribuição do calor vinda da combustão do COG é muito superior comparada com o calor sensível do próprio COG, o calor sensível do ar atmosférico e até mesmo o calor sensível do carvão enornado. Apesar de se sobressair, o pouco que contribuem os outros fatores é algo que afeta, mesmo que minimamente, o processo. Essa primeira análise reforça a prerrogativa de que os custos envolvidos pelo consumo de COG são predominantes comparados com os outros fatores contribuintes na injeção de calor na bateria.

Já na figura 16, é possível fazer a análise de Pareto para o calor que deixa a bateria. Nota-se que o calor sensível do coque é responsável por mais de 45% do calor que deixa a bateria. Esse calor sensível tem grande parte transferida para a água na torre de extinção, pois com essa quantidade de calor, o coque pode danificar outros equipamentos no processo posterior. Logo em seguida vem o calor retido na água presente em forma de umidade na mistura de carvão. A análise dessa umidade retida é um fator essencial para o processo tendo em vista o clima chuvoso onde a empresa está

localizada. Essa umidade não só retém grande parte do calor do processo, mas também influencia na densidade da mistura, na fluidez do carvão pelo processo, na granulometria do carvão, etc. Após a umidade, vem o calor retido pelo gás bruto. Esse gás deve ter sua temperatura reduzida de aproximadamente 800°C a 20°C antes de entrar na GTP, entretanto, se o gás tiver uma temperatura muito inferior a 700°C, alguns componentes do gás irão prejudicar o tratamento na planta química. O modelo auxilia essa análise de temperatura através do gráfico de Pareto, fazendo com que a operação mantenha os parâmetros do processo para que o gás bruto deixe a bateria com uma temperatura entre 700 – 720 °C.

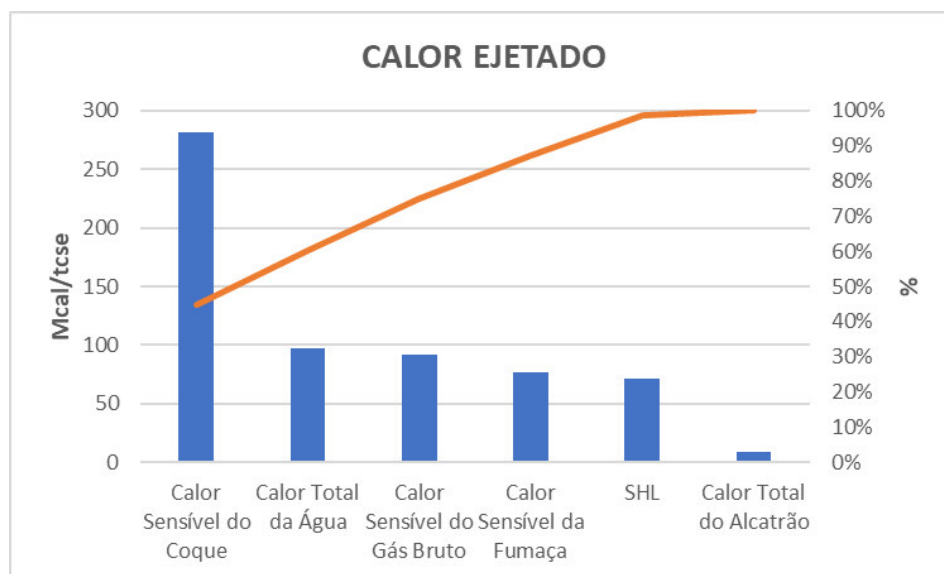
Na análise da figura 16, pode-se observar que a fumaça é o quarto fator responsável por retirar calor da bateria. Por ter COG sendo queimado em grande parte do tempo no processo, conseqüentemente há fumaça deixando à bateria constantemente. Apesar de ser o quarto fator na retirada do calor, costuma-se utilizar desse calor para o processo a fim de perder o mínimo possível para a vizinhança. Ao reter a fumaça na bateria, ou seja, tornar lento o seu processo de saída, a fumaça irá ceder calor com o forno e isso reduz o consumo de calor da bateria, como também aumenta a temperatura do gás bruto caso seja necessário. Entretanto, com a retenção da fumaça há um aumento na pressão interna da bateria que deve ser extremamente controlada pela operação para que não haja desgaste do refratário. Por fim, como esperado, o calor é ejetado pela bateria pelas perdas térmicas para a vizinhança e pelo alcatrão (presente no gás bruto).

FIGURA 15: Gráfico de Pareto do calor injetado.



FONTE: Própria do autor, 2018.

FIGURA 16: Gráfico de Pareto para o calor ejetado.



FONTE: Própria do autor, 2018.

5.3 INFLUÊNCIA DA UMIDADE, DA MATÉRIA VOLÁTIL E DO OXIGÊNIO NA FUMAÇA

Seguindo a discussão levantada por Loison, Boyer e Foch (1989) acerca de alguns fatores que afetam o balanço térmico do processo de coqueificação, foram plotados alguns gráficos a fim de averiguar o quanto o balanço foi afetado pela umidade da mistura de carvão, matéria volátil da mistura de carvão e oxigênio no canal de fumaça como consequência do aumento do ar em excesso na reação de combustão do COG.

Cada cenário foi estabelecido com o modelo em equilíbrio térmico e o fator a ser analisado foi incrementado gradativamente a fim de observar a sua influência no desvio do modelo.

Pode-se observar nas figuras 17, 18 e 20 que ao aumentar o oxigênio, a matéria volátil e a umidade respectivamente o modelo foi se afastando do equilíbrio, indicando que era necessário injetar mais calor na bateria para que a igualdade térmica fosse restabelecida. Esperava-se de fato que o balanço indicasse a necessidade de injeção de calor na bateria, porém, além disso, foi possível observar a tendência linear da curva em cada interação dos fatores com o balanço. Verificou-se que a umidade é o fator que mais afasta o modelo do equilíbrio, ou seja, o coeficiente angular da reta é maior comparado com a tendência da matéria volátil e oxigênio na fumaça. Além de aumentar a umidade na carga, há uma queda no rendimento da produtividade, pois com uma umidade maior, menos carga seca é de fato enforcada, ocasionando numa massa menor de coque desenforcada. Essa relação pode ser observada na figura 22 onde mostra que além da energia térmica necessária para evaporar a umidade, há uma perda na produtividade. Por isso, é desejado carvões com menores índices percentuais de umidade.

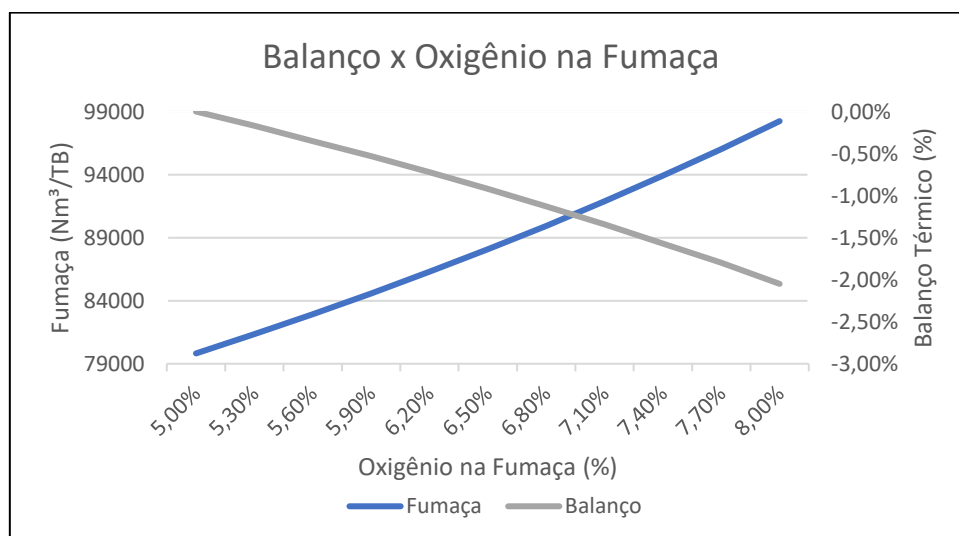
Alterando 3% na umidade do carvão enforcado, o modelo chegou a até 3,5% de afastamento do equilíbrio. Esse resultado era esperado com base nos estudos levantados na revisão bibliográfica. Essa influência da umidade é de extrema importância para o processo industrial, pois a siderúrgica onde o trabalho foi realizado está localizada a poucos quilômetros do litoral brasileiro e sofre com períodos climáticos que variam frequentemente entre céu limpo e chuvas intensas. A umidade do carvão estocado no pátio de matérias-primas pode variar de 7% em épocas mais secas a até

12% em estações chuvosas e essa variação aumenta muito o consumo de calor na bateria. O conhecimento teórico da influência da umidade sob o processo auxilia os especialistas a tomarem ações preventivas no processamento das misturas de carvões.

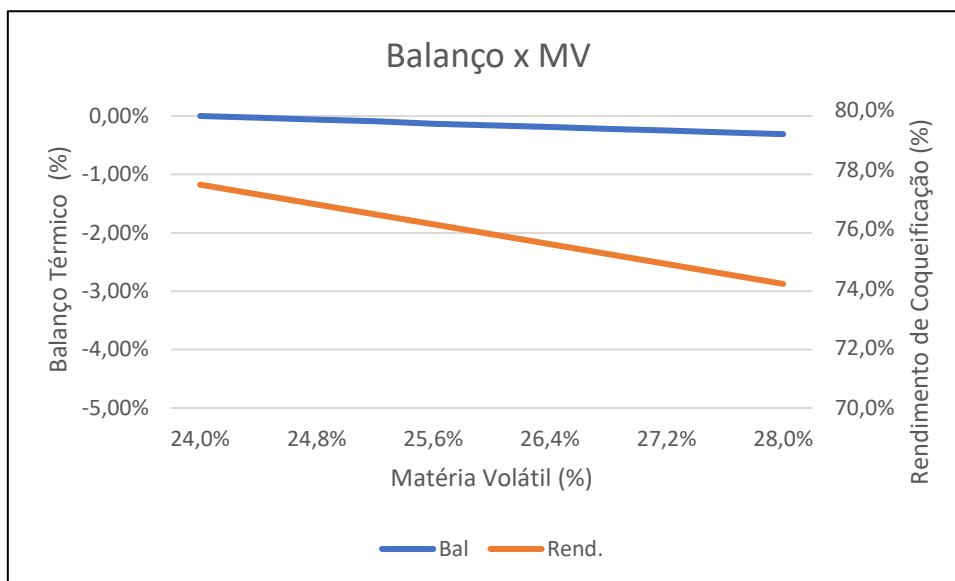
Pode-se observar na figura 18 que o aumento da matéria volátil acarreta em uma maior produção de gás bruto, porém não influencia tanto no balanço comparada à umidade. Da mesma forma, o oxigênio presente na fumaça informa a quantidade de ar atmosférico que foi injetado na bateria, porém dentre os três fatores é o que menos influencia no equilíbrio térmico. Há também a questão envolvida da produtividade, pois com um percentual maior de matéria volátil na mistura, há mais gás produzido e menos coque sendo desenformado. Vale ressaltar que apesar de o coque ser o responsável principal por retirar calor do sistema a produção de gás bruto balanceia a redução de coque desenformado fazendo com que haja uma leve necessidade de inserir calor no volume de controle, porém o balanço não chega a atingir um desvio de 0,5%.

Por fim, a análise de ar em excesso expresso pela quantidade de oxigênio presente na fumaça da chaminé mostrou um resultado intermediário entre o aumento da matéria volátil e o aumento da umidade. A figura 17 mostra que com o aumento de 3% no oxigênio presente na fumaça, o balanço chega a atingir um desvio de aproximadamente 2%. Esse desvio é explicado pela retirada de calor do sistema pela fumaça que tem um aumento na sua geração devido a uma maior vazão de ar atmosférico adentrando a bateria.

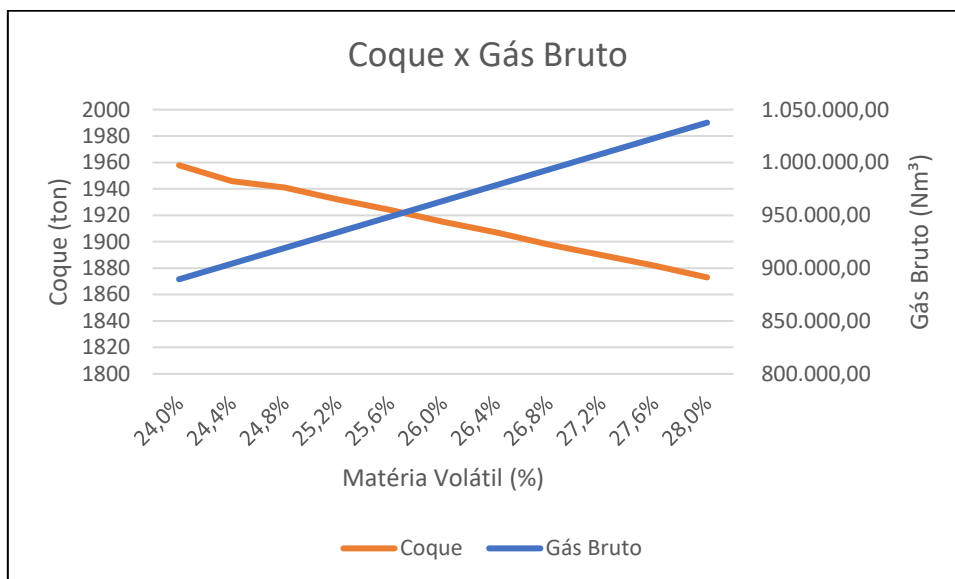
FIGURA 17: Influência do Ar em Excesso no Balanço.



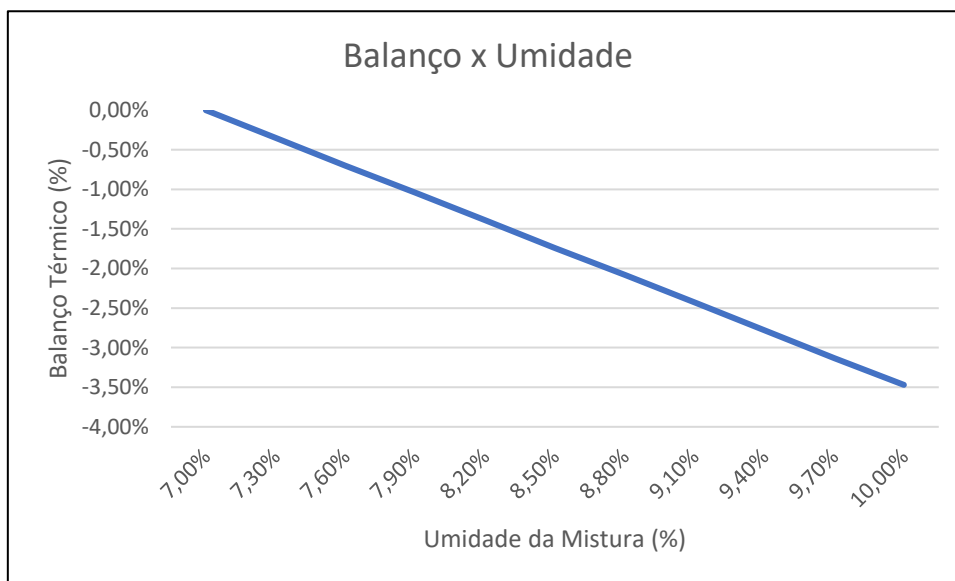
FONTE: Própria do autor, 2018.

FIGURA 18: Influência da Matéria Volátil no Balanço.

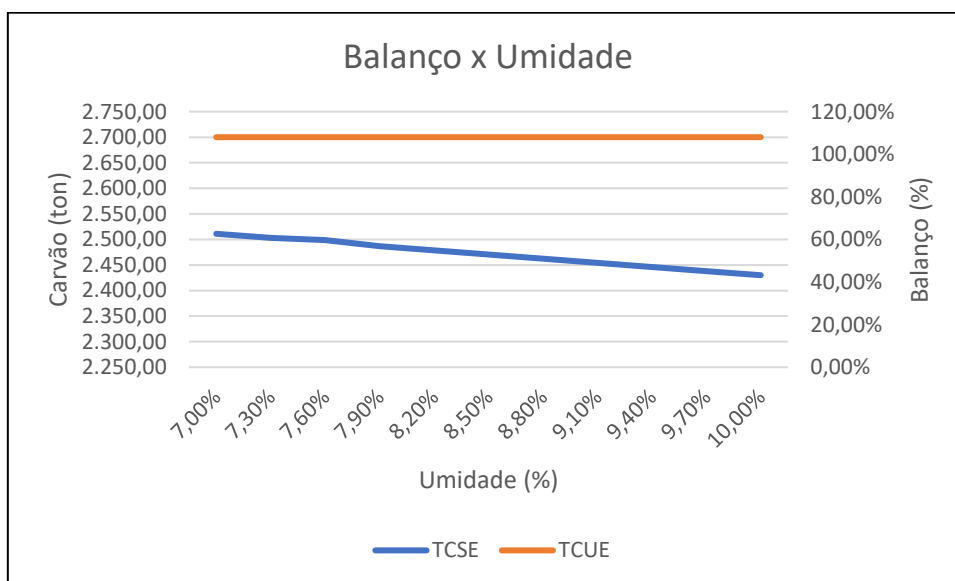
FONTE: Própria do autor, 2018.

FIGURA 19: Influência na produção de coque devido a geração de gás bruto.

FONTE: Própria do autor, 2018.

FIGURA 20: Influência da umidade no balanço.

FONTE: Própria do autor, 2018.

FIGURA 21: Influência da umidade no carregamento dos fornos.

FONTE: Própria do autor, 2018.

5.4 ANÁLISE DA TEMPERATURA DA CÂMARA DE COMBUSTÃO, TEMPO LÍQUIDO DE COQUEIFICAÇÃO E BALANÇO TÉRMICO.

Esse tópico do trabalho trata das relações da temperatura com o tempo líquido e o balanço térmico. As figuras 22 e 23 comprovam o resultado da inspeção realizada pela coloração do gás bruto antes e depois do carvão atingir o estado de coqueificação total.

Esperava-se que com o aumento da temperatura na câmara de combustão, o balanço térmico indicaria um excesso de calor na bateria. A figura 24 mostra essa relação da temperatura com o balanço. Por causa da dinâmica de carregamento de carvão da bateria, a temperatura tende a flutuar, fazendo com que a equipe de operação do controle térmico tome ações que aumentem ou diminuam a temperatura a fim de mantê-la constante em uma faixa objetivada. As ações são fundamentadas na alteração da vazão de gás de combustão como também no tempo de pausa entre as queimas. Por se tratar de um sistema alternado de queima nas câmaras de combustão (nomenclatura: queima verde e queima vermelha), ao trocar de câmara há um tempo de intervalo chamado tempo de pausa. Esse tempo intervalar pode ser alterado para passar mais tempo sem injetar gás, como também pode ser encurtado para passar menos tempo sem injetar gás.

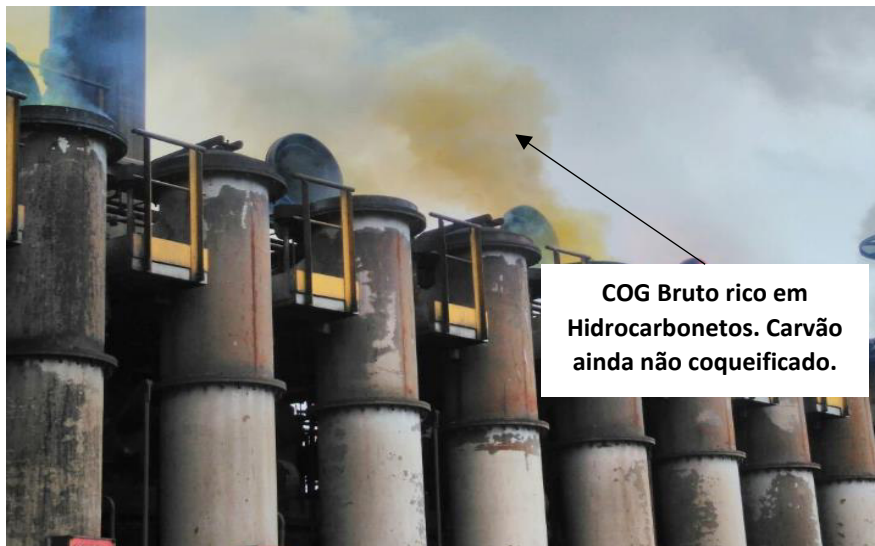
O comportamento do balanço reagiu como esperado e houve um acompanhamento com a temperatura. Quando a temperatura apresentou tendência de aumento, o balanço apresentou excesso de calor na bateria. Quando a temperatura apresentou tendência de queda, o balanço também acompanhou a curva. Da mesma forma, quando a curva da temperatura apresentou constância o balanço térmico também estabilizou com poucas variações. A figura 24 representa essa relação Balanço com a Temperatura em um período de 7 dias. A tomada de temperatura é feita a cada 8 horas.

Da mesma forma, analisou-se a relação do tempo líquido com a temperatura (Figura 25) a fim de constatar os resultados da inspeção visual com a teoria. Com o aumento da temperatura, o tempo líquido diminuiu, pois o houve um aumento do fluxo térmico, acarretando também em um aumento no coking rate (taxa de coqueificação). Com a diminuição da temperatura, o tempo líquido tende a aumentar, pois o calor fornecido para o processo de coqueificação é menor, desta forma, o coking rate diminui também. As análises comprovaram essa relação e encaminhou o estudo para o próximo passo que seria a relação entre o balanço com o tempo líquido.

A relação do balanço com o tempo líquido de coqueificação é um indicativo tão importante quando a relação do balanço com a temperatura da câmara de combustão. A figura 26 informa justamente como o balanço térmico se comportou com

a alteração do tempo líquido. Com o aumento do tempo líquido, há a indicação de que a temperatura da bateria está em queda, com isso, o balanço deve apresentar uma indicação contrária à tendência da curva do tempo líquido. Quando o balanço se encontra em ascensão, o tempo líquido deve se comportar de maneira descendente a fim de respeitar a relação inversa. O gráfico demonstrou isso, porém não com tanta precisão. Acredita-se que isso é justificado pelo fato de que não só a temperatura influencia o tempo líquido, mas também a forma de carregamento, a distribuição da chama da câmara de combustão, a granulometria da massa de carvão enforada, entre outros fatores do processo.

FIGURA 22: Inspeção visual de um forno não coqueificado.



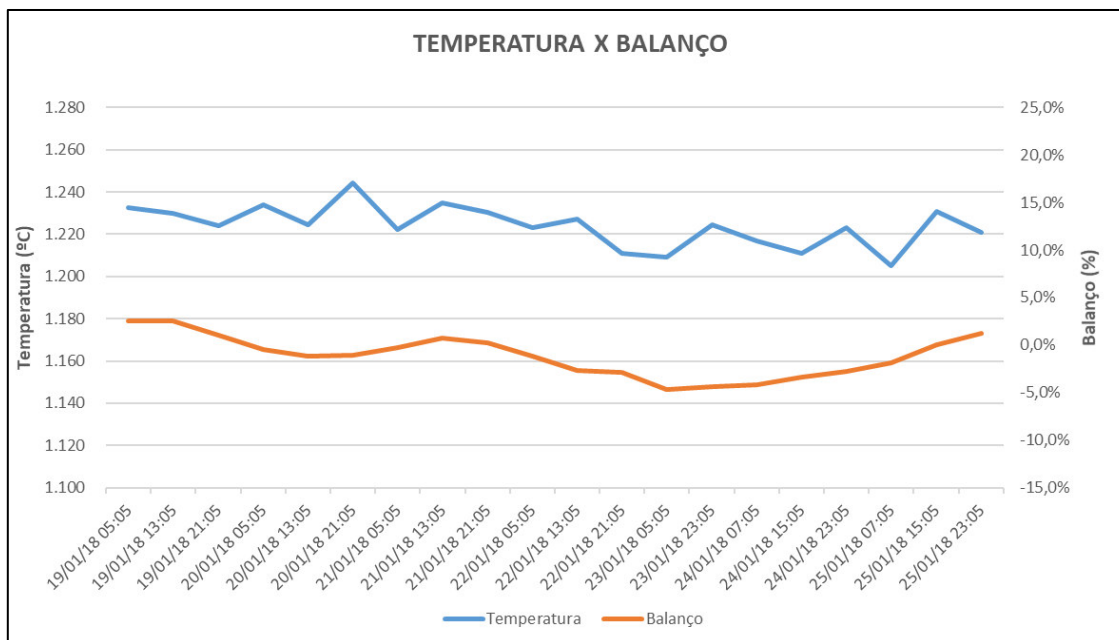
FONTE: Própria do autor, 2018.

FIGURA 23: Inspeção visual de um forno coqueificado.



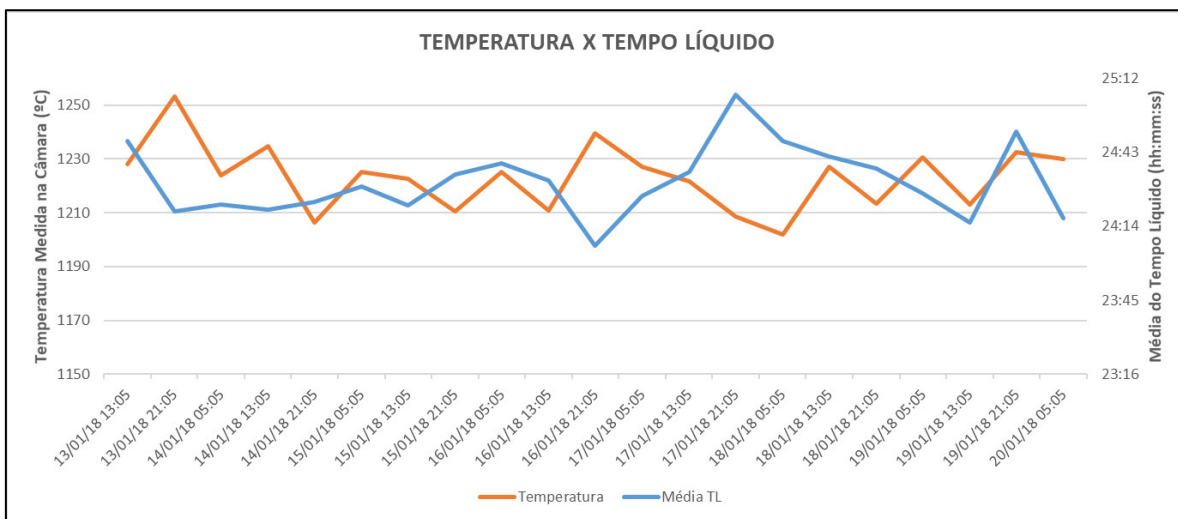
FONTE: Própria do autor, 2018.

FIGURA 24: Influência da temperatura com o balanço.



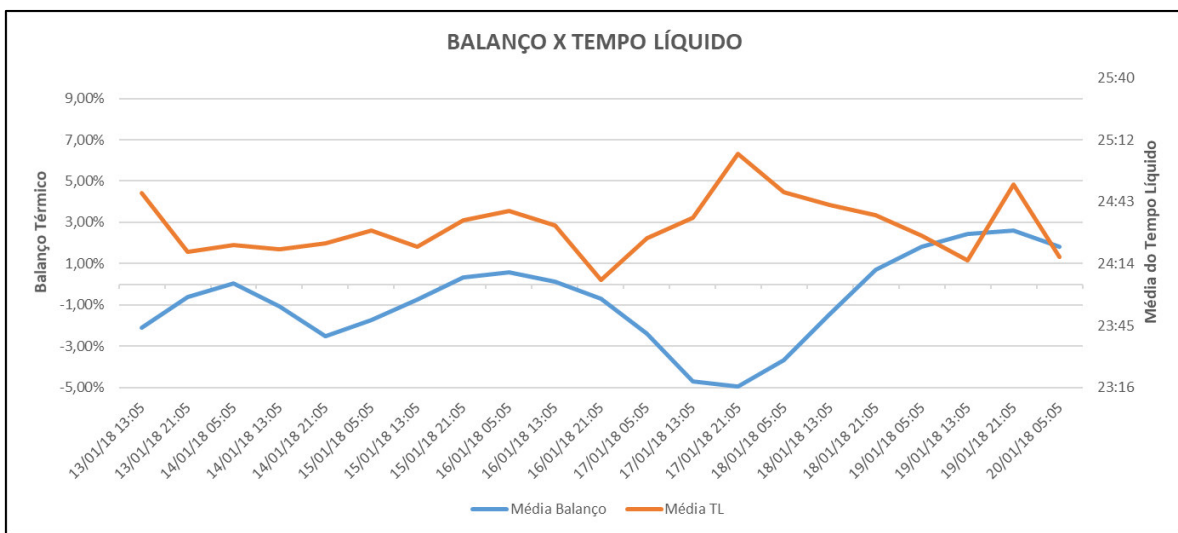
FONTE: Própria do autor, 2018.

FIGURA 25: Relação do tempo líquido com a temperatura da câmara de combustão.



FONTE: Própria do autor, 2018.

FIGURA 26: Relação do Balanço Térmico com o Tempo Líquido de Coqueificação.

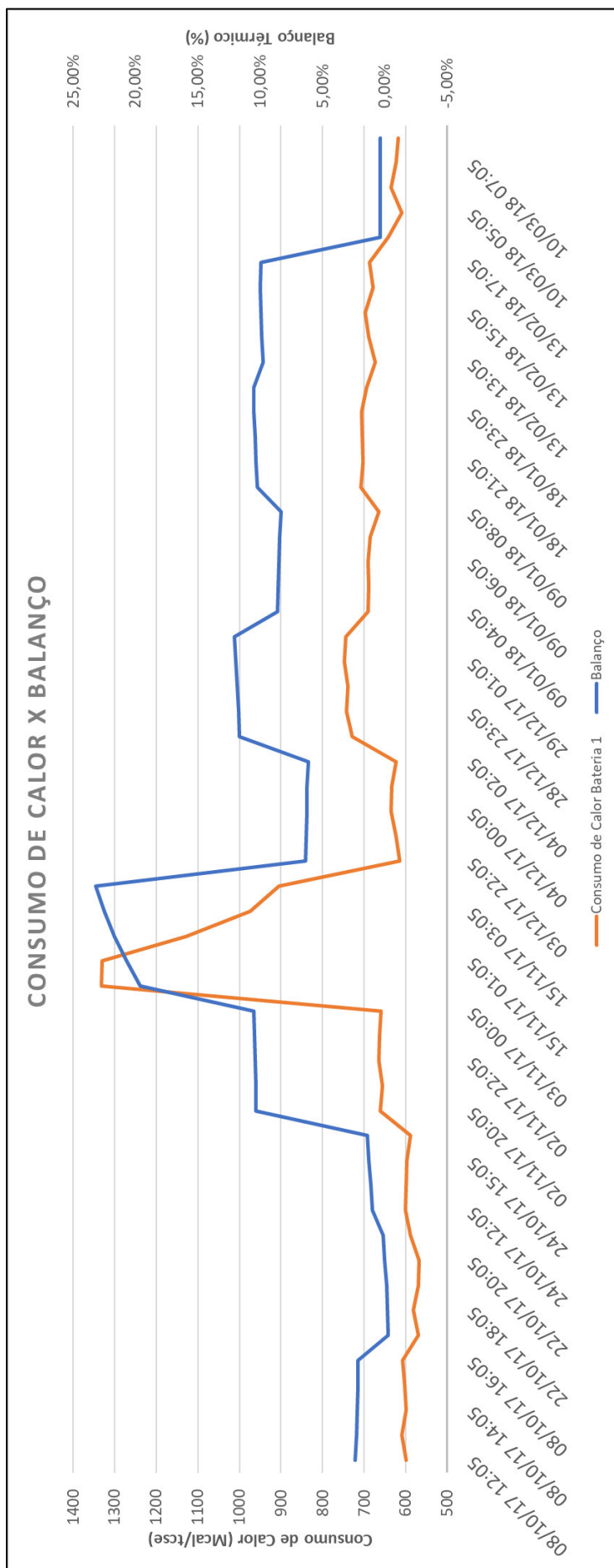


FONTE: Própria do autor, 2018.

5.5 INFLUÊNCIA DO CONSUMO DE CALOR POR TONELADA DE CARVÃO ENFORNADO

A Figura 27 expressa um dos resultados mais importantes desse trabalho. Foram coletados dados de dez períodos distintos onde houve uma significativa variação no consumo de calor da bateria. Comparando as informações com os resultados de desvio do balanço térmico, foi possível observar que o balanço reagiu às alterações provocadas pelo calor injetado na bateria. Destaca-se o período referente ao dia 15 de novembro de 2017 onde houve uma paralisação na operação para realização de manutenção na planta. Nesse período o consumo de calor tende a subir, pois não há coque retirado e muito menos carvão injetado na bateria, mas há a necessidade de manter a temperatura na planta. Ao gerar um pico no gráfico referente ao consumo de calor, o balanço reagiu com uma certa antecedência, mostrando a necessidade de tomar uma ação de correção. Essa análise comprova que o balanço térmico tem atendido às suas demandas em prever o estado térmico da bateria, tornando-se mais uma ferramenta para os operadores do controle térmico da coqueria.

FIGURA 27: Influência do consumo de calor por tonelada de carvão enformado com o balanço térmico.



FONTE: Própria do autor, 2018.

6. CONCLUSÃO

Pode-se concluir que o trabalho atingiu seus objetivos ao comprovar a eficácia do balanço térmico desenvolvido como uma ferramenta auxiliar no controle térmico da bateria de coqueificação composta por 50 fornos.

Após toda estruturação do modelo em uma pasta de trabalho do software Microsoft Excel e tratamento dos dados do processo, como consumo de gás de combustão, produção de gás bruto, quantidade de carvão enornado, etc, o modelo se mostrou eficaz no seu fim principal de otimizar o controle térmico da coqueria. Isso pôde ser visto nos resultados, onde foi comprovada a sensibilidade da ferramenta com as alterações de alguns parâmetros, como o aumento da vazão de ar atmosférico para combustão do COG, aumento da matéria volátil presente na mistura de carvão e aumento da umidade presente no carvão enornado. Este último é o parâmetro mais acompanhado devido à localização da usina ser em uma região chuvosa e com alta umidade relativa do ar. Além disso, não só o consumo térmico é aumentado, como também há uma perda da produtividade por conta da diminuição da massa de coque desenornada quando aumentada a umidade e o teor de matéria volátil.

A comparação com a literatura mostrou resultados positivos tendo em vista que o modelo desenvolvido no trabalho se aproximou do balanço desenvolvido pela literatura base e pelo software utilizado nas usinas em geral.

Com a estruturação do modelo, foi possível também analisar quais fatores são responsáveis por inserir ou retirar mais calor do sistema. Com essa análise, é possível atuar na causa raiz quando o objetivo é otimizar o consumo de calor do processo.

O balanço desenvolvido também reagiu a alteração da temperatura média da bateria, possibilitando atuar com ações corretivas, mantendo a temperatura real mais perto da objetivada. Esperava-se que houvesse uma relação próxima do balanço com o tempo líquido dos fornos, porém o balanço não demonstrou tal resultado com tanta precisão. Notou-se apenas uma relação em períodos com maiores variações. Por fim, o modelo demonstrou ótima resposta com a alteração do consumo de calor da bateria. Vários testes foram feitos com diferentes consumos e a ferramenta

acompanhou muito bem cada teste, indicando quando houve calor em excesso, calor em falta e equilíbrio térmico na bateria em cada situação ensaiada.

Concluimos então que o modelo pode ser aplicado às condições industriais com o intuito de reduzir o desperdício de gás de combustão injetado na bateria, tendo em vista que esse é o segundo fator que mais agrega custo ao processo, ficando atrás apenas do preço da mistura de carvão.

7. REFERÊNCIAS

- BUTTS, A. **Metallurgical Problems**. 2ª. ed. New York: Mcgraw-Hill Book Company, 1943.
- CARRILHO, E.; TAVARES, M. H.; LANÇAS, F. Fluidos Supercríticos em Química Analítica. II. Cromatografia com Fluido Supercrítico: Instrumentação. **Quim. Nova**, São Carlos, v. XXVI, n. 5, p. 687-693, 6 Dezembro 2002.
- COELHO, R. J. et al. Modelos de Previsão da Qualidade Metalúrgica do Coque a Partir da Qualidade dos Carvões Individuais e do Coque Obtido no Forno-piloto de Coqueificação. **Escola de Minas - Metalurgia & Materiais**, Ouro Preto, p. 27-32, Março 2004.
- COSTA, C. et al. **Siderurgia no Brasil 2010-2015**. 1ª. ed. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, v. I, 2010.
- COSTA, L. C. Parâmetros de Controle de Processo de Coqueificação das Baterias de Fornos de Coque da Cosipa. **Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**, São Paulo, 2008.
- DE ARAUJO, L. A. **Manual de Siderurgia**. 2ª. ed. São Paulo: Editora Arte e Ciência, 2005.
- FERREIRA, D. A.; BERNARDES, L. L.; DE ANDRADE, R. M; Termografia Aplicada ao Balanço de Energia de um Forno Industrial. **VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, Uberlândia, Minas Gerais, 2014
- INSTITUTO de Pesquisa de Relações Internacionais, 2017. Disponível em: <<http://www.funag.gov.br/ipri/index.php/o-ipri/47-estatisticas/94-as-15-maiores-economias-do-mundo-em-pib-e-pib-ppp>>. Acesso em: 10 abril 2018.
- KNOVEL Corporation. **Site da Knovel Corporation**, 2018. Disponível em: <<https://app.knovel.com/web/index.v>>. Acesso em: 25 maio 2018.
- LOISON, R.; FOCH, P.; BOYER, A. **Coke Quality and Production**. 2ª. ed. Cambrigde: Buterworths, 1989.
- OSÓRIO, E.; VILELA, A.; SAMPAIO, C. **Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico**. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Brasília, p. 24. 2008.
- PAUL Wurth. **Site da Paul Wurth**, 2018. Disponível em: <<http://www.paulwurth.com/pt/NOSSAS-ATIVIDADES/Produ%C3%A7%C3%A3o-de-Coque/Baterias-de-coque>>. Acesso em: 24 maio 2018.
- RIZZO, E. M. S. **Processo de Fabricação de Ferro-Gusa em Alto-Forno**. 1ª. ed. São Paulo: Abm, 2009.
- THERMTEST INC. **ThermalTest Thermophysical Instruments**, 2017. Disponível em: <<https://thermtest.com/materials-database>>. Acesso em: 01 Outubro 2017.
- VALLE, R. M. Escoamento Laminar em Placas de Orifício - Análise Teórica e Experimental em Regime Permanente e Transiente. **Universidade Federal de Santa Catarina**, Florianópolis, Fevereiro 1995.
- WORLD Steel, 2018. Disponível em: <<https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:0474d208-9108-4927-ace8-4ac5445c5df8/World+Steel+in+Figures+2017.pdf>>. Acesso em: 29 janeiro 2018.