

Sistema FIEB



PELO FUTURO DA INOVAÇÃO

CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC  
PROGRAMA DE POS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU  
GESTÃO E TECNOLOGIA INDUSTRIAL

Fernanda Miranda Torres Paiva

**Melhoria de Eficiência Energética em um Forno de  
síntese de Óxido de Zinco - Estudo de Caso**

Dissertação de Mestrado

Salvador, 2023

FERNANDA MIRANDA TORRES PAIVA

MELHORIA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM UM FORNO DE  
ÓXIDO DE ZINCO  
ESTUDO DE CASO

Projeto de Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu do Centro Universitário SENAI CIMATEC como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Gestão e Tecnologia Industrial

Orientador: Prof. Dr. Fernando Luiz Pellegrini Pessoa

Salvador, 2023

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Centro Universitário SENAI CIMATEC

P142m Paiva, Fernanda Miranda Torres

Melhoria de eficiência energética em um forno de síntese de óxido de zinco -  
Estudo de Caso / Fernanda Miranda Torres Paiva. – Salvador, 2023.

76 f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Luiz Pellegrini Pessoa.

Dissertação (Mestrado em Gestão e Tecnologia Industrial) – Programa de  
Pós-Graduação, Centro Universitário SENAI CIMATEC, Salvador, 2023.  
Inclui referências.

1. Fornos industriais. 2. Integração de processos. 3. Eficiência energética. I.  
Centro Universitário SENAI CIMATEC. II. Pessoa, Fernando Luiz Pellegrini. III. Título.

CDD 621.31

**CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC****Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia Industrial**

A Banca Examinadora, constituída pelos professores abaixo listados, aprova a Defesa de Mestrado, intitulada “**Melhoria de Eficiência Energética em um forno de síntese de óxido de zinco - Estudo de Caso**” apresentada no dia 06 de setembro de 2023, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Gestão e Tecnologia Industrial.

Orientador:

Assinado eletronicamente por:  
Fernando Luiz Pellegrini Pessoa  
CPF: \*\*\*.470.585-\*\*  
Data: 06/11/2023 14:35:00 -05:00

**Prof. Dr. Fernando Luiz Pellegrini Pessoa**  
SENAI CIMATEC

Membro Interno:

Assinado eletronicamente por:  
Alex Alisson Bandeira Santos  
CPF: \*\*\*.191.765-\*\*  
Data: 06/11/2023 15:40:26 -03:00

**Prof. Dr. Alex Alisson Bandeira Santos**  
SENAI CIMATEC

Membro Externo:

Assinado eletronicamente por:  
Gerhard Ett  
CPF: \*\*\*.421.898-\*\*  
Data: 06/11/2023 15:41:54 -03:00

**Prof. Dr. Gerhard Ett**  
FIEB

Membro Externo:

Assinado eletronicamente por:  
Hugo Gomes D'Amato Villardi  
CPF: \*\*\*.141.587-\*\*  
Data: 06/11/2023 15:04:46 -03:00

**Prof. Dr. Hugo Gomes D'Amato Villardi**  
FIEB

## Resumo

A indústria Mineração no Brasil consiste em um setor relevante para o desenvolvimento econômico do país devido às diversas aplicações, apresentando um grande consumidor de energia elétrica e térmica. Dentre os equipamentos presentes nos processos produtivos, os fornos são considerados as maiores unidades consumidoras de energia, logo a eficiência térmica dele desempenha um papel crucial na economia de energia das empresas. O trabalho proposto pretende analisar os benefícios energéticos da incorporação da recuperação de calor e pré-aquecimento do ar em um forno industrial de produção de óxido de zinco, tanto no ponto de vista energético como econômico. Os resultados obtidos apresentam uma redução substancial do consumo de combustível, na ordem de 22,4%, ao mesmo tempo que diminuem a perda de calor e a irreversibilidade da unidade. No aspecto econômico, a implantação do sistema resultou no tempo de retorno inferior a 2 anos e meio para o cenário político atual do Brasil.

**Palavras-chave:** Fornos Industriais; Integração de Processos; Eficiência Energética.

## **Title and Abstract**

The Mining industry in Brazil is a relevant sector for the country's economic development due to its diverse applications, featuring a large consumer of electrical and thermal energy. Among the equipment present in production processes, ovens are considered the largest energy consuming units, so their thermal efficiency plays a crucial role in energy savings for companies. The proposed work aims to analyze the energy benefits of incorporating heat recovery and air preheating in an industrial zinc oxide production furnace, both from an energy and economic point of view. The results obtained show a substantial reduction in fuel consumption, in the order of 22.4%, while reducing heat loss and the irreversibility of the unit. In the economic aspect, the implementation of the system resulted in a payback time of less than 2 and a half years.

**Keywords:** Industrial Ovens; Process Integration; Energy Efficiency.

## Lista de Tabelas

Tabela 1 – Produção de aço bruto para os 20 principais países (milhões de tonelada)	11
Tabela 2 - <i>Lista de componentes usados na simulação presentes Aspen Plus®.</i>	28
Tabela 3 - Dados de entrada para a simulação da etapa de combustão	30
Tabela 4 - <i>Dados de entrada para a simulação da etapa de volatilização do Zn.</i>	30
Tabela 5 - Dados de entrada para cada operações unitárias usadas.	30
Tabela 6 - <i>Dados de entrada para a simulação caso 2</i>	31
Tabela 7 – Dados Experimentais	35
Tabela 8 – Resultados do Simulador Aspen ©	35

## Lista de Figuras

<i>Figura 1 - Número de publicações por ano, com as palavras-chave: preheating, energy efficiency, furnaces, industry</i>	13
<i>Figura 2 - Países que mais publicam no tema “Integração energética na indústrias”.</i>	14
<i>Figura 3 – Mecanismo do pré- aquecedor de ar</i>	17
<i>Figura 4 - Fluxograma de metodologia</i>	19
<i>Figura 5 – Bateria de Fornos de Produção de Óxido de Zinco da NEXA Resources</i>	20
<i>Figura 6 - Forno tipo Cadinho</i>	21
<i>Figura 7 - Fluxograma do processo de integração energética</i>	22
<i>Figura 8 - Esboço do feixe tubular do recuperador de calor</i>	23
<i>Figura 9 - Chaminé do forno antes da integração energética</i>	23
<i>Figura 10 - Unidade de monitoramento dos testes</i>	24
<i>Figura 11 – Localização do protótipo de apoio aos testes</i>	24
<i>Figura 12 – Localização do IHM do Skid</i>	25
<i>Figura 13 - Tela do Supervisório de acompanhamento dos Testes</i>	25
<i>Figura 14- Vista da Instalação do recuperador de calor</i>	26
<i>Figura 15 - Fluxograma de processo do caso 1</i>	29
<i>Figura 16 - Fluxograma de processo do caso 2.</i>	31
<i>Figura 17 – Perfil de temperatura dos Gases de Exaustão</i>	34
<i>Figura 18 – Perfil de temperatura do ar de combustão</i>	34
<i>Figura 19 - Redução de custos</i>	36
<i>Figura 20 - Memória de cálculo do Valor Presente</i>	37
<i>Figura 21 – Calculo de taxação de carbono</i>	38
<i>Figura 22 - Memória de cálculo do Valor Presente com taxação de carbono</i>	39

## **Lista de Siglas e Abreviaturas**

**BPF** – Baixo Ponto de Fluidez

**CFD** - Computational Fluid Dynamics

**GLP** – Gás Liquefeito de Petróleo

**IHM** – Interfase Homem maquina

**IP** - Integração de Processos

**OBAF** – Forno elétrico de conversão a oxigênio

**PCI** – Poder Calorífico Inferior

**REA** – Forno elétrico rotativo

**TIR** – Taxa Interna de Retorno

**TMA** – Taxa Mínima de Atratividade

**VPL** – Valor Presente Líquido

## Sumário

Resumo .....	2
Title and Abstract.....	3
Lista de Tabelas .....	4
Lista de Figuras .....	5
Lista de Siglas e Abreviaturas .....	6
1 Contextualização e Justificativa .....	8
1.1 Objetivo.....	9
1.2 Objetivos Específicos .....	9
1.3 Organização do Documento.....	9
2 Revisão da Literatura .....	11
2.1 Integração Energética em Processos com Fornos.....	14
3 Materiais e Métodos.....	19
3.1 Projeto EMBRAPPII - Eficiência Energética.....	19
3.1.1 Descrição do Sistema.....	20
3.2 Método de experimentos em campo.....	24
3.3 Balanço de Energia no Forno .....	26
3.3.1 Energia Requerida .....	26
3.3.2 Energia Disponível .....	27
3.3.3 Eficiência.....	28
3.4.1 Caso 1 .....	29
3.4.2 Caso 2 .....	31
4 Resultados e Discussões.....	33
5 Conclusão e Sugestões para Trabalhos Futuros .....	40
6 Referências.....	41
Produção Técnica e Científica .....	44
7 Anexos.....	45
7.1 Memorial de Cálculo Aspen – Caso 1 e Caso 2 .....	45

## 1 Contextualização e Justificativa

A indústria desempenha um papel fundamental no consumo global de energia, representando uma parcela significativa das emissões de gases de efeito estufa e do consumo de combustíveis fósseis. Diante dos desafios atuais de mudanças climáticas e sustentabilidade, torna-se imperativo buscar soluções que melhorem a eficiência energética e reduzam o impacto ambiental das operações industriais.

A indústria siderúrgica no Brasil consiste em um setor relevante para o desenvolvimento econômico do país devido às diversas aplicações do aço, principalmente na construção e no transporte, sendo fornecedora de matérias-primas para outros setores da indústria de transformação, participando do PIB e na geração de empregos (VIANA, 2017).

As reduções no consumo de energia podem ser obtidas pela eliminação de consumos excessivos, recuperação de perdas, implementação de melhorias em equipamentos existentes e utilização de equipamentos de melhor eficiência (SÁ, 2010).

Nos últimos 50 anos, o setor teve uma redução de 60% no consumo energético por tonelada produzida. Por causa dessa considerável queda, os ganhos de eficiência energética estão cada vez mais difíceis de ser obtido, com as tecnologias e processos já existentes e ultrapassados (CARVALHO *et al.*, 2015).

Nesse contexto, a integração energética entre as correntes de combustível e comburentes em fornos industriais tem se mostrado uma estratégia promissora para otimizar o uso de energia e minimizar as emissões de poluentes atmosféricos. A combinação adequada de correntes de gases de combustão e ar pode resultar em benefícios significativos, como a redução do consumo de combustível, a melhoria da eficiência térmica e a minimização das emissões de gases poluentes.

A cadeia minero-siderúrgica emitiu em 2020 aproximadamente 107,6 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>, de acordo com dados levantados pelo Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA, 2022) no SEEG/Observatório do Clima. Esse montante, contribui diretamente para o agravamento da crise climática no Brasil e no mundo, responde por cerca de 5% das emissões totais brasileiras.

A integração energética em fornos industriais envolve a otimização dos processos de combustão e a recuperação de calor dos gases de combustão para pré-aquecer o ar de combustão. Essa abordagem permite aproveitar a energia térmica contida nos gases de exaustão, que seria normalmente dissipada para a atmosfera, e utilizá-la para pré-aquecer o ar necessário à combustão (KIAN *et al.* 2023). Dessa forma, a temperatura do ar de combustão aumenta, resultando em uma queima mais eficiente e, conseqüentemente, em maior eficiência energética.

Além disso, a integração entre correntes de combustível e comburentes em fornos industriais pode contribuir para a redução das emissões de poluentes atmosféricos. O controle adequado dos parâmetros de operação, como a temperatura e a velocidade dos gases de combustão, permite minimizar a formação de óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), particulados e outros compostos prejudiciais à saúde e ao meio ambiente.

Embora a integração energética em fornos industriais ofereça diversas vantagens potenciais, sua implementação bem-sucedida requer uma abordagem abrangente e personalizada para cada aplicação específica. É necessário considerar fatores como o tipo de combustível utilizado, as características do processo industrial, as restrições operacionais e as exigências regulatórias vigentes.

Portanto, o objetivo desta dissertação é analisar a integração energética entre as correntes de combustível e comburentes em fornos de produção de óxido de zinco, com o intuito de avaliar as reduções de consumo de combustível como também de emissões de  $\text{CO}_2$ , com base em dados experimentais e dados obtidos de simulação em software Aspen Plus.

## **1.1 Objetivo**

Na presente dissertação, o objetivo é avaliar os ganhos energéticos com a implantação de sistema de pré-aquecimento de ar em um forno de síntese de óxido de zinco, visando reduções no consumo energético e nas emissões de gás carbônico.

## **1.2 Objetivos Específicos**

Para alcançar o objetivo do trabalho, foi proposto como objetivos específicos:

- Analisar a redução do consumo de combustível com a integração térmica proposta mediante implementação de trocador de calor na exaustão dos gases de combustão;
- Determinar os desvios experimentais e teóricos relacionados ao trabalho;
- Desenvolver simulação de processo que correlacione os ganhos energéticos com as reduções das emissões de carbono.

## **1.3 Organização do Documento**

Esta dissertação está dividida em capítulos. O primeiro apresentou uma introdução do assunto estudado, contextualizando a importância de estudos para abordarem a eficiência energética em indústrias, com seus ganhos, como também a importância da redução de emissões de  $\text{CO}_2$ , nos setores industriais. No segundo capítulo será apresentada uma revisão da literatura na indústria química e com processos envolvendo fornos. O terceiro capítulo apresenta a metodologia e procedimento aplicado e o descritivo do processo estudado e como será realizado o estudo. O quarto capítulo contém os resultados obtidos das simulações realizadas e

suas respectivas discussões. No quinto serão apresentadas as considerações finais desta dissertação e sugestões para realização de trabalhos futuros. No sexto e último, estão disponíveis as referências bibliográficas utilizadas.

## 2 Revisão da Literatura

A indústria siderúrgica é uma das maiores consumidoras de energia do setor industrial. Uma quantidade considerável de calor residual é perdida durante a produção de aço, sendo liberada na atmosfera. Logo, a recuperação do calor residual oriundo do processo pode aumentar a eficiência dos sistemas, reduzir o consumo de combustível e diminuir as emissões de CO<sub>2</sub> (INAYAT *et al* 2023).

A tecnologia de ferro e aço avançou significativamente recentemente, com a produção global de aço aumentando de 850 milhões de toneladas em 2010 para 1878 milhões de toneladas em 2020 (FORDER 2022). A indústria siderúrgica não é apenas um dos setores altamente significativos da economia, mas também é responsável por uma quantidade considerável de consumo de energia e produção de poluentes. A energia consumida pela indústria siderúrgica representa de 10 a 15% do gasto energético mundial, e suas emissões de CO<sub>2</sub> representam cerca de 7% de todas as emissões antrópicas de CO<sub>2</sub> (CHEN L *et al* 2015). A Tabela 1 mostra o ranking dos países produtores de aço bruto em 2021, onde a China lidera, com mais da metade do aço mundial.

Tabela 1 – Produção de aço bruto para os 20 principais países (milhões de tonelada)

País	Classificação	Produção	País	Classificação	Produção
China	1	1064,8	Taiwan	11	21,0
Índia	2	100,3	Ucrânia	12	20,6
Japão	3	83,2	Itália	13	20,4
EUA	4	72,7	Vietnã	14	19,5
Rússia	5	71,6	México	15	16,8
Coreia do Sul	6	67,1	França	16	11,6
Peru	7	35,8	Espanha	17	11,0
Alemanha	8	35,7	Canadá	18	11,0
Brasil	9	31,0	Indonésia	19	9,3
Irã	10	29,0	Egito	20	8,2

Fonte: INAYAT *et al* 2023

A indústria siderúrgica emprega alguns dos processos industriais mais energointensivas, onde 10% do calor residual é liberado a atmosfera com uma temperatura muito alta. Alguns autores estudaram estratégias de recuperação de calor residual da indústria siderúrgica, HUI ZHANG *et al.* (2015) estudaram o potencial da recuperação de calor residual na escória fundida, um resíduo da indústria siderúrgica com alta temperatura (1400–1600 °C). HUSSAM JOUHARA *et al.* (2018) revisaram as tecnologias que podem aplicadas na indústria siderúrgica, visando a recuperação de calor, como, por exemplo: regeneradores de forno e pré-aquecedores de ar passivos, queimadores regenerativos e recuperativos, trocadores de calor de placas e economizadores.

A integração energética consiste em uma técnica industrial voltada ao reaproveitamento da energia térmica, antes subutilizada. Esta técnica se utiliza de correntes de processos, fluxos de fluido do processo, quentes e frias, vindas de outras etapas do processo para aquecimento e resfriamento, respectivamente.

O conceito de integração de processo (IP) é utilizado para a análise do uso da energia e a diminuição do impacto ambiental em processos industriais, englobando um universo amplo de possibilidades de integração que vai além do uso da energia nos processos. A aplicação da IP na indústria tornou-se um método essencial para o projeto e o planejamento de otimização, proporcionando a redução de custos operacionais e de investimento.

A minimização do consumo de recursos naturais em processos industriais integrados vem não só do melhor aproveitamento da energia, mas também do consumo de matérias-primas e água, por meio de análises que incluem integração térmica e de massa, além de gestão de resíduos industriais.

As áreas de aplicação de técnicas de integração de processos não se resumem somente em cenários de redução no uso da energia e do impacto ambiental, mas também em investimentos de tecnologias mais atualizadas e com menor custo de uso de energia.

Segundo Gundersen (2000), os métodos de integração de processos podem ser realizados pelo uso de três ferramentas, sendo estas:

- Regras heurísticas, fundamentadas na experiência sobre o projeto e a economia;
- Conceitos de termodinâmica;
- Técnicas de otimização.

Os diversos métodos de IP apresentam relação e semelhanças, sendo em muitos casos utilizados simultaneamente as três ferramentas citadas.

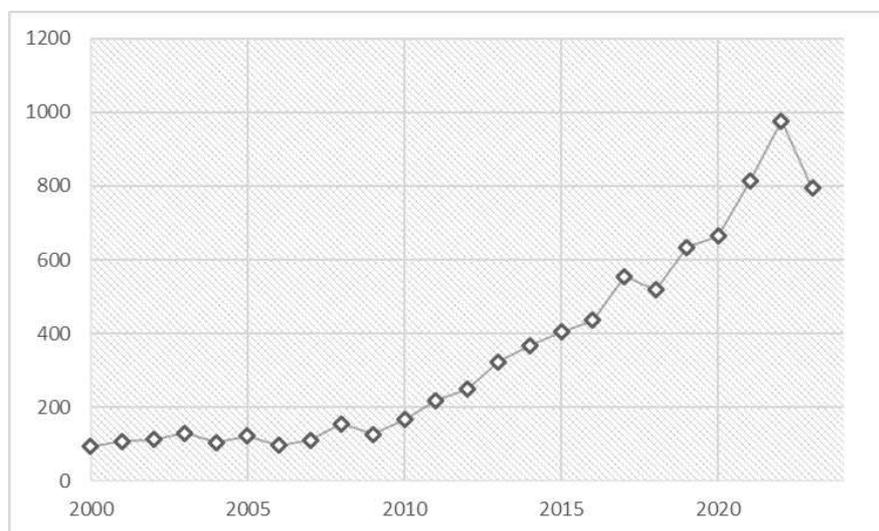
Ensinas (2008), buscando reduzir a demanda de utilidades, e assim, aumentar os rendimentos, propõe um método de integração térmica no processo de produção de açúcar e etanol. O autor trabalhou com uma rede de trocadores de calor e um sistema de evaporação. Esse trabalho mostra os benefícios de estudos relacionados à integração energética e os ganhos financeiros. Obteve-se uma redução da demanda de vapor (458 kg de vapor/t de cana da planta padrão, para 307 kg de vapor/t cana com integração térmica). Outra redução foi observada no consumo de água de refrigeração para os evaporadores e cozedores (28% e 21% respectivamente). Outra vantagem obtida foi a eliminação de uma torre de resfriamento para a vinhaça, que passou a ter seu conteúdo de energia térmica mais bem aproveitado por outra corrente do processo.

A metodologia pode ser aplicado em empreendimentos variados, como o estudo apresentado por Meloni (2020). Seu trabalho teve o objetivo de identificar

oportunidades de otimização da eficiência energética e redução do consumo de energia elétrica. Após levantamento de dados e análise, os resultados mostraram que a substituição dos motores elétricos por outros de alto rendimento, pode reduzir o consumo de energia elétrica em 9,7% e que a substituição de lâmpadas fluorescentes por lâmpadas LED tubulares, com medidas simples, tais quais: treinamentos para conscientização e motivação dos funcionários, limpeza e pintura com cores claras do teto, paredes e janelas e a substituição de telhas translúcidas envelhecidas, podem reduzir o consumo em valores maiores que 55%.

A análise dos trabalhos publicados, na plataforma Science Direct sobre integração energética mostra que o assunto tem ganhado destaque na comunidade científica. Como pode ser observado na Figura 1, em 2022, as publicações ultrapassaram a marca de 900 trabalhos, em 2023 são quase 800 trabalhos já realizados, e ainda faltam 5 meses para o fim do ano.

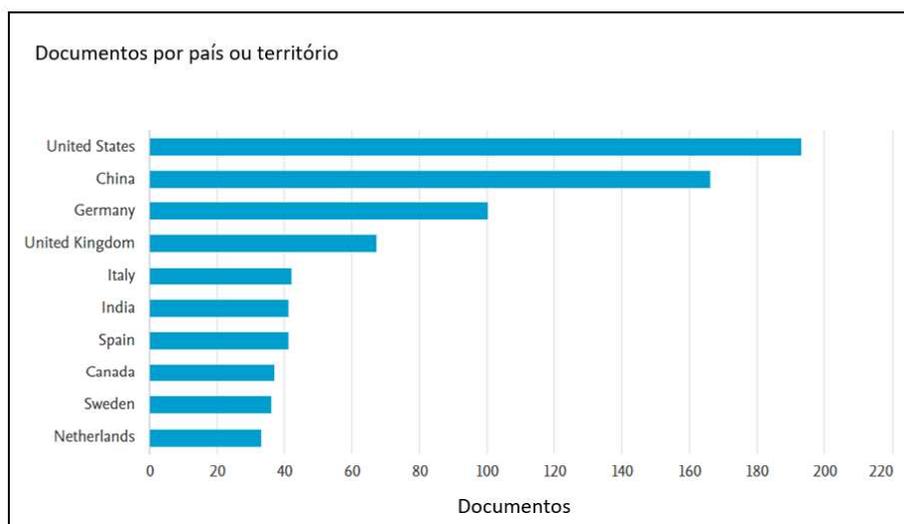
Figura 1 - Número de publicações por ano, com as palavras-chave: *preheating, energy efficiency, furnaces, industry*



Fonte: Autoria Propria

Os países que mais publicam sobre o tema de integração energética em indústrias, forma Estados Unidos e China, conforme apresentado na Figura 2. O Brasil não aparece no top-10, mostrando a necessidade de pesquisa no assunto, visto que o tema é importante e de interesse das indústrias.

Figura 2 - Países que mais publicam no tema "Integração energética na indústrias".



Fonte: autoria própria.

Na indústria, a análise exérgica tem sido utilizada com mais frequência, como estudado por Freire (2018), que utilizou dados deste tipo para avaliar a cogeração de energia em um centro de pesquisa autoprodutor de energia elétrica e que necessita, também, de demanda térmica para refrigeração. Foram avaliadas unidades de cogeração com motores de combustão a gás (natural, biogás ou síntese). Os autores utilizaram ferramentas de resolução de equações de engenharia que mostrou a potencialidade de otimização dos motores a combustão quando operado com gás natural e com biogás. A operação com gás natural resultou em uma eficiência elétrica de 43% e de cogeração de 69%, já a operação do biogás, apresentou 40% para eficiência elétrica e 71% para cogeração, em relação à operação real dos motores.

O trabalho apresentado por Yang *et al.* (2021) apresenta soluções para o desenvolvimento sustentável em grande escala de etilenoglicol a partir de carvão melhorando os seguintes parâmetros: emissões de CO<sub>2</sub>, custo de investimento e consumo de energia. Os autores avaliam três alternativas para o processo; reforma a seco, a vapor e misto. Os resultados mostraram que a eficiência energética de utilização de carbono é aumentada de 21,09% (convencional) para 59,47% na reforma a seco, 58,51% a vapor e 59,33% na mista. Os processos alternativos tiveram aumento de eficiência exérgica em 17,70% (seco), 20,66% (vapor) e 13,66% (misto). Além disso, todos os processos apresentaram um investimento de capital total menor e o custo de produção foram economizados em 10,48% (seco), 13,23% (vapor) e 9,09% (misto).

## 2.1 Integração Energética em Processos com Fornos

Os fornos são dispositivos projetados para assegurar a queima completa do combustível, de modo eficiente e contínuo, visando ao aproveitamento de sua energia térmica liberada na combustão, com o máximo de rendimento na conversão da energia química do combustível em energia térmica. Estes equipamentos consistem

em grandes consumidores de combustíveis fósseis, representando uma parcela significativa dos custos das empresas.

Katsuki e Hasegawa (1998) revisaram vários aspectos de tecnologia de recuperação de calor de combustão e mostrou algumas vantagens quando o calor gerado nos fornos é utilizado para pré-aquecer o ar de combustão como: redução do consumo de combustível, reduzindo as emissões de NO<sub>x</sub> e aumento da eficiência de transferência de calor.

A primeira lei da termodinâmica tem sido amplamente usada para análise de utilização de energia; entretanto, é limitado por ser incapaz de determinar quantitativamente a qualidade da energia. A segunda lei da termodinâmica supera essa limitação, onde aborda a análise de exergia que quantifica o trabalho útil potencial para uma determinada quantidade de energia (CENGEL e MICHAEL, 2008). É fundamental ser levado em consideração tanto a quantidade quanto a qualidade da energia utilizada para expressar a verdadeira eficiência. Sendo assim a exergia passa a ser uma ferramenta poderosa na análise energética (ROSEN e DINCER, 1997). Esse conceito tem despertado grande interesse e, nas últimas três décadas, tem sido aplicado a diversos setores da economia, como processamento industrial e térmico, para determinar a economia de energia e financeira inerente.

Ziebig e Stanek (2006) estudaram a redução do custo energético num alto-forno para produção de aço. Os autores avaliaram a energia e exergia do processo, através da análise do consumo de coque, produção de gás de topo e de eletricidade na turbina de recuperação utilizando a exergia residual do gás de topo. O trabalho propôs um algoritmo de análise exérgica para investigar a influência dos parâmetros térmicos no processo. Utilizando o algoritmo, os autores conseguiram reduzir o consumo e o custo do processo.

Wu *et al.* (2011) mostrou que a combustão com ar pré-aquecido é uma maneira eficaz de queimar os líquidos de baixo valor calórico.

Hasanuzzaman *et al.* (2012) estudou a energia utilizada em fornos e determinou que a maioria da energia gerada é perdida (57%), dessa forma a utilização de pré-aquecedores de ar de combustão visando aumentar a eficiência dos fornos através da recuperação do calor, acarreta uma redução de 8,1% no consumo de combustível.

Hasanuzzaman *et al.* (2012) revisou a eficiência energética e estratégias de economia da combustão baseado no uso de pré-aquecedores de ar, e obteve uma redução de 25% de energia, e nas análises econômicas obteve um tempo de retorno do investimento inferior a 2 anos com a aplicação do recuperador de calor.

Os fornos são equipamentos onipresentes nas indústrias de petróleo, petroquímica e metalúrgica, por serem essenciais nas operações de produção. Este equipamento é considerado as maiores unidades consumidoras de energia, logo a eficiência térmica dos mesmos desempenha um papel crucial na economia de energia

das empresas (SHEKARCHIAN *et al.* 2013). Os fornos são destinados ao aquecimento de materiais, com vários objetivos, como: cozimento, fusão, calcinação, tratamento térmico, secagem, etc. Sua principal função é transferir ao material o calor gerado pela combustão, com a máxima eficiência e uniformidade.

Aisyah *et al.* (2015) analisaram o efeito do uso de pré-aquecimento do ar em sistemas visando melhorar a eficiência de fornos que operam com a queima de GLP, obtendo um aumento na eficiência da combustão de até 6,75% e redução na emissão de CO<sub>2</sub> em até 49,06%.

Kian (2023), apresentou que o pré-aquecimento do ar de combustão tem efeitos positivos e negativos. Como positivo o pré-aquecimento do ar de combustão como a maneira mais robusta de aumentar a produção de vapor e a eficiência de uma caldeira, visto a presença de alto fluxo de exaustão com alta temperatura. A perda de energia mais significativa ocorre em caldeiras de utilidades por gases de exaustão. Portanto, parte do calor sensível necessário para participar do processo de combustão pode ser fornecido pelo pré-aquecimento do ar de combustão pelos gases de combustão. Como ponto negativo, na combustão convencional, o ar pré-aquecido aumenta a temperatura de pico da chama, o que tem um efeito significativo no aumento da formação de NO<sub>x</sub>.

A eficiência do processo, permitindo a maximização da quantidade de calor transferido para o processo e minimização das perdas de calor do forno para o ambiente, é essencial para eficiência do processo produtivo. Quantidade significativa de energia nos processos é perdido através do gás de chaminé (MICHAEL, 2008). Portanto, a utilização de unidades de troca térmica tem sido amplamente utilizada nas indústrias visando reaproveitar a energia dissipada ao meio ambiente. A primeira lei da termodinâmica é normalmente utilizada para avaliar a utilização de energia nos sistemas industriais. Entretanto, é inadequada quando o uso da energia de qualidade é levado em conta. A análise exérgica, porém, é baseado na segunda lei. É um método termodinâmico para avaliar e melhorar a eficiência dos processos, dispositivos e sistemas, bem como para melhorar o desempenho ambiental e econômico (SERT e BALKAN, 2016).

Segundo Noorpoor e Mazare (2018), o uso de aquecedores industriais para recuperar os gases de combustão com alta temperatura, tem sido um meio eficaz de aumentar a eficiência de fornos, entretanto não é considerada uma tecnologia nova.

Gao *et al.* (2019) simularam e otimizaram, com integração energética, o processo de carbonatação utilizando escória de alto forno e CO<sub>2</sub> que são descarregados anualmente das indústrias de ferro e aço, com uma abundância de calor residual. Os resultados mostram que 2,57 kg de escória podem sequestrar 1 kg de CO<sub>2</sub>, exigindo 5,34 MJ de energia (3,3 MJ de calor e 2,04 MJ de eletricidade). Aproximadamente 60 kg de redução líquida de emissão de CO<sub>2</sub> poderiam ser alcançados com o descarte de uma tonelada de escória de alto-forno. Além disso, o

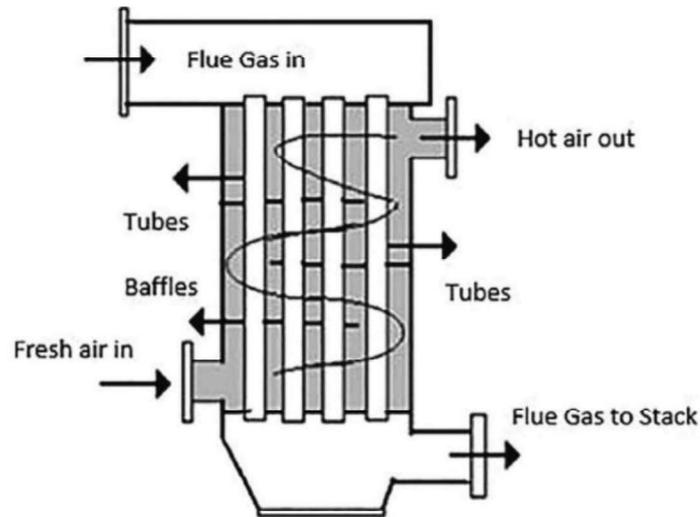
subproduto, sulfato de alumínio e amônio, é um produto de alto valor agregado e representaria um ganho monetário para o processo.

Yuan *et al.* (2019) utilizaram o conceito de exergia para reduzir as perdas associadas ao forno de craqueamento a vapor, tentando assim aumentar a eficiência termodinâmica do sistema. Os autores realizaram uma simulação em regime permanente de um forno industrial a vapor com capacidade total de alimentação de 12 t/h. O trabalho propõe modificações nos reatores tubulares, no processo de combustão, e no superaquecedor da mistura, o que garantiria um aumento de 10,53% em eficiência.

Zhao *et al.* (2021) apresentaram uma revisão dos trabalhos que utilizaram fornos e como a integração energética tem ajudado no desenvolvimento de equipamentos mais eficientes que utilizam menos energia e matéria-prima. Os autores apontam para a importância da fluidodinâmica computacional (CFD) nos avanços, pois são integradas as características dos processos de aquecimento, fluxo, transferência de calor, controle e otimização da fornalha. Além disso, os fornos modernos têm softwares para melhoria da eficiência energética em termos de desempenho de combustão, que podem alterar o design do queimador e a porcentagem ideal de oxigênio para a queima. Outro avanço é a recuperação e adequação dos gases utilizados, reduzindo o consumo e aumentando a eficiência, os fornos modernos conseguem ser de 26 a 50% mais eficientes.

O mecanismo de troca térmica entre o ar de combustão e os gases exaustos resulta no ar de combustão com temperaturas elevadas sendo bombeado para dentro da fornalha para queimar o combustível, o que melhora tanto o processo de combustão quanto a eficiência dos fornos (MALLIKARJUNA 2014). De acordo com INAYAT (2023) existem geralmente 3 categorias de pré-aquecedores de ar comumente usados e categorizados como regeneradores: regeneradores rotativos, regeneradores circulares e recuperadores. Embora sejam projetadas de forma diferente e usadas por motivos diferentes, essas tecnologias operam com uma teoria semelhante à dos pré-aquecedores de ar. A *Figura 3* mostra uma ilustração do mecanismo de trabalho do pré-aquecedor de ar. O ar quente troca calor em contracorrente com os gases de combustão por meio de trocadores de ar casco tubo.

*Figura 3 – Mecanismo do pré- aquecedor de ar*



Fonte: INAYAT, 2023

As técnicas de análise energética têm sido utilizadas para otimização de processo convencionais, no entanto, projetos novos têm sido desenvolvidos baseados nos conceitos também. El-Shafie *et al.* (2021) fizeram uso delas para definir os parâmetros de um forno-regenerador de vidro para produção de hidrogênio via decomposição térmico-catalítica de amônia. A análise permitiu verificar que o calor recuperado pelo ar de combustão do regenerador tem influência com a presença de incrustações do trocador de calor, reduzindo a taxa térmica entre os fluido e consequentemente o de reaproveitamento do calor.

Outra maneira de melhorar a eficiência energética foi estudada por Shan *et al.* (2021), os autores utilizaram os princípios de energia radioativa e exergia para desenvolver um modelo que previsse as melhores condições para a combustão do oxi-combustível utilizado num forno unidimensional. O estudo visa otimizar o processo alterando diferente parâmetros como: temperatura, pressão e razão molar. O trabalho concluiu que aumento na pressão total e na razão oxigênio/combustível aumenta a energia radiativa total e exergia, enquanto a pressão maior que 5 bar não tem efeito significativo. Ou seja, não é preciso gastar com energia para manter o sistema em pressões elevadas, como era pensado anteriormente.

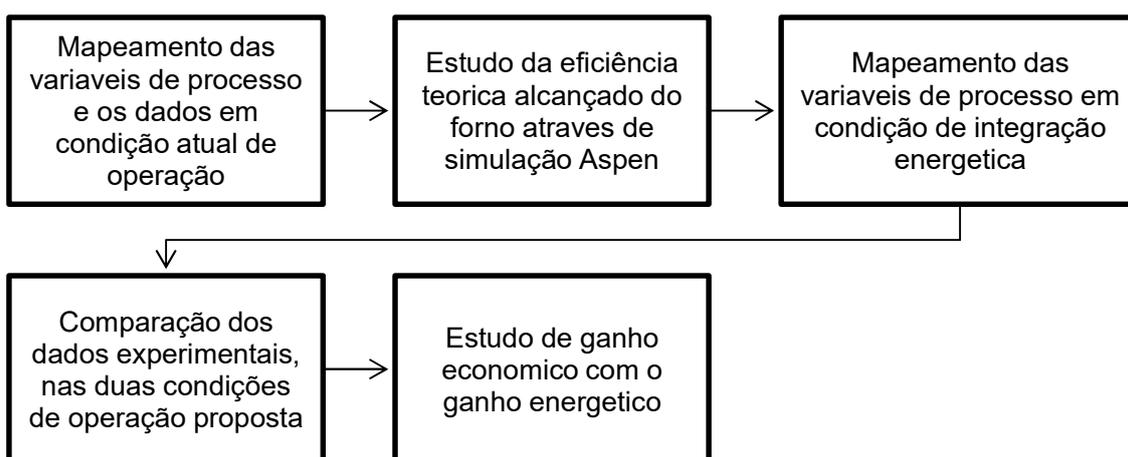
Os trabalhos apresentados mostram o potencial do tema e sua capacidade de otimizar a energia de processos variados, principalmente aqueles que utilizam muita energia e, por consequência, tem muitas perdas, como fornos. No entanto, os trabalhos não discutem os ganhos financeiros que o conceito pode permitir.

### 3 Materiais e Métodos

O procedimento utilizado para realizar a avaliação energética do sistema de recuperação de calor em fornos de oxidação de zinco será desenvolvido ao longo desta seção. Primeiramente, serão realizados o descritivo do sistema de oxidação de zinco e o aparato montado em campo, objeto de estudo desta pesquisa, em seguida apresentado os resultados da simulação desenvolvida em software comercial, comparados com os resultados coletados e armazenados em campo com a integração energética.

A Figura 4, apresenta um fluxograma com a abordagem metodológica proposta onde inicialmente as condições operacionais foram mapeadas em condição de operação normal do forno. Estudos teóricos sucederam o trabalho, para obter a eficiência teórica que o forno poderia alcançar para comparar com os dados obtidos com os experimentos realizados em campo, obtendo assim ganhos energéticos teóricos e reais.

Figura 4 - Fluxograma de metodologia



#### 3.1 Projeto EMBRAPII - Eficiência Energética

O projeto Eficiência Energética, firmado em parceria do SENAI CIMATEC com a NEXA Resources, tendo como fomento EMBRAPII, e como desafio estudar alternativas energéticas para os fornos de ZnO presentes na unidade da NEXA em Três Marias/ MG. O projeto é composto pelo desenvolvimento e fabricação de um SKID, com a finalidade de estudar a eficiência de queima através dos testes com diferentes combustíveis líquidos, enriquecimento do ar primário com oxigênio e instalação de um recuperador de calor para pré-aquecimento do ar primário, através dos gases de combustão.

A NEXA Resources é uma empresa global de mineração e metalurgia de metais não-ferrosos, resultado da fusão da brasileira Votorantim Metais e a peruana Milpo.

Está entre as cinco maiores produtoras mundiais de zinco, ocupando posição de liderança na América Latina e conta com um portfólio diversificado, que contempla também: cobre (Cu), chumbo (Pb), prata (Ag) e outros minérios. A unidade de Três Marias, está localizada no estado de Minas Gerais, e tem como objetivo a produção e refino de zinco. Suas operações começaram em 1969, e, em 2021, produziu cerca de 163.7 mil toneladas de zinco metálico e 40.9 mil toneladas de óxido de zinco.

*Figura 5 – Bateria de Fornos de Produção de Óxido de Zinco da NEXA Resources*



A EMBRAPPII (Associação Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial) é uma Organização Social fomentada pelo Poder Público Federal que, desde 2013, ampara instituições de pesquisa tecnológica promovendo a inovação na indústria brasileira. Os projetos de pesquisa com fomento da EMBRAPPII iniciam pela identificação das oportunidades por instituições de pesquisa tecnológica e empresas industriais, em prol do fortalecimento da capacidade de inovação brasileira.

O SENAI CIMATEC, centro integrado de manufatura e tecnológica, foi um dos primeiros institutos de ciência e tecnologia (ICT) do Brasil a se tornar credenciado pela EMBRAPPII para atendimento na área de Soluções Industriais com um programa avançado de suporte tecnológico para promover a pesquisa aplicada nas tecnologias integradas da manufatura para atender a indústria brasileira, com desenvolvimento de projetos nos setores: Automação industrial; robótica; e Otimização de processos industriais.

### **3.1.1 Descrição do Sistema**

O zinco consiste em um dos elementos químicos mais comuns na crosta terrestre, em sua forma metálica o zinco é um metal branco-azulado, brilhante, de baixo ponto de fusão, 419,5°C, com boa fusibilidade. Sua principal aplicação é no processo de galvanização do aço ou do ferro para protegê-los do processo de corrosão, utilizando assim o zinco como metal de sacrifício.

Óxido de Zinco, composto químico de cor branca amplamente utilizada na produção de tintas, produtos farmacêuticos, cerâmicos, etc., é resultante do processo de oxidação do zinco metálico, em fornos industriais. O óxido é formado pela reação

Zinco no estado gasoso com o oxigênio presente no ar ambiente, conforme a Eq. ( 1 ). O vapor de zinco é produzido em cadinhos de grafite a partir do zinco metálico, onde o zinco é alimentado diretamente no cadinho na forma líquida ou em barras, sendo que em ambos os casos a operação de alimentação ocorre por batelada. O óxido de zinco, após formado, é captado por dois circuitos de despoejamento (primário e secundário), sendo em seguida retido em filtros de mangas.

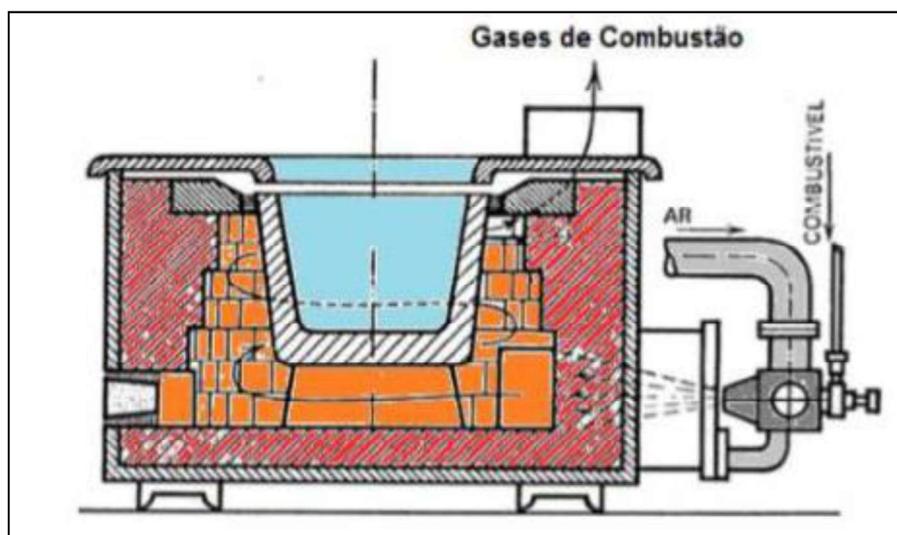


A reação de formação do óxido de zinco ocorre em altas temperaturas, sendo a mesma altamente exotérmica. A temperatura interna na câmara de combustão pode chegar a 1.200°C, sendo essa energia dissipada para atmosfera.

Um dos tipos de fornos utilizado no processo metalúrgico de produção de óxido de zinco é o tipo cadinho, este possui uma câmara concebida para acomodar um ou mais cadinhos, este que consiste no recipiente que irá acomodar o material para fusão. Estes cadinhos podem ser feitos a partir de uma variedade de materiais resistentes ao calor, que podem suportar temperaturas muito elevadas no interior do forno, durante a transferência de calor da chama para o material localizado no interior do forno. Eles podem ser feitos de cerâmica, assim como outros materiais, dependendo de como e para o que serão usados.

Nos fornos tipo cadinho, o material a ser aquecido não tem contato com os gases de combustão. A chama formada pela combustão envolve todo o cadinho e os gases gerados são removidos pela chaminé do forno, enquanto isso o material a ser fundido ou vaporizado, encontra-se isolado dentro da panela, o esquema ilustrativo do forno é apresentado na Figura 6.

Figura 6 - Forno tipo Cadinho



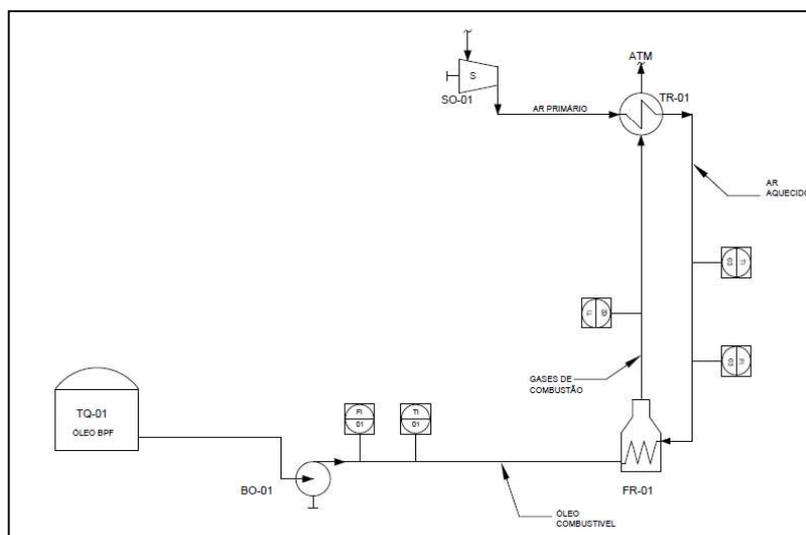
Fonte: adaptado de SITES GOOGLE, 2022.

As reações complexas que ocorrem dentro dos fornos são denominadas de combustão, que consiste em reações químicas exotérmicas, ou seja, liberam calor ao ambiente, envolvendo a oxidação de um combustível. Durante a reação de combustão são gerados diversos produtos resultantes da combinação dos reagentes utilizados.

As reações químicas que ocorrem durante a combustão de um hidrocarboneto são muito complexas, ocorrendo muitas reações intermediárias antes de chegar aos produtos da combustão:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$  e  $\text{CO}$ .

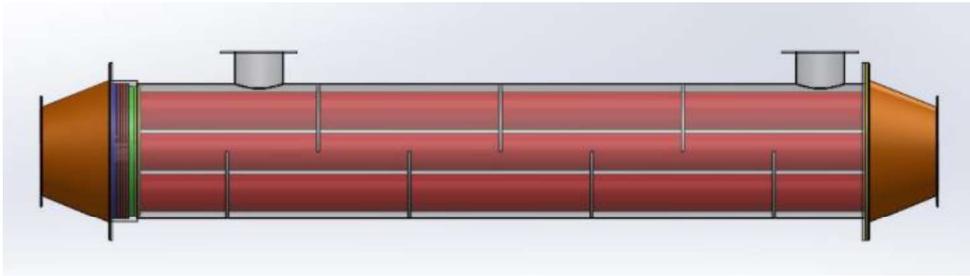
O sistema criado para estudo consiste em um pré-aquecedor de ar, tipo tubular instalado próximo do duto de exaustão dos gases de combustão do forno, conforme ilustrado na Figura 7. O processo é composto por um tanque de armazenamento de combustível (TQ-01), bomba centrífuga (BO-01) com objetivo de bombear combustível para o queimador, localizado no forno (FR-01). A seção de combustível é composta por um indicador de vazão (FI-01) e de temperatura (TI-01). O comburente da reação de combustão é alimentado por meio de um soprador (SO-01), e aquecido através dos gases de combustão no pré- aquecedor (TR-01). A seção de ar primário é composta por indicador de vazão (FI-03) e indicador de temperatura (TI-03). No duto de passagem dos gases de combustão, foi instalado um sensor, para medição e indicação da temperatura dos gases (TI-02).

Figura 7 - Fluxograma do processo de integração energética



O gás de exaustão do forno (FR-01), composto por grande carga térmica, flui via recuperador de calor composto por 5 tubos internos, conforme Figura 8, enquanto o primário, forçado por um soprador (SO-01), transcorre através da região anular do trocador de calor, ou seja, o casco que envolve os tubos internos que troca calor.

*Figura 8 - Esboço do feixe tubular do recuperador de calor*



A combustão realizada do forno, se dá através da alimentação do óleo combustível: óleo de baixo ponto de fluidez (BPF). Este que consiste em um óleo residual de alta viscosidade, obtido do refino do petróleo ou da mistura de destilados pesados, muito utilizado como combustível na indústria de modo geral em equipamentos para geração de calor, fornos, caldeiras e secadores, ou indiretamente em equipamentos destinados a produzir trabalho a partir de uma fonte térmica. É manuseado geralmente aquecido para se conseguir uma maior fluidez. O sistema apresentado foi utilizado em todos os experimentos.

A Figura 9 apresenta a chaminé por onde os gases eram liberados sem a integração energética com o trocador. Na Figura 10 é mostrado o local onde fica o tanque com óleo e o sistema de controle e indicadores.

*Figura 9 - Chaminé do forno antes da integração energética*



Figura 10 - Unidade de monitoramento dos testes



### 3.2 Método de experimentos em campo

Os testes experimentais ocorreram em um período de 15 dias, com o acompanhamento da equipe técnica no local. Os testes foram baseados em procedimentos e planejamento de testes, visando sempre manter a produção diária de óxido de zinco, está por sua vez mensurada através da alimentação do Zinco sólido no forno tipo cadinho.

Figura 11 – Localização do protótipo de apoio aos testes



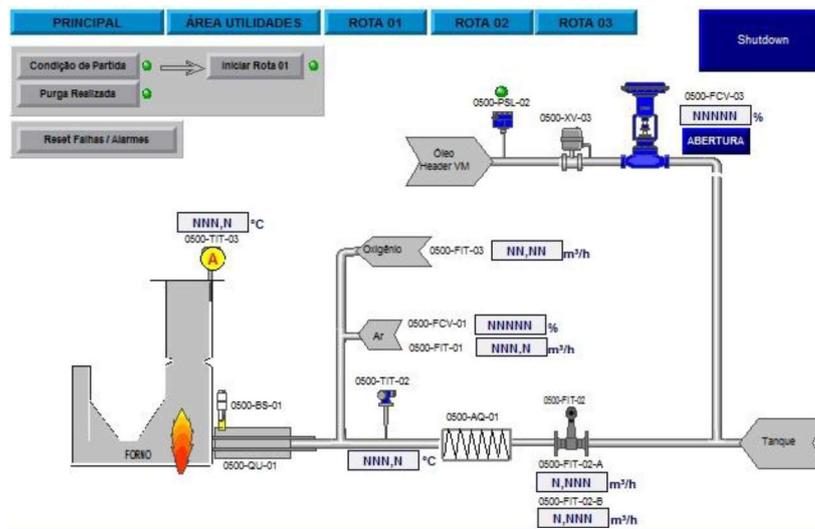
O aparato integrado ao forno de produção de óxido de zinco, possui sistema de controle e monitoramento das variáveis de processo (temperatura e vazão) do ar de combustão, combustível e gases exaustos. Os dados dos experimentos foram acompanhados através da tela de Interface Homem Máquina (IHM), conforme Figura 12. Para cada teste realizado foi configurada uma tela gráfica específica de forma

apresentar as variáveis de processo, conforme Figura 13. As variáveis de processos foram armazenadas com intervalo de tempo de 5 segundos, sendo extraído do supervisão sempre após a finalização do experimento.

Figura 12 – Localização do IHM do Skid



Figura 13 - Tela do Supervisório de acompanhamento do Testes

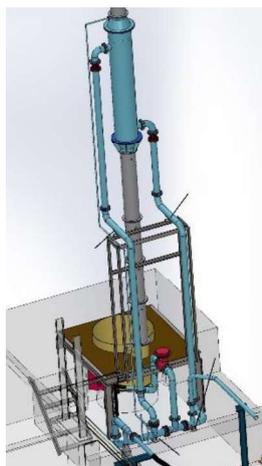


A alimentação de combustível foi realizada pelo “header” geral da unidade, sempre montada através de uma planta de orifício. A alimentação de ar primário foi oriunda de soprador instalado no skid, com todo o controle e monitoramento de vazão, pressão e temperatura. Os experimentos iniciaram com a operação habitual do forno, sem o pré-aquecimento do ar, onde foram coletados os dados e o perfil de temperatura dos gases de exaustos.

Os testes visando o pré-aquecimento do ar de combustão foi possível com aberturas e fechamento de válvulas, permitindo o direcionamento do ar oriundo do soprado para o trocador de calor, este instalado em uma das secções da chaminé do forno, conforme ilustrado na

Figura 14.

Figura 14- Vista da Instalação do recuperador de calor



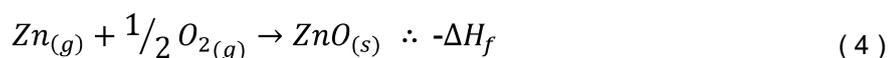
De modo a termos dados representativos da operação normal e sem intercorrências do forno, os dados extraídos do IHM (interfase homem máquina). A amostra de dados de processo, correspondente a 12 horas de operação, foram tratados retirados os momentos de abastecimento do zinco, como também episódios interrupção de fornecimento de energia elétrica.

### 3.3 Balanço de Energia no Forno

A metodologia empregada para cálculo do balanço energético no forno levou em conta as taxas de energia com base na temperatura do ar na entrada ou saída, com relação a uma temperatura de referência, esta que foi considerada 30°C. A energia disponível no combustível é dependente da vazão mássica do combustível e do seu poder calorífico inferior (PCI). A energia do ar de combustão é dada pela vazão mássica do ar, sendo dependente do calor específico a pressão constante e função da temperatura de entrada e da temperatura de referência. A temperatura final do ar da combustão foi considerada a temperatura de ebulição do zinco líquido.

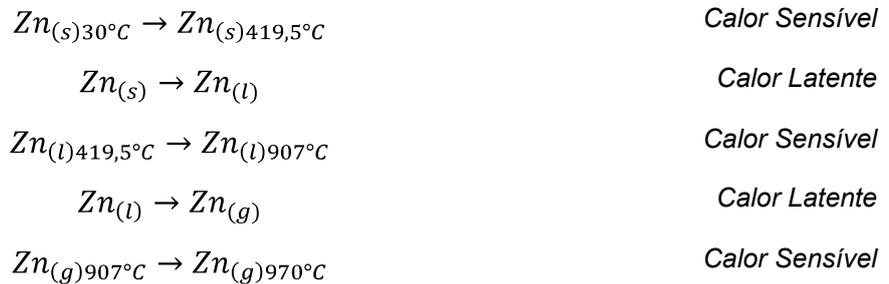
#### 3.3.1 Energia Requerida

O forno presente no processo tem como objetivo vaporizar o zinco, alimentado na forma sólida e a reagir o mesmo com o ar atmosférico gerando óxido de zinco, reação esta exotérmica, conforme as Eq.( 2 ), Eq. ( 3 ) e Eq. ( 4 ).



Para viabilização da fase de vaporização, o calor gerado no forno, além de ser necessário para aquecimento do zinco, é preciso aquecer o comburente (ar de combustão) que em operação normal adentra ao forno a 25°C.

Para base se cálculo é necessário considerar o calor sensível e latente do processo de vaporização do Zinco, este alimentado no estado solido, seguindo o processo abaixo:



Logo, para cálculo da energia necessária ( $E_n$ ), resulta no somatório das energias, sensível e latente, de transformação do zinco com a energia de aquecimento do ar de combustão, conforme Eq.( 5 ).

$$E_n = \Sigma Q_{latente\ comb} + \Sigma Q_{sensivel\ comb} + Q_{ar} \quad (5)$$

Onde  $Q_{latente\ comb}$  consiste no somatório do calor latente empregado no processo de vaporização e liquefação dos lingotes de zinco e,  $Q_{sensivel\ comb}$  o somatório da energia sensível necessária para variação da temperatura no processo para iniciar a liquefação e vaporização do zinco sólido;  $Q_{ar}$  o calor necessário para viabilizar um aumento de temperatura do ar da sua  $T_{in}$  (temperatura de entrada) a  $T_{out}$  (temperatura de saída).

### 3.3.2 Energia Disponível

A energia presente no forno é fornecida através da combustão do óleo 1A (BPF), este fornecido pela Petrobrás ( $Q_{comb}$ ), como também pela energia liberada da reação de formação de óxido de zinco, reação esta exotérmica ( $\Delta H_f$ ), apresentada na Eq. ( 6 ).

$$E_d = \Delta H_f + Q_{comb} \quad (6)$$

A energia/calor fornecido pela queima do combustível foi obtida pelo consumo mássico do óleo multiplicado pelo Poder Calorífico Inferior (PCI) do combustível, como mostrado na Eq. ( 7 ).

$$Q_{comb} = m_{comb} \times PCI \quad (7)$$

### 3.3.3 Eficiência

Uma vez calculada a energia dissipada,  $E_r$ , ao meio ambiente através dos gases de chaminé nos cenários com pré-aquecedor ( $E_{r2}$ ) e sem pré-aquecimento de ar ( $E_{r1}$ ) é possível identificar o ganho de eficiência do forno com a implementação (Eq. ( 8 ) e Eq.( 9 )).

$$E_r = E_d - E_n \quad (8)$$

$$\varepsilon = E_{r1} / E_{r2} \quad (9)$$

### 3.4 Modelagem e Simulação

A modelagem e simulação do processo da produção de óxido de zinco no software Aspen Plus foi desenvolvido através de modelos matemáticos de transferência de massa, energia e equilíbrio de fases/químico pré-existent e do banco de dados termodinâmico disponibilizados pelo software. A Tabela 2 apresenta os componentes utilizados na simulação. Todos os componentes estão presentes no banco de dados do Aspen Plus®, bem como as propriedades físicas de cada um.

Tabela 2 - Lista de componentes usados na simulação presentes Aspen Plus®.

Componentes	Tipo	Formula
Água	Convencional (Base Padrao)	H <sub>2</sub> O
Oxigênio	Convencional (Base Padrao)	O <sub>2</sub>
Nitrogênio	Convencional (Base Padrao)	N <sub>2</sub>
Monóxido de carbono	Convencional (Base Padrao)	CO
Dióxido de carbono	Convencional (Base Padrao)	CO <sub>2</sub>
Óxido nítrico	Convencional (Base Padrao)	NO
Dióxido de nitrogênio	Convencional (Base Padrao)	NO <sub>2</sub>
2-butil-5-hexilindão	Convencional (Base Padrao)	C <sub>19</sub> H <sub>30</sub>
Zinco	Convencional (Base Padrao)	Zn
Óxido de zinco	Convencional (Base Padrao)	ZnO

A modelagem do processo foi desenvolvida em dois cenários: Caso 1, representando a condição atual da unidade, com a liberação dos gases de exaustão a atmosfera, sem aproveitamento energético. Caso 2, foi representado a possibilidade de pré-aquecimento do ar de combustão com a energia presente dissipada dos gases, oriundo da queima.

Para configuração do software foi necessário considerar algumas premissas: a operação do forno ocorre em circunstâncias de baixas pressões, sem condensação, definido o uso do pacote termodinâmico "IDEAL" que define as propriedades termodinâmicas no Aspen Plus® nos bancos de dados presentes no programa.

O modelo "IDEAL" se utiliza das leis de Raoult e Henry, sendo recomendado para sistemas os quais o comportamento ideal pode ser assumido, como, por

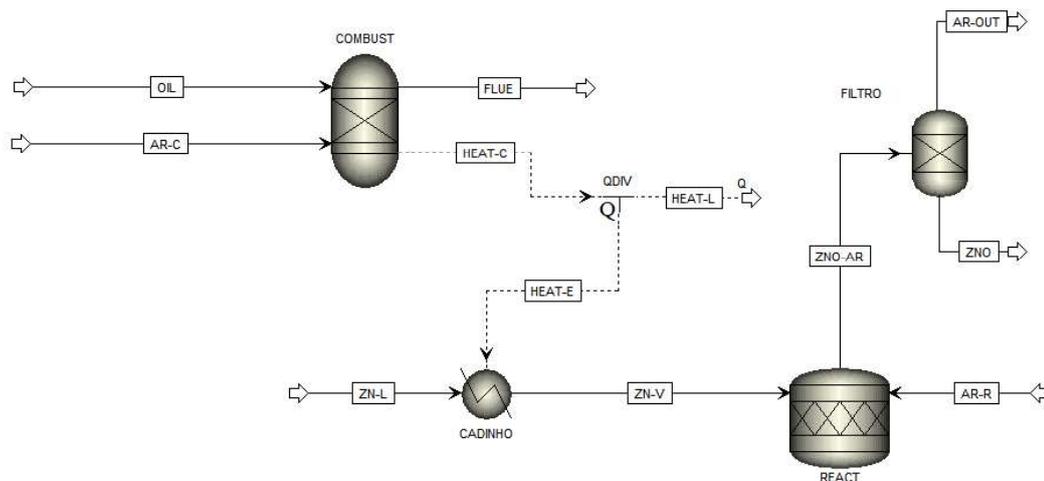
exemplo, sistemas a baixa pressão, sistema com interações muito pequenas, sistemas com e sem componentes condensáveis e ainda para o processamento de sólidos em que o equilíbrio líquido vapor não é importante, como o caso abordado.

### 3.4.1 Caso 1

O caso 1, consiste na condição atual de operação do forno de produção de óxido de zinco, cujo gases de exaustão são liberados para a atmosfera sem nenhum aproveitamento energético.

A Figura 14 apresenta o fluxograma do processo, em que o zinco metálico é liquefeito e posteriormente vaporizado utilizando trocador de calor (CADINHO). A quantidade de calor necessária para a vaporização do zinco metálico é fornecida por um forno (COMBUST), por sua vez decorrente da reação de combustão de óleo combustível. Posteriormente tem-se a reação de formação do óxido de zinco, esta que ocorre em um reator, sua separação é realizada por um filtro (FILTRO). Todas as operações unitárias já implementadas no Software foram definidas para representar o estudo de caso real na simulação.

Figura 15 - Fluxograma de processo do caso 1



O processo inicia-se através de uma reação de combustão do combustível (C19H30) apresentada no reator de Gibbs, denominado “COMBUST”, a qual fornecerá o calor necessário para ocorrer a volatilização do Zn. O reator COMBUST utiliza a rotina RGibbs, que permite modelar o equilíbrio químico multifásico e que considera a minimização da energia livre de Gibbs. A rotina RGibbs permite a melhor descrição da reação de combustão, já que está calcula por meio da minimização de Gibbs as proporções finais dos gases de combustão (CO<sub>2</sub>, CO, NO, NO<sub>2</sub>) e a entalpia da reação.

O bloco COMBUST foi alimentado com as correntes de óleo (OIL) e ar de combustão (AR-C), gerando uma corrente de gás de combustão (FLUE) e calor (HEAT-C), cuja corrente foi dividida entre o calor que alimentará a o processo de

volatilização (HEAT-E) e o calor liberado para o ambiente (HEAT-L) em uma proporção de 0,5, uma vez que nem todo calor produzido é de fato utilizado no processo. A Tabela 3 apresenta os dados de entrada para a simulação desta etapa de combustão.

Tabela 3 - Dados de entrada para a simulação da etapa de combustão

Corrente	Vazão (kg/h)	Composição molar	Temperatura (°C)	Pressão (bar)
OIL	24,5	100% C <sub>19</sub> H <sub>30</sub>	110	4,5
ARC-C	314,1	21% O <sub>2</sub> 79% N <sub>2</sub>	25	1

O calor da corrente, HEAT-E, introduzido ao trocador de calor denominado “CADINHO” possibilita a etapa seguinte de volatilização do zinco metálico. Para tal, a corrente de calor (HEAT-E), com o zinco em estado líquido da corrente, ZN-L, alimentam o cadinho, e através da rotina HEATER que realiza cálculos considerando adição ou remoção de calor. O CADINHO permite que a corrente ZN-L receba calor suficiente para a sua vaporização. O zinco volatilizado transporta-se pela corrente ZN-V e segue para um reator estequiométrico, denominado “REACT”, onde com ar presente na corrente AR-R reage formando óxido de zinco e transporta-se na corrente ZNO-AR para um filtro “FILTRO”. No Aspen Plus, o reator estequiométrico é denominado de RStoic, que se baseia na estequiometria e conversão das reações e na reação do óxido de zinco, que possui um rendimento de 97%. Por fim, o FILTRO tem como função separar o ZnO formado, do ar remanescente da reação. Todas as especificações de cada operação unitária do processo seguem na Tabela 4.

Tabela 4 - Dados de entrada para a simulação da etapa de volatilização do Zn.

Corrente	Vazão (kg/h)	Composição molar	Temperatura (°C)	Pressão (bar)
ZN-L	102	100% Zn	490	1
ARC-R	314,1	21% O <sub>2</sub> 79% N <sub>2</sub>	25	1

Tabela 5 - Dados de entrada para cada operações unitárias usadas.

Corrente	Calculo	Reação	Temperatura (°C)	Pressão (bar)
COMBUST	Equilíbrio químico e de fases	-	970	4,5
CADINHO	Vapor-Líquido	-	-	1
REACT	Vapor-Líquido	2Zn + O <sub>2</sub> → 2ZnO	920	1

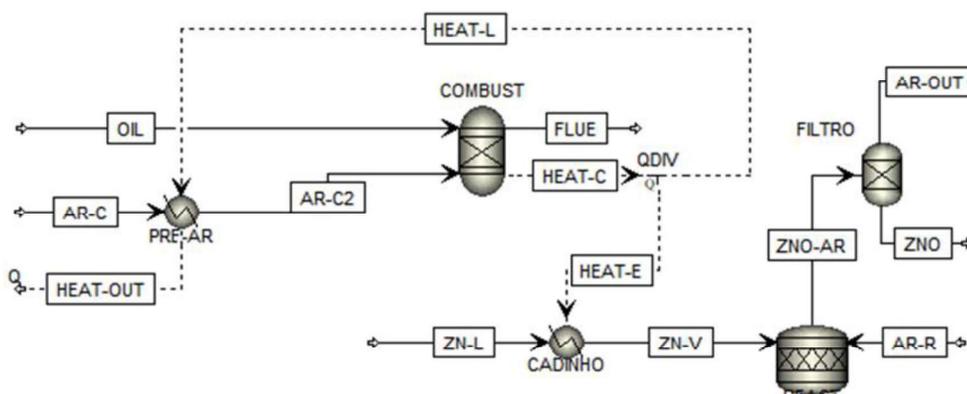
Corrente	Calculo	Reação	Temperatura (°C)	Pressão (bar)
FILTRO	Split fraction (1 ar, 0 Zn)	-	-	-

### 3.4.2 Caso 2

O caso 2, consiste na implementação de um trocador de calor, capaz de aquecer o ar de combustão com a energia térmica presente nos gases exaustos do forno. Para o segundo caso foi utilizado todas as convenções utilizadas no caso 1, porém foram feitas alterações no fluxograma visando o aproveitamento de oportunidades de melhoria no processo como objetivo -se neste trabalho.

Dessa forma, a Figura 16 apresenta o fluxograma do processo atualizado em que se nota como principais diferenças a presença de uma etapa de pré-aquecimento (Trocador de calor "PRE-AR") do ar de combustão da corrente AR-C usado no bloco "COMBUST", um ciclo desenvolvido através da utilização do calor que iria para o meio ambiente sendo direcionado para a etapa de pré-aquecimento e, por fim, não é visível no fluxograma, mas existe uma redução do consumo de combustível.

Figura 16 - Fluxograma de processo do caso 2.



No processo alterado, a corrente a AR-C vem com uma temperatura de 25°C e é pré-aquecido para 300 °C e na corrente OIL a vazão de massa de combustível passa a ser de 19 kg/h e temperatura de 112 °C. Na Tabela 6 está descrito todos os dados de entrada de correntes de processo.

Tabela 6 - Dados de entrada para a simulação caso 2

Corrente	Vazão (kg/h)	Composição molar	Temperatura (°C)	Pressão (bar)
OIL	19	100% C <sub>19</sub> H <sub>30</sub>	112	4,5
ARC-C	292,9	21% O <sub>2</sub> 79% N <sub>2</sub>	25	1
ZN-L	102	100% Zn	490	1

ARC-R	292,9	21% O <sub>2</sub> 79% N <sub>2</sub>	25	1
-------	-------	--	----	---

---

### 3.5 Análise de Viabilidade Econômica

A análise de investimentos é frequentemente indicada como um conjunto de técnicas que apoia a tomada de decisões quanto à prática investimentos, a partir da determinação da relação de grandeza entre os respectivos custos e benefícios esperados (SOARES et al., 2015). Cada alternativa proposta apresenta benefícios e custos, que devem ser confrontadas pela empresa, por meio de uma visão sistêmica de todo o processo, buscando sempre a maximização de lucro e redução do risco do investimento (GITMAN, 2005).

A exigência básica de um projeto de investimento é a geração de retorno econômico, que compense os riscos e os custos de capital envolvidos no investimento. As decisões de investimento e financiamento de um projeto de investimento podem ser separáveis, mas dificilmente podem ser independentes. O capital é um fator de produção, e como os outros fatores, tem seu custo associado.

Em empresas de mineração, onde a grande maioria das implantações de projetos no setor operacional possuem um alto custo de investimento inicial devido à robustez dos equipamentos da produção (WEG, 2015), a análise de investimento deve ser bem criteriosa. Ela deve levar em consideração algumas variáveis, tais como: vida útil econômica do projeto, valor do desembolso inicial, geração de caixa, retorno esperado, etc (GITMAN, 2005).

**Taxa Mínima de Atratividade (TMA)**, consiste na remuneração mínima para que o investimento seja considerado viável, este é um conceito econômico-financeiro utilizado para avaliar a viabilidade econômica de projetos de investimento ou decisões financeiras de longo prazo. Pode ser denominada como Taxa de Desconto ou Custo de Capital.

A TMA representa a taxa de retorno mínima esperada que um investimento precisa alcançar para ser considerado atrativo, dado o risco associado a esse investimento. Em outras palavras, é a taxa que reflete o custo de oportunidade do capital investido, ou seja, o retorno que os investidores esperam ganhar como compensação por não alocar seus recursos em outras oportunidades de investimento de risco similar. A TMA pode variar segundo o tipo de investimento, o nível de risco envolvido e as condições econômicas do mercado. Ela pode ser influenciada por fatores como a taxa de juros de mercado, a taxa de inflação, a estabilidade econômica e a percepção de risco dos investidores.

**Valor Presente Líquido (VPL)** é uma técnica de análise financeira usada para avaliar a viabilidade de um investimento ou projeto a partir do fluxo de caixa descontado, isto é, trazendo para o presente as entradas futuras. Ele é amplamente

utilizado nas áreas de finanças e gestão para tomar decisões sobre a alocação de recursos em projetos de longo prazo.

O VPL é calculado subtraindo-se o investimento inicial do projeto (ou fluxo de caixa) do valor presente de todos os fluxos de caixa futuros gerados pelo projeto, descontados a uma taxa apropriada, conhecida como taxa de desconto ou taxa mínima de atratividade (TMA).

A fórmula geral do Valor Presente Líquido é a seguinte:

$$VPL = \sum \frac{\text{Fluxo de Caixa}}{(1 + TMA)^n} \quad (10)$$

Onde "n" é o período em questão (geralmente contado em anos ou meses);

Se o VPL for positivo, isso indica que o projeto ou investimento é atrativo, pois o retorno líquido esperado é maior do que o custo do capital (TMA). Quanto maior o VPL positivo, mais atrativo é o investimento. Se o VPL for zero, o projeto gera exatamente o retorno esperado, igualando o custo do capital. Nesse caso, o investimento é considerado neutro. Caso o VPL for seja negativo, indica que o projeto provavelmente não é atrativo, pois o retorno líquido esperado é menor do que o custo do capital (TMA).

O VPL é uma ferramenta valiosa para a tomada de decisões, pois permite comparar diferentes projetos ou investimentos e selecionar aqueles que têm o maior retorno líquido esperado em relação ao custo de oportunidade do capital investido.

**Taxa Interna de Retorno (TIR)** é uma taxa de desconto hipotética, calculada a partir de uma projeção de fluxo de caixa (previsão de receitas geradas por um investimento ao longo de determinado período) quando consideramos que seu Valor Presente Líquido (VPL) é igual a zero. Na prática, ela é usada por investidores para indicar se um projeto é viável ou não. Nos casos em que a TIR é maior do que a TMA, o projeto é atrativo, pois oferece um retorno maior do que o custo de capital. Se a TIR for igual à TMA, o projeto é neutro, pois o retorno é exatamente igual ao custo de capital. Quando a TIR for menor do que a TMA, o projeto não é atrativo, pois oferece um retorno menor do que o custo de capital.

O VPL e a TIR são considerados e denominados na maioria da literatura financeira como os métodos mais tradicionais e eficientes na avaliação de projetos de investimentos. Além destes dois métodos, o critério de Período de Payback (PB) também é bastante utilizado, em grande parte, devido ao seu processamento simples.

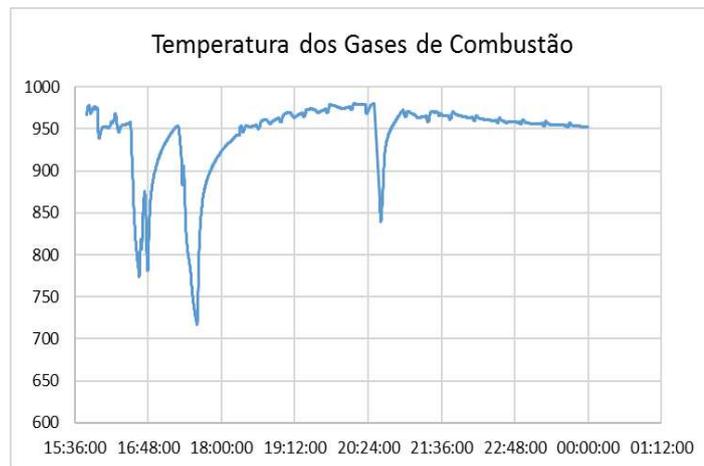
## 4 Resultados e Discussões

### 4.1 Pré-aquecimento do ar de Combustão

Os experimentos realizados, a unidade piloto acoplada ao forno de produção de zinco, operou por 15 dias horas com coletas de dados por segundo. Durante os

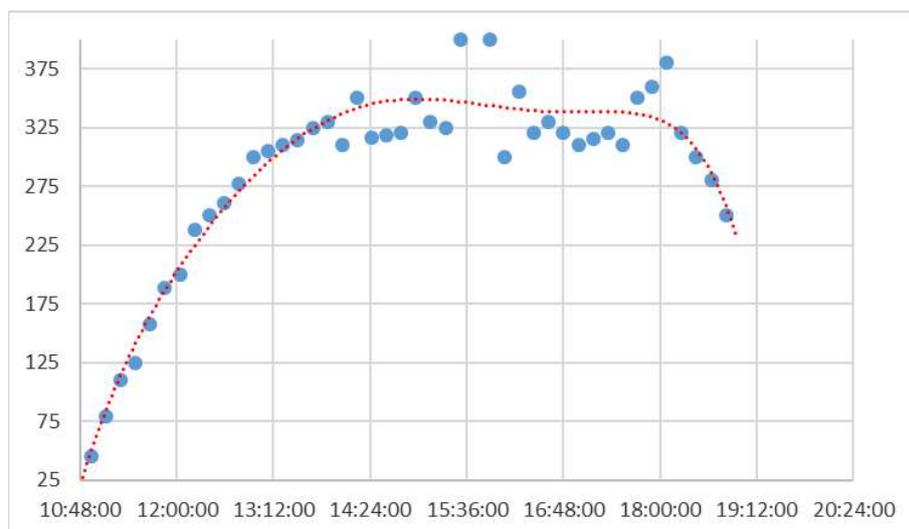
testes a máxima temperatura alcançada pelos gases de combustão foi de 980°C sendo a mínima de 900°C. A queda da temperatura dos gases de combustão ocorre devido o abastecimento do forno com zinco líquido, levando assim a redução da temperatura da câmara de combustão, o comportamento da temperatura do forno durante o teste de queima, como ilustrado na Figura 17. No procedimento de abastecimento do forno, o mesmo é aberto, permitindo dissipação de calor para o meio ambiente, além do fato do zinco abastecido encontra-se em uma temperatura abaixo da temperatura do forno, logo o mesmo acaba absorvendo calor do sistema, ocasionando queda na temperatura dos gases de combustão.

Figura 17 – Perfil de temperatura dos Gases de Exaustão



O perfil de temperatura do ar e combustão permaneceu estável, estando próximo dos 325°C, conforme Figura 18.

Figura 18 – Perfil de temperatura do ar de combustão



Os dados apresentados na Tabela 7, foram tratados e representa a média de operação do forno nos dois cenários.

Tabela 7 – Dados Experimentais

<b>Corrente</b>	<b>Unidades</b>	<b>CASO 1 (sem pré- aquecimento)</b>	<b>CASO 2 (com pré- aquecimento)</b>
Vazão de Combustível	kg/hr	24,5	<b>18,5</b>
Temp. de entrada Combustível	°C	110	110
Vazão de entrada ar de combustão	kg/hr	314,1	292,9
Temp. entrada Ar de Combustão	°C	25	<b>308</b>
Vazão de entrada Zinco	kg/hr	129,5	129,5
Temp. Gases de Combustão	°C	970,8	973,5

Ao simular os dois cenários, com e sem pré-aquecimento do ar de combustão, obtivemos como resultados uma redução 22,4% no consumo de combustível para a mesma massa de zinco processada, conforme ilustra a Tabela 8.

Tabela 8 – Resultados do Simulador Aspen ©

<b>Corrente</b>	<b>Unidades</b>	<b>CASO 1 (sem preaquecimento)</b>	<b>CASO 2 (com pré- aquecimento)</b>
Vazão de Combustível	kg/hr	24,5	<b>19</b>
Temp. de entrada Combustível	°C	110	112
Vazão de entrada ar de combustão	kg/hr	314,1	292,9
Temp. entrada Ar de Combustão	°C	25	<b>300</b>
Vazão de entrada Zinco	kg/hr	102	102
Temp. Gases de Combustão	°C	970	950

Ao comparar os dados obtidos experimentalmente com o resultado das simulações é possível identificar convergência, apresentando uma diferença aproximada de 3%. Esta variação pode ser em virtude da premissa adotada na simulação, em se utilizar um combustível semelhante em números de carbono, entretanto não considerando os teores de nitrogênio, cinzas, enxofre e água presente.

O uso da integração do processo permite a redução da energia necessária, pois utiliza a energia proveniente da queima do combustível. Este processo demanda o controle da vazão visando manter a variável de processo temperatura da câmara de combustão controlada. O controle do combustível entre os cenários resultou em uma redução de 56 ton/ano de combustível, equivalente a 22,4% de redução.

O resultado alcançado converge com o estudo realizado por Hasanuzzaman *et al.* (2012), este que revisou a eficiência energética e estratégias de economia da combustão baseado no uso de pré-aquecedores de ar, e obteve uma redução de 25% de energia.

Zhao *et al.* (2021) em seu estudo também apresentaram o potencial da recuperação de calor com os gases gerados, reduzindo o consumo de combustível e aumentando a eficiência, o afirmando que nos fornos modernos a integração entre processo acarreta um aumento de eficiência de 26 a 50%.

A redução do consumo de combustível com a integração entre correntes no processo, além de favorecer a reduções de custos de OPEX na empresa, favorece também a redução da emissão de CO<sub>2</sub>. No caso apresentado, a redução diária de 144 kg de óleo combustível, equivale a uma redução de 528 Kg/dia de CO<sub>2</sub> emitidos para a atmosfera, levando em consideração que a combustão foi completa. Logo, além de benefícios econômicos, permite benefícios ambientais e sustentáveis a empresa. O efeito observado do uso de pré-aquecimento do ar em sistemas visando melhorar a eficiência de fornos foi analisado por Aisyah *et al.* (2015), obtendo um aumento na eficiência da combustão de até 6,75% e redução na emissão de CO<sub>2</sub> em até 49,06%.

A introdução do pré-aquecedor de ar pretende aumentar a eficiência térmica a fim de reduzir o consumo de combustível a ser queimado, seu uso conduz uma elevação da temperatura adiabática de chama, com conseqüente aumento da taxa de calor absorvido na zona de radiação e redução na zona de convecção, para uma mesma carga térmica, redução da temperatura de saída dos gases de combustão, aumento da eficiência térmica do forno e diminuição do consumo de combustível. Os pré-aquecedores, do tipo recuperativos, são aqueles em que o calor é transferido dos gases de combustão para o ar através de um trocador de calor tubular, no qual o ar a ser aquecido passa por dentro dos tubos, enquanto os gases atravessam o feixe tubular externamente.

## 4.2 Análise de Viabilidade Econômica

A análise de viabilidade econômica do projeto, levou em consideração algumas premissas, como:

- O desenvolvimento do projeto e a fabricação do trocador de calor realizados internamente no SENAI CIMATEC, aproveitando a interdisciplinaridade do centro tecnológico como também a infraestrutura existente na área de fábrica piloto, totalizando um valor de venda de R\$ 300.000,00 (trezentos mil reais).
- O valor de comercialização do óleo combustível BPF pela Petrobras, foi obtido mediante uma empresa parceira do CIMATEC a Petrobras no ano de 2023. Esse valor pode ter variação a depender do modelo de contrato hoje existente entre a petrolífera com NEXA Resources. O valor comercializado é de R\$3,56/litro, o que fundamenta a redução de R\$187.144,00/ano em óleo combustível.

Figura 19 - Redução de custos

REDUÇÃO DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL	REDUÇÃO DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL	VALOR DO COMBUSTÍVEL	REDUÇÃO
Kg/h	Kg/ano	R\$/kg	R\$/ano
6	52.560	3,56	187.114

- A análise foi realizada para período de 10 anos, baseado no prazo estipulado para depreciação de máquinas e equipamentos pela Secretaria da Receita Federal, no artigo 305 do RIR/99.
- Além do custo do investimento, foi considerado um custo de manutenção, correspondente a 10% do valor do ativo.
- O setor de mineração no cenário nacional apresenta um alto nível de competitividade, no qual as empresas cada vez mais precisam buscar melhorias contínuas. Devido a isso, a análise de investimento é muito importante. A taxa mínima de atratividade (TMA), considerada, foi de 9,5%.
- A análise econômica, levou em consideração a cotação do Euro de R\$ 5,4 (Cinco reais e quarenta centavos).

Com base nas premissas apontadas acima, e com os resultados de redução de consumo de combustível alcançados, foram cálculos os fatores para análise de viabilidade econômica, juntamente com a taxa de retorno do investimento. O primeiro fator calculado foi a Valor presente líquido, Eq. ( 10 ), que totaliza em 10 anos montante de R\$ 358.694,38.

Figura 20 - Memória de cálculo do Valor Presente

PERIODO	CUSTO	RECEITA	FLUXO DE CAIXA	VALOR PRESENTE
0	R\$ 300.000	R\$ -	R\$ (300.000)	R\$ (300.000,00)
1	R\$ 30.000	R\$ 187.114	R\$ 157.114	R\$ 130.928,00
2	R\$ 30.000	R\$ 187.114	R\$ 157.114	R\$ 109.106,67
3	R\$ 30.000	R\$ 187.114	R\$ 157.114	R\$ 90.922,22
4	R\$ 30.000	R\$ 187.114	R\$ 157.114	R\$ 75.768,52
5	R\$ 30.000	R\$ 187.114	R\$ 157.114	R\$ 63.140,43
6	R\$ 30.000	R\$ 187.114	R\$ 157.114	R\$ 52.617,03
7	R\$ 30.000	R\$ 187.114	R\$ 157.114	R\$ 43.847,52
8	R\$ 30.000	R\$ 187.114	R\$ 157.114	R\$ 36.539,60
9	R\$ 30.000	R\$ 187.114	R\$ 157.114	R\$ 30.449,67
10	R\$ 30.000	R\$ 187.114	R\$ 157.114	R\$ 25.374,72

O valor da taxa interna de retorno (TIR) calculada foi de 52%, a mesma supera o valor de TMA, o que indica que o projeto é viável, tendo uma taxa de retorno a Nexa Resources menor de 2 anos e meio.

#### 4.2.1 Taxação de Carbono

A taxaço de carbono é uma política ambiental cuja finalidade é reduzir as emissões de gases de efeito estufa, como o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), que cooperam para as mudanças climáticas. Essas políticas propõem-se criar incentivos econômicos para que empresas e indivíduos reduzam suas emissões de carbono, ao mesmo tempo, em que geram receitas para financiar iniciativas de mitigação das mudanças climáticas.

A taxaço de carbono abarca a aplicação de um imposto sobre as emissões de carbono provenientes de fontes de combustíveis fósseis, como carvão, petróleo e gás natural. Esse imposto é geralmente baseado na quantidade de dióxido de carbono emitida por tonelada. O preço do carbono incentiva as empresas a buscar maneiras mais eficientes e limpas de operar, reduzindo suas emissões para evitar custos adicionais.

A política de taxaço de carbono já está em vigor na união Europeia, em 2023 a taxa paga por empresas emissoras de carbonodentro do ETS (Sistema de Comércio de Emissões, na sigla em inglês), bateu recorde e superou € 100 (Cem euros).

Se o Brasil apresentasse uma política de taxaço de carbono com valores similares aos praticados na Europa, a empresa em questão teria como receita o somatório do custo associado a redução do consumo de combustível como também o custo associado a redução de emissões de carbono.

O cálculo de redução de emissões de carbono teve como premissa que a reação de combustão completa do combustível, em proporções estequiométricas, conforme a Eq. ( 11 ), resultando uma receita de R\$ 91.968 mil reais ao ano, conforme a Figura 21.



Figura 21 – Calculo de taxaço de carbono

REDUÇÃO DE EMISSÕES DE CO <sub>2</sub>	TAXAÇÃO CO <sub>2</sub>	REDUÇÃO CO <sub>2</sub>	REDUÇÃO CO <sub>2</sub>
ton/ano	€/ton	€/ano	R\$/ano
170	100	17.031	91.968

Segundo os dados e as premissas apontadas acima, os fatores para análise de viabilidade econômica, foram calculadas obtendo valor presente líquido de R\$ 1.238.349,23.

Figura 22 - Memória de cálculo do Valor Presente com taxaço de carbono

PERIODO	CUSTO	RECEITA	FLUXO DE CAIXA	VALOR PRESENTE
0	R\$ 300.000	R\$ -	R\$ (300.000)	R\$ (300.000,00)
1	R\$ 30.000	R\$ 272.774	R\$ 242.774	R\$ 222.137,59
2	R\$ 30.000	R\$ 272.774	R\$ 242.774	R\$ 203.255,19
3	R\$ 30.000	R\$ 272.774	R\$ 242.774	R\$ 185.977,85
4	R\$ 30.000	R\$ 272.774	R\$ 242.774	R\$ 170.169,13
5	R\$ 30.000	R\$ 272.774	R\$ 242.774	R\$ 155.704,21
6	R\$ 30.000	R\$ 272.774	R\$ 242.774	R\$ 142.468,86
7	R\$ 30.000	R\$ 272.774	R\$ 242.774	R\$ 130.358,55
8	R\$ 30.000	R\$ 272.774	R\$ 242.774	R\$ 119.277,65
9	R\$ 30.000	R\$ 272.774	R\$ 242.774	R\$ 109.138,67
10	R\$ 30.000	R\$ 272.774	R\$ 242.774	R\$ 99.861,53

O valor da taxa interna de retorno (TIR) calculada foi de 81%, a mesma também supera o valor de TMA, o que indica que o projeto é viável, entretanto a taxa de retorno foi menor à comparada com o primeiro cenário, menor que 1 ano e meio.

## **5 Conclusão e Sugestões para Trabalhos Futuros**

Com base no estudo realizado, é possível concluir que a integração entre as correntes de gases exaustos e ar de combustão é uma possibilidade promissora nos aspectos técnicos, ambientais e econômicos. A mesma proporciona redução significativa no consumo de combustível, redução das emissões de gasosas e início da sustentabilidade nas indústrias.

A integração entre correntes de gases de combustão e ar colaboram para o desenvolvimento de processos mais sustentáveis, somando a esta iniciativa estudos acerca da transição energética, com o consumo de combustíveis verdes, converge para redução das emissões e de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

O projeto apresentou grande viabilidade econômica com tempo de retorno do investimento inferior a 2 anos e meio no cenário político atual do Brasil. A implementação do recuperador de calor, ocasionou um a redução de 22,4% no consumo de combustível, o que equivale a 56 ton/ano de combustível e 528 kg/dia de CO<sub>2</sub> que deixa de ser emitido a atmosfera.

## 6 Referências

- AISYAH, Lies; RULIANTO, Dimitri; WIBOWO, Cahyo S. **Analysis of the effect of preheating system to improve efficiency in LPG-fuelled small industrial burner**. *Energy Procedia*, v. 65, p. 180-185, 2015.
- BEJAN, A. **Advanced Engineering Thermodynamics**. New Jersey: John Wiley and Sons, ed 4, 2016.
- BEN. **Balanco Energético Nacional, EPE**; Disponível em <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>, 2017.
- BENALI, T; TONDEUR, D; JAUBERT, J. **An improved crude oil atmospheric distillation process for energy integration: Part I: Energy and exergy analyses of the process when a flash is installed in the preheating train**. *Applied Thermal Engineering*, v. 32, p. 125-131, 2012.
- BRASIL. **Anuário Estatístico do Setor Metalúrgico - 2015: Siderurgia, Ferro-gusa, Ferroligas, Metais não-ferrosos, Fundição**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, p. 108, 2015.
- CARVALHO, P. S. L. D.; MESQUITA, P. P. D.; ARAÚJO, E. D. G. D. **Sustentabilidade da siderurgia brasileira: eficiência energética, emissões e competitividade**. *BNDES Setorial*, v. 41, p. 181-236, 2015.
- CENGEL, Y. A.; MICHAEL, A. B. **Termodinâmica Uma Abordagem de Engenharia**. McGraw-Hill, 2008.
- CHEN L, YANG B, SHEN X, XIE Z, SUN F. **Thermodynamic optimization opportunities for the recovery and utilization of residual energy and heat in China's iron and steel industry: A case study**. *Appl Therm Eng* 2015
- DINCER, I.; ROSEN, M. A. **Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development**. Oxford: Elsevier, ed 1, 2007.
- EL-SHAFIE, M.; KAMBARA, S.; HAYAKAWA, Y.; HUSSIEN, A. A. **Integration between Energy and Exergy Analyses to Assess the Performance of Furnace Regenerative and Ammonia Decomposition Systems**. *Renewable Energy*, v. 175, p. 232–243, 2021.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Análise Da Eficiência Energética Em Seguintos Industriais Selecionados - Segmento Cadeia Siderúrgica**, p. 187, 2018.
- ENSINAS, A.; V. **Integração Térmica e Otimização Termoeconômica Aplicadas Ao Processo Industrial de Produção de Açúcar e Etanol a Partir Da Cana-de-Açúcar**, p. 207, 2008.
- FREIRE, R.; M.; M. **Avaliação Termoeconômica de Propostas de Unidades de Cogeração de Energia: Um Estudo de Caso Com Gás de Síntese, Gás Natural e Biogás**, 2018.

- GAO, J.; LI, C.; LIU, W.; HU, J.; WANG, L.; LIU, Q.; LIANG, B.; YUE, H.; ZHANG, G.; LUO, D.; TANG, S. **Process Simulation and Energy Integration in the Mineral Carbonation of Blast Furnace Slag**. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, v. 27, p. 157–67, 2019.
- GUNDERSEN, T. **A process integration primer-implementing agreement on process integration Trondheim**. *International Energy Agency, SINTEF Energy Research, Norway*, 2000.
- HASANUZZAMAN, M.; RAHIMAM, N. A.; HOSENUZZAMANB, M.; SAIDUR, R.; MAHBUBUL, I. M.; RASHIDD, M. M. **Energy Savings in the Combustion Based Process Heating in Industrial Sector**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.16, p. 4527–4536, 2012.
- JOUHARA H, KHORDEHGAH N, ALMAHMOUD S, DELPECH B, CHAUHAN A, TASSOU SA. **Waste heat recovery technologies and applications**. *Thermal Sci Eng Progr* 2018
- KATSUKI, M.; HASEGAWA, T. **The Science and Technology of Combustion in Highly Preheated Air**. *Symposium (International) on Combustion*, v. 27, p. 3135–3146, 1998.
- KOTAS, T. J. **The Exergy Method of Thermal Plant Analysis**. *Elsevier*, 1985.
- KUMAR, B.; GOUR, G. R.; PRODIP, K. S. **Comparative Exergy Analysis between Rotary Hearth Furnace-Electric Arc Furnace and Blast Furnace-Basic Oxygen Furnace Steelmaking Routes**. *Energy and Climate Change*, v. 1, p. 100016, 2020.
- LI, Z.; ZHANG, X.; LAI, N.; JIANG, Z.; LI, J. **A Novel Process for Coke Wastewater Gasification Quenching: Energy and Exergy Analysis**. *Applied Thermal Engineering*, v. 191, p. 116863, 2021.
- MALLIKARJUNA V, JASHUVA N, REDDY B. **Improving boiler efficiency by using air preheater**. *Int J Adv Res Eng Appl Sci* 2014
- MELONI, P. S. R. **Proposta para melhoria da eficiência energética em uma indústria metalúrgica**. 2020.
- MEN Y, LIU X, ZHANG T. **A review of boiler waste heat recovery technologies in the medium-low temperature range**. *Energy* 2021
- MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. **Fundamentals of Engineering Thermodynamics**. John Willey & Sons. *Inc: London*, 2006.
- NICHOLSON R. **Recuperative and regenerative techniques at high temperature**. *J Heat Recov Syst* 1983
- NOORPOOR, A. R.; MAZARE, F. **Conventional and Advanced Exergetic and Exergoeconomic Analysis Applied to an Air Preheater System for Fired Heater ( Case Study : Tehran Oil Refinery Company )**. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering (IJCCE)*, v. 37, n. 4, p. 205-219, 2018.
- PERLINGEIRO, C. A. G. **Engenharia de processos: análise, simulação, otimização e síntese de processos químicos**. *Editores Blucher*, 2005.

- PILI R, MARTÍNEZ LG, WIELAND C, SPLIETHOFF H. **Techno-economic potential of waste heat recovery from German energy-intensive industry with Organic Rankine Cycle technology.** *Renew Sustain Energy Rev* 2020
- ROSADO, D. J. M.; CHÁVEZ, S. B. R.; GUTIERREZ, J. A.; DE ARAÚJO, F. H. M.; DE CARVALHO JR, J. A.; MENDIBURU, A. Z. **Energetic Analysis of Reheating Furnaces in the Combustion of Coke Oven Gas, Linz-Donawitz Gas and Blast Furnace Gas in the Steel Industry.** *Applied Thermal Engineering*, v. 169, p. 114905, 2020.
- ROSEN, M. A.; DINCER, I. **Sectoral energy and exergy modeling of Turkey.** 1997.
- SÁ, A. F. R. **Guia de aplicações de gestão de energia e eficiência energética.** 2010.
- SARCO S. **An explanation of specialist boiler types and other specialist features.** Cheltenham: Spirax Sarco; 2011
- SERT, S.; BALKAN, F. **Determination of Avoidable & Unavoidable Exergy Destructions of Furnace- Air Preheater Coupled System in a Petrochemical Plant.** *Journal of Thermal Engineering*, v. 2, n. 3, p. 794-800, 2016.
- SHAN, S.; CHEN, B.; ZHOU, Z.; ZHANG, Y. **Spectral Radiative Energy and Exergy Analysis of Oxy-Fuel Gaseous Media in One-Dimensional Furnace Cases.** *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, v. 270, p. 107721, 2021.
- SHEKARCHIAN, M.; Zarifi, F.; MOGHAVVEMI, M.; MOTASEMI, F.; MAHLIA, T. M. I. **Energy, Exergy, Environmental and Economic Analysis of Industrial Fired Heaters Based on Heat Recovery and Preheating Techniques.** *Energy Conversion and Management*, v. 71, p. 51-61, 2013.
- SITES GOOGLE; **IFRS Tecnologia em Processos Metalúrgicos;** Disponível em <https://sites.google.com/site/tecnologiaprocessometalurgico/fundicao-i/2-fornos/1-f-cadinho>; Último acesso em 07 de Março de 2022.
- SMITH, J. M.; VAN NESS, H. C.; ABBOTT, M. M.; GARCÍA, C. R. **Termodinamica Introducción a La Termodinámica En Ingeniería Química.** *McGraw-Hill*, 2007.
- VIANA, F. L. **Caderno Setorial ETENE. Banco Do Nordeste,** 2017.
- VIVANTE; **Redução de energia em indústria.** Disponível em <https://vivante.com.br/blog/reducao-de-energia-em-industria-sustentabilidade>, 2020.
- WANG HY, ZHAO LL, ZHOU QT, XU ZG, KIM HT. **Exergy analysis on the irreversibility of rotary air preheater in thermal power plant.** *Energy* 2008
- WANG, D.; LING, X.; PENG, H.; LIU, L.; TAO, L. **Efficiency and optimal performance evaluation of organic Rankine cycle for low grade waste heat power generation.** *Energy*, v. 50, p. 343-352, 2013.
- WARK, K. **Advanced Thermodynamics for Engineers.** *New York: McGraw-Hill*, 1995.

- WU, S. R.; CHEN, C. H.; CHUNG, I. L.; LEE, H. T. **Combustion of Low-Calorific Waste Liquids in High Temperature Air.** *Fuel*, v. 90, n. 8, p. 2639-2644, 2011.
- YANG, Q.; YANG, Q.; XU, S.; ZHANG, D.; LIU, C.; ZHOU, H. **Optimal Design, Exergy and Economic Analyses of Coal-to-Ethylene Glycol Process Coupling Different Shale Gas Reforming Technologies.** *Energy*, v. 228, p. 120535, 2021.
- YUAN, B.; ZHANG, Y.; DU, W.; WANG, M.; QIAN, F. **Assessment of Energy Saving Potential of an Industrial Ethylene Cracking Furnace Using Advanced Exergy Analysis.** *Applied Energy*, v. 254, p. 113583, 2019.
- ZHANG H, WANG H, ZHU X, QIU Y-J, LI K, CHEN R, *et al.* **A review of waste heat recovery technologies towards molten slag in steel industry.** *Appl Energy* 2013
- ZHAO, J.; MA, L.; ZAYED, M. E.; ELSHEIKH, A. H.; LI, W.; YAN, Q.; WANG, J. **Industrial Reheating Furnaces: A Review of Energy Efficiency Assessments, Waste Heat Recovery Potentials, Heating Process Characteristics and Perspectives for Steel Industry.** *Process Safety and Environmental Protection*, v. 147, p. 1209-1228, 2021.
- ZIEBIK, A.; STANEK, W. **Influence of Blast-Furnace Process Thermal Parameters on Energy and Exergy Characteristics and Exergy Losses.** *International Journal of Energy Research*, v. 30, n. 4, p. 203-219, 2006.

## **Produção Técnica e Científica**

- TORRES, F.; PELLEGRINI, F.; SANTOS, A.; CARVALHO, L. **Avaliação da eficiência energética e exergética de um sistema com pré-aquecedor de ar em uma planta metalúrgica.** Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 2020.
- TORRES, F.; PELLEGRINI, F.; VILLARDI, H.; CALIXTO, E. **Preheating in industrial ovens review on energy efficiency, residual heat recovery potential, for the metallurgy industry.** VIII International Symposium on Innovation and Technology (SIINTEC), 2022.

## **7 Anexos**

### **7.1 Memorial de Cálculo Aspen – Caso 1 e Caso 2**



AR-C AR-OUT AR-R FLUE OIL.....	10
ZN-L ZN-V ZNO ZNO-AR.....	10
HEAT-C HEAT-E HEAT-L.....	11
UTILITY SECTION.....	12
UTILITY USAGE: U-1 (GENERAL).....	12
PROBLEM STATUS SECTION.....	13
BLOCK STATUS.....	13

RUN CONTROL SECTION

RUN CONTROL INFORMATION

-----

THIS COPY OF ASPEN PLUS LICENSED TO

TYPE OF RUN: NEW

INPUT FILE NAME: \_2337rlz.inm

OUTPUT PROBLEM DATA FILE NAME: \_2337rlz  
LOCATED IN:

PDF SIZE USED FOR INPUT TRANSLATION:

    NUMBER OF FILE RECORDS (PSIZE) = 0  
    NUMBER OF IN-CORE RECORDS = 256  
PSIZE NEEDED FOR SIMULATION = 256

CALLING PROGRAM NAME: apmain  
LOCATED IN: C:\Program Files\AspenTech\Aspen Plus V14.0\Engine\XeQ

SIMULATION REQUESTED FOR ENTIRE FLOWSHEET

FLOWSHEET SECTION

FLOWSHEET CONNECTIVITY BY STREAMS

-----

STREAM	SOURCE	DEST	STREAM	SOURCE	DEST
AR-C	----	COMBUST	OIL	----	COMBUST
AR-R	----	REACT	ZN-L	----	CADINHO
FLUE	COMBUST	----	HEAT-C	COMBUST	QDIV
ZNO-AR	REACT	FILTRO	ZN-V	CADINHO	REACT
AR-OUT	FILTRO	----	ZNO	FILTRO	----
HEAT-L	QDIV	----	HEAT-E	QDIV	CADINHO

FLOWSHEET CONNECTIVITY BY BLOCKS

```

-----
BLOCK          INLETS                OUTLETS
COMBUST        OIL AR-C                FLUE HEAT-C
REACT          ZN-V AR-R                ZNO-AR
CADINHO        ZN-L HEAT-E              ZN-V
FILTRO         ZNO-AR                  AR-OUT ZNO
QDIV           HEAT-C                  HEAT-L HEAT-E

```

COMPUTATIONAL SEQUENCE

SEQUENCE USED WAS:  
 COMBUST QDIV CADINHO REACT FILTRO U-1

OVERALL FLOWSHEET BALANCE

```

*** MASS AND ENERGY BALANCE ***

```

CONVENTIONAL COMPONENTS (KMOL/HR )	IN	OUT	GENERATION	RELATIVE DIFF.
WATER	0.00000	1.29395	1.29395	0.00000
OXYGE-01	4.57265	1.52979	-3.04286	0.00000
NITRO-01	17.2019	17.2017	-0.220688E-03	0.00000
CARBO-01	0.00000	0.317697E-03	0.317697E-03	0.00000
CARBO-02	0.00000	1.63896	1.63896	0.00000
NITRI-01	0.00000	0.441352E-03	0.441352E-03	0.00000
NITRO-02	0.00000	0.231416E-07	0.231416E-07	0.00000
2-BUT-01	0.947969E-01	0.851897E-02	-0.862780E-01	-0.365987E-16
ZINC	1.55987	0.467961E-01	-1.51308	-0.667256E-16
ZINC--01	0.00000	1.51308	1.51308	0.00000
TOTAL BALANCE				
MOLE(KMOL/HR )	23.4292	23.2335	-0.195682	0.151636E-15
MASS(KG/HR )	754.700	754.687		0.176253E-04
ENTHALPY(CAL/SEC )	475.236	-39828.1		1.01193

```

*** CO2 EQUIVALENT SUMMARY ***

```

FEED STREAMS CO2E	0.00000	KG/HR
PRODUCT STREAMS CO2E	72.1305	KG/HR
NET STREAMS CO2E PRODUCTION	72.1305	KG/HR
UTILITIES CO2E PRODUCTION	0.00000	KG/HR
TOTAL CO2E PRODUCTION	72.1305	KG/HR

ASPEN PLUS PLAT: WIN-X64 VER: 40.0

02/07/2024 PAGE 3

U-O-S BLOCK SECTION

BLOCK: CADINHO MODEL: HEATER

```

-----
INLET STREAM:      ZN-L
INLET HEAT STREAM: HEAT-E
OUTLET STREAM:     ZN-V
PROPERTY OPTION SET: IDEAL      IDEAL LIQUID / IDEAL GAS

```

\*\*\* MASS AND ENERGY BALANCE \*\*\*

	IN	OUT	RELATIVE DIFF.
CONVENTIONAL COMPONENTS (KMOL/HR )			
WATER	0.00000	0.00000	0.00000
OXYGE-01	0.00000	0.00000	0.00000
NITRO-01	0.00000	0.00000	0.00000
CARBO-01	0.00000	0.00000	0.00000
CARBO-02	0.00000	0.00000	0.00000
NITRI-01	0.00000	0.00000	0.00000
NITRO-02	0.00000	0.00000	0.00000
2-BUT-01	0.00000	0.00000	0.00000
ZINC	1.55987	1.55987	0.00000
ZINC--01	0.00000	0.00000	0.00000
TOTAL BALANCE			
MOLE(KMOL/HR )	1.55987	1.55987	0.00000
MASS(KG/HR )	102.000	102.000	0.00000
ENTHALPY(CAL/SEC )	20209.7	20209.7	0.00000

\*\*\* CO2 EQUIVALENT SUMMARY \*\*\*

FEED STREAMS CO2E	0.00000	KG/HR
PRODUCT STREAMS CO2E	0.00000	KG/HR
NET STREAMS CO2E PRODUCTION	0.00000	KG/HR
UTILITIES CO2E PRODUCTION	0.00000	KG/HR
TOTAL CO2E PRODUCTION	0.00000	KG/HR

\*\*\* INPUT DATA \*\*\*

TWO PHASE PQ FLASH		
SPECIFIED PRESSURE	BAR	1.00000
DUTY FROM INLET HEAT STREAM(S)	CAL/SEC	18,443.8
MAXIMUM NO. ITERATIONS		30
CONVERGENCE TOLERANCE		0.000100000

\*\*\* RESULTS \*\*\*

OUTLET TEMPERATURE	C	3130.4
OUTLET PRESSURE	BAR	1.0000
OUTLET VAPOR FRACTION		1.0000

U-O-S BLOCK SECTION

BLOCK: CADINHO MODEL: HEATER (CONTINUED)

V-L PHASE EQUILIBRIUM :

COMP	F(I)	X(I)	Y(I)	K(I)
ZINC	1.0000	1.0000	1.0000	0.61824E+15

BLOCK: COMBUST MODEL: RGIBBS

-----  
 INLET STREAMS: OIL AR-C  
 OUTLET STREAM: FLUE  
 OUTLET HEAT STREAM: HEAT-C  
 PROPERTY OPTION SET: IDEAL IDEAL LIQUID / IDEAL GAS

*** MASS AND ENERGY BALANCE ***				
CONVENTIONAL COMPONENTS (KMOL/HR )	IN	OUT	GENERATION	RELATIVE DIFF.
WATER	0.00000	1.29395	1.29395	0.00000
OXYGE-01	2.28632	0.756787E-05	-2.28632	-0.943785E-16
NITRO-01	8.60094	8.60072	-0.220688E-03	0.00000
CARBO-01	0.00000	0.317697E-03	0.317697E-03	0.00000
CARBO-02	0.00000	1.63896	1.63896	0.00000
NITRI-01	0.00000	0.441352E-03	0.441352E-03	0.00000
NITRO-02	0.00000	0.231416E-07	0.231416E-07	0.00000
2-BUT-01	0.947969E-01	0.851897E-02	-0.862780E-01	-0.365987E-16
ZINC	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
ZINC--01	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
TOTAL BALANCE				
MOLE(KMOL/HR )	10.9821	11.5429	0.560855	0.00000
MASS(KG/HR )	338.600	338.602		-0.540141E-05
ENTHALPY(CAL/SEC )	-1290.70	-1290.70		0.458024E-14

*** CO2 EQUIVALENT SUMMARY ***		
FEED STREAMS CO2E	0.00000	KG/HR
PRODUCT STREAMS CO2E	72.1305	KG/HR
NET STREAMS CO2E PRODUCTION	72.1305	KG/HR
UTILITIES CO2E PRODUCTION	0.00000	KG/HR
TOTAL CO2E PRODUCTION	72.1305	KG/HR

\*\*\* INPUT DATA \*\*\*

EQUILIBRIUM SPECIFICATIONS:

BOTH PHASE AND CHEMICAL EQUILIBRIUM ARE CONSIDERED  
 THE MAXIMUM NUMBER OF FLUID PHASES CONSIDERED IS 2  
 INCLUDING A VAPOR PHASE

SYSTEM TEMPERATURE C 970.00  
 TEMPERATURE FOR FREE ENERGY EVALUATION C 970.00  
 SYSTEM PRESSURE BAR 4.5000

FLUID PHASE SPECIES IN PRODUCT LIST:

WATER OXYGE-01 NITRO-01 CARBO-01 CARBO-02 NITRI-01 NITRO-02

2-BUT-01 ZINC ZINC--01

▲ ASPEN PLUS PLAT: WIN-X64 VER: 40.0

02/07/2024 PAGE 5

U-O-S BLOCK SECTION

BLOCK: COMBUST MODEL: RGIBBS (CONTINUED)

ATOM MATRIX:

ELEMENT	H	C	N	O	ZN
WATER	2.00	0.00	0.00	1.00	0.00
OXYGE-01	0.00	0.00	0.00	2.00	0.00
NITRO-01	0.00	0.00	2.00	0.00	0.00
CARBO-01	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
CARBO-02	0.00	1.00	0.00	2.00	0.00
NITRI-01	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00
NITRO-02	1.00	0.00	1.00	2.00	0.00
2-BUT-01	30.00	19.00	0.00	0.00	0.00
ZINC	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
ZINC--01	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00

\*\*\* RESULTS \*\*\*

TEMPERATURE	C	970.00
PRESSURE	BAR	4.5000
HEAT DUTY	CAL/SEC	-36888.
VAPOR FRACTION		1.0000
NUMBER OF FLUID PHASES		1

FLUID PHASE MOLE FRACTIONS:

PHASE OF TYPE	VAPOR
PHASE FRACTION	1.000000
PLACED IN STREAM	FLUE
WATER	0.1120990
OXYGE-01	0.6556291E-06
NITRO-01	0.7451079
CARBO-01	0.2752315E-04
CARBO-02	0.1419887
NITRI-01	0.3823574E-04
NITRO-02	0.2004834E-08
2-BUT-01	0.7380256E-03

KMOL/HR 11.54291

BLOCK: FILTRO MODEL: SEP

-----  
 INLET STREAM: ZNO-AR  
 OUTLET STREAMS: AR-OUT ZNO  
 PROPERTY OPTION SET: IDEAL IDEAL LIQUID / IDEAL GAS

▲ ASPEN PLUS PLAT: WIN-X64 VER: 40.0 02/07/2024 PAGE 6

U-O-S BLOCK SECTION

BLOCK: FILTRO MODEL: SEP (CONTINUED)

*** MASS AND ENERGY BALANCE ***			
	IN	OUT	RELATIVE DIFF.
CONVENTIONAL COMPONENTS (KMOL/HR )			
WATER	0.00000	0.00000	0.00000
OXYGE-01	1.52979	1.52979	0.00000
NITRO-01	8.60094	8.60094	0.00000

CARBO-01	0.00000	0.00000	0.00000
CARBO-02	0.00000	0.00000	0.00000
NITRI-01	0.00000	0.00000	0.00000
NITRO-02	0.00000	0.00000	0.00000
2-BUT-01	0.00000	0.00000	0.00000
ZINC	0.467961E-01	0.467961E-01	0.00000
ZINC--01	1.51308	1.51308	0.00000
TOTAL BALANCE			
MOLE(KMOL/HR )	11.6906	11.6906	0.00000
MASS(KG/HR )	416.085	416.085	-0.136615E-15
ENTHALPY(CAL/SEC )	-19760.9	-20093.6	0.165555E-01

\*\*\* CO2 EQUIVALENT SUMMARY \*\*\*

FEED STREAMS CO2E	0.00000	KG/HR
PRODUCT STREAMS CO2E	0.00000	KG/HR
NET STREAMS CO2E PRODUCTION	0.00000	KG/HR
UTILITIES CO2E PRODUCTION	0.00000	KG/HR
TOTAL CO2E PRODUCTION	0.00000	KG/HR

\*\*\* INPUT DATA \*\*\*

FLASH SPECS FOR STREAM AR-OUT

TWO PHASE TP FLASH	
PRESSURE DROP	BAR 0.0
MAXIMUM NO. ITERATIONS	30
CONVERGENCE TOLERANCE	0.000100000

FLASH SPECS FOR STREAM ZNO

TWO PHASE TP FLASH	
PRESSURE DROP	BAR 0.0
MAXIMUM NO. ITERATIONS	30
CONVERGENCE TOLERANCE	0.000100000

▲ ASPEN PLUS PLAT: WIN-X64 VER: 40.0

02/07/2024 PAGE 7

U-O-S BLOCK SECTION

BLOCK: FILTRO MODEL: SEP (CONTINUED)

FRACTION OF FEED

SUBSTREAM= MIXED

STREAM= AR-OUT	CPT= WATER	FRACTION=	1.00000
	OXYGE-01		1.00000
	NITRO-01		1.00000
	CARBO-01		1.00000
	CARBO-02		1.00000
	NITRI-01		1.00000
	NITRO-02		1.00000
	2-BUT-01		1.00000
	ZINC		0.0
	ZINC--01		0.0



CONVENTIONAL COMPONENTS  
(KMOL/HR )

WATER	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
OXYGE-01	2.28632	1.52979	-0.756538	-0.971186E-16
NITRO-01	8.60094	8.60094	0.00000	0.00000
CARBO-01	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
CARBO-02	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
NITRI-01	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
NITRO-02	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
2-BUT-01	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
ZINC	1.55987	0.467961E-01	-1.51308	-0.667256E-16
ZINC--01	0.00000	1.51308	1.51308	0.00000
TOTAL BALANCE				
MOLE(KMOL/HR )	12.4471	11.6906	-0.756538	0.285424E-15
MASS(KG/HR )	416.100	416.085		0.363633E-04
ENTHALPY(CAL/SEC )	20209.7	-19760.9		1.97780

\*\*\* CO2 EQUIVALENT SUMMARY \*\*\*

FEED STREAMS CO2E	0.00000	KG/HR
PRODUCT STREAMS CO2E	0.00000	KG/HR
NET STREAMS CO2E PRODUCTION	0.00000	KG/HR
UTILITIES CO2E PRODUCTION	0.00000	KG/HR
TOTAL CO2E PRODUCTION	0.00000	KG/HR

\*\*\* INPUT DATA \*\*\*

STOICHIOMETRY MATRIX:

REACTION #	1:				
SUBSTREAM MIXED	:				
OXYGE-01	-1.00	ZINC	-2.00	ZINC--01	2.00

U-O-S BLOCK SECTION

BLOCK: REACT MODEL: RSTOIC (CONTINUED)

REACTION CONVERSION SPECS: NUMBER= 1

REACTION # 1:

SUBSTREAM:MIXED KEY COMP:ZINC CONV FRAC: 0.9700

TWO PHASE TP FLASH	
SPECIFIED TEMPERATURE C	920.000
SPECIFIED PRESSURE BAR	1.00000
MAXIMUM NO. ITERATIONS	30
CONVERGENCE TOLERANCE	0.000100000
SIMULTANEOUS REACTIONS	
GENERATE COMBUSTION REACTIONS FOR FEED SPECIES	NO

\*\*\* RESULTS \*\*\*

OUTLET TEMPERATURE	C	920.00
OUTLET PRESSURE	BAR	1.0000
HEAT DUTY	CAL/SEC	-39970.
VAPOR FRACTION		0.87032

REACTION EXTENTS:

REACTION NUMBER	REACTION EXTENT KMOL/HR
1	0.75654

V-L PHASE EQUILIBRIUM :

COMP	F(I)	X(I)	Y(I)	K(I)
OXYGE-01	0.13086	0.13916E-19	0.15035	0.10805E+20
NITRO-01	0.73571	0.16204E-23	0.84534	0.52168E+24
ZINC	0.40029E-02	0.19920E-02	0.43025E-02	2.1599
ZINC--01	0.12943	0.99801	0.75294E-06	0.75445E-06

ASPDEN PLUS PLAT: WIN-X64 VER: 40.0 02/07/2024 PAGE 10

STREAM SECTION

AR-C AR-OUT AR-R FLUE OIL

ZN-L ZN-V ZNO ZNO-AR

STREAM ID	AR-C	AR-OUT	AR-R	FLUE	OIL
ZN-L ZN-V	ZNO	ZNO-AR			
FROM :	----	FILTRO	----	COMBUST	----
TO :	CADINHO	FILTRO	REACT		
CADINHO	REACT	----	FILTRO		COMBUST

SUBSTREAM: MIXED

PHASE:	VAPOR	VAPOR	VAPOR	VAPOR	LIQUID
LIQUID VAPOR	LIQUID	MIXED			
COMPONENTS: KMOL/HR					
WATER	0.0	0.0	0.0	1.2939	0.0
0.0 0.0	0.0	0.0			
OXYGE-01	2.2863	1.5298	2.2863	7.5679-06	0.0
0.0 0.0	0.0	1.5298			
NITRO-01	8.6009	8.6009	8.6009	8.6007	0.0
0.0 0.0	0.0	8.6009			
CARBO-01	0.0	0.0	0.0	3.1770-04	0.0
0.0 0.0	0.0	0.0			
CARBO-02	0.0	0.0	0.0	1.6390	0.0
0.0 0.0	0.0	0.0			
NITRI-01	0.0	0.0	0.0	4.4135-04	0.0

0.0	0.0	0.0	0.0				
	NITRO-02		0.0	0.0	0.0	2.3142-08	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0				
	2-BUT-01		0.0	0.0	0.0	8.5190-03	9.4797-02
0.0	0.0	0.0	0.0				
	ZINC		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.5599	1.5599	4.6796-02	4.6796-02				
	ZINC--01		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	1.5131	1.5131				
COMPONENTS: KG/HR							
	WATER		0.0	0.0	0.0	23.3108	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0				
	OXYGE-01		73.1578	48.9501	73.1578	2.4216-04	0.0
0.0	0.0	0.0	48.9501				
	NITRO-01		240.9422	240.9422	240.9422	240.9360	0.0
0.0	0.0	0.0	240.9422				
	CARBO-01		0.0	0.0	0.0	8.8987-03	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0				
	CARBO-02		0.0	0.0	0.0	72.1305	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0				
	NITRI-01		0.0	0.0	0.0	1.3688-02	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0				
	NITRO-02		0.0	0.0	0.0	1.0880-06	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0				
	2-BUT-01		0.0	0.0	0.0	2.2017	24.5000
0.0	0.0	0.0	0.0				
	ZINC		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
102.0000	102.0000	3.0600	3.0600				
	ZINC--01		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	123.1326	123.1326				
TOTAL FLOW:							
	KMOL/HR		10.8873	10.1307	10.8873	11.5429	9.4797-02
1.5599	1.5599	1.5599	11.6906				
	KG/HR		314.1000	289.8923	314.1000	338.6018	24.5000
102.0000	102.0000	126.1926	416.0849				
	L/MIN		4498.1040	1.6750+04	4498.1040	4418.7811	0.3595
0.2626	7356.9522	9.5058	1.6832+04				
STATE VARIABLES:							
	TEMP C		25.0000	920.0000	25.0000	970.0000	110.0000
490.0000	3130.4075	920.0000	920.0000				
	PRES BAR		1.0000	1.0000	1.0000	4.5000	4.5000
1.0000	1.0000	1.0000	1.0000				
	VFRAC		1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.0
0.0	1.0000	0.0	0.8703				
	LFRAC		0.0	0.0	0.0	0.0	1.0000
1.0000	0.0	1.0000	0.1297				
	SFRAC		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0				
ENTHALPY:							
	CAL/MOL		-7.0292-13	6714.4111	-7.0292-13	-1.1907+04	-4.9016+04
4075.5746	4.6642+04	-8.9981+04	-6085.1825				
	CAL/GM		-2.4364-14	234.6452	-2.4364-14	-405.9091	-189.6539
62.3272	713.2832	-1112.2591	-170.9733				
	CAL/SEC		-2.1258-12	1.8895+04	-2.1258-12	-3.8178+04	-1290.7005

1765.9369 2.0210+04 -3.8989+04 -1.9761+04  
 ENTROPY:  
 CAL/MOL-K 1.0468 11.0931 1.0468 -3.4460 -346.6884  
 7.4995 40.5954 3.0080 10.1218  
 CAL/GM-K 3.6283-02 0.3877 3.6283-02 -0.1175 -1.3414  
 0.1147 0.6208 3.7182-02 0.2844  
 DENSITY:  
 MOL/CC 4.0340-05 1.0080-05 4.0340-05 4.3537-05 4.3950-03  
 9.8996-02 3.5338-06 2.7349-03 1.1576-05  
 GM/CC 1.1638-03 2.8845-04 1.1638-03 1.2771-03 1.1359  
 6.4734 2.3107-04 0.2213 4.1200-04  
 AVG MW 28.8502 28.6152 28.8502 29.3342 258.4472  
 65.3900 65.3900 80.8993 35.5914  
 ▲ ASPEN PLUS PLAT: WIN-X64 VER: 40.0 02/07/2024 PAGE 11

STREAM SECTION

HEAT-C HEAT-E HEAT-L  
 -----

STREAM ID	HEAT-C	HEAT-E	HEAT-L
FROM :	COMBUST	QDIV	QDIV
TO :	QDIV	CADINHO	----
CLASS:	HEAT	HEAT	HEAT

STREAM ATTRIBUTES:

HEAT  
 Q CAL/SEC 3.6888+04 1.8444+04 1.8444+04

▲ ASPEN PLUS PLAT: WIN-X64 VER: 40.0 02/07/2024 PAGE 12

UTILITY SECTION

UTILITY USAGE: U-1 (GENERAL)  
 -----

HOT OIL, INLET TEMP=280 C, OUTLET TEMP=250 C  
 INPUT DATA:

INLET TEMPERATURE	280.0000	C
OUTLET TEMPERATURE	250.0000	C
HEAT TRANSFER COEFFICIENT	5.5480-03	CAL/SEC-SQCM-K
CO2 DATA SOURCE		US-EPA-RULE-E9-5711
CO2 FUEL SOURCE		NATURAL_GAS
CO2 EMISSION TYPE		SCOPE 2
CO2 EMISSION FACTOR	2.1055-07	KG/CAL
THERMAL EFFICIENCY	0.8500	
CO2 ADJUSTMENT FACTOR	1.0000	
HEATING VALUE	21.4961	CAL/GM
PRICE	1.4654-08	\$/CAL
INDEX TYPE		FUEL

RESULT:





BLOCK: REACT	MODEL: RSTOIC.....	10
STREAM SECTION.....		13
AR-C AR-C2 AR-OUT AR-R FLUE.....		13
OIL ZN-L ZN-V ZNO ZNO-AR.....		13
HEAT-C HEAT-E HEAT-L HEAT-OUT.....		14
UTILITY SECTION.....		15
UTILITY USAGE: U-1 (GENERAL).....		15
PROBLEM STATUS SECTION.....		16
BLOCK STATUS.....		16

ASPEN PLUS PLAT: WIN-X64 VER: 40.0 02/07/2024 PAGE 1

RUN CONTROL SECTION

RUN CONTROL INFORMATION

-----

THIS COPY OF ASPEN PLUS LICENSED TO

TYPE OF RUN: NEW

INPUT FILE NAME: \_2428ewv.inm

OUTPUT PROBLEM DATA FILE NAME: \_2428ewv  
LOCATED IN:

PDF SIZE USED FOR INPUT TRANSLATION:  
NUMBER OF FILE RECORDS (PSIZE) = 0  
NUMBER OF IN-CORE RECORDS = 256  
PSIZE NEEDED FOR SIMULATION = 256

CALLING PROGRAM NAME: apmain  
LOCATED IN: C:\Program Files\AspenTech\Aspen Plus V14.0\Engine\exeq

SIMULATION REQUESTED FOR ENTIRE FLOWSHEET

ASPEN PLUS PLAT: WIN-X64 VER: 40.0 02/07/2024 PAGE 2

FLOWSHEET SECTION

FLOWSHEET CONNECTIVITY BY STREAMS

-----

STREAM	SOURCE	DEST	STREAM	SOURCE	DEST
OIL	----	COMBUST	AR-R	----	REACT
ZN-L	----	CADINHO	AR-C	----	PRE-AR
FLUE	COMBUST	----	HEAT-C	COMBUST	QDIV
ZNO-AR	REACT	FILTRO	ZN-V	CADINHO	REACT
AR-OUT	FILTRO	----	ZNO	FILTRO	----

HEAT-L	QDIV	PRE-AR	HEAT-E	QDIV	CADINHO
AR-C2	PRE-AR	COMBUST	HEAT-OUT	PRE-AR	----

FLWSHEET CONNECTIVITY BY BLOCKS

-----

BLOCK	INLETS	OUTLETS
COMBUST	AR-C2 OIL	FLUE HEAT-C
REACT	ZN-V AR-R	ZNO-AR
CADINHO	ZN-L HEAT-E	ZN-V
FILTRO	ZNO-AR	AR-OUT ZNO
QDIV	HEAT-C	HEAT-L HEAT-E
PRE-AR	AR-C HEAT-L	AR-C2 HEAT-OUT

CONVERGENCE STATUS SUMMARY

-----

TEAR STREAM SUMMARY

=====

STREAM ID	VARIABLE ID	MAXIMUM ERR/TOL	MAX. ERR. RELATIVE	ABSOLUTE ERROR	STAT	CONV BLOCK
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
HEAT-C	INFO-VAR	0.28399E-06	0.28399E-10	0.42896E-05	#	

\$OLVER01

# = CONVERGED  
 \* = NOT CONVERGED

CONVERGENCE BLOCK: \$OLVER01

-----

Tear Stream : HEAT-C  
 Tolerance used: 0.100D-03

MAXIT= 30 WAIT 1 ITERATIONS BEFORE ACCELERATING  
 QMAX = 0.0 QMIN = -5.0  
 METHOD: WEGSTEIN STATUS: CONVERGED  
 TOTAL NUMBER OF ITERATIONS: 2

\*\*\* FINAL VALUES \*\*\*

VAR#	TEAR STREAM VAR	STREAM	SUBSTREA	COMPONEN	ATTRIBUT	ELEMENT	UNIT
VALUE	PREV VALUE	ERR/TOL					
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
1	INFO-VAR	HEAT-C			HEAT	Q	
CAL/SEC	3.6076+04	3.6076+04	2.8399-07				

\*\*\* ITERATION HISTORY \*\*\*

FLWSHEET SECTION

CONVERGENCE BLOCK: \$OLVER01 (CONTINUED)

TEAR STREAMS AND TEAR VARIABLES:

ITERATION	MAX-ERR/TOL	VAR#	STREAM ID	VAR DESCRIPTION	SUBSTREA	COMPONEN
1	0.1000E+05	1	HEAT-C	INFO-VAR		
HEAT	Q					
2	0.2840E-06	1	HEAT-C	INFO-VAR		
HEAT	Q					

COMPUTATIONAL SEQUENCE

SEQUENCE USED WAS:

\$OLVER01 QDIV PRE-AR COMBUST  
 (RETURN \$OLVER01)  
 CADINHO REACT FILTRO U-1

OVERALL FLOWSHEET BALANCE

*** MASS AND ENERGY BALANCE ***				
	IN	OUT	GENERATION	RELATIVE DIFF.
CONVENTIONAL COMPONENTS (KMOL/HR )				
WATER	0.00000	1.10091	1.10091	0.00000
OXYGE-01	4.26402	1.55838	-2.70564	0.104148E-15
NITRO-01	16.0408	16.0390	-0.183345E-02	-0.221479E-15
CARBO-01	0.00000	0.107402E-05	0.107402E-05	0.00000
CARBO-02	0.00000	1.39680	1.39680	0.00000
NITRI-01	0.00000	0.363330E-02	0.363330E-02	0.00000
NITRO-02	0.00000	0.336052E-04	0.336052E-04	0.00000
2-BUT-01	0.735160E-01	0.00000	-0.735160E-01	0.00000
ZINC	1.55987	0.467961E-01	-1.51308	-0.667256E-16
ZINC--01	0.00000	1.51308	1.51308	0.00000
TOTAL BALANCE				
MOLE(KMOL/HR )	21.9383	21.6586	-0.279617	0.323883E-15
MASS(KG/HR )	706.800	706.786		0.192013E-04
ENTHALPY(CAL/SEC )	770.430	-40502.4		1.01902

*** CO2 EQUIVALENT SUMMARY ***		
FEED STREAMS CO2E	0.00000	KG/HR
PRODUCT STREAMS CO2E	61.4730	KG/HR
NET STREAMS CO2E PRODUCTION	61.4730	KG/HR
UTILITIES CO2E PRODUCTION	0.00000	KG/HR
TOTAL CO2E PRODUCTION	61.4730	KG/HR

U-O-S BLOCK SECTION

BLOCK: CADINHO MODEL: HEATER

-----

INLET STREAM: ZN-L  
 INLET HEAT STREAM: HEAT-E  
 OUTLET STREAM: ZN-V  
 PROPERTY OPTION SET: IDEAL IDEAL LIQUID / IDEAL GAS

\*\*\* MASS AND ENERGY BALANCE \*\*\*

	IN	OUT	RELATIVE DIFF.
CONVENTIONAL COMPONENTS (KMOL/HR )			
WATER	0.00000	0.00000	0.00000
OXYGE-01	0.00000	0.00000	0.00000
NITRO-01	0.00000	0.00000	0.00000
CARBO-01	0.00000	0.00000	0.00000
CARBO-02	0.00000	0.00000	0.00000
NITRI-01	0.00000	0.00000	0.00000
NITRO-02	0.00000	0.00000	0.00000
2-BUT-01	0.00000	0.00000	0.00000
ZINC	1.55987	1.55987	0.00000
ZINC--01	0.00000	0.00000	0.00000
TOTAL BALANCE			
MOLE(KMOL/HR )	1.55987	1.55987	0.00000
MASS(KG/HR )	102.000	102.000	0.00000
ENTHALPY(CAL/SEC )	19804.2	19804.2	-0.183698E-15

\*\*\* CO2 EQUIVALENT SUMMARY \*\*\*

FEED STREAMS CO2E	0.00000	KG/HR
PRODUCT STREAMS CO2E	0.00000	KG/HR
NET STREAMS CO2E PRODUCTION	0.00000	KG/HR
UTILITIES CO2E PRODUCTION	0.00000	KG/HR
TOTAL CO2E PRODUCTION	0.00000	KG/HR

\*\*\* INPUT DATA \*\*\*

TWO PHASE PQ FLASH		
SPECIFIED PRESSURE	BAR	1.00000
DUTY FROM INLET HEAT STREAM(S)	CAL/SEC	18,038.2
MAXIMUM NO. ITERATIONS		30
CONVERGENCE TOLERANCE		0.000100000

\*\*\* RESULTS \*\*\*

OUTLET TEMPERATURE	C	2941.9
OUTLET PRESSURE	BAR	1.0000
OUTLET VAPOR FRACTION		1.0000

BLOCK: CADINHO MODEL: HEATER (CONTINUED)

V-L PHASE EQUILIBRIUM :

COMP	F(I)	X(I)	Y(I)	K(I)
ZINC	1.0000	1.0000	1.0000	0.36159E+14

BLOCK: COMBUST MODEL: RGIBBS

-----  
INLET STREAMS: AR-C2 OIL  
OUTLET STREAM: FLUE  
OUTLET HEAT STREAM: HEAT-C  
PROPERTY OPTION SET: IDEAL IDEAL LIQUID / IDEAL GAS

\*\*\* MASS AND ENERGY BALANCE \*\*\*

	IN	OUT	GENERATION	RELATIVE DIFF.
CONVENTIONAL COMPONENTS (KMOL/HR )				
WATER	0.00000	1.10091	1.10091	0.00000
OXYGE-01	2.13201	0.182904	-1.94911	0.260370E-16
NITRO-01	8.02042	8.01859	-0.183345E-02	0.00000
CARBO-01	0.00000	0.107402E-05	0.107402E-05	0.00000
CARBO-02	0.00000	1.39680	1.39680	0.00000
NITRI-01	0.00000	0.363330E-02	0.363330E-02	0.00000
NITRO-02	0.00000	0.336052E-04	0.336052E-04	0.00000
2-BUT-01	0.735160E-01	0.00000	-0.735160E-01	0.00000
ZINC	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
ZINC--01	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
TOTAL BALANCE				
MOLE(KMOL/HR )	10.2259	10.7029	0.476921	0.165970E-15
MASS(KG/HR )	311.900	311.902		-0.499929E-05
ENTHALPY(CAL/SEC )	4534.50	4534.50		0.225946E-09

\*\*\* CO2 EQUIVALENT SUMMARY \*\*\*

FEED STREAMS CO2E	0.00000	KG/HR
PRODUCT STREAMS CO2E	61.4730	KG/HR
NET STREAMS CO2E PRODUCTION	61.4730	KG/HR
UTILITIES CO2E PRODUCTION	0.00000	KG/HR
TOTAL CO2E PRODUCTION	61.4730	KG/HR

\*\*\* INPUT DATA \*\*\*

EQUILIBRIUM SPECIFICATIONS:

BOTH PHASE AND CHEMICAL EQUILIBRIUM ARE CONSIDERED  
THE MAXIMUM NUMBER OF FLUID PHASES CONSIDERED IS 2  
INCLUDING A VAPOR PHASE

SYSTEM TEMPERATURE	C	950.00
TEMPERATURE FOR FREE ENERGY EVALUATION	C	950.00
SYSTEM PRESSURE	BAR	4.5000

FLUID PHASE SPECIES IN PRODUCT LIST:

WATER OXYGE-01 NITRO-01 CARBO-01 CARBO-02 NITRI-01 NITRO-02

U-O-S BLOCK SECTION

BLOCK: COMBUST MODEL: RGIBBS (CONTINUED)

ATOM MATRIX:

ELEMENT	H	C	N	O	ZN
WATER	2.00	0.00	0.00	1.00	0.00
OXYGE-01	0.00	0.00	0.00	2.00	0.00
NITRO-01	0.00	0.00	2.00	0.00	0.00
CARBO-01	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
CARBO-02	0.00	1.00	0.00	2.00	0.00
NITRI-01	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00
NITRO-02	1.00	0.00	1.00	2.00	0.00
2-BUT-01	30.00	19.00	0.00	0.00	0.00
ZINC	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
ZINC--01	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00

\*\*\* RESULTS \*\*\*

TEMPERATURE	C	950.00
PRESSURE	BAR	4.5000
HEAT DUTY	CAL/SEC	-36076.
VAPOR FRACTION		1.0000
NUMBER OF FLUID PHASES		1

FLUID PHASE MOLE FRACTIONS:

PHASE OF TYPE	VAPOR
PHASE FRACTION	1.000000
PLACED IN STREAM	FLUE
WATER	0.1028609
OXYGE-01	0.1708927E-01
NITRO-01	0.7491999
CARBO-01	0.1003484E-06
CARBO-02	0.1305073
NITRI-01	0.3394694E-03
NITRO-02	0.3139832E-05
2-BUT-01	0.000000

KMOL/HR 10.70287

BLOCK: FILTRO MODEL: SEP

-----  
 INLET STREAM: ZNO-AR  
 OUTLET STREAMS: AR-OUT ZNO  
 PROPERTY OPTION SET: IDEAL IDEAL LIQUID / IDEAL GAS

U-O-S BLOCK SECTION

BLOCK: FILTRO MODEL: SEP (CONTINUED)

\*\*\* MASS AND ENERGY BALANCE \*\*\*

	IN	OUT	RELATIVE DIFF.
CONVENTIONAL COMPONENTS (KMOL/HR )			
WATER	0.00000	0.00000	0.00000
OXYGE-01	1.37547	1.37547	0.00000
NITRO-01	8.02042	8.02042	0.00000
CARBO-01	0.00000	0.00000	0.00000
CARBO-02	0.00000	0.00000	0.00000
NITRI-01	0.00000	0.00000	0.00000
NITRO-02	0.00000	0.00000	0.00000
2-BUT-01	0.00000	0.00000	0.00000
ZINC	0.467961E-01	0.467961E-01	0.00000
ZINC--01	1.51308	1.51308	0.00000
TOTAL BALANCE			
MOLE(KMOL/HR )	10.9558	10.9558	0.00000
MASS(KG/HR )	394.885	394.885	0.143949E-15
ENTHALPY(CAL/SEC )	-21137.7	-21468.6	0.154170E-01

\*\*\* CO2 EQUIVALENT SUMMARY \*\*\*

FEED STREAMS CO2E	0.00000	KG/HR
PRODUCT STREAMS CO2E	0.00000	KG/HR
NET STREAMS CO2E PRODUCTION	0.00000	KG/HR
UTILITIES CO2E PRODUCTION	0.00000	KG/HR
TOTAL CO2E PRODUCTION	0.00000	KG/HR

\*\*\* INPUT DATA \*\*\*

FLASH SPECS FOR STREAM AR-OUT

TWO PHASE TP FLASH

PRESSURE DROP BAR

0.0

MAXIMUM NO. ITERATIONS

30

CONVERGENCE TOLERANCE

0.000100000

FLASH SPECS FOR STREAM ZNO

TWO PHASE TP FLASH

PRESSURE DROP BAR

0.0

MAXIMUM NO. ITERATIONS

30

CONVERGENCE TOLERANCE

0.000100000

ASPEN PLUS PLAT: WIN-X64 VER: 40.0

02/07/2024 PAGE 8

U-O-S BLOCK SECTION

BLOCK: FILTRO MODEL: SEP (CONTINUED)

FRACTION OF FEED

SUBSTREAM= MIXED

STREAM= AR-OUT

CPT= WATER

FRACTION=

1.00000

OXYGE-01

1.00000

NITRO-01

1.00000

CARBO-01	1.00000
CARBO-02	1.00000
NITRI-01	1.00000
NITRO-02	1.00000
2-BUT-01	1.00000
ZINC	0.0
ZINC--01	0.0

\*\*\* RESULTS \*\*\*

HEAT DUTY                      CAL/SEC                      -330.98

COMPONENT = OXYGE-01  
 STREAM      SUBSTREAM      SPLIT FRACTION  
 AR-OUT      MIXED                      1.00000

COMPONENT = NITRO-01  
 STREAM      SUBSTREAM      SPLIT FRACTION  
 AR-OUT      MIXED                      1.00000

COMPONENT = ZINC  
 STREAM      SUBSTREAM      SPLIT FRACTION  
 ZNO          MIXED                      1.00000

COMPONENT = ZINC--01  
 STREAM      SUBSTREAM      SPLIT FRACTION  
 ZNO          MIXED                      1.00000

BLOCK: PRE-AR      MODEL: HEATER

-----  
 INLET STREAM:              AR-C  
 INLET HEAT STREAM:        HEAT-L  
 OUTLET STREAM:             AR-C2  
 OUTLET HEAT STREAM:       HEAT-OUT  
 PROPERTY OPTION SET:      IDEAL      IDEAL LIQUID / IDEAL GAS

\*\*\* MASS AND ENERGY BALANCE \*\*\*

	IN	OUT	RELATIVE DIFF.
CONVENTIONAL COMPONENTS (KMOL/HR )			
WATER	0.00000	0.00000	0.00000
OXYGE-01	2.13201	2.13201	0.00000
NITRO-01	8.02042	8.02042	0.00000
CARBO-01	0.00000	0.00000	0.00000
CARBO-02	0.00000	0.00000	0.00000

▲ ASPEN PLUS      PLAT: WIN-X64      VER: 40.0                      02/07/2024      PAGE 9

U-O-S BLOCK SECTION

BLOCK: PRE-AR      MODEL: HEATER (CONTINUED)

\*\*\* MASS AND ENERGY BALANCE \*\*\*

	IN	OUT	RELATIVE DIFF.
--	----	-----	----------------

CONVENTIONAL COMPONENTS (KMOL/HR )

NITRI-01	0.00000	0.00000	0.00000
NITRO-02	0.00000	0.00000	0.00000
2-BUT-01	0.00000	0.00000	0.00000
ZINC	0.00000	0.00000	0.00000
ZINC--01	0.00000	0.00000	0.00000
TOTAL BALANCE			
MOLE(KMOL/HR )	10.1524	10.1524	0.00000
MASS(KG/HR )	292.900	292.900	0.00000
ENTHALPY(CAL/SEC )	18038.2	18038.2	0.00000

\*\*\* CO2 EQUIVALENT SUMMARY \*\*\*

FEED STREAMS CO2E	0.00000	KG/HR
PRODUCT STREAMS CO2E	0.00000	KG/HR
NET STREAMS CO2E PRODUCTION	0.00000	KG/HR
UTILITIES CO2E PRODUCTION	0.00000	KG/HR
TOTAL CO2E PRODUCTION	0.00000	KG/HR

\*\*\* INPUT DATA \*\*\*

TWO PHASE TP FLASH

SPECIFIED TEMPERATURE	C	300.000
SPECIFIED PRESSURE	BAR	1.00000
MAXIMUM NO. ITERATIONS		30
CONVERGENCE TOLERANCE		0.000100000

\*\*\* RESULTS \*\*\*

OUTLET TEMPERATURE	C	300.00
OUTLET PRESSURE	BAR	1.0000
HEAT DUTY	CAL/SEC	5530.0
NET DUTY	CAL/SEC	-12508.
OUTLET VAPOR FRACTION		1.0000
PRESSURE-DROP CORRELATION PARAMETER		0.0000

V-L PHASE EQUILIBRIUM :

COMP	F(I)	X(I)	Y(I)	K(I)
OXYGE-01	0.21000	0.97336	0.21000	0.48621E+09
NITRO-01	0.79000	0.26637E-01	0.79000	0.66837E+11

▲ ASPEN PLUS PLAT: WIN-X64 VER: 40.0 02/07/2024 PAGE 10

U-O-S BLOCK SECTION

BLOCK: QDIV MODEL: FSPLIT

-----

INLET STREAM:	HEAT-C
OUTLET STREAMS:	HEAT-L HEAT-E
PROPERTY OPTION SET:	IDEAL IDEAL LIQUID / IDEAL GAS

\*\*\* MASS AND ENERGY BALANCE \*\*\*

	IN	OUT	RELATIVE DIFF.
TOTAL BALANCE			
ENTHALPY(CAL/SEC )	36076.5	36076.5	0.00000

\*\*\* INPUT DATA \*\*\*

FRACTION OF FLOW	STRM=HEAT-L	FRAC=	0.50000
------------------	-------------	-------	---------

\*\*\* RESULTS \*\*\*

STREAM= HEAT-L	SPLIT=	0.50000
HEAT-E		0.50000

BLOCK: REACT MODEL: RSTOIC

-----

INLET STREAMS:	ZN-V	AR-R
OUTLET STREAM:	ZNO-AR	
PROPERTY OPTION SET:	IDEAL	IDEAL LIQUID / IDEAL GAS

\*\*\* MASS AND ENERGY BALANCE \*\*\*

	IN	OUT	GENERATION	RELATIVE DIFF.
CONVENTIONAL COMPONENTS (KMOL/HR )				
WATER	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
OXYGE-01	2.13201	1.37547	-0.756538	0.00000
NITRO-01	8.02042	8.02042	0.00000	0.00000
CARBO-01	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
CARBO-02	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
NITRI-01	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
NITRO-02	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
2-BUT-01	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
ZINC	1.55987	0.467961E-01	-1.51308	-0.667256E-16
ZINC--01	0.00000	1.51308	1.51308	0.00000

▲ ASPEN PLUS PLAT: WIN-X64 VER: 40.0 02/07/2024 PAGE 11

### U-O-S BLOCK SECTION

BLOCK: REACT MODEL: RSTOIC (CONTINUED)

TOTAL BALANCE				
MOLE(KMOL/HR )	11.7123	10.9558	-0.756538	0.151666E-15
MASS(KG/HR )	394.900	394.885		0.383154E-04
ENTHALPY(CAL/SEC )	19804.2	-21137.7		1.93691

\*\*\* CO2 EQUIVALENT SUMMARY \*\*\*

FEED STREAMS CO2E	0.00000	KG/HR
PRODUCT STREAMS CO2E	0.00000	KG/HR
NET STREAMS CO2E PRODUCTION	0.00000	KG/HR
UTILITIES CO2E PRODUCTION	0.00000	KG/HR
TOTAL CO2E PRODUCTION	0.00000	KG/HR

\*\*\* INPUT DATA \*\*\*

STOICHIOMETRY MATRIX:

REACTION # 1:  
 SUBSTREAM MIXED :  
 OXYGE-01 -1.00 ZINC -2.00 ZINC--01 2.00

REACTION CONVERSION SPECS: NUMBER= 1  
 REACTION # 1:  
 SUBSTREAM:MIXED KEY COMP:ZINC CONV FRAC: 0.9700

TWO PHASE TP FLASH  
 SPECIFIED TEMPERATURE C 920.000  
 SPECIFIED PRESSURE BAR 1.00000  
 MAXIMUM NO. ITERATIONS 30  
 CONVERGENCE TOLERANCE 0.000100000  
 SIMULTANEOUS REACTIONS  
 GENERATE COMBUSTION REACTIONS FOR FEED SPECIES NO

\*\*\* RESULTS \*\*\*

OUTLET TEMPERATURE C 920.00  
 OUTLET PRESSURE BAR 1.0000  
 HEAT DUTY CAL/SEC -40941.  
 VAPOR FRACTION 0.86160

REACTION EXTENTS:

REACTION NUMBER	REACTION EXTENT KMOL/HR
1	0.75654

ASPEN PLUS PLAT: WIN-X64 VER: 40.0

02/07/2024 PAGE 12

U-O-S BLOCK SECTION

BLOCK: REACT MODEL: RSTOIC (CONTINUED)

V-L PHASE EQUILIBRIUM :

COMP	F(I)	X(I)	Y(I)	K(I)
OXYGE-01	0.12555	0.13486E-19	0.14572	0.10805E+20
NITRO-01	0.73207	0.16287E-23	0.84967	0.52168E+24
ZINC	0.42714E-02	0.21363E-02	0.46143E-02	2.1599
ZINC--01	0.13811	0.99786	0.75284E-06	0.75445E-06

ASPEN PLUS PLAT: WIN-X64 VER: 40.0

02/07/2024 PAGE 13

STREAM SECTION

AR-C AR-C2 AR-OUT AR-R FLUE

-----  
OIL ZN-L ZN-V ZNO ZNO-AR  
-----

STREAM ID		AR-C	AR-C2	AR-OUT	AR-R	FLUE
OIL	ZN-L	ZN-V	ZNO	ZNO-AR		
FROM :		----	PRE-AR	FILTRO	----	COMBUST
----	----	CADINHO	FILTRO	REACT		
TO :		PRE-AR	COMBUST	----	REACT	----
COMBUST	CADINHO	REACT	----	FILTRO		

SUBSTREAM: MIXED

PHASE:		VAPOR	VAPOR	VAPOR	VAPOR	VAPOR
LIQUID	LIQUID	VAPOR	LIQUID	MIXED		
COMPONENTS: KMOL/HR						
WATER		0.0	0.0	0.0	0.0	1.1009
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
OXYGE-01		2.1320	2.1320	1.3755	2.1320	0.1829
0.0	0.0	0.0	0.0	1.3755		
NITRO-01		8.0204	8.0204	8.0204	8.0204	8.0186
0.0	0.0	0.0	0.0	8.0204		
CARBO-01		0.0	0.0	0.0	0.0	1.0740-06
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
CARBO-02		0.0	0.0	0.0	0.0	1.3968
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
NITRI-01		0.0	0.0	0.0	0.0	3.6333-03
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
NITRO-02		0.0	0.0	0.0	0.0	3.3605-05
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
2-BUT-01		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7.3516-02	0.0	0.0	0.0	0.0		
ZINC		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	1.5599	1.5599	4.6796-02	4.6796-02		
ZINC--01		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	1.5131	1.5131		
COMPONENTS: KG/HR						
WATER		0.0	0.0	0.0	0.0	19.8331
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
OXYGE-01		68.2201	68.2201	44.0124	68.2201	5.8526
0.0	0.0	0.0	0.0	44.0124		
NITRO-01		224.6799	224.6799	224.6799	224.6799	224.6286
0.0	0.0	0.0	0.0	224.6799		
CARBO-01		0.0	0.0	0.0	0.0	3.0083-05
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
CARBO-02		0.0	0.0	0.0	0.0	61.4730
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
NITRI-01		0.0	0.0	0.0	0.0	0.1127
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
NITRO-02		0.0	0.0	0.0	0.0	1.5799-03
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
2-BUT-01		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
19.0000	0.0	0.0	0.0	0.0		
ZINC		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

0.0	102.0000	102.0000	3.0600	3.0600		
ZINC--01		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	123.1326	123.1326		
TOTAL FLOW:						
KMOL/HR		10.1524	10.1524	9.3959	10.1524	10.7029
7.3516-02	1.5599	1.5599	1.5599	10.9558		
KG/HR		292.9000	292.9000	268.6923	292.9000	311.9016
19.0000	102.0000	102.0000	126.1926	394.8849		
L/MIN		4194.5070	8063.3295	1.5535+04	4194.5070	4031.2843
0.2793	0.2626	6949.4699	9.5058	1.5616+04		
STATE VARIABLES:						
TEMP	C	25.0000	300.0000	920.0000	25.0000	950.0000
112.0000	490.0000	2941.8934	920.0000	920.0000		
PRES	BAR	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	4.5000
4.5000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000		
VFRAC		1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
0.0	0.0	1.0000	0.0	0.8616		
LFRAC		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.0000	1.0000	0.0	1.0000	0.1384		
SFRAC		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
ENTHALPY:						
CAL/MOL		-7.0292-13	1960.9114	6712.6920	-7.0292-13	-1.0609+04
-4.8749+04	4075.5746	4.5706+04	-8.9981+04	-6945.7073		
CAL/GM		-2.4364-14	67.9687	234.7360	-2.4364-14	-364.0605
-188.6223	62.3272	698.9705	-1112.2591	-192.7031		
CAL/SEC		-1.9823-12	5530.0058	1.7520+04	-1.9823-12	-3.1542+04
-995.5065	1765.9369	1.9804+04	-3.8989+04	-2.1138+04		
ENTROPY:						
CAL/MOL-K		1.0468	5.6988	11.0742	1.0468	-2.3986
-345.9946	7.4995	40.3125	3.0080	10.0394		
CAL/GM-K		3.6283-02	0.1975	0.3873	3.6283-02	-8.2307-02
-1.3387	0.1147	0.6165	3.7182-02	0.2785		
DENSITY:						
MOL/CC		4.0340-05	2.0985-05	1.0080-05	4.0340-05	4.4249-05
4.3874-03	9.8996-02	3.7410-06	2.7349-03	1.1693-05		
GM/CC		1.1638-03	6.0542-04	2.8827-04	1.1638-03	1.2895-03
1.1339	6.4734	2.4462-04	0.2213	4.2144-04		
AVG MW		28.8502	28.8502	28.5968	28.8502	29.1419
258.4472	65.3900	65.3900	80.8993	36.0436		

▲ ASPEN PLUS PLAT: WIN-X64 VER: 40.0 02/07/2024 PAGE 14

### STREAM SECTION

HEAT-C HEAT-E HEAT-L HEAT-OUT

-----

STREAM ID	HEAT-C	HEAT-E	HEAT-L	HEAT-OUT
FROM :	COMBUST	QDIV	QDIV	PRE-AR
TO :	QDIV	CADINHO	PRE-AR	----
CLASS:	HEAT	HEAT	HEAT	HEAT

CONV. MAX. REL. ERR: 2.8399-11 0.0 0.0 0.0

STREAM ATTRIBUTES:

HEAT

Q	CAL/SEC	3.6076+04	1.8038+04	1.8038+04	1.2508+04
TBEG	C	MISSING	MISSING	MISSING	300.0000
TEND	C	MISSING	MISSING	MISSING	25.0000

ASPEN PLUS PLAT: WIN-X64 VER: 40.0 02/07/2024 PAGE 15

UTILITY SECTION

UTILITY USAGE: U-1 (GENERAL)

-----

HOT OIL, INLET TEMP=280 C, OUTLET TEMP=250 C

INPUT DATA:

INLET TEMPERATURE	280.0000	C
OUTLET TEMPERATURE	250.0000	C
HEAT TRANSFER COEFFICIENT	5.5480-03	CAL/SEC-SQCM-K
CO2 DATA SOURCE		US-EPA-RULE-E9-5711
CO2 FUEL SOURCE		NATURAL_GAS
CO2 EMISSION TYPE		SCOPE 2
CO2 EMISSION FACTOR	2.1055-07	KG/CAL
THERMAL EFFICIENCY	0.8500	
CO2 ADJUSTMENT FACTOR	1.0000	
HEATING VALUE	21.4961	CAL/GM
PRICE	1.4654-08	\$/CAL
INDEX TYPE		FUEL

RESULT:

HEATING VALUE	21.4961	CAL/GM
INDEXED PRICE	MISSING	\$/KG
CO2 EMISSION FACTOR	2.1055-07	KG/CAL

THIS UTILITY IS PURCHASED

THIS UTILITY IS NOT USED BY ANY COST OR UOS BLOCKS

ASPEN PLUS PLAT: WIN-X64 VER: 40.0 02/07/2024 PAGE 16

PROBLEM STATUS SECTION

BLOCK STATUS

-----

```

*****
*
* Calculations were completed normally
*
* All Unit Operation blocks were completed normally
*
* All streams were flashed normally
*

```

```
*
* All Utility blocks were completed normally
*
* All Convergence blocks were completed normally
*
*****
```