

FABIO CAMILO UNTERMAN SANTOS

**Modelagem de um termoacumulador para reaproveitamento dos gases de exaustão em
uma Usina Siderúrgica**

Fabio Camilo Unterman Santos

**Modelagem de um termoacumulador para reaproveitamento dos gases de exaustão em
uma Usina Siderúrgica**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. José Alexandre Matelli

S237m	Santos, Fabio Camilo Unterman Modelagem de um termoacumulador para reaproveitamento dos gases de exaustão em uma usina siderúrgica / Fabio Camilo Unterman Santos – Guaratinguetá, 2022. 54 f : il. Bibliografia: f. 52-54 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2022. Orientador: Prof. Dr. José Alexandre Matelli 1. Aproveitamento energético. 2. Usinas siderúrgicas. 3. Energia elétrica e calor Cogeração. I. Título.
-------	--

CDU 536.72

FABIO CAMILO UNTERMAN SANTOS

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“**GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. JOSÉ ALEXANDRE MATELLI
Orientador/UNESP-FEG



Prof. Dr. JOSÉ ANTÔNIO PERRELLA BALESTIERI
UNESP-FEG



Prof. Dr. ALEX MENDONÇA BIMBATO
UNESP-FEG

Dedico este trabalho
de modo especial, aos meus pais e minha irmã

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Camilo e Márcia, por me proporcionarem todas as condições para eu me desenvolver e me tornar uma pessoa melhor a cada dia;

ao meu amigo de longa data Fauze Hammoud, pela lealdade e apoio todos os dias;

aos meus amigos da República APAE, por todos os bons momentos compartilhados

ao meu orientador *Prof. Dr. José Alexandre Matelli*, por suas orientações, provocações e ensinamentos desde a graduação até a conclusão deste trabalho;

aos funcionários da UNESP/FEG pela dedicação e alegria no atendimento.

“O objetivo da existência é a destilação mais ampla da experiência de vida possível para formar sabedoria.”

Wilhelm von Humboldt

RESUMO

A siderurgia é um setor industrial caracterizado pelo uso intensivo de energia em processos de redução de minério de ferro, fusão de matérias-primas e refino de aço líquido. Durante a produção do aço, grandes volumes de gases de exaustão são liberados, de modo a representar expressivo potencial para recuperação de calor em processos siderúrgicos e minimização de emissões de gases do efeito estufa na atmosfera. O presente trabalho tem como objetivo avaliar e otimizar o comportamento térmico de um termoacumulador baseado em material do tipo PCM (Phase Change Material) para aproveitamento energético dos gases de exaustão de um forno elétrico a arco (FEA) em uma Usina Siderúrgica da região do Vale do Paraíba, com o auxílio do software ANSYS Fluent. Foi realizada uma análise comparativa entre arranjos de termoacumulação a partir de escoamento cruzado em cilindros alinhados e alternados encapsulados com um PCM comercial, de modo a amortecer o efeito transiente dos gases de exaustão e utilizá-los em um ciclo *bottoming* de cogeração. Os resultados obtidos indicaram que a modelagem em arranjo alinhado é uma opção para amortecimento da temperatura dos gases, de modo a gerar 3,90 MW de potência elétrica.

PALAVRAS-CHAVE: Termoacumulação. Aproveitamento energético. Cogeração. Siderurgia. PCM.

ABSTRACT

Steelmaking is an energy-intensive industrial sector, characterized by the reduction of iron ore, melting of raw materials, and refining of liquid steel. During steel production, large volumes of exhaust gases are released, representing a significant potential for heat recovery in steelmaking processes and minimizing greenhouse gas emissions into the atmosphere. The present work aims to evaluate and optimize the behavior of a thermal accumulator based on a PCM material (Phase Change Material) for heat recovering use of the exhaust gases of an electric arc furnace (EAF) in a Steel Plant in the region of Vale do Paraiba, using ANSYS Fluent software. A comparative analysis was carried out between thermal accumulation arrangements from crossed flow in aligned and alternate cylinders encapsulated with a commercial PCM, to damp the transient effect of the exhaust gases and use them in a bottoming cogeneration plant. The results show that the aligned modeling is an option to damp the off gases' temperature, resulting in 3,90 MW of electric power.

KEYWORDS: Thermal acumulation. Heat recovery. Cogeneration. Mini-mill. PCM.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Etapas de produção do aço	15
Figura 2 – Arranjo geral de um FEA	17
Figura 3 – Carregamento de sucata	19
Figura 4 – Balanço energético de um FEA	20
Figura 5 – Processo de despoeiramento	22
Figura 6 – Arranjo do sistema Consteel® Evolution	23
Figura 7 – Arranjo do sistema Twin - Shell	24
Figura 8 – Arranjo do sistema Ecoarc™	25
Figura 9 – Arranjo do sistema Clean Heat Recovery	26
Figura 10 – Arranjo do sistema iRecovery®	28
Figura 11 – Sistema proposto por Nardin et al. (2014)	29
Figura 12 – Classificação dos PCMs	31
Figura 13 – Arranjo proposto por Nardin et al. (2014)	33
Figura 14 – Perfil de temperaturas obtido por Nardin et al. (2014)	33
Figura 15 – Sistema proposto por Royo et al. (2019)	34
Figura 16 – Arranjo de leito fluidizado	35
Figura 17 – 4º Furo do FEA	37
Figura 18 – Proposta de instalação do termoacumulador	40
Figura 19 – Arranjos alinhado/alternado	41
Figura 20 – Ciclo térmico de cogeração	44
Figura 21 – Campo de temperaturas em arranjo alinhado	47
Figura 22 – Campo de temperaturas em arranjo alternado	48
Figura 23 – Perfil amortecido dos gases de exaustão	49
Figura 24 – Temperatura dos gases e água no ciclo de cogeração	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Evolução da matriz energética siderúrgica no Brasil	14
Tabela 2 – Principais insumos energéticos e efluentes gerados em uma rota via FEA	21
Tabela 3 – Propriedades do PCM selecionado	41
Tabela 4 – Parâmetros para modelagem do termoacumulador	42
Tabela 5 – Coeficientes para determinação do número de Nusselt	43
Tabela 6 – Parâmetros do ciclo	45
Tabela 7 – Resultados da simulação para arranjo alinhado/alternado	48
Tabela 8 – Dados obtidos para o ciclo de cogeração	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CFD	Dinâmica de fluidos computacional (do inglês, Computational Fluid Dynamics)
CRO	Ciclo Rankine Orgânico
FEA	Forno Elétrico a Arco
GEE	Gases do Efeito Estufa
HRSR	Caldeira de recuperação (do inglês, Heat Recovery Steam Generator)
PCM	Material fundente (do inglês, Phase Change Material)
TA	Termoacumulador
TVCD	Turbina à Vapor de Condensação

LISTA DE SÍMBOLOS

C_{lp}	Calor específico do PCM na fase líquida	J/kg.K
C_{sp}	Calor específico do PCM na fase sólida	J/kg.K
C_p	Calor específico do PCM	J/kg.K
$C_{p,g}$	Calor específico dos gases de exaustão	J/kg.K
D	Diâmetro dos cilindros	m
f_l	Fração líquida PCM para dada temperatura	%
\vec{g}	Aceleração da gravidade	m/s ²
\bar{h}	Coefficiente convectivo médio para o escoamento	W/m ² .K
h_a	Entalpia da água líquida comprimida	J/kg
h_v	Entalpia de vapor d'água	J/kg
H	Entalpia total do PCM	J/kg
k_g	Condutividade térmica dos gases de exaustão	W/m.K
L	Calor latente de fusão do PCM para dada temperatura	J/kg
m	Massa do PCM	kg
\dot{m}_a	Vazão mássica de água	kg/s
\dot{m}_g	Vazão mássica dos gases de exaustão	kg/s
N	Quantidade de cilindros	-
N_T	Quantidade de cilindros por fileira	-
\bar{Nu}	Número de Nusselt médio para o escoamento	-
P	Pressão estática	Pa
Pr	Número de Prandtl dos gases de exaustão	-
Q	Energia armazenada pelo PCM	J
\dot{Q}_a	Energia para o fluido se tornar líquido comprimido	J
\dot{Q}_g	Energia contida nos gases de exaustão	J
\dot{Q}_l	Energia para o fluido se tornar líquido saturado	J
\dot{Q}_v	Energia para o fluido se tornar vapor saturado	J
Re_D	Número de Reynolds	-
S_D	Passo diagonal	m
S_T	Passo transversal	m
T_f	Temperatura final do PCM	°C

$T_{g,in}$	Temperatura de entrada dos gases de exaustão	°C
$T_{g,out}$	Temperatura de saída dos gases de exaustão	°C
T_i	Temperatura inicial do PCM	°C
T_m	Temperatura de fusão final do PCM	°C
T_s	Temperatura do PCM em dado instante	°C
\dot{W}_e	Potência mecânica	W
\dot{W}_{ger}	Potência gerada	W
\vec{v}	Vetor de velocidade	m/s
V	Velocidade de escoamento	m/s
a_m	Fração do PCM na fase líquida	%
ΔH	Calor latente de fusão do PCM	J/kg
μ	Viscosidade dinâmica	N.s/m ²
η_{HRSG}	Rendimento da caldeira de recuperação	%
η_{ger}	Rendimento do gerador	%
ρ	Massa específica	kg/m ³
ρ_g	Massa específica dos gases de exaustão	kg/m ³
$\bar{\tau}$	Tensor de tensão viscosa	kg/m ² .s ²
ν_g	Viscosidade cinemática dos gases de exaustão	m ² /s

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	JUSTIFICATIVAS	16
1.2	OBJETIVOS	16
1.3	ESTRUTURA	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	HISTÓRICO DO FORNO ELÉTRICO A ARCO (FEA)	17
2.1.1	A usina semi-integrada (<i>mini-mill</i>)	18
2.2	A OPERAÇÃO DO FORNO ELÉTRICO A ARCO (FEA).....	18
2.3	O BALANÇO DE ENERGIA NO FEA	20
2.3.1	O sistema de despoeiramento	20
2.4	TECNOLOGIAS DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DIRETO	22
2.4.1	Consteel® Evolution	22
2.4.2	Twin - Shell	23
2.4.3	Ecoarc™	24
2.5	TECNOLOGIAS DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO INDIRETO.....	26
2.5.1	Clean Heat Recovery®	26
2.5.2	IRecovery® System	27
2.6	TECNOLOGIAS DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO INOVADORAS..	28
2.7	A CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS PCM.....	30
2.8	MODELAGEM COMPUTACIONAL APLICADA AO PCM	32
3	MATERIAL E MÉTODO	36
3.1	O FEA ESTUDADO	36
3.2	A DINÂMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL.....	37
3.3	DESENVOLVIMENTO	39
3.3.1	Modelagem fluidodinâmica	41
3.3.2	Modelagem térmica	42
3.3.3	Modelagem do ciclo de cogeração	44
4	RESULTADOS	47
5	CONCLUSÃO	51
	REFERÊNCIAS	52

1 INTRODUÇÃO

O cenário industrial brasileiro, cada vez mais competitivo, demanda por implementos tecnológicos que aumentem sua produtividade com o menor custo de produção possível. Nesse sentido, destaca-se o reaproveitamento energético, o qual, a partir de resíduos de determinado processo, possuem potencial para uso em uma planta industrial. Segundo o Balanço Energético Nacional (2019), em 2018 o consumo industrial de energia elétrica foi de 31,6%, enquanto o setor siderúrgico foi responsável por 7% deste montante. Além disso, outras fontes primárias são utilizadas nos processos de produção de aço, sendo grandes contribuintes para a emissão de gases do efeito estufa. A Tabela 1 ilustra a evolução da matriz energética siderúrgica.

Tabela 1 - Evolução da matriz energética siderúrgica no Brasil.

Fontes (%)	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Gás Natural	5,5	6,4	7,1	7,8	6,3	7,3	6,8	7,1	7,0
Óleo	1,0	0,2	0,2	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0
Combustível									
Gás de Coqueria	7,6	7,3	7,2	7,3	7,3	6,9	7,4	7,3	7,5
Coque	43,5	44,2	43,9	44,2	44,2	44,5	44,9	44,6	44,2
Eletricidade	9,8	9,8	9,9	10,2	10,2	9,6	9,9	9,9	9,8
Carvão Vegetal	20,5	19,9	19,6	18,3	18,1	17,9	16,6	15,9	15,9
Outras	12,1	12,2	12,0	12,1	13,7	13,8	14,3	15,1	15,6
Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

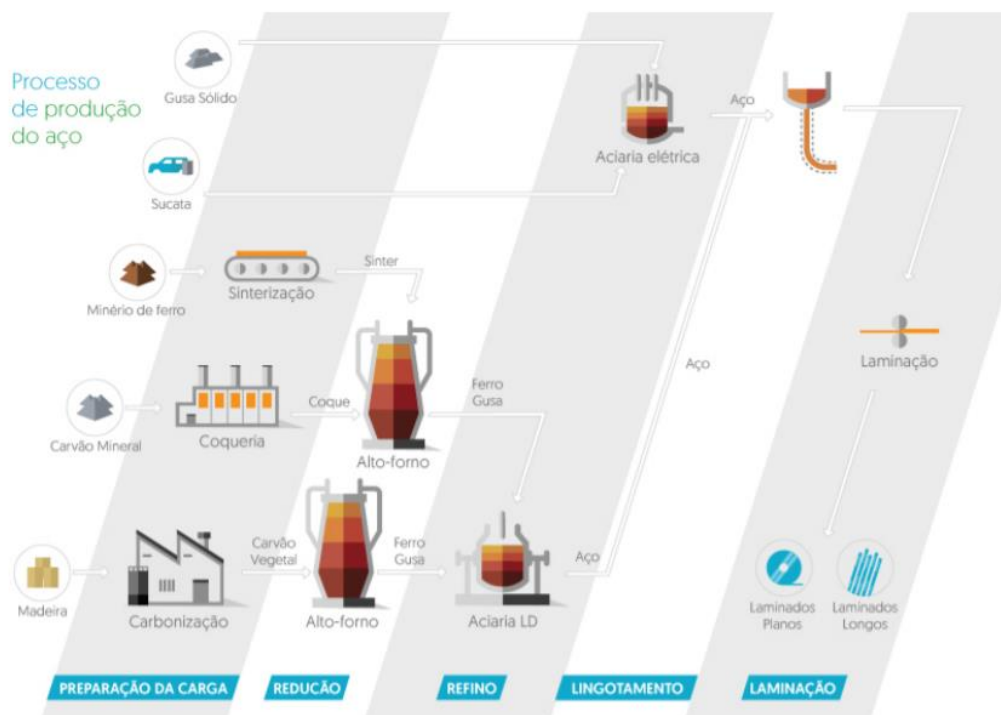
Fonte: Ministério de Minas e Energia (2019).

No Brasil, em 2015 a emissão de gases do efeito estufa (GEE) na produção de aço e ferro-gusa correspondeu a 51,1% das emissões totais em processos industriais, sendo o principal deles o gás carbônico (CO₂) (BRASIL, 2019). Além disso, a siderurgia é responsável pela emissão de material particulado e gases que contribuem para a formação de chuvas ácidas.

Quanto aos processos para a produção de aço, as indústrias siderúrgicas se dividem entre usinas integradas e semi-integradas (*mini-mills*). A primeira possui três etapas de produção: redução, refino e laminação. Nas usinas integradas, utiliza-se principalmente coque e carvão vegetal para a fabricação da gusa a partir do minério de ferro.

Nas *mini-mills*, não é realizada a etapa de redução e estas são alimentadas principalmente com sucata ferrosa, mas também com ferro-gusa. A produção do aço é feita em um forno elétrico a arco (FEA) em um processo cujo objetivo é fundir os materiais ferrosos com energia fornecida por arcos voltaicos. A temperatura do metal líquido nesses fornos pode superar o valor de 1600°C (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2019). A Figura 1 ilustra um panorama das etapas de fabricação de aço.

Figura 1. Etapas de produção do aço.



Fonte: Instituto Aço Brasil (2019).

Ao contrário das usinas siderúrgicas integradas, o processo em usinas *mini-mills* não gera gases combustíveis suficientes para uso em centrais de geração elétrica. O processo de refino do aço em *mini-mills* é realizado após o processo de fusão, com o auxílio de sistemas de gaseificação a vácuo para a remoção de impurezas, para assegurar as especificações do produto acabado. Os sistemas de desgaseificação, são, em grande parte das usinas, operados com vapor d'água superaquecido.

Para atender às normas ambientais, de saúde e segurança dos trabalhadores, sistemas de despoeiramento são instalados nas aciarias para a remoção de materiais particulados, de modo a evitar o rejeito para a atmosfera.

1.1 JUSTIFICATIVAS

Os gases de exaustão em uma *mini-mill* possuem grandes volumes de material particulado e calor. Dessa forma, podem-se adotar medidas para recuperação dos materiais particulados e calor rejeitado. Atualmente, nas aciarias elétricas brasileiras, não existem sistemas para recuperação de calor a partir dos gases de exaustão, sendo estes apenas rejeitos do processo siderúrgico. Assim, há elevado potencial para reaproveitamento dos gases de exaustão em ciclo de cogeração, de modo a gerar ganhos em eficiência energética, redução de custos operacionais e menores impactos ambientais.

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho visa simular computacionalmente a aplicação de um material do tipo PCM (*Phase Change Material*) para reaproveitamento dos gases de exaustão do sistema de despoeiramento de uma *mini-mill* brasileira e aplicação em um ciclo de cogeração Rankine do tipo *bottoming*¹.

1.3 ESTRUTURA

No capítulo 2 é detalhada uma revisão bibliográfica da evolução das usinas semi-integradas, o processo de despoeiramento, tecnologias utilizadas para aproveitamento energético na siderurgia, aplicação de modelagem computacional em sistemas com PCM e é estabelecida a base para o desenvolvimento do trabalho. No capítulo 3, é apresentada a modelagem do problema, onde são discutidas a metodologia para cálculo e simulação computacional. No capítulo 4 são apresentados os principais resultados deste trabalho e, por fim, são expostas as conclusões.

¹ No regime de geração *bottoming*, a energia térmica é gerada com prioridade sobre a elétrica.

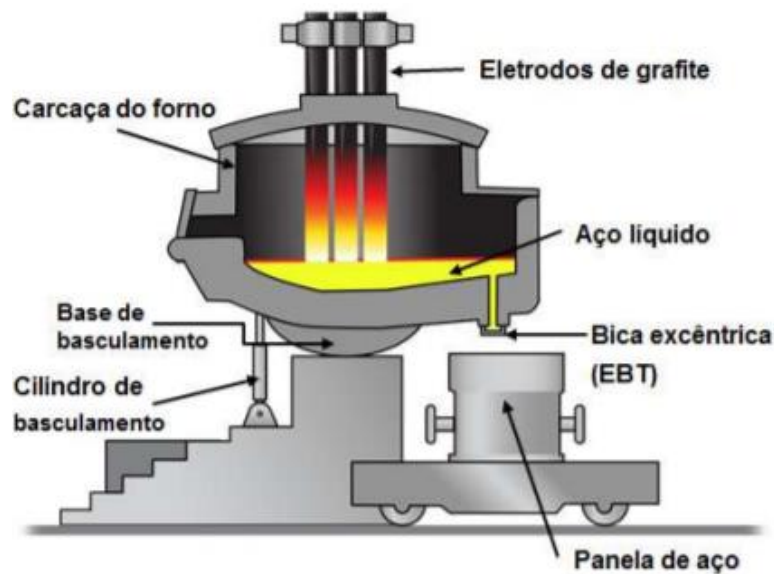
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 HISTÓRICO DO FORNO ELÉTRICO A ARCO (FEA)

O primeiro registro sobre o uso de energia elétrica na produção de aço data de 1878, quando W. Von Siemens patenteou um forno a arco indireto constituído de 2 eletrodos dispostos horizontalmente, através da parede de um cadinho. Ao formar um arco sobre a carga, os eletrodos a aqueciam por irradiação. Em 1899, Heroult patenteou o forno elétrico a arco direto e, em 1909, surgiu o forno elétrico trifásico com carcaça circular, que é utilizado atualmente (MOURÃO, 2007).

A Figura 2 ilustra o arranjo geral de um forno elétrico a arco, onde é possível observar a carcaça protetora do forno, os eletrodos de carbono para arco elétrico e o sistema de basculamento, que permite o aço ser vazado conforme o processo.

Figura 2. Arranjo geral de um FEA.



Fonte: Adaptado de Institute of Industrial Productivity (2011).

Inicialmente, os fornos elétricos utilizavam eletrodo de carbono amorfo e sem emendas. Em razão das dificuldades para sua troca, desenvolveu-se eletrodos com soquetes rosqueados, para serem emendados. O primeiro eletrodo de grafite surgiu em 1920 (MOURÃO, 2007).

De acordo com Figueira (2007), o uso do FEA expandiu-se pela Europa após a II Guerra Mundial, momento em que havia grande demanda por aço para reconstrução e grande disponibilidade de sucata gerada durante a guerra. Além disso, a Europa tornou-se um local promissor para a criação de usinas baseadas no FEA sendo o custo investido nesse tipo de planta equivalente a 140-200 US\$/tonelada/ano, enquanto as usinas integradas necessitavam de um investimento de 1000 US\$/tonelada/ano.

2.1.1 A usina semi-integrada (*mini-mill*)

Uma segunda fase de expansão ocorreu em 1969 quando a empresa siderúrgica americana NUCOR inaugurou o primeiro forno elétrico a arco baseado numa “mini usina de aço” (*mini-mill*) para a produção de aços longos. Outras empresas rapidamente seguiram este modelo devido à grande vantagem na produção de uma variedade de aços para atender demandas locais em todo o país, além de consumir sucata gerada também regionalmente (FIGUEIRA, 2007).

O desenvolvimento tecnológico permitiu que as usinas semi-integradas se tornassem unidades de fusão em larga escala, rápida e econômica para o qual o advento de tecnologia de lingotamento em placas finas abriu o mercado de produtos planos (MOURÃO, 2007).

Dessa forma, a denominação *mini-mill* deve-se à sua rota tecnológica característica por uma combinação de aciaria com FEA e processos compactos, como o lingotamento contínuo aliado à modernas práticas gerenciais. Ademais, as *mini-mills* diferenciam-se das usinas integradas não só pelo processo inicial de produção de aço, mas também pela mínima escala eficiente de produção, baixo capital investido e maior adaptabilidade ao mercado (BNDES, 2000).

2.2 A OPERAÇÃO DO FORNO ELÉTRICO A ARCO (FEA)

De acordo com Mourão (2007), o ciclo de operação do FEA é dividido nas etapas enunciadas a seguir.

Durante o primeiro carregamento, a abóboda do forno é aberta de modo que o primeiro cestão de sucata seja posicionado sobre o forno. A Figura 3 ilustra o processo de carregamento de sucata no forno elétrico a arco.

Figura 3. Carregamento de sucata.



Fonte: Siemens (2006).

Em seguida, com o forno ligado, abre-se um arco elétrico entre os eletrodos e a carga metálica, formando a primeira poça de aço líquido. O processo de fusão é continuamente implementado, até que a maior parte da carga metálica esteja derretida. Em processos modernos, utilizam-se também lanças de oxigênio, queimadores a gás e injetores de carbono para geração adicional de energia por meio de reações exotérmicas (WORLDSTEEL ASSOCIATION, 2020).

No segundo carregamento, realiza-se mais um depósito de sucata para o prosseguimento da fusão. A sucata, quando totalmente derretida, atinge uma temperatura em torno de 1570 °C e então inicia-se o processo de refino. Durante o refino, há uma retirada parcial de impurezas do aço e o ajuste de composição química; ocorre também uma elevação da temperatura do banho metálico e a formação de escória, que contribui para a limpeza e purificação do aço.

No terceiro carregamento, as reações exotérmicas com o oxigênio provocam um superaquecimento do banho, o que é evitado pela adição de agentes resfriadores. A lança injetora de carbono é então substituída pelos eletrodos e, a partir desse instante, pode-se adicionar todos os elementos sólidos para definir o peso da corrida². Por fim, quando a temperatura do aço estiver ajustada, este é vazado para uma panela previamente preparada.

² Refere-se ao processo de produção do aço desde a fundição ao refino.

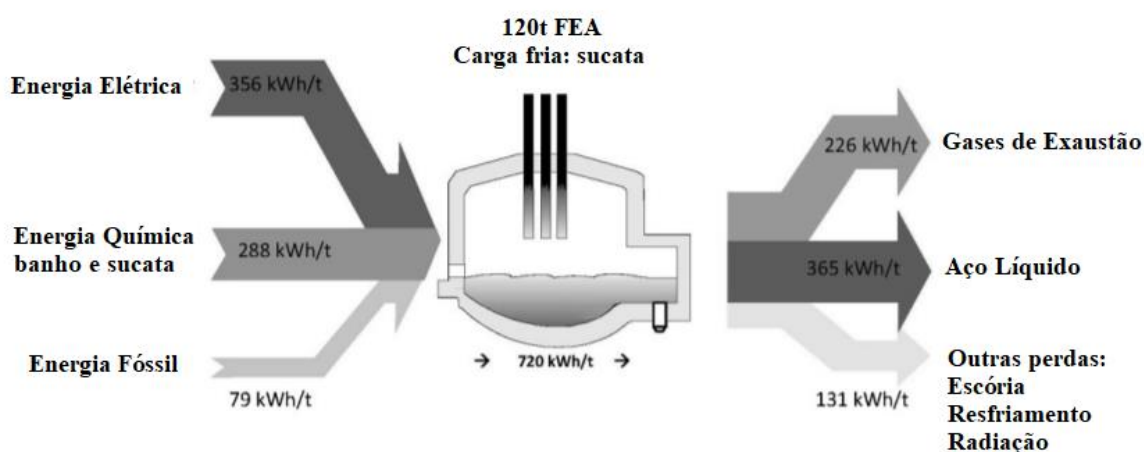
2.3 O BALANÇO DE ENERGIA NO FEA

De acordo com Sandberg et al. (2005), o processo de produção de aço no forno elétrico a arco envolve diferentes fontes de energia. A principal fonte de energia é a elétrica, todavia, outras fontes como a energia química liberada em reações exotérmicas e pela injeção de queimadores estão envolvidas no processo de fusão.

Conforme citado por Steinparzer et al. (2014), cerca de 50% da energia necessária para fusão do aço é proveniente da eletricidade, enquanto o restante provém de reações químicas exotérmicas no banho metálico, queimadores de gás natural e pela combustão de carvão. Ademais, a maior parte da energia inserida permanece no banho metálico e escória, ao passo que há dissipação de calor ao sistema de resfriamento do forno e em calor sensível para os gases de exaustão do forno, este em torno de 20-30% da energia inserida.

A Figura 4 ilustra o diagrama de Sankey para um típico forno elétrico a arco. É possível observar como as fontes energéticas de origem elétrica e química são estratificadas no FEA, bem como a parcela efetiva para fundição do aço e suas perdas.

Figura 4. Balanço energético de um FEA.



Fonte: Adaptado de Steinparzer et al. (2014).

2.3.1 O sistema de despoeiramento

A indústria siderúrgica é responsável por elevados volumes de efluentes, devido à grande quantidade de reações físico-químicas que envolvem suas diversas etapas de produção, desde a fusão ao refino (BRASIL, 2015). A Tabela 2 ilustra os principais insumos energéticos e efluentes gerados na rota de produção do aço em uma rota via forno elétrico a arco.

Tabela 2. Principais insumos energéticos e efluentes gerados em uma rota via FEA.

Área	Principais insumos	Principais efluentes		
		Gasosos	Líquidos	Sólidos
Aciaria elétrica	Energia elétrica (alto consumo)	Material particulado, metais (zinco, chumbo e mercúrio), CO ₂ e dioxinas.	-	Pós, lamas e escória.
Lingotamento contínuo	Energia elétrica (baixo consumo)	-	Óleo.	Sólidos suspensos e sucata.
Laminação	Gás natural e energia elétrica (alto consumo)	Material particulado, CO, CO ₂ , SO ₂ , NO _x , e vapor ácido.	Óleos e ácidos.	Carepas, lama e liquor ácido.

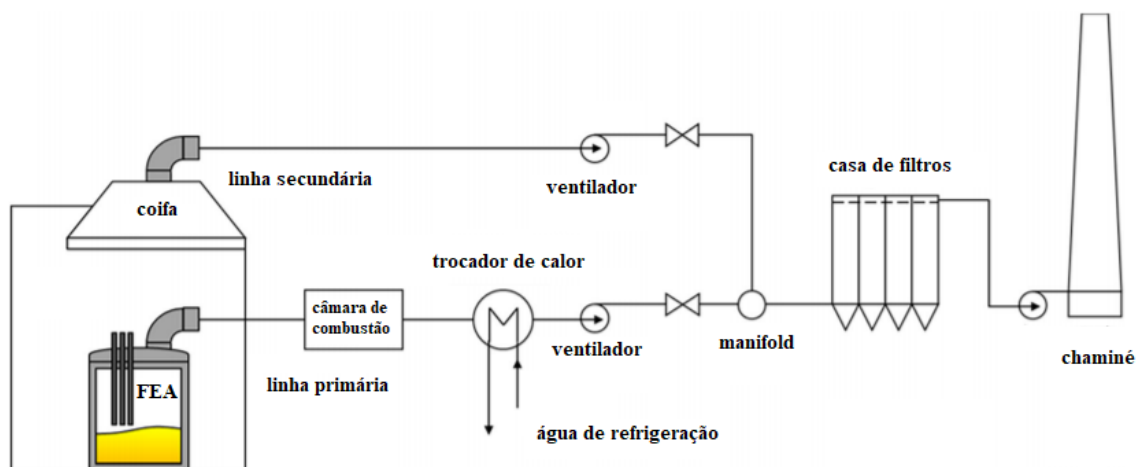
Fonte: Adaptado de BNDES (2015).

Segundo Silva e Matelli (2018), o sistema de despoejamento faz-se necessário para evitar a emissão de gases de exaustão contendo material particulado e poluentes atmosféricos. Esse sistema apresenta elevada vazão de gases quentes com alta concentração de material particulado e monóxido de carbono originado no FEA.

Tipicamente, o processo de despoejamento é composto por um sistema primário que capta gases tóxicos, monóxido de carbono e material particulado durante a operação do FEA. Após essa captação, os gases de exaustão são direcionados a uma câmara de combustão para completar a combustão de alguns gases tóxicos e, em seguida, são resfriados e direcionados para uma casa de filtros (SILVA; MATELLI, 2018).

Ainda há um sistema de captação secundário, utilizado em momentos em que o FEA é aberto, por exemplo, para carregamento ou no fim de uma corrida. Uma coifa instalada no teto aspira esses gases e os direciona, para a casa de filtros da usina. Como ocorre, também, a sucção de gases à temperatura ambiente, não é necessário resfriamento pois esses gases estarão mais frios comparados aos gases do sistema primário (SILVA; MATELLI, 2018). A Figura 5 ilustra o processo de despoejamento em uma *mini-mill*.

Figura 5. Processo de despoeiramento.



Fonte: Adaptado de Silva e Matelli (2018).

Os gases de exaustão do forno elétrico a arco são uma excelente oportunidade de aproveitamento energético.

2.4 TECNOLOGIAS DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DIRETO

Atualmente existem diferentes tecnologias de aproveitamento energético direto dos gases de exaustão em mini-mills. De acordo com Dal Magro et al. (2014), as tecnologias mais comuns envolvem o pré-aquecimento de sucata antes de seu carregamento no FEA, de modo a reduzir o consumo de eletricidade para fusão de carga metálica, diminuir o período de ciclo tap-to-tap³ (TTT), bem como controlar a emissão de gases poluentes. Nas próximas seções serão apresentadas algumas tecnologias comerciais atualmente aplicadas na indústria siderúrgica.

2.4.1 Consteel® Evolution

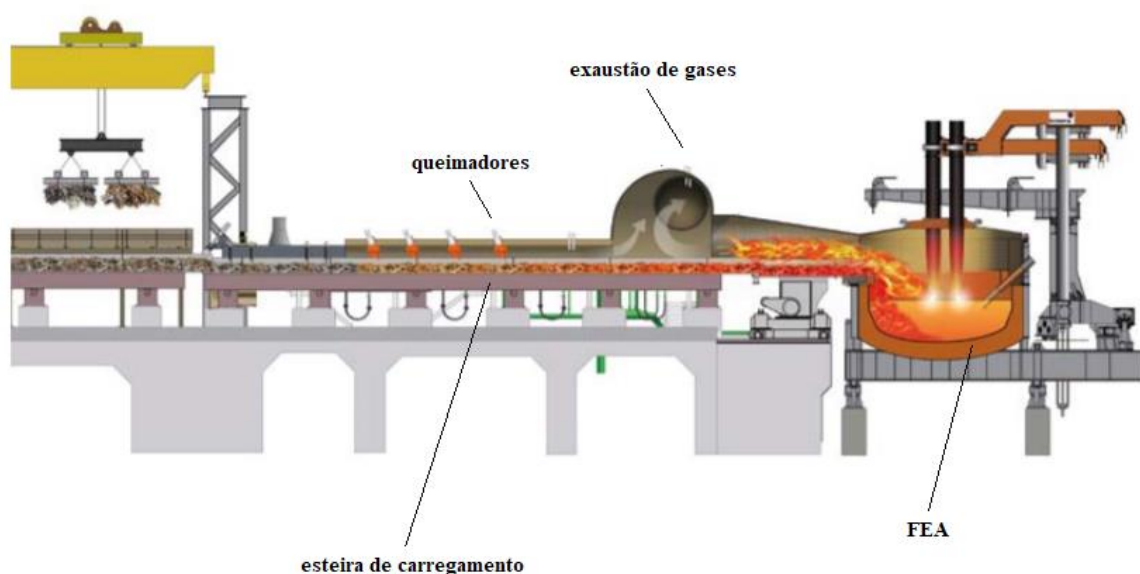
O sistema de pré-aquecimento Consteel® Evolution é fabricado pela empresa Tenova e consiste em um aquecimento contínuo da sucata e carregamento no FEA, controlando simultaneamente a emissão de gases. O sistema é composto por um túnel dividido em duas partes. A primeira parte consiste em queimadores de alto desempenho, enquanto a segunda completa a combustão dos gases de exaustão do FEA. Em seguida, os gases são misturados em uma seção intermediária para obter-se as melhores condições de recuperação energética para pré-aquecimento e fusão à medida que minimiza a emissão de poluentes.

³ Período entre ciclos completos de fusão e vazamento de aço.

Além disso, a partir do monitoramento da temperatura, vazão e composição dos gases de exaustão, pode-se regular a entrada de energia pelos queimadores de modo a efetivar o pré-aquecimento de sucata e reduzir custos operacionais. Ainda há menores custos logísticos para carregamento de sucatas, manutenção e uma redução na emissão de poeiras entre 30 e 40%.

Esse sistema permite a operação do forno elétrico a arco com uma carga constante, representando grande vantagem comparado a uma operação convencional em que a sucata é fundida por ação direta do arco elétrico. A Figura 6 ilustra o arranjo do sistema Consteel® Evolution.

Figura 6. Arranjo do sistema Consteel® Evolution.



Fonte: Adaptado de Tenova (2020).

2.4.2 Twin - Shell

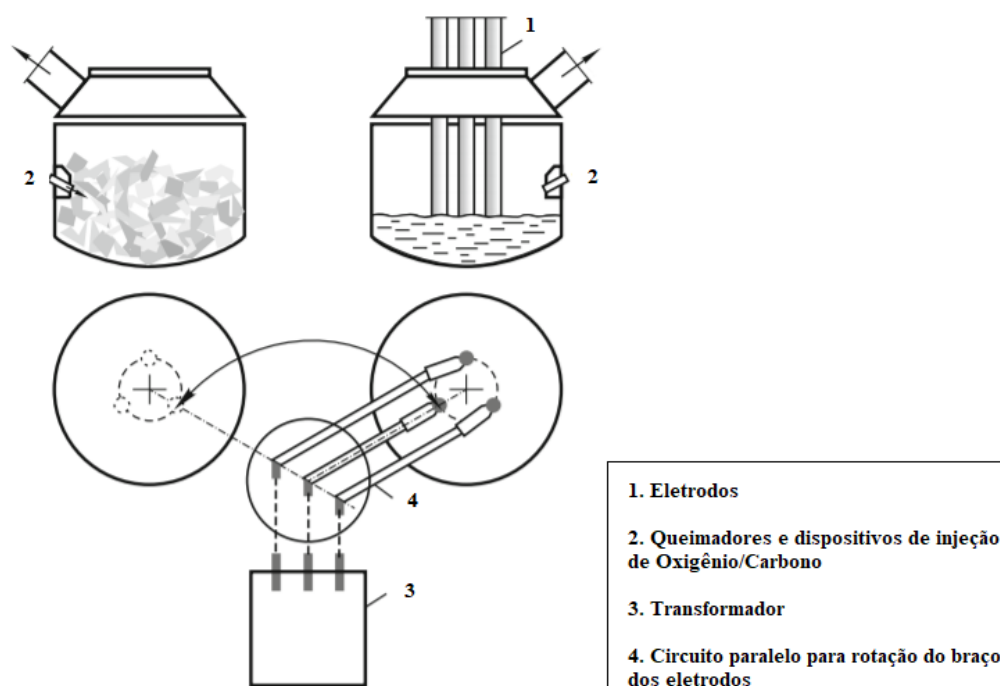
A tecnologia Twin - Shell é desenvolvida em conjunto pelos fabricantes NSC, NKK, SMS - Demag e CLECIM e consiste no uso de dois fornos elétricos a arco idênticos, que dividem os mesmos eletrodos: enquanto o primeiro forno funde a sucata metálica, o segundo recebe os gases de exaustão a alta temperatura para pré-aquecimento da carga de sucata (LEE; SOHN, 2014).

Os fornos são equipados com queimadores para aquecer a sucata bem como injetores de oxigênio e carbono. Os queimadores são benéficos para manter a alta temperatura do forno mesmo durante o *power-off*⁴ do FEA (TOLOUEVSKI; ZINUROV, 2017).

⁴ Período em que o forno elétrico a arco não está em operação.

A Figura 7 ilustra o arranjo do sistema Twin – Shell. Percebe-se que ambos os fornos são conectados pelo mesmo transformador e há um circuito paralelo que permite a rotação do braço dos eletrodos para que seja utilizado alternativamente nos dois fornos, de acordo com a necessidade do processo (TOLOUEVSKI; ZINUROV, 2017).

Figura 7. Arranjo do sistema Twin – Shell.



Fonte: Adaptado de Tolouevski e Zinurov (2017).

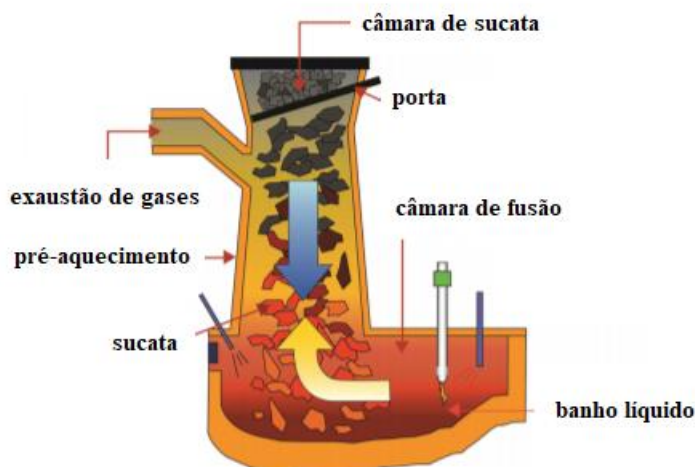
Esse sistema permite uma redução de aproximadamente 17 kWh/t de energia com uma temperatura média de sucata em torno de 200 ° C, sendo grande vantagem a estrutura simples para alimentação de sucata e uma significativa redução no período de *tap-to-tap*. Todavia, a complexidade de projeto e custos de manutenção são barreiras à disseminação dessa tecnologia nas indústrias (LEE; SOHN, 2014; TOLOUEVSKI; ZINUROV, 2017).

2.4.3 Ecoarc™

De acordo com Lee e Sohn (2014), a tecnologia Ecoarc (*Ecologically Friendly and Economical Arc*) consiste em um sistema com uma câmara vertical de pré-aquecimento de sucata conectada ao FEA de corrente alternada, em que os gases de exaustão do processo aquecem a sucata até uma temperatura média de 650°C.

A Figura 8 ilustra o arranjo da tecnologia Ecoarc™, em que se nota a seta azul como o sentido de alimentação de sucata e a seta amarela como o fluxo dos gases de exaustão do processo. Toda a estrutura desse sistema é rígida, sem acoplamentos intermediários.

Figura 8. Arranjo do sistema Ecoarc™.



Fonte: Adaptado de Lee e Sohn (2014).

De acordo com a fabricante Steel Plantech (2020), esta tecnologia de pré-aquecimento de sucata permite uma redução de 100 kWh/t de energia inserida bem como uma diminuição em 30% na emissão de gases do efeito estufa e 40% na emissão de poeira.

Todavia, há algumas limitações na aplicação do sistema Ecoart™ pela oxidação da sucata e sua fusão parcial, de modo a necessitar um controle rigoroso nas dimensões de sucata e na formação de escória espumante. Além disso, assim como no sistema Consteel®, há uma redução de produtividade devido ao maior tempo para fusão de sucata no banho líquido do forno elétrico a arco. Com a diminuição na taxa de transferência de calor por arco elétrico e um curto *tap-to-tap*, há menor carga térmica nos gases de exaustão para pré-aquecimento da sucata, sendo necessário o uso de fontes energéticas alternativas para compensar a redução no consumo de energia elétrica e manter a produtividade do processo (DAL MAGRO et al., 2015; LEE; SOHN, 2014; TOLOUEVSKI; ZINUROV, 2017).

2.5 TECNOLOGIAS DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO INDIRETO

Nos sistemas de aproveitamento energético indireto, a energia contida nos gases de exaustão do forno elétrico a arco é recuperada através da transferência de calor e geração de

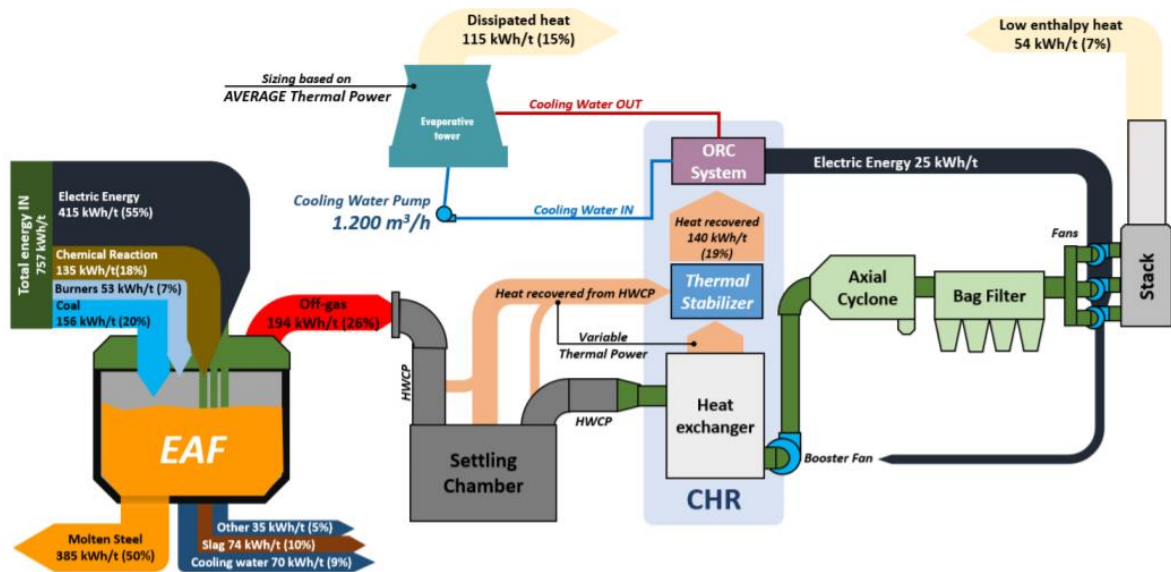
vapor ou água quente para uso em outros processos industriais (DAL MAGRO et al., 2015).

2.5.1 Clean Heat Recovery®

A recuperação energética a partir de vapor d'água superaquecido para geração de energia elétrica em um Ciclo de Rankine Orgânico (CRO) é atualmente empregada pela fabricante Danieli. O princípio operacional do CRO é baseado na utilização de um fluido de trabalho com menor ponto de ebulição para expansão na turbina quando comparado a um Ciclo Rankine convencional, com uso de água (SANTANGELO et al., 2015).

Em virtude da variabilidade no perfil dos gases de exaustão do FEA, desenvolveu-se um tanque estabilizador com água superaquecida e pressurizada para amortecer a oscilação da temperatura dos gases de exaustão, bem como para armazenamento de energia, de modo a suprir o ciclo mesmo em períodos de *power-off* (SANTANGELO et al., 2015). A Figura 9 ilustra o sistema Clean Heat Recovery®.

Figura 9. Arranjo do sistema Clean Heat Recovery®.



Fonte: Santangelo et al. (2015).

De acordo com Santangelo et al. (2015), para um forno elétrico a arco de 120 t, essa tecnologia permite recuperar entre 15 e 20 kWh/t de energia dissipada nos gases de exaustão bem como gerar 3,5 MW de potência elétrica a partir do Ciclo de Rankine Orgânico na planta e evitar a emissão de 10,000 t/ano de CO₂ na atmosfera.

2.5.2 iRecovery System®

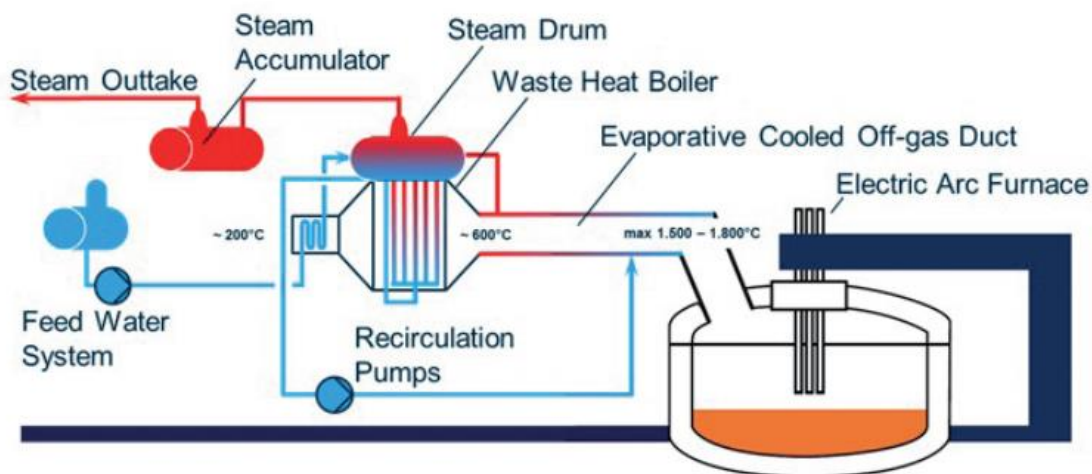
Nas usinas siderúrgicas são tradicionalmente utilizados dutos resfriados à água para troca de calor com o FEA. Todavia, esta energia dissipada não é recuperada. Para tanto, a empresa Tenova desenvolveu um sistema de reaproveitamento energético que produz vapor através de sistemas de resfriamento evaporativos. Atualmente, esse sistema representa uma das melhores soluções para recuperação energética de gases de exaustão em virtude de sua flexibilidade (DAL MAGRO et al., 2015).

Dessa forma, a geração de vapor pode ser utilizada em sistemas de metalurgia secundária⁵, geração elétrica em turbinas para consumo interno ou venda para um consumidor externo.

A Figura 10 ilustra o arranjo do sistema de reaproveitamento iRecovery®. Pode-se notar que a temperatura dos gases de exaustão do FEA pode ser reduzida até aproximadamente 200°C a partir de uma caldeira de recuperação. O sistema possui dutos com água de resfriamento pressurizada com temperatura entre 180°C e 250°C e absorve energia dos gases para atingir o estado de vapor. A mistura vapor-água é então levada a uma caldeira aquatubular onde são separadas; o vapor de água é substituído pela água de reposição e então a água retorna ao circuito.

⁵ Na metalurgia secundária, realiza-se o refino do aço pela adição de elementos de liga e desgaseificação à vácuo, com o uso de ejetores à vapor.

Figura 10. Arranjo do sistema iRecovery®.



Fonte: Adaptado de Born e Granderath (2013).

De acordo com Born e Granderath (2013), devido à elevada troca térmica no circuito, é necessário menor volume de água de circulação de modo a necessitar menores bombas, tubulações e reduzindo custos de manutenção. O sistema possui eficiência de recuperação energética em torno de 75% (DAL MAGRO et al., 2015).

2.6 TECNOLOGIAS DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO INOVADORAS

Atualmente, há estudos que avaliam aumento da eficiência energética baseados em sais fundidos e materiais do tipo PCM (*Phase Change Material*). O uso de sal fundido como fluido de troca térmica e armazenamento energético foi testado em uma planta piloto instalada em um FEA Simetal Quantum⁶ (STEINPARZER et al., 2014).

De acordo com Agyenim et al. (2010), o uso de PCMs baseados em armazenamento de calor latente são considerados uma excelente opção por sua principal característica de absorver ou liberar energia durante a transição de fase.

Ao contrário dos sistemas de armazenamento baseados em calor sensível, os PCMs possuem a característica de absorver e liberar calor a uma temperatura constante, de modo a absorver de 5 a 14 vezes mais calor por unidade de volume quando comparados a um material baseado em calor sensível como a água (SHARMA et al., 2009).

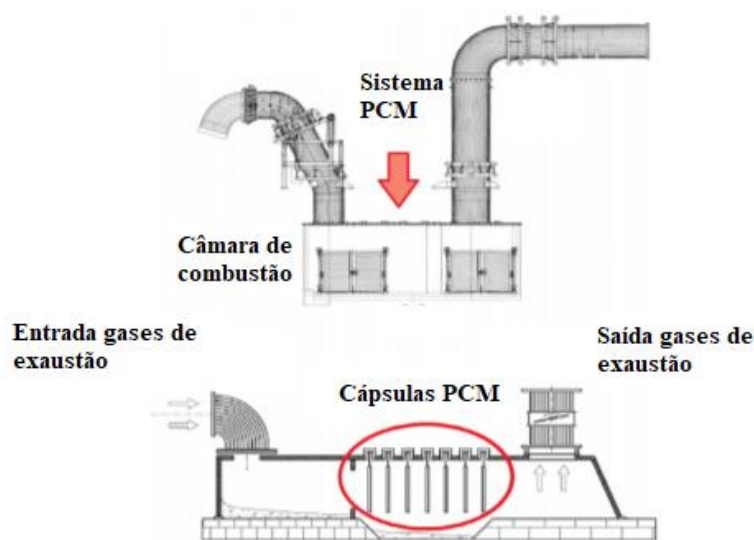
⁶ Arranjo de FEA desenvolvido pela empresa Primetal Technologies.

Nardin et al. (2014) propôs um sistema de aproveitamento energético dos gases de exaustão de um forno elétrico a arco baseado em metais como PCMs encapsulados em cilindros. Nessa aplicação, o objetivo consistiu no amortecimento do efeito transiente na temperatura desses gases para um posterior aproveitamento energético em um ciclo Rankine.

O amortecimento no perfil de temperatura dos gases de exaustão gera condições mais favoráveis para a alimentação de vapor em uma turbina, elevando sua eficiência pela operação em plena carga.

A Figura 11 ilustra o sistema proposto por Nardin et al. (2014). Pode-se notar que o sistema é instalado na câmara de combustão do FEA e os cilindros são dispostos em escoamento cruzado com os gases de exaustão do forno.

Figura 11. Sistema proposto por Nardin et al. (2014).



Fonte: Adaptado de Nardin et al. (2014).

De acordo com Nardin et al. (2014), a disposição das cápsulas com PCM no interior da câmara de combustão é devido à elevada temperatura dos gases nessa zona, bem como pela barreira que as cápsulas impõem ao escoamento, de modo a favorecer a remoção de poeira sem necessitar equipamentos adicionais para esta finalidade. Além disso, o sistema é projetado de forma que não seja necessária nenhuma alteração especial na planta.

2.7 A CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS PCM

Os mecanismos para armazenamento térmico ocorrem de duas formas: por troca de calor sensível ou latente. Na primeira, a energia é armazenada pela variação da temperatura de um material no estado sólido ou líquido, em função de sua capacidade térmica e variação de temperatura. A quantidade de energia armazenada é explicitada pela Eq. 1.

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} mC_p dT = mC_p(T_f - T_i) \quad (1)$$

Sendo Q a energia armazenada em Joule [J], m a massa do material [kg], C_p [J/kg K] o calor específico do material e T_i e T_f [°C] são as temperaturas iniciais e finais, respectivamente.

Em armazenamento térmico baseado em troca de calor latente, a energia é armazenada durante a etapa de carregamento do material em que ocorre mudança de fase. Durante a descarga, essa energia é liberada e o material retorna à fase anterior. Nota-se que os processos de mudança de fase ocorrem em condições aproximadamente isotérmicas, ao contrário do mecanismo de armazenamento por calor sensível, no qual a absorção energética ocorre em função do aumento da energia interna do material. Uma grande vantagem desse mecanismo é sua elevada densidade de armazenamento aliada a uma pequena variação de temperatura entre carga e descarga de calor (PIELICHOWSKA; PIELICHOWSKI, 2014).

A quantidade de energia armazenada por mecanismo de calor latente em um PCM é explicitada pela Eq. 2.

$$Q = \int_{T_i}^{T_m} mC_{sp} dT + ma_m \Delta H + \int_{T_m}^{T_f} mC_{lp} dT \quad (2)$$

Sendo T_m a temperatura de fusão do material [°C], a_m a fração do material que está sendo fundida e ΔH o calor latente de fusão do material [J/kg].

Segundo Pielichowska e Pielichowski (2014), a seleção dos PCMs a serem aplicados deve possuir algumas propriedades físicas, cinéticas, químicas e econômicas desejáveis:

- (i) Ponto de fusão adequado à temperatura de operação do sistema;
- (ii) Elevado calor latente de mudança de fase por unidade de volume;
- (iii) Elevado calor específico;
- (iv) Elevada condutividade térmica em ambas as fases do material, para que o gradiente de temperatura em carga e descarga seja mínimo;

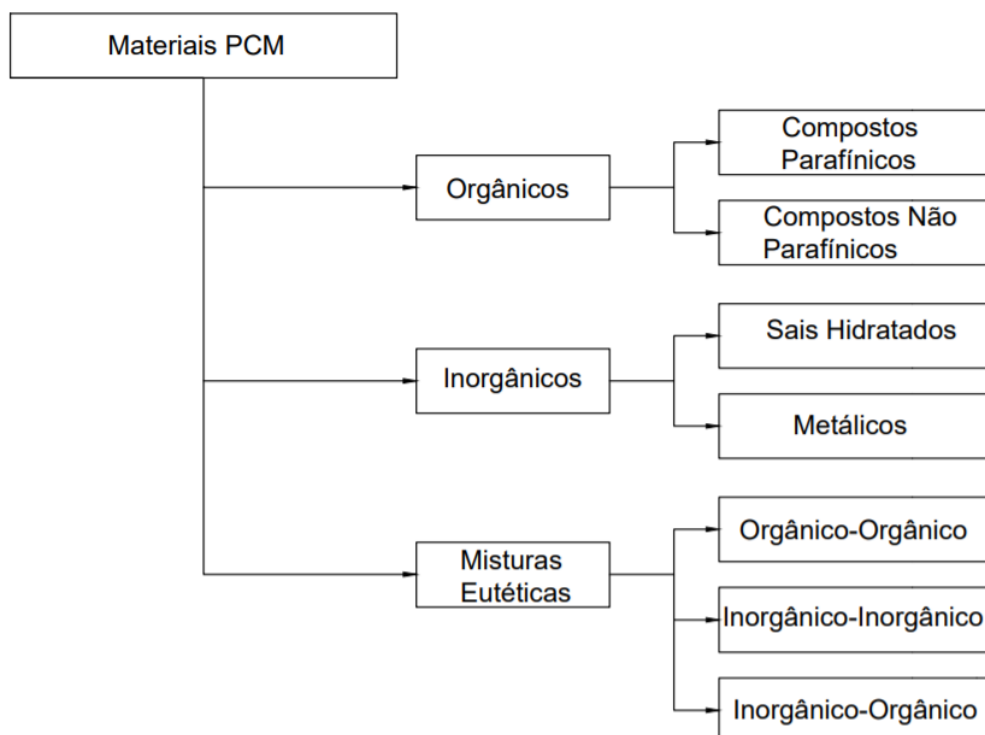
- (iv) Pequena variação volumétrica em mudança de fase;
- (v) Fundir uniformemente;
- (vi) Possuir estabilidade química para que não ocorra interação e corrosão com o material de encapsulamento;
- (vii) Disponibilidade a baixo custo.

De acordo com Pielichowska e Pielichowski (2014), a classificação dos PCMs pode ser feita de acordo com seu ponto de fusão:

- PCM de baixa temperatura: Ponto de fusão abaixo de 15°C.
- PCM de média temperatura: Ponto de fusão entre 15°C e 90°C.
- PCM de alta temperatura: Ponto de fusão acima de 90°C.

Para Sharma et al. (2009), os PCMs podem ser classificados de acordo com o tipo de material, conforme a Figura 12 a seguir.

Figura 12. Classificação dos PCMs.



Fonte: Adaptado de Sharma et al. (2009).

Álcoois, óleos e parafinas são típicos PCMs orgânicos. São significativamente baratos em virtude de sua variedade. Estes materiais possuem elevado calor latente de fusão e pouca segregação de fase, que permite um uso cíclico sem que o calor latente de fusão decresça. Uma desvantagem dos materiais orgânicos seria sua condutividade térmica relativamente baixa (SHARMA et al., 2009).

O grupo de materiais inorgânicos é formado por sais hidratados e materiais metálicos. Possuem elevado calor latente de fusão, condutividade térmica e pequena variação volumétrica durante a mudança de fase, de modo a tornar sua aplicação vasta. Todavia, sua grande desvantagem é a fusão não uniforme, que diminui sua capacidade de absorção e liberação de energia a cada ciclo (SHARMA et al., 2009).

Os materiais eutéticos são basicamente misturas entre compostos orgânicos e inorgânicos. Seu estudo, ainda recente, propõe a melhoria de propriedades químicas e físicas que limitam o uso desses compostos quando aplicados isoladamente.

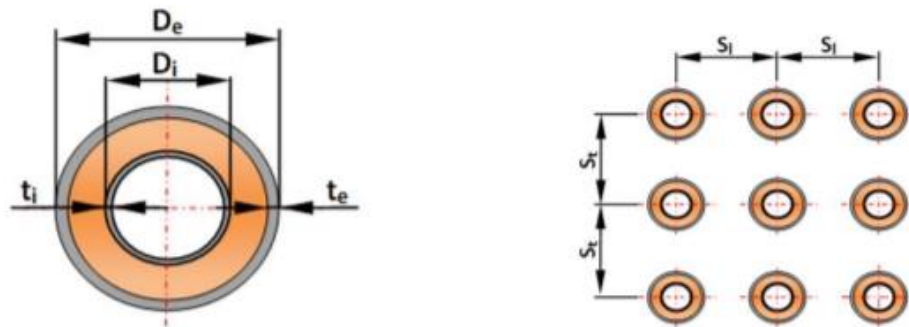
Embora haja uma diversidade de materiais para aplicação, é impossível encontrar um PCM que satisfaça todas as propriedades químicas, físicas e econômicas necessárias à sua aplicação. Dessa forma, algumas propriedades do material podem ser compensadas, como por exemplo, pela aplicação de superfícies aletadas no encapsulamento do PCM para melhorar a sua condutividade térmica ou ainda pela adição de agentes nucleantes para evitar o subresfriamento de um PCM de baixa temperatura (CÁRDENAS et al., 2013).

2.8 MODELAGEM COMPUTACIONAL APLICADA AO PCM

A partir da aplicabilidade dos materiais de mudança de fase em termoacumulação e eficiência energética, pesquisas baseadas em modelagem computacional são desenvolvidas para descrever os fenômenos que envolvem os sistemas baseados em PCM.

Nardin et al. (2014) avaliou o potencial de amortecimento do comportamento transiente dos gases de exaustão em um forno elétrico à arco (FEA) com PCM encapsulado em cilindros concêntricos ou simples. Foram utilizados o software ANSYS Fluent, o pré-processador GAMBIT e o sistema foi analisado em configurações alinhadas, alternadas e em diferentes diâmetros de cilindros. A Figura 13 ilustra o arranjo proposto.

Figura 13. Arranjo proposto por Nardin et al. (2014).

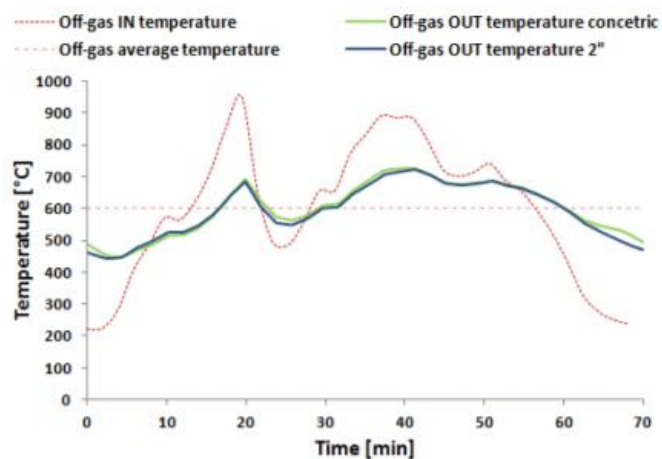


Fonte: Adaptado de Nardin et al. (2014).

Foram avaliados três tipos de PCMs: estanho, alumínio e chumbo, encapsulados em cilindros com diâmetro externo de $\frac{3}{4}$ ", 1" e 2". Para simulação, considerou-se a velocidade dos gases de exaustão constante ao longo do tempo, enquanto as propriedades do PCM foram assumidas como valores médios nas suas respectivas temperaturas de fusão; adotou-se o modelo $k - \varepsilon$ para simular escoamento turbulento.

Assim, concluiu-se que cilindros concêntricos encapsulados com alumínio em arranjo alinhado geram menor perda de carga e, em maiores diâmetros, contribuem para uma troca térmica mais efetiva. A Figura 14 ilustra o perfil de temperatura obtido.

Figura 14. Perfil de temperaturas obtido por Nardin et al. (2014).

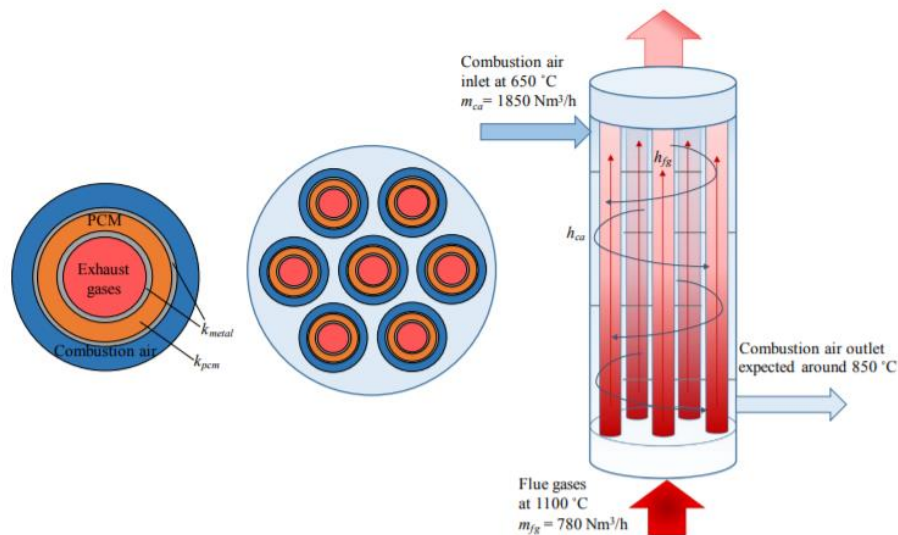


Fonte: Adaptado de Nardin et al. (2014).

Embora o perfil de temperatura dos gases na saída do termoacumulador seja similar, a aplicação de cilindros concêntricos justifica-se para promover melhor resistência estrutural em função da expansão térmica do alumínio.

Royo et al. (2019) desenvolveu um termoacumulador em formato de casca e tubo para reaproveitamento dos gases de exaustão em um forno a gás natural para pré-aquecimento de ar para combustão. A Figura 15 ilustra o sistema proposto.

Figura 15. Sistema proposto por Royo et al. (2019).



Fonte: Royo et al. (2019).

Para modelagem, foi adotado um algoritmo genérico com flexibilidade para aplicação em diferentes configurações de sistemas de casca e tubos. Um código de simulação numérica foi desenvolvido no software MATLAB®, para obter-se o perfil de temperatura do PCM ao longo dos períodos de mudança de fase. A partir do método das diferenças finitas, avaliou-se o comportamento de um modelo 3D do termoacumulador.

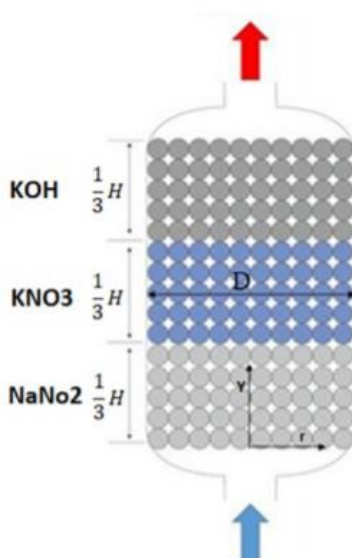
No algoritmo desenvolvido, nos tubos em que escoam os gases de exaustão e ar de combustão o mecanismo de transferência de calor governante é o de convecção forçada. No início da simulação, considera-se o sistema a uma temperatura ambiente e, quando a fração de PCM em estado líquido é superior a 90%, considera-se que houve “carga” do PCM e o perfil de temperatura do sistema é determinado. No período de descarga, o perfil de temperatura do PCM encapsulado é adotado como condição inicial para determinar a temperatura dos gases de exaustão na saída do termoacumulador e atualiza-se também a temperatura de saída do ar de combustão e do PCM a cada iteração.

Quando a temperatura do ar de combustão na saída do termoacumulador atinge 700°C, considera-se o fim do período de descarga e o perfil de temperatura do sistema nesse instante é adotado como condição inicial para o próximo ciclo de carga. De acordo com Royo et al. (2019),

o sistema proposto permite atingir uma temperatura do ar de combustão entre 865°C e 705°C.

Mohammadnejad e Hossainpour (2020), investigaram a aplicação de PCM encapsulado esfericamente em leito fluidizado, com o auxílio do software CFD Comsol®. Foram avaliadas camadas de diferentes materiais de mudança de fase e simulações computacionais comparadas com resultados experimentais para validar o método. A Figura 16 ilustra o arranjo estudado.

Figura 16. Arranjo de leito fluidizado.



Fonte: Mohammadnejad e Hossainpour (2020).

Na simulação, simplificou-se a geometria para um arranjo 2D com malha dividida entre elementos triangulares e retangulares e, para validar o modelo, algumas hipóteses simplificativas foram adotadas: ar escoando a uma temperatura e velocidade constante; os perímetros do tanque contendo as cápsulas com PCM são termicamente isolados; não há geração interna de energia e efeitos de radiação são desprezíveis.

Dessa forma, comparou-se o perfil de temperaturas do PCM obtidas numericamente e experimentalmente e obteve-se um erro máximo de 3,5%. Essa diferença pode ser explicada devido a perdas térmicas no arranjo experimental, pois o sistema não é perfeitamente isolado.

Com o modelo computacional validado, avaliou-se o encapsulamento de KOH, KNO₃ e NaNO₂ em contato com o escoamento de uma mistura de 60% NaNO₃ + 40% KNO₃ à 250°C, em diferentes velocidades e arranjos de PCM. Assim, Mohammadnejad e Hossainpour (2020) demonstraram que a porosidade do meio, bem como a espessura de cada camada de PCM são fatores de relevantes no potencial de termoacumulação e pode-se gerar um ganho de 29,2% em eficiência.

3 MATERIAL E MÉTODO

O presente trabalho é um estudo da viabilidade técnica de reaproveitamento dos gases de exaustão do FEA no qual é avaliado o uso de material PCM para termoacumulação. Como o regime de trabalho do forno é transiente, a energia térmica recuperável varia ao longo do tempo. O estudo visa o amortecimento do efeito transiente desses gases de exaustão.

3.1 O FEA ESTUDADO

O forno elétrico a arco alocado na usina siderúrgica estudada é produzido pela fabricante DEMAG® com 40 MW de potência, tipo AC (corrente alternada) e possui três eletrodos de carbono, com capacidade de 100 t de aço vazado. Possui paredes internas revestidas por tijolos refratários, carcaça e abóboda compostas por painéis resfriados à água. A abóboda e eletrodos são retráteis, assim sendo deslocados durante os carregamentos de sucata. O FEA possui duas saídas para as quais pode bascular: uma é a porta para retirada de escória e a outra, denominada “bica”, para vazamento do aço líquido.

Para adição de energia, há um sistema supersônico de injeção de oxigênio, Cojet®, além de sistema de injeção de carbono e queimadores adicionais a gás natural, acionados de acordo com o tipo de aço a ser produzido.

O tempo médio de corrida, desde seu carregamento até o vazamento do aço, é denominado *tap-to-tap* e dura em média 90 minutos. O tempo médio que o forno está em funcionamento, denominado *power-on*, é de 60 minutos, enquanto o tempo de forno inativo, *power-off*, é em média 30 minutos.

O FEA trabalha com pressão interna negativa em virtude do sistema de despoeiramento para sucção dos gases de exaustão. Este, localiza-se no chamado “4º furo” da abóboda do forno, conforme ilustrado na Figura 17.

Figura 17. “4º furo” do FEA.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 A DINÂMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

Para avaliar o comportamento dos gases de exaustão e o potencial de termoacumulação dos PCMs, será utilizada a versão acadêmica e gratuita do ANSYS Fluent, software de CFD (*Computational Fluid Dynamics*) que, a partir do método dos volumes finitos, soluciona as equações de conservação de momento (ou Equação de Navier-Stokes, Eq. 3), equação de continuidade (Eq. 4) e equação de conservação de energia (Eq. 5) em domínios particulares.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \vec{v} \cdot \nabla(\rho \vec{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot \bar{\tau} + \rho \vec{g} \quad (3)$$

Sendo, na Eq. 3, ρ a massa específica do fluido, \vec{v} o vetor de velocidade, $\bar{\tau}$ o tensor de tensão viscosa, \vec{g} o vetor de aceleração gravitacional e P a pressão estática.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (4)$$

A Eq. 4 estabelece que, se há conservação de massa em regime permanente, o seu acúmulo líquido é igual a zero. As equações (3) e (4) caracterizam o escoamento de um fluido em condições isotérmicas. Para descrever a transferência de calor, introduz-se a conservação

de energia (Eq. 5).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot [\vec{v}(\rho E + P)] = \nabla \cdot [k\nabla T + (\vec{\tau} \cdot \vec{v})] + \dot{S} \quad (5)$$

A Eq. 5 estabelece que a taxa líquida na qual a energia entra no volume de controle, mais a taxa na qual o calor é adicionado, menos a taxa na qual o trabalho é realizado pelo fluido no volume de controle, é igual a zero. O primeiro termo da Eq. 5 representa a taxa de variação de energia total, composta pela energia interna, cinética e potencial. O segundo está relacionado à energia convectiva líquida saindo do sistema e trabalho por forças de pressão. O terceiro termo da igualdade representa a transferência de energia devido à condução, pela Lei de Fourier e por tensões viscosas, respectivamente. O último termo correlaciona-se com a geração de energia por reação química, radiação ou fonte externa de calor (ITEN; LIU, 2018).

Em dinâmica de fluidos computacional, estas equações são discretizadas, linearizadas e finalmente solucionadas através de métodos iterativos.

Para a solução de problemas de engenharia envolvendo materiais de mudança de fase, pode-se aplicar o Método da Entalpia. Neste, o primeiro termo da equação (5) é aproximado a uma taxa de variação da entalpia e simplificado conforme a Eq. 6.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) = k\nabla T \quad (6)$$

A entalpia total (H) corresponde ao somatório do calor sensível e latente, explicitado na Eq. 7.

$$H(T) = \int_{T_m}^T \rho c_p dT + \rho f_l L \quad (7)$$

Na Eq. 7, ρ corresponde à massa específica, c_p ao calor específico e L ao calor latente do PCM, este relacionado à fração líquida do material, f_l , que permite calcular a variação na entalpia do material durante a mudança de fase. A forma geral de f_l é explicitada na Eq. 8.

$$f_l = \begin{cases} 0 & \text{se } T < T_s \text{ (sólido)} \\ \frac{T-T_s}{T_l-T_s} & \text{se } T_s < T < T_l \text{ (transição)} \\ 1 & \text{se } T > T_l \text{ (líquido)} \end{cases} \quad (8)$$

No ANSYS Fluent, este método é denominado *Solidification & Melting*. A partir de uma

formulação de entalpia-porosidade, a região solidificada é tratada como um meio poroso. Assim, nesta formulação, baseada no balanço de entalpia, a porosidade é igualada à fração líquida f_l e calculada em um elemento em cada iteração. Na fase de transição, a fração líquida varia entre 0 e 1. Quando o material está totalmente solidificado em um elemento da malha, a porosidade iguala-se a zero (ITEN; LIU, 2018).

Substituindo a Eq. 8 na formulação para entalpia total, Eq. 7, tem-se a Eq. 9:

$$H(T) = \int_{T_s}^T \rho c_{p,s} dT \quad \text{se } T < T_s \text{ (sólido)} \quad (9a)$$

$$H(T) = \rho L \frac{T-T_s}{T_l-T_s} \quad \text{se } T_s < T < T_l \text{ (transição)} \quad (9b)$$

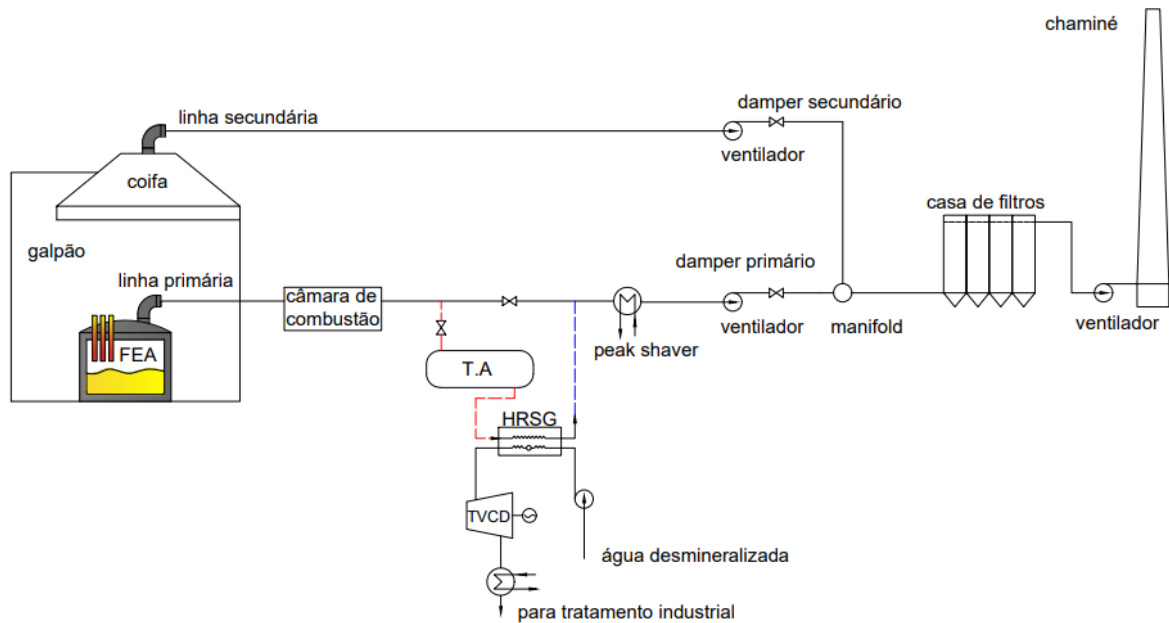
$$H(T) = \int_{T_l}^T \rho c_{p,l} dT + \rho L \quad \text{se } T > T_l \text{ (líquido)} \quad (9c)$$

3.3 DESENVOLVIMENTO

A energia contida nos gases de exaustão do sistema de despoeiramento do forno elétrico indica relevante potencial para recuperação de calor. Esta, associada a uma planta de cogeração, pode gerar energia elétrica para consumo interno, bem como reduzir o consumo de água industrial para resfriamento desses gases.

Na aciaria em questão, o sistema de despoeiramento é controlado em função da temperatura dos gases por meio de injeção de água nebulizada em dispositivo denominado *peak shaver*, pressão do sistema e abertura de *dampers*, dispositivos que alteram a área de sucção dos gases do sistema. Este possui programação pré-definida de acordo com a etapa da corrida (carregamento, fusão, refino ou vazamento), sendo os *dampers* com abertura variável. Ao final do processo de despoeiramento, os gases de exaustão devem ser liberados em temperatura inferior a 150°C, para que não ocorra degradação do filtro de mangas de captação de material particulado. O termoacumulador proposto introduz uma alternativa à programação dos *dampers* do sistema de despoeiramento, conforme Figura 18.

Figura 18. Proposta de instalação do termoacumulador.



Fonte: Adaptado de Silva e Matelli (2018).

Com a proposta alternativa, reduz-se a sobrecarga térmica ao sistema de despoeiramento em consonância com uma redução do uso de água de resfriamento no *peak shaver*, uma temperatura de entrada de gases na casa de filtros em faixa adequada (inferior à 150°C) e geração de excedente elétrico na turbina a vapor de condensação (TVCD).

A modelagem do termoacumulador envolve o monitoramento de parâmetros como a temperatura dos gases de exaustão do FEA, o arranjo físico do termoacumulador e as propriedades do PCM.

Para determinar a energia disponível nos gases de exaustão, e posterior seleção do PCM, foram feitas as seguintes considerações: dois patamares de temperatura dos gases, 290°C e 400°C, foram coletados e sua temperatura média definida como ponto de fusão do material a ser selecionado. A Tabela 3 especifica as propriedades do material PCM comercial selecionado.

Tabela 3. Propriedades do PCM selecionado.

Material H355	
Temperatura de fusão (°C)	353
Massa específica (kg/m ³)	2.060
Calor latente de fusão (kJ/kg)	230
Condutividade térmica (W/m.K)	0.556
Temperatura máxima (°C)	1300

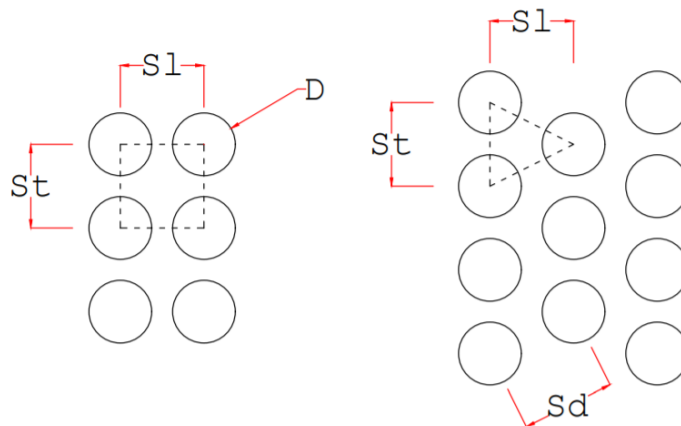
Fonte: PlusIce® (2020).

Dessa forma, avalia-se o perfil de temperatura dos gases de exaustão na saída do termoacumulador, para períodos em que a temperatura dos gases é inferior à temperatura de fusão do PCM. A temperatura média amortecida será o ponto de operação para ciclo de cogeração.

3.3.1 Modelagem fluidodinâmica

O termoacumulador trata-se, basicamente, de um trocador de calor em escoamento cruzado e, com auxílio da versão acadêmica e gratuita do software ANSYS Fluent, analisaram-se os arranjos alinhado e alternado com finalidade de avaliar a troca térmica, determinar qual deles possui menor perda de carga e, conseqüentemente, menor potência de ventilação requerida. A Figura 19 ilustra os dois arranjos avaliados.

Figura 19. Arranjos alinhado/alternado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os parâmetros avaliados na modelagem do termoacumulador estão definidos na Tabela 4.

Tabela 4. Parâmetros para modelagem do termoacumulador.

Parâmetros	Alinhado	Alternado
Passo transversal St (mm)	200	200
Passo longitudinal Sl (mm)	200	173,2
Sd (mm)	-	200
D (mm)	150	150
Número de fileiras Nf	25	28
Número de tubos por fileira Nt	8	8 (7)
Número total de tubos N	200	210
Temperatura dos tubos (°C)		350
Velocidade de escoamento (m/s)		10

Fonte: Elaborado pelo autor.

O arranjo alternado é composto por fileiras de 8 e 7 tubos dispostos alternativamente.

3.3.2 Modelagem térmica

Nesta etapa, faz-se necessário considerar algumas hipóteses simplificativas: a temperatura do material PCM é constante e igual à temperatura superficial do cilindro $T_s = 350^\circ\text{C}$; propriedades dos gases de exaustão aproximadas às do ar atmosférico; temperatura superficial do cilindro constante; efeitos de condução e radiação desprezíveis.

Para determinação da temperatura amortecida dos gases de exaustão após o termoacumulador, utilizou-se um procedimento iterativo seguindo os seguintes passos:

1. Arbitra-se uma temperatura de saída dos gases de exaustão, $T_{g,out}$, para obter-se as propriedades do gás: ρ_g , k_g , $c_{p,g}$, u_g e o número de Prandtl.
2. Com as propriedades definidas, estima-se a velocidade máxima de escoamento e o número de Reynolds (Eq. 11):

$$V_{m\acute{a}x} = \frac{S_T}{S_T - D} \cdot V, \text{ para arranjo alinhado} \quad (10a)$$

$$V_{m\acute{a}x} = \frac{S_T}{2 \cdot (S_D - D)} \cdot V, \text{ para arranjo alternado} \quad (10b)$$

$$Re_{D,m\acute{a}x} = \frac{V_{m\acute{a}x}.D}{\nu_g} \quad (11)$$

3. A partir da correlação de Zukauskas (1972), determina-se o número de Nusselt médio para o escoamento (Eq. 12):

$$\overline{Nu} = C_1 \cdot Re_{D,max}^m \cdot Pr^{0,36} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_s}\right)^{1/4} \quad (12)$$

Em que C_1 e m dependem do número de Reynolds (Tabela 5).

4. A partir do número de Nusselt, determina-se o coeficiente convectivo médio para o escoamento a partir da Eq. 13:

$$\bar{h} = \frac{\overline{Nu}.k}{D} \quad (13)$$

5. Estima-se $T_{g,out}$ intermediária, com propriedades avaliadas à temperatura de entrada dos gases (Eq. 14):

$$\frac{T_s - T_{g,out}}{T_s - T_{g,in}} = \exp\left(-\frac{\pi.D.N.\bar{h}}{\rho_g.V.N_T S_T c_{p,g}}\right) \quad (14)$$

6. Com a estimativa da temperatura de saída dos gases, determina-se a diferença média logarítmica das temperaturas (Eq. 15):

$$\Delta T_{mL} = \frac{(T_s - T_{g,in}) - (T_s - T_{g,out})}{\ln\left(\frac{T_s - T_{g,in}}{T_s - T_{g,out}}\right)} \quad (15)$$

7. Determina-se a potência térmica contida dos gases de exaustão (Eq. 16):

$$\dot{Q}_g = \bar{h} \cdot \pi \cdot D \cdot L \cdot \Delta T_{mL} \cdot N_T \quad (16)$$

8. Atualiza-se a temperatura de saída dos gases de exaustão até a convergência (Eq. 17):

$$T_{g,out} = T_{g,in} - \frac{\dot{Q}_g}{\dot{m}_g \cdot c_{p,g}} \quad (17)$$

Tabela 5. Coeficientes para determinação do número de Nusselt

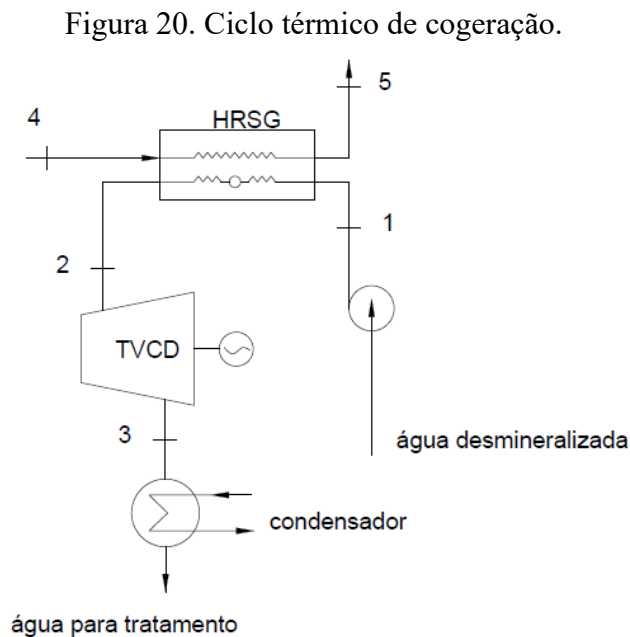
Configuração	$Re_{D,m\acute{a}x}$	C_1	m
Alinhado	$2 \times 10^5 - 2 \times 10^6$	0,021	0,84
Alternado	$2 \times 10^5 - 2 \times 10^6$	0,022	0,84

Fonte: Incropera et al. (2014).

O método iterativo adotado foi programado em VBA (Visual Basic for Applications), a partir de cada temperatura de entrada dos gases no termoacumulador em função do tempo. Todas as propriedades com exceção de Pr_s são avaliadas na temperatura de filme do fluido.

3.3.3 Modelagem do ciclo de cogeração

Para a modelagem do ciclo, primeiramente avaliou-se o amortecimento do efeito transiente na temperatura dos gases de exaustão. Em seguida, com o perfil de temperatura amortecido, determina-se uma temperatura de operação dos gases provenientes do sistema de despoeiramento para geração de vapor em uma caldeira de recuperação (HRSG). Assim, o vapor vivo gerado alimenta uma turbina de condensação e enfim, avalia-se o excedente elétrico gerado. A Figura 20 ilustra o ciclo estudado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Considera-se pressão e temperatura de entrada na turbina de condensação (Ponto 2) iguais a 2,2 MPa e 300 °C, respectivamente. Esta consideração justifica-se, pois, na planta estudada há uma linha de vapor alimentada por uma caldeira convencional, logo, não serão necessárias maiores mudanças na tubulação e o vapor gerado poderia ser complementado entre a TVCD e demais processos. A Tabela 6 resume os parâmetros de operação do ciclo.

Tabela 6. Parâmetros do ciclo.

Ponto (Figura 20)	Descrição	Parâmetros	Observações
1	Entrada de água na HRSG	$T_A = 40^\circ\text{C}$	Temperatura após a bomba.
2	Vapor de água na entrada da turbina	$T_V = 300^\circ\text{C}$ $P_V = 2,2 \text{ MPa}$	Baseada em uma caldeira e linha de vapor já existentes.
3	Saída para condensador	$T_{CD} = 40^\circ\text{C}$ $P_{CD} = 7,50 \text{ kPa}$ $x = 0,80$	Valores típicos para uma TVCD.
4	Entrada dos gases de exaustão na HRSG	$T_G = 350^\circ\text{C}$ $\dot{m}_g = 91,54 \text{ kg/s}$	Temperatura de operação amortecida.
5	Saída chaminé HRSG	$T_{ch} = 150^\circ\text{C}$	Valor inicial.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para os cálculos de potência do ciclo, primeiramente, avalia-se o volume de controle na HRSG, com uma temperatura inicial de chaminé $T_{ch} = 150^\circ\text{C}$:

$$\eta_{HRSG} \cdot \dot{Q}_g = \dot{Q}_a \quad (18)$$

Na Eq.18, os termos \dot{Q}_g e \dot{Q}_a são representados pelas equações (19) e (20), respectivamente:

$$\dot{Q}_g = \dot{m}_g \cdot c_{p,g} \cdot (T_g - T_{ch}) \quad (19)$$

$$\dot{Q}_a = \dot{m}_a \cdot (h_v - h_a) \quad (20)$$

De acordo com Lora e Nascimento (2004), o rendimento da caldeira de recuperação pode ser considerado $\eta_{HRSG} = 0,80$, devido a perdas de calor para o ambiente.

É avaliada a temperatura de chaminé corrigida em dois patamares de *pinch point*⁷ para assegurar que não há violação de leis da Termodinâmica:

$$T_{ch}' = T_g + (T_{sat} + \Delta T_{pp} - T_g) \cdot \frac{\dot{Q}_g}{\dot{Q}_i} \quad (21)$$

⁷ Diferença entre temperatura do gás que deixa o evaporador e a temperatura de saturação do vapor na pressão de vapor vivo.

Sendo $\Delta T_{pp} = \{10; 30\} [^{\circ}C]$.

Na Eq.21, o termo \dot{Q}_l são representados pela Eq. 22:

$$\dot{Q}_l = \dot{m}_a \cdot (h_v - h_l) \quad (22)$$

Com a temperatura de chaminé atualizada, utiliza-se como base aquela inferior à 150°C, para que o filtro de mangas do sistema de despoeiramento não seja danificado. Assim, retorna-se à Eq. 18 e determina-se a vazão de vapor de água para a turbina, \dot{m}_a . Em seguida, avalia-se o volume de controle na TCVD para determinação da potência elétrica gerada:

$$\dot{W}_e = \dot{m}_a \cdot (h_v - h_{cd}) \quad (23)$$

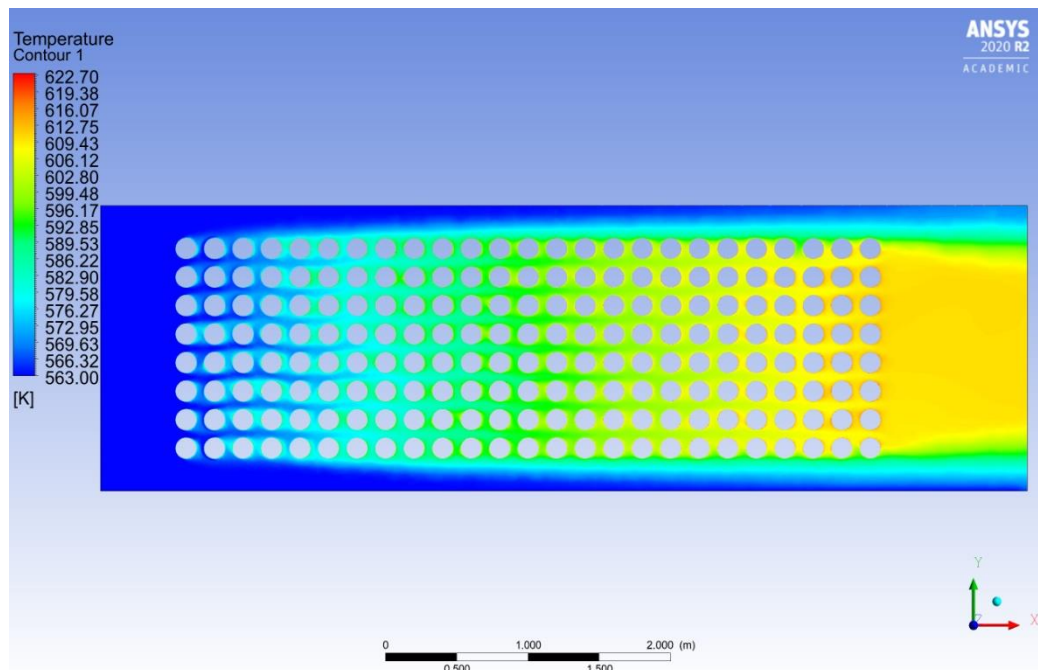
$$\dot{W}_{ger} = \eta_{ger} \cdot \dot{W}_e \quad (24)$$

A potência gerada é determinada considerando o rendimento do gerador equivalente a $\eta_{ger} = 0,95$.

4 RESULTADOS

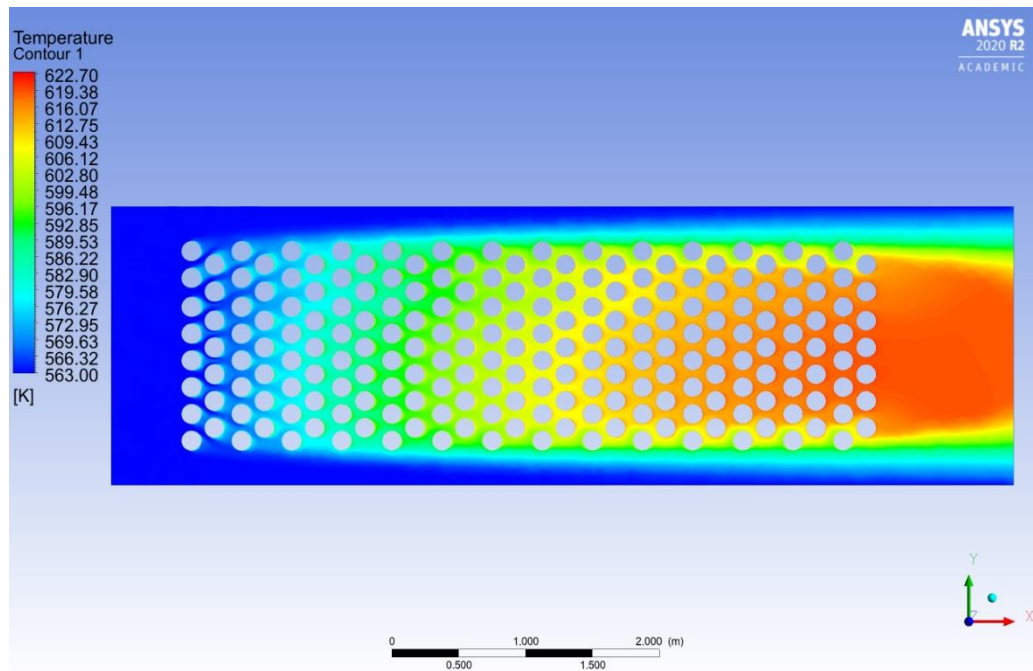
Foram feitas simulações para analisar o escoamento dos gases de exaustão no termoacumulador. Para ambas as simulações, verificou-se que o balanço de massa obteve desvio de 0,003 %, indicando que a solução obteve boa convergência. As Figuras 21 e 22 representam o campo de temperaturas em arranjo alinhado e alternado, respectivamente.

Figura 21. Campo de temperaturas em arranjo alinhado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 22. Campo de temperaturas em arranjo alternado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As Figuras 21 e 22 ilustram o perfil térmico quando a temperatura dos gases de exaustão é mínima, 290°C, e o PCM está completamente líquido. A Tabela 7 resume a perda de carga e temperatura média de saída dos gases no termoacumulador.

Tabela 7. Resultados da simulação para arranjo alinhado/alternado.

Arranjo	Temperatura média de saída dos gases (°C)	Perda de carga (Pa)
Alinhado	337	130
Alternado	343	298

Fonte: Elaborado pelo autor.

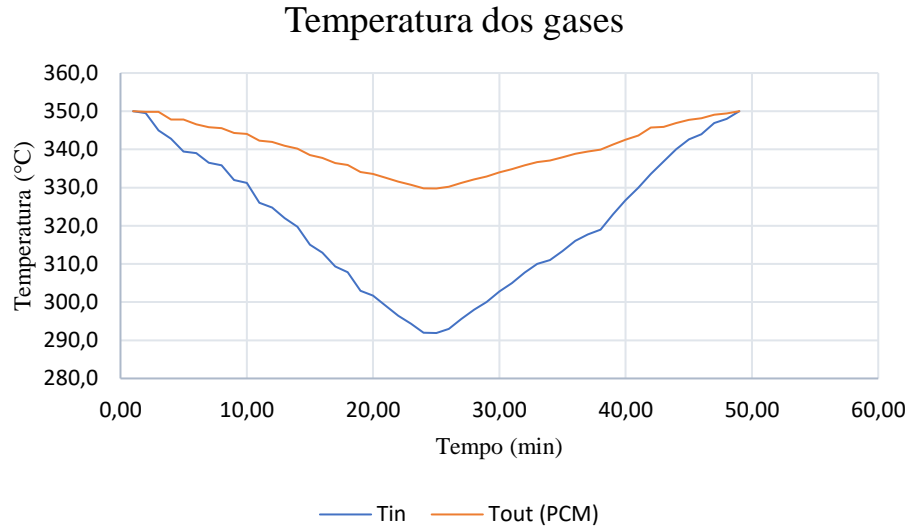
Ao analisar os dados da Tabela 7, infere-se que ambos os arranjos estabelecem excelente troca térmica, todavia, no arranjo alinhado há menor perda de carga. Dessa forma, esse será o arranjo adotado no termoacumulador.

Ademais, as simulações foram bidimensionais pois se considera uma fusão homogênea do PCM ao longo do eixo axial do cilindro, por este possuir comprimento muito superior ao diâmetro, além de ser uma alternativa de redução do esforço computacional para a solução.

Em seguida, a partir do método iterativo aplicado no capítulo 3, obteve-se o perfil de amortecimento da temperatura dos gases de exaustão após o termoacumulador, com

convergência após 5 iterações. A Figura 23 ilustra o amortecimento de temperatura.

Figura 23. Perfil amortecido dos gases de exaustão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisar-se a Figura 23, infere-se que o termoacumulador proposto reduz drasticamente a oscilação de temperatura dos gases ao longo do tempo, com máxima variação em torno de 20°C com relação à temperatura de fusão do PCM. Esse amortecimento permite a HRSG operar a uma carga aproximadamente constante. A temperatura média na entrada da caldeira de recuperação (HRSG), ou seja, a temperatura de projeto do ciclo de cogeração, é de 340,4 °C.

Assim, definido o melhor arranjo de cilindros para o termoacumulador e determinadas as condições de projeto para a cogeração, apresenta-se na Tabela 8 os dados do ciclo e potência gerada na planta.

Tabela 8. Dados obtidos para o ciclo de cogeração.

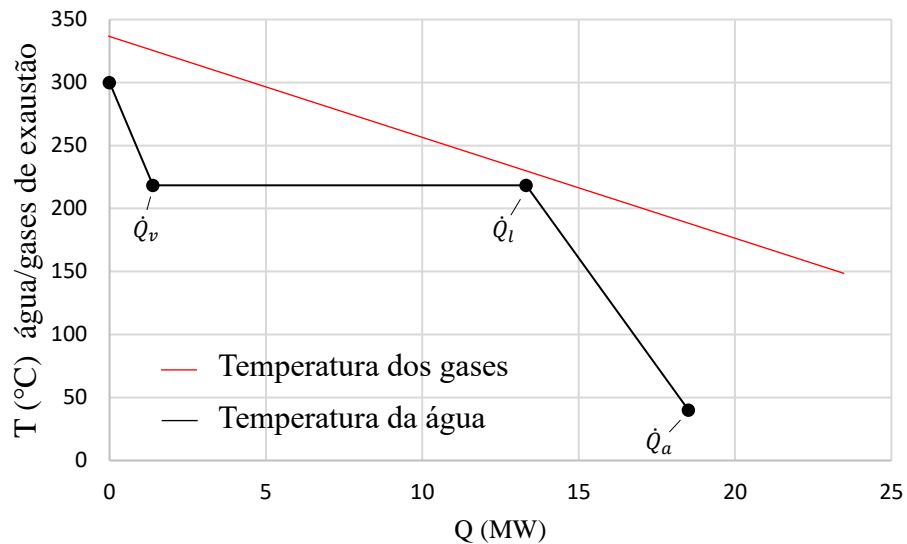
ΔT_{pp} (°C)	T_{ch} (°C)	\dot{m}_a (kg/s)	\dot{W}_e (MW)	\dot{W}_{ger} (MW)
10	148,7	6,40	4,1	3,90

Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram avaliados dois patamares de *pinch point*, sendo $\Delta T_{pp} = 10$ °C o valor adotado para que a temperatura de chaminé da caldeira de recuperação seja inferior a 150°C e o filtro de mangas no sistema de despoeiramento não seja degradado. Ademais, de acordo com Balestieri

(2002), menores patamares de *pinch point* representam melhor troca térmica na caldeira de recuperação. Conseqüentemente, o consumo de água de resfriamento dos gases de exaustão no *peak shaver* é minimizado. A Figura 24 ilustra o perfil de temperatura dos gases e da água de alimentação do ciclo.

Figura 24. Temperatura dos gases e água no ciclo de cogeração.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se, pela Figura 24, que a temperatura amortecida de entrada dos gases na HRSG é reduzida de 340,4°C até aproximadamente 148,7°C, enquanto a temperatura da água, na linha preta, é incrementada até 300°C para alimentar a turbina de condensação. Assim, o ciclo proposto gera uma potência de 3,90 MW.

5 CONCLUSÃO

A partir dos cálculos e simulações apresentadas, pode-se concluir que a recuperação de energia térmica através de um termoacumulador é uma opção tangível para amortecimento dos gases de exaustão e posterior aplicação em ciclos de cogeração. Na modelagem do sistema, o arranjo de tubos alinhado mostrou-se mais eficiente em virtude de sua menor perda de carga e, conseqüentemente, menor potência de ventilação requerida.

Dessa forma, obteve-se uma acentuada redução na oscilação de temperatura dos gases, com máxima diferença de 20°C em relação à sua temperatura média de entrada e com a aplicação desses gases em um ciclo Rankine, demonstrou-se ser possível gerar 3,90 MW de potência elétrica para outros processos da planta.

Ademais, o sistema proposto caracteriza-se uma excelente opção à programação do sistema de despoeiramento da usina por reduzir a sobrecarga térmica, consumo de água de resfriamento e contribuir para a redução de emissões nocivas à atmosfera.

Em trabalhos futuros, sugere-se uma análise exergoeconômica, para avaliação de performance termodinâmica e econômica do sistema de termoacumulação e cogeração proposto.

REFERÊNCIAS

- AGYENIM, Francis *et al.* A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS). **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.l.], v. 14, n. 2, p. 615-628, fev. 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.015>. Acesso em: 15 mar. 2020.
- BALESTIERI, José Antônio Perrella. **Cogeração: geração combinada de eletricidade e calor**. Florianópolis: Editora UFSC, 2002.
- BORN, Carsten; GRANDERATH, Ralf. Heat recovery from EAF off-gas: a new benchmark. **Millennium Steel**, Düsseldorf, v. 1, n. 14, p. 51-54, mar. 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/283750145_Benchmark_for_heat_recovery_from_the_offgas_duct_of_electric_arc_furnaces. Acesso em: 03 mar. 2020
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanco energético nacional**. Brasília, 2019. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2019>. Acesso em: 02 fev. 2020.
- CÁRDENAS, Bruno; LEÓN, Noel. High temperature latent heat thermal energy storage: phase change materials, design considerations and performance enhancement techniques. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.l.], v. 27, p. 724-737, nov. 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.028>. Acesso em: 17 mar. 2020.
- FIGUEIRA, Renato Minelli. **ACI-504: operação do FEA. Módulo interno de treinamento da Gerdau**. São Paulo: Gerdau, 2007.
- INCROPERA, Frank P. *et al.* **Fundamentos da transferência de calor e de massa**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.
- INSTITUTE OF INDUSTRIAL PRODUCTIVITY. **Electric arc furnace**. Disponível em: <http://www.iipinetwork.org/wp-content/letd/content/electric-arc-furnace.html>. Acesso em: 20 mar. 2020.
- INSTITUTO AÇO BRASIL. **Processo siderúrgico**. Disponível em: <https://acobrasil.org.br/site/processo-siderurgico/>. Acesso em: 20 maio 2020.
- LEE, Baek; SOHN, Il. Review of innovative energy savings technology for the electric arc furnace. **Jom**, [S.l.], v. 66, n. 9, p. 1581-1594, 20 ago. 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s11837-014-1092-y>. Acesso em: 14 ago. 2020.
- LORA, Electo Eduardo Silva; NASCIMENTO, Marco Antônio Rosa do. **Geração termelétrica: planejamento, projeto e operação**. Rio de Janeiro: Interciência, 2004.
- MAGRO, Fabio dal *et al.* Enhancing energy recovery in the steel industry. **Energy Conversion and Management**. Udine, Italy, v. 104, p. 78-89, nov. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.05.012>. Acesso em: 23 fev. 2020.
- MOHAMMADNEJAD, Farshad; HOSSAINPOUR, Siamak. A CFD modeling and investigation of a packed bed of high temperature phase change materials (PCMs) with

different layer configurations. **Journal of Energy Storage**, [S.l.], v. 28, p. 101209-101209, abr. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.est.2020.101209>. Acesso em: 24 set. 2020.

MOURÃO, Marcelo Breda. **Introdução à siderurgia**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007.

NARDIN, Gioacchino *et al.* PCM-based energy recovery from electric arc furnaces. **Applied Energy**, Udine, Italy, v. 136, p. 947-955, dez. 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.052>. Acesso em: 14 jun. 2020.

PCM PRODUCTS. **High temperature salts PCMs**. Disponível em: https://www.pcmproducts.net/High_Temperature_Salt_PCMS.htm/. Acesso em: 13 set. 2020.

PIELICHOWSKA, Kinga; PIELICHOWSKI, Krzysztof. Phase change materials for thermal energy storage. **Progress in Materials Science**, [S.l.], v. 65, p. 67-123, ago. 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pmatsci.2014.03.005>. Acesso em: 20 ago. 2020.

ROYO, Patrícia *et al.* High-temperature PCM-based thermal energy storage for industrial furnaces installed in energy-intensive industries. **Energy**, [S.l.], v. 173, p. 1030-1040, abr. 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.118>. Acesso em: 13 out. 2020.

SANDBERG, Erik. **Energy and scrap optimisation of electric arc furnaces by statistical analysis of process data**. 2005. 80 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Curso de Chemical Engineering, Department Of Chemical Engineering And Geosciences, Luleå University Of Technology, Luleå, 2005. Disponível em: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:990816/FULLTEXT01.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2020

SANTANGELO, Nicola *et al.* Toward zero-energy fumes treatment plant. **Proceedings of European Steel Technology and Application Days**, Dusseldorf (Germany), 2015. Disponível em: <https://abmproceedings.com.br/en/article/danieli-s-green-steel-vision-first-step-towards-zero-energy-ftp-at-abs-steelmaking-plant-italy->. Acesso em: 15 jun. 2020.

SIEMENS. **Technology, mechanical engineering, automation and electrical engineering from a single source – cleaner steel production at attractive cost**. Disponível em: <http://www.automation.siemens.com/datapool/industry/industrysolutions/metals/simetal/en/Dedusting-Solutions-en.pdf>. Acesso em: 27 maio 2020.

SILVA, Cesar Augusto Arezo e; MATELLI, José Alexandre. Heat recovery of dedusting systems in electric arc furnaces: concept of a bottoming cogeneration plant and techno-economic analysis. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, Guaratinguetá, Brazil, v. 40, n. 1, p. 1-14, 30 dez. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40430-017-0919-1>. Acesso em: 03 mar. 2020.

STEEL PLANTECH. **Ecological and economic arc furnace**. Disponível em: <https://steelplantech.com/en/product/ecoarc/>. Acesso em: 13 ago. 2020.

STEINPARZER, Thomas *et al.* Electric arc furnace off-gas heat recovery and experience with a testing plant. **Steel Research International**, [S.l.], v. 85, n. 4, p. 519-526, 13 ago. 2013. Wiley. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/srin.201300228>. Acesso em: 22 jul. 2020.

SHARMA, Atul *et al.* Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 2, p. 318–345, fev. 2009. ISSN 1364-0321. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005>. Acesso em: 15 jul. 2020.

TOULOUEVSKI, Yuri N.; ZINUROV, Ilyaz Y. Fuel arc furnace (FAF) for effective scrap melting: from eaf to faf. **Springer**, Singapore, v. 1, n. 1, p. 1-101, mar. 2017. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-981-10-5885-1>. Acesso em: 01 jul. 2020.

WORLDSTEEL ASSOCIATION. **Steel statistics**. Disponível em: <https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics.html/>. Acesso em: 20 maio 2020.

ZUKAUSKAS, Algirdas. Heat transfer from tubes in crossflow. **Advances in Heat Transfer**, [S.l.], p. 93-160, 1972. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/s0065-2717\(08\)70038-8](http://dx.doi.org/10.1016/s0065-2717(08)70038-8). Acesso em: 13 set. 2020.