

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

REAPROVEITAMENTO DE CALOR RADIANTE NO PROCESSO SIDERÚRGICO ATRAVÉS DA TROCA TÉRMICA DE TARUGOS

por

André Felipe Scherer

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Dezembro de 2021

CIP - Catalogação na Publicação

Scherer, André Felipe
REAPROVEITAMENTO DE CALOR RADIANTE NO PROCESSO
SIDERÚRGICO ATRAVÉS DA TROCA TÉRMICA DE TARUGOS /
André Felipe Scherer. -- 2021.
27 f.
Orientador: Francis Henrique Ramos França.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2021.

1. Eficiência Energética. 2. Reaproveitamento de
Calor. I. França, Francis Henrique Ramos, orient. II.
Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todas as pessoas que contribuíram na minha trajetória. À minha família por todo o apoio e suporte que me deram ao longo de toda minha vida. À minha namorada pelo companheirismo e o crescimento pessoal que vivenciamos juntos ao longo da graduação. Aos meus amigos pelas experiências que tivemos juntos. Aos meus colegas pela parceria e troca de conhecimento. A todos os professores que tive ao longo da vida pelos ensinamentos e principalmente por estimular a criatividade e a vontade de aprender. À nós brasileiros que pagamos nossos impostos e esperamos um retorno por meio de serviços como esse, uma universidade pública, gratuita e de qualidade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os meus colegas de trabalho da Gerdau Aços Especiais Piratini pelo apoio e incentivo à busca por conhecimento e constante aprimoração. Agradeço também à todas as pessoas envolvidas nos testes anteriores que ajudaram a complementar este trabalho.

Scherer, André. **Reaproveitamento de calor radiante no processo siderúrgico através da troca térmica de tarugos**. 2021. 27p. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

RESUMO

Foi firmado um acordo em Paris no ano de 2016 com o objetivo de conter o avanço do aquecimento global e continuar tendo um planeta habitável. Para garantir isso, a sociedade precisa agir de modo que a temperatura média não aumente mais de 1,5°C até 2050. Um dos processos de maior impacto ambiental é a indústria siderúrgica, responsável por 7,2% de toda a emissão global de carbono. O objetivo deste trabalho foi desenvolver uma solução para utilizar o calor radiante desperdiçado pelos tarugos que saem aquecidos da Aciaria para aquecer os tarugos que entram no processo subsequente, a Laminação, e assim diminuir o consumo de gás dos fornos. Foi estudado um grande trocador de calor que permite a troca térmica em contracorrente dos tarugos quentes provenientes da Aciaria, com os tarugos frios que vão para a Laminação. Utilizando um cálculo iterativo para resolver o problema, simulou-se vários cenários possíveis variando os dados de entrada: seção dos tarugos, temperatura e tempo de troca. No melhor cenário, os tarugos inicialmente frios chegaram a 536°C no final do processo, proporcionando assim uma redução estimada de 31,97% no consumo de gás dos fornos da Laminação.

PALAVRAS-CHAVE: trocador de calor, tarugos, Aciaria, Laminação

Scherer, André. **Reuse of radiant heat in the steelmaking process through the thermal exchange of billets**. 2021. 27p. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

ABSTRACT

An agreement was signed in Paris in 2016 with the aim of containing the advance of global warming and continuing to have a habitable planet. To ensure this, society needs to act so that the average temperature does not increase by more than 1.5°C by 2050. One of the processes with the most environmental impact is the steel industry, responsible for 7.2% of all global carbon emissions. The objective of this work was to develop a solution to use the radiant heat wasted by the billets that leave the steel mill at great temperatures to heat the billets that enter the subsequent process, the rolling mill, and thus reduce the gas consumption of the furnaces. A large heat exchanger was studied, which allows the heat exchange in countercurrent of the hot billets coming from the melt shop, with the cold billets going to the rolling mill. Using an iterative calculation to solve the problem, several possible scenarios were simulated by varying the input data: billet section, temperature and changeover time. In the best scenario, the initially cold billets reached 536°C at the end of the process, thus providing an estimated reduction of 31.97% in the gas consumption of the rolling mill furnaces.

KEYWORDS: heat exchanger, billets, steel mill, rolling mill

NOMENCLATURA

Símbolos

J	Radiosidade	[W/m ²]
E	Poder Emissivo	[W/m ²]
F	Fator de forma	[-]
Bi	Número de Biot	[-]
h	Coefficiente de transferência de calor radiante	[W/m ² K]
L_c	Comprimento característico	[m]
k	Condutividade térmica	[W/mK]
q''	Fluxo radiante	[W/m ²]
Q	Calor	[J]
m	Massa	[kg]
c_p	Calor específico	[J/kgK]
T	Temperatura	[K] ou [°C]
t	Tempo de troca	[s]
x	Diferença entre o calor trocado e o calor perdido	[J]
dif	Diferença de temperatura entre dois tarugos quentes	[K] ou [°C]
y	Valor de dif correspondente ao menor x local	[K] ou [°C]

Símbolos gregos

ε	Emissividade	[-]
σ	Constante de Planck	[W/m ² ·K]

Abreviaturas e acrômimos

MCG	Modelo da capacitância global
-----	-------------------------------

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO.....	1
1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
1.3 OBJETIVO	3
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
2.1 TRANSFERÊNCIA RADIATIVA EM CAVIDADES	3
2.2 BALANÇO DE ENERGIA	4
3. METODOLOGIA	4
3.1 PREMISSAS E SIMPLIFICAÇÕES	6
3.2 ESTRUTURAÇÃO DO PROBLEMA.....	7
3.3 FLUXO DE CALOR RADIANTE	8
3.4 BALANÇO DE ENERGIA	9
3.5 CÁLCULO ITERATIVO	10
3.6 REDUÇÃO NO CONSUMO DE GÁS.....	11
4. RESULTADOS	11
4.1 TEMPERATURA.....	12
4.2 TEMPO DE TROCA.....	13
4.3 CORRELAÇÃO	13
4.4 ERROS E INCERTEZAS	14
5. CONCLUSÃO	15
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	16
APÊNDICE	17

1. INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

Foi estabelecida uma meta em 2016 no acordo de Paris para que a temperatura média do planeta não aumente mais de 1,5°C até 2050, mantendo assim condições habitáveis. Nesse contexto, é fundamental a atuação nos processos com maior impacto ambiental. A indústria é um dos fatores de maior relevância, tendo a siderurgia como um dos seus principais expoentes. Segundo a WORLD RESOURCES INSTITUTE (2020), 7,2% de toda a emissão global de carbono de 2016 provém dessa atividade.

Uma companhia siderúrgica de grande relevância mundial é a Gerdau. O trabalho foi desenvolvido considerando a usina de Charqueadas, que mesmo sendo semi-integrada (primeira parte do processo é a aciaria, sem mineração), a qual utiliza majoritariamente sucata, ainda existem enormes oportunidades de redução de emissão de carbono nas mais variadas formas, como por exemplo reduzir o consumo dos fornos a gás natural.

O processo tem 4 etapas principais: aciaria, laminação, tratamento térmico e inspeção. O presente trabalho foca-se nas duas primeiras etapas, com o objetivo desenvolver uma solução para utilizar o calor gerado na aciaria para aquecer os materiais que entram na Laminação.

Figura 1 – Fluxo Produtivo

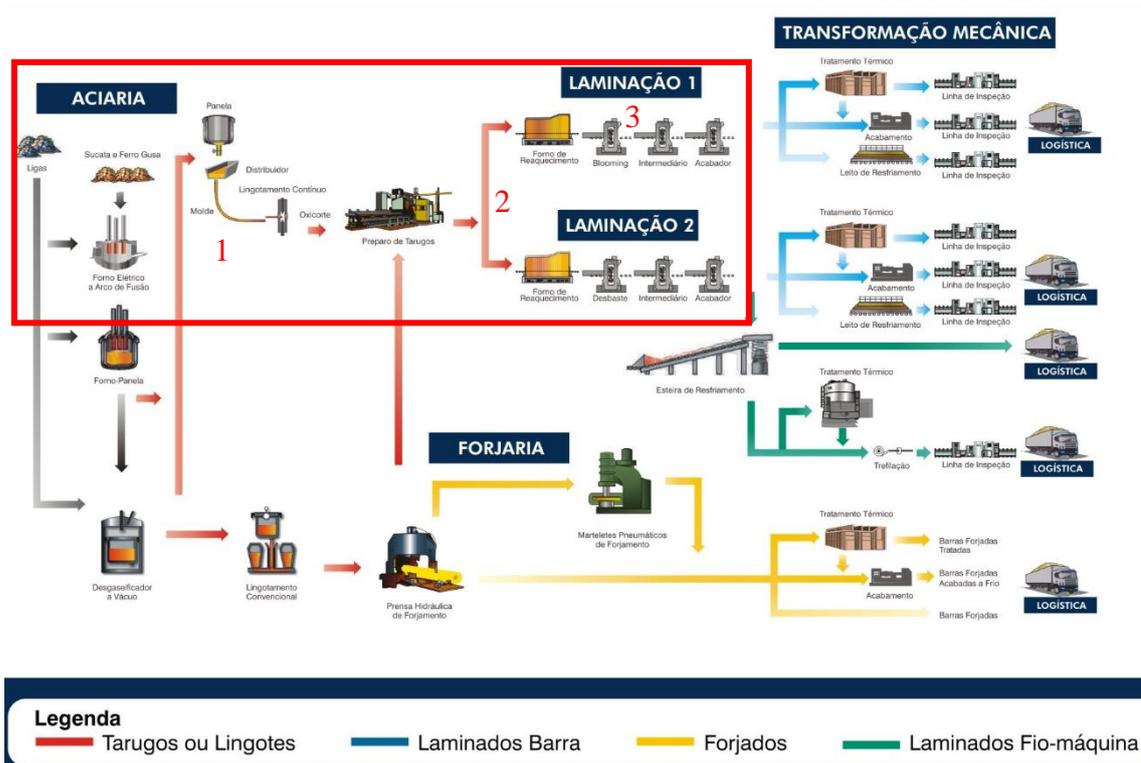


Figura 2 – Tarugo quente pós lingotamento na aciaria (900°C). Ponto 1 na Fig.1



Figura -3 – Tarugo morno (450°C). Ponto 2 na Fig.1



2

Figura 4 – Laminação a quente (1200°C). Ponto 3 na Fig.1



1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Existem diversas possibilidades de aproveitamento do calor dos tarugos incandescentes da aciaria. A forma mais eficaz é planejar o processo produtivo para que a aciaria e a laminação sejam conectadas, de forma que o material não resfrie e faça os dois processos na sequência. Quanto mais direta for essa ligação, menor será o consumo de energia.

O processo de enformamento (PUC RIO, 2003) se refere ao fluxo dos materiais decorrentes do lingotamento contínuo até a sua entrada na laminação. Existem 4 principais formas:

- ‘Enformamento a frio’ (CC-CCR- *Continuouscasting – cold chargerolling*), no qual os tarugos vão da aciaria para um estoque e depois são laminados. A temperatura de enformamento é inferior a 400°C, e frequentemente é a ambiente.
- ‘Enformamento a quente’ (CC-HCR- *Continuouscasting - hot chargerolling*), onde os tarugos saem da aciaria e ficam isolados termicamente antes de prosseguir para a laminação. Geralmente as temperaturas de enformamento variam entre 400°C e 800°C.
- ‘Enformamento a quente direto’ (CC-DHCR- *Continuouscasting – direct hot charge rolling*), no qual os tarugos saem da aciaria direto para a laminação. Esse processo necessita de uma grande robustez operacional para a sua execução, pois não existe

tempo para correção. Normalmente as temperaturas de carregamento variam entre 700°C e 1000°C.

- ‘Laminação direta a quente’ (CC-HDR- *Continuous casting - hot direct rolling*), onde os tarugos saem direto do lingotamento contínuo para as gaiolas de laminação, sem passar por um forno de reaquecimento. Necessita de uma temperatura de saída do lingotamento acima de 1100°C.

O presente trabalho focou em aumentar a temperatura de enformamento sem alterar o fluxo de programação. Conforme será mostrado posteriormente, os possíveis enformamentos resultantes do estudo se enquadram nos primeiros dois casos, com a temperatura máxima chegando até 536°C.

Um exemplo que não envolve enformamento foi o estudo realizado por Villar (2014), no qual simulou-se um recuperador de calor para aquecer água. Com o projeto e a simulação otimizada, seria possível obter uma diferença de temperatura de entrada e saída de 90°C, com um desempenho de 77% dentro das restrições de operação.

1.3 OBJETIVO

O objetivo do trabalho é estudar a viabilidade de uma solução para utilizar o calor gerado na aciaria para aquecer os tarugos que entram na laminação, diminuindo o consumo de gás dos fornos. O artifício proposto para atingir esse objetivo seria proporcionar a troca térmica radiante entre os tarugos que saem da aciaria com aqueles que estão por entrar na laminação, aumentando a temperatura de enformamento e diminuindo o consumo de gás sem tirar a flexibilidade de programação (sequenciar de forma independente os processos de aciaria, preparo e laminação).

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 TRANSFERÊNCIA RADIATIVA EM CAVIDADES

A transferência de calor radiativo em cavidades pode ser resolvida com o uso do método das radiosidades. Nesse método, é preciso estabelecer uma condição de contorno: temperatura ou fluxo radiante. No problema a ser resolvido, se assumiu uma temperatura para calcular o balanço energético de forma iterativa, de forma que a condição específica conhecida é a temperatura.

Superfícies reais emitem e refletem radiação para todas as direções. O fluxo de calor correspondendo à emissão e reflexão é denominado de radiosidade (J). A equação da radiosidade de cada superfície é dada abaixo:

$$J_j = \varepsilon_j E_{CN,j} + (1 - \varepsilon_j) \sum_{k=1}^N F_{jk} J_k \quad (1)$$

onde o primeiro termo é referente ao quanto essa superfície emite de radiação e o segundo termo é referente ao quanto ela reflete radiação de outras superfícies. Detalhadamente, ε é a emissividade, $E_{CN,j}$ é o poder emissivo de um corpo negro na temperatura local na superfície determinada (W/m^2), e F_{jk} é o fator de forma entre as superfícies, que representa a fração de energia radiante que deixa a superfície j e atinge a superfície k .

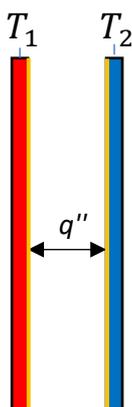
Escrevendo-se uma equação para cada superfície, teremos um total de N incógnitas (ou seja, as radiosidades de cada superfície) e N equações lineares. Após, resolve-se o sistema de equações para determinar as radiosidades (J) de cada uma das superfícies. Finaliza-se o problema determinando-se a condição de contorno desconhecida, neste caso o fluxo radiante, que é dado por:

$$q_{r,j}'' = J_j - \sum_{k=1}^N F_{jk} J_k \quad (2)$$

onde as radiosidades J foram calculadas com o sistema de equações lineares descrito anteriormente.

Essas equações foram utilizadas para calcular o balanço energético do sistema, que será mostrado em mais detalhes na sequência. Levando em conta as dimensões dos tarugos e que o fator de forma calculado entre as faces laterais de cada par de tarugos é aproximadamente 1, o problema pôde ser aproximado a uma troca entre duas placas paralelas. Está destacado em amarelo na figura abaixo as faces consideradas.

Figura 5 – Transferência de calor radiante



2.2 BALANÇO DE ENERGIA

Existem diferentes abordagens para resolver o balanço energético. Um modelo que facilita o cálculo do balanço energético em regime transiente é o modelo da capacitância global (MCG), o qual considera a temperatura uniforme espacialmente, mas variável no tempo. Verifica-se o uso do MCG tendo em mãos o número de *Biot*, Bi , dado pela equação abaixo:

$$Bi = h \cdot L_c / k \quad (3)$$

onde h é o coeficiente de transferência de calor radiante ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$), L_c é o comprimento característico e k é a condutividade térmica do aço (W/mK).

$$h = \mathcal{E} \cdot \sigma \cdot (T_1 + T_2) \cdot ((T_1)^2 + (T_2)^2) \quad (4)$$

onde T_1 é a temperatura da superfície 1, T_2 é a temperatura da superfície 2, \mathcal{E} é a emissividade da superfície e σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$).

Considerando a distribuição uniforme de temperatura no contorno da peça, a variação incremental de energia da peça deve gerar uma variação de temperatura que pode ser resolvida pela equação fundamental da calorimetria:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (5)$$

onde, Q é o calor (J), m a massa(kg), c_p o calor específico ($\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$), ΔT a diferença de temperatura (K).

O calor trocado explicado na seção 2.1 é comparado com o calor esperado dada uma diferença de temperatura entre um tarugo. Essa diferença de energia é minimizada através de um cálculo iterativo, que será mostrado com mais detalhes posteriormente.

3. METODOLOGIA

A Gerdau Aços Especiais Piratini produz aços para aplicações críticas, como a indústria automotiva e a petrolífera. Além disso, a estratégia da empresa é ser flexível e atender às mais diversas demandas dos clientes. Esse rígido controle de qualidade somado à flexibilidade traz enormes complexidades produtivas, dificultando um enformamento a quente direto como é feito em outras siderúrgicas. É preciso que a produção da aciaria e da laminação sejam independentes.

Esses desafios levaram à solução proposta representada pela Figura 5, que não interfere na sequência de produção da Aciaria, Preparo de Tarugos e Laminação. Esse modelo simula os tarugos que saem aquecidos da Aciaria (ponto 2 da Figura 5) (cerca de 900°C) trocando calor radiante em contracorrente com os tarugos frios (ponto 1 da Figura 5) (20°C) a entrar na Laminação, assim reduzindo o custo de gás para aquecer os tarugos e aumentando a produtividade do forno. As setas azuis indicam o fluxo dos tarugos frios, que seguem a sequência dos pontos 1-2-3 representados na Figura 5. As setas vermelhas representam a entrada dos tarugos quentes no trocador, que seguem a sequência dos pontos 2-1 da figura abaixo.

Figura 6 – Trocador de calor proposto



Depois de compreendido o contexto e a possível solução, existem tem diversos aspectos importantes a serem levados em consideração, desde as simplificações necessárias até a redução do consumo.

Os passos necessários são:

- 1) Premissas e simplificações necessárias;
- 2) Elaboração de cálculo iterativo;
- 3) Simulação levando em conta diferentes cenários (variando T, tempo de troca...);
- 4) Análise de reduções de consumo de gás;

A solução proposta é resolvida primeiramente através de simplificações para tornar o problema possível de ser resolvido. Somente depois das premissas bem estabelecidas, parte-se para a resolução.

Devido à não-linearidade do problema, parte-se para um cálculo iterativo numérico para calcular o balanço energético do sistema e assim obter a equivalência entre as trocas térmicas e ganhos/perdas de calor. Assim, são obtidas as temperaturas de saída dos tarugos frios para a análise de viabilidade da solução.

Tendo em posse um bom modelo computacional, é possível simular diferentes cenários. É de grande valor entender como a variação de temperatura, tempo de troca térmica, velocidade dos tarugos, e diversos outros fatores influenciam o resultado.

Finaliza-se o trabalho com uma análise da real redução de consumo de gás, agregando as estimativas teóricas com os testes já realizados na empresa.

3.1 PREMISSAS E SIMPLIFICAÇÕES

O estudo foi feito simulando um trocador de calor com grandes dimensões. Analisando o espaço físico disponível da usina, a velocidade de saída do lingotamento contínuo, a velocidade de entrada na laminação e assim o tempo de troca de cada tarugo, estruturou-se um modelo físico que representa a situação.

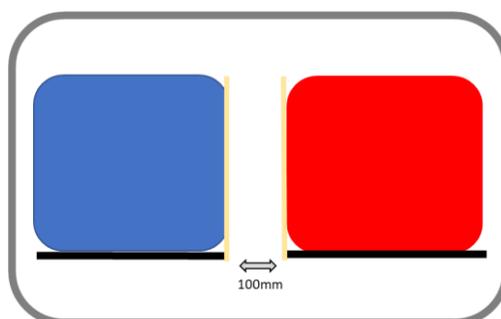
O comprimento disponível para o trocador de calor é de 160m. Assim, dado que cada tarugo tem no máximo 8,3m de comprimento e que o espaço entre cada tarugo na mesma fileira é de 0,6m, temos a possibilidade de colocar 18 tarugos em sequência.

A laminação opera com um forno a gás que tem um passo constante e discreto. Esse ritmo de entrada do forno depende da seção de cada tarugo: 1 tarugo de seção 240mm a cada 180 segundos, ou 1 tarugo de seção 155mm a cada 90 segundos.

Para prosseguir com os cálculos, as seguintes premissas foram consideradas:

1. Trocas de calor ocorrem com os tarugos parados. Movimento ocorre de forma discreta após cada troca de calor;
2. Mesma velocidade dos tarugos quentes e frios;
3. Sem perda de calor para o ambiente. O calor flui unicamente de um tarugo para o outro na mesma posição;
4. Modelo da Capacitância Global. O calor recebido é instantaneamente distribuído por todo tarugo.;
5. Emissividade e calor específico constante para todos os tarugos, quentes e frios;
6. O incremento de temperatura ocorre após o tempo total de troca de calor. Assim, analisa-se os estados iniciais e finais da troca, sem entrar em detalhes durante cada segundo do processo, algo comum na termodinâmica clássica;
7. As trocas térmicas ocorrem apenas na face lateral próxima ao tarugo vizinho, como indicado na figura 7;

Figura 7 - Troca Radiante entre os Tarugos



3. 2 ESTRUTURAÇÃO DO PROBLEMA

O problema se apresenta da seguinte forma: Sabe-se a temperatura de entrada dos tarugos quentes e frios. Entretanto, a temperatura do último tarugo quente, o qual troca calor com o primeiro tarugo frio, não é conhecida, pois para isso precisaríamos saber quanto calor esse tarugo perdeu em todas as trocas anteriores. As trocas anteriores dependem da temperatura da primeira troca, o que leva a um sistema indeterminado.

A resolução desse problema exige um cálculo iterativo. Atribuiu-se temperaturas para todos os tarugos quentes e resolveu-se o balanço energético da seguinte maneira: a energia proporcional ao incremento de temperatura dos tarugos deve ser igual ao calor envolvido nas trocas térmicas. Depois de diversas iterações, chega-se à melhor solução possível dentro dos limites estabelecidos.

A Tabela 1 ajuda a entender a abordagem utilizada, com os valores de temperatura e erros do final do processo iterativo. Em cinza, temos os dados de entrada das temperaturas dos primeiros tarugos quentes e frios (°C). Estão destacadas em laranja as temperaturas atribuídas para os tarugos quentes(°C). A diferença entre o calor trocado e o calor perdido pelos tarugos quentes (posteriormente denominada x) (J) está destacada em amarelo.

Os detalhes do cálculo iterativo e dos erros serão apresentados posteriormente, mas já se destaca a diferença entre os valores das trocas e do calor perdido pela temperatura. A iteração leva em conta o módulo da diferença e tenta minimizá-la, o que explica os valores negativos apresentados abaixo.

Tabela 1 – Resultado do processo iterativo

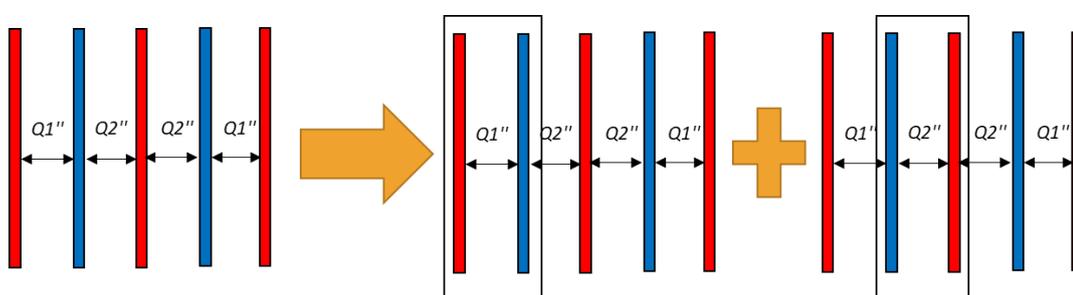
Troca	Tfrio(°C)	TqextC(°C)	Q1(J)	Qtarquente 1(J)	Qtarq-Qtroc(J) (x)	Dif/Q
		564,441	-			
1	20,000	575,092	19.152.653	- 19.152.628	25	1,31E-06
2	36,237	586,288	20.132.263	- 20.132.647	384	1,91E-05
3	53,368	598,075	21.196.164	- 21.195.383	781	3,68E-05
4	71,476	610,506	22.354.120	- 22.353.424	695	3,11E-05
5	90,656	623,640	23.617.180	- 23.617.559	378	1,6E-05
6	111,018	637,542	24.997.750	- 24.998.576	826	3,31E-05
7	132,684	652,284	26.509.723	- 26.509.064	659	2,49E-05
8	155,796	667,949	28.168.962	- 28.168.803	159	5,64E-06
9	180,519	684,628	29.992.885	- 29.992.178	707	2,36E-05
10	207,042	702,424	32.000.737	- 32.000.767	30	9,45E-07
11	235,587	721,450	34.212.851	- 34.212.553	298	8,72E-06
12	266,418	741,832	36.650.096	- 36.650.912	817	2,23E-05
13	299,848	763,705	39.331.462	- 39.332.029	567	1,44E-05
14	336,256	787,212	42.270.474	- 42.270.287	187	4,42E-06
15	376,111	812,497	45.467.703	- 45.467.487	216	4,74E-06
16	420,006	839,688	48.895.664	- 48.894.856	808	1,65E-05
17	468,725	868,867	52.469.363	- 52.469.678	315	6E-06
18	523,367	900,000	55.982.541	- 55.983.361	819	1,46E-05

3.3 FLUXO DE CALOR RADIANTE

Cada troca de calor pode ser resumida a um problema de placas planas paralelas. A emissividade \mathcal{E} das superfícies consideradas para o cálculo foi 0,96, que segundo Fluke (2008) é a de uma superfície áspera de aço. O fator de forma F_{12} e F_{21} foi calculado e o seu valor foi aproximado de 0,97 para 1, pois essa pequena diferença não teria impacto significativo no cálculo. Além disso, a distância entre os tarugos é um parâmetro de projeto que pode ser modificado para que o fator de forma seja igual a 1.

Conforme a Figura 8, cada troca foi considerada no par de tarugos de forma isolada. A simetria do problema nos permite resolver apenas duas trocas e espelhar os resultados.

Figura 8 – Fluxos Radiantes



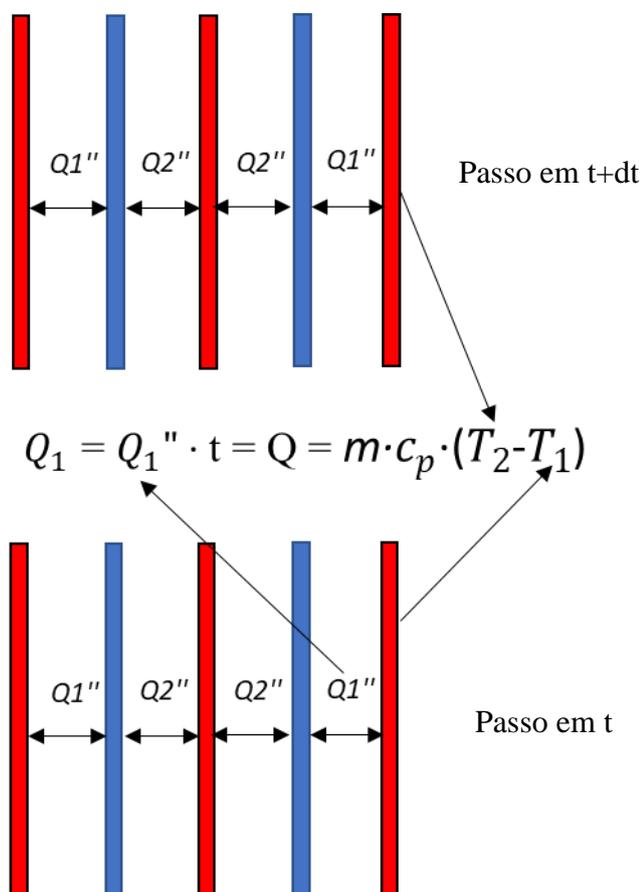
Resolvido o problema dos fluxos de calor, Q_1'' e Q_2'' . (W/m^2) com o método das radiosidades, multiplica-se pela área e pelo tempo de troca para termos o calor transferido (J). Após, pode-se realizar o balanço de energia.

3.4 BALANÇO DE ENERGIA

O número de *Biot* para esse problema se encontra numa faixa suficiente para ser adotado o MCG. Exemplificando com a primeira troca de calor do cenário 1 que será mostrado posteriormente com mais detalhes, temos que o coeficiente de transferência de calor radiante para essa troca é de $50,04 W/m^2 \cdot K$. Isso considerando: emissividade do aço igual a 0,96; temperaturas frias e quentes de $20^\circ C$ e $575^\circ C$, respectivamente. O comprimento característico é $0,12m$ ($0,240m/2$), já que o tarugo troca calor em ambos os lados. A condutividade térmica do aço é $52 W/mK$, segundo a Protolab (2021). Calculando, chega-se a um número de *Biot* de $0,11 W/m^2 \cdot K$, no limiar para a utilização do MCG.

Considerando a distribuição uniforme de temperatura ao longo de seu volume, a redução incremental de temperatura após a troca pode ser resolvida pela equação fundamental da calorimetria. Supondo que o único fluxo de calor é de um tarugo quente para um frio, todo o calor é convertido integralmente em aumento de temperatura de um tarugo frio e em um decréscimo de temperatura de um tarugo quente.

Figura 9 – Balanço de Energia



São necessários valores de massa e calor específico dos tarugos para realizar esse cálculo. Os valores padrões de massa já utilizados em cálculos anteriores na empresa são: 3700 kg para os tarugos de seção 240 mm, 1700 kg para os tarugos de seção 155 mm. O calor específico normalmente utilizado é 486 (J/kg·K).

No problema em questão, temos 2 trocas, Q_1'' e Q_2'' . Os tarugos quentes da extremidade trocam calor com apenas 1 tarugo frio, já o do meio troca com 2 tarugos frios. Dessa forma, é esperado que os tarugos do meio tenham temperaturas menores ao longo do processo.

3.5 CÁLCULO ITERATIVO

O problema foi estruturado de forma a estipular valores de temperatura dos tarugos quentes e resolver o problema das 18 trocas de calor. Se as temperaturas estiverem corretas, o calor trocado vai ser igual ao calor perdido pelos tarugos quentes. É essa diferença que se busca minimizar através do uso do algoritmo, até convergir no menor valor possível.

Utilizando o a primeira troca como exemplo. O tarugo quente vai entrar a uma determinada temperatura (T_1) fixada. Depois da primeira troca, ele tem uma temperatura (T_2), estimada. O balanço de energia desse tarugo deveria garantir que o calor radiante trocado e calculado anteriormente com o método das radiosidades Q_1 seja igual à diferença de calor entre os dois estados, de forma que $Q_1 = m \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1)$. Porém, como a temperatura foi estimada, existe

uma diferença x (J) que representa a diferença entre o calor trocado e o calor perdido. O problema se resume a tentar minimizar x .

$$x_1 = Q_1 + m \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1). \quad (6)$$

Sabendo-se que a temperatura dos tarugos quentes só decai a partir da temperatura inicial, essa diferença dif é que foi estimada.

$$dif = T_2 - T_1 \quad (7)$$

A convergência se deu em etapas, tendo duas principais: uma varredura para verificar as temperaturas possíveis num domínio inteiro e posteriormente um método de interpolação para refinar os dados nesse ponto. Foi feita uma varredura das temperaturas com dif variando 1 Kelvin. Depois de encontrar o valor y de dif que corresponde ao menor x no intervalo inteiro selecionado, se procura no intervalo $(y+1:y-1)$, dessa vez variando 0,1 Kelvin. Repete-se o mesmo procedimento até convergir no menor x local. Esse processo está esquematizado na Figura 10.

Figura 10 – Fluxo de um x local do algoritmo



Após a convergência local, parte-se para a próxima troca de calor. Faz-se o mesmo cálculo até encontrar todos os menores x locais. Quando o algoritmo já estiver contemplado todas as trocas, possivelmente o primeiro valor de temperatura da primeira troca não esteja retornando o menor x local. Repete-se até que os valores x estejam dentro de uma margem de erro aceitável.

3.6 REDUÇÃO NO CONSUMO DE GÁS

A estimativa da redução no consumo de gás foi feita baseada na temperatura média de aquecimento dos tarugos, 1200°C. Utilizando um calor específico constante, a redução é linear conforme a temperatura de entrada no forno, dada por:

$$\text{Redução Linear} = 1 - (T_m - T_e) / T_m \quad (8)$$

onde T_e é a temperatura de entrada do forno, que corresponde ao tarugo frio que sai do trocador e T_m é a temperatura média de aquecimento

Na realidade, o calor específico não é constante, e o comportamento dos queimadores de calor para aquecer os tarugos também não é linear conforme a temperatura. Já foram feitos testes com os tarugos entrando a morno no forno da laminação, e o que se percebeu é que em média a redução foi 75% da linear. A tabela abaixo representa esses testes.

Tabela 2 – Testes anteriores realizados na empresa

Teste	Tentrada(°C)	Redução Linear (%)	Redução Real (%)	Real/Linear (%)
1	142	10,40%	8,00%	76,92%
2	400	33,00%	25,00%	75,76%

Dessa forma, a redução final de gás (%) foi ajustada para:

$$\text{Redução Final} = \text{Redução Linear} \cdot 0,75 \quad (9)$$

4. RESULTADOS

A complexidade do problema e do contexto em que está envolvido traz a necessidade de uma análise abrangente e com múltiplos cenários. Foi feita uma análise das possibilidades de implementação do problema, variando a seção, tempo e temperatura.

A Tabela 3 resume os problemas analisados e suas variações. Cada ponto será abordado detalhadamente na sequência.

Tabela 3 – Cenários Analisados

Cenário	Seção	Tempo de troca (s)	Temperatura de entrada dos tarugos quentes(°C)	Temperatura de saída dos tarugos frios(°C)	Redução em consumo de gás (%)
1	240	360	900	523	31,97%
2	240	360	700	337	20,15%
3	240	180	900	380	22,88%
4	240	180	700	229	13,28%
5	155	180	900	450	27,33%
6	155	180	700	280	16,53%
7	155	90	900	312	18,56%
8	155	90	700	183	10,36%

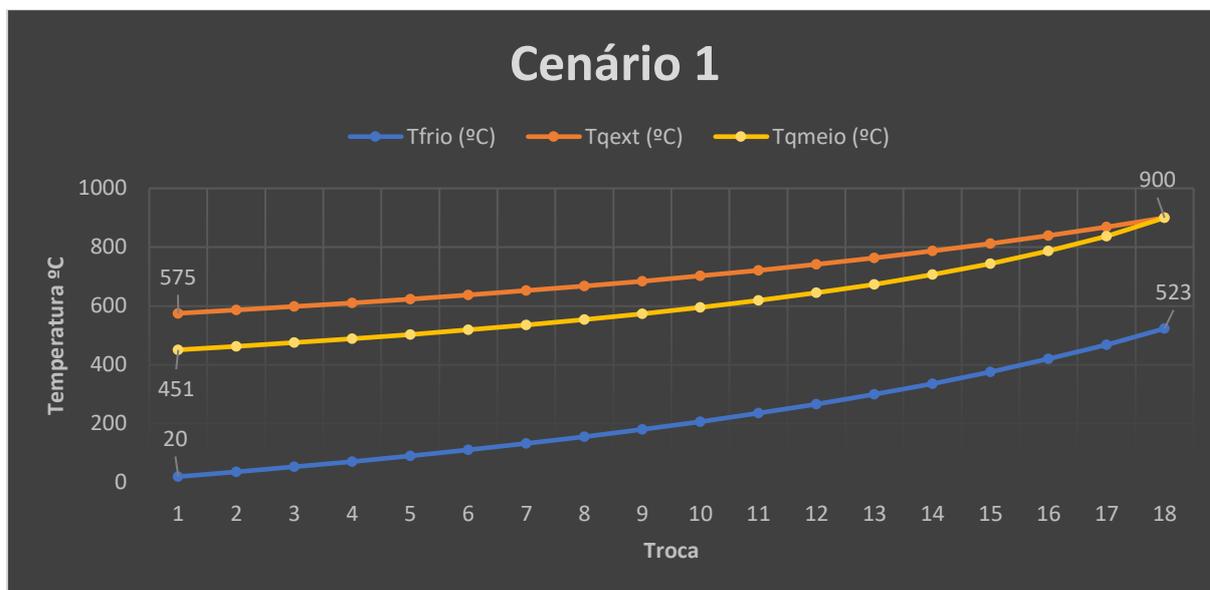
onde temos a temperatura de entrada da primeira fileira de tarugos quentes e a temperatura de saída dos tarugos frios para cada cenário. O consumo de gás foi mantido em sigilo para ficar em conformidade com as obrigações legais da empresa, sintetizando a análise a ganhos percentuais.

4.1 TEMPERATURA

Analisando todos os cenários, aqueles em que a temperatura de entrada é 900°C apresentaram as maiores temperaturas de saída e consequentemente maiores reduções. Nesses casos, tivemos temperaturas de saída dos tarugos frios acima de 300°C.

Utilizando o cenário 1 como exemplo, é possível perceber a variação da temperatura ao longo das trocas, com a posição 1 sendo a de entrada do tarugo frio e a 18 a entrada do tarugo quente.

Figura 11 – Temperaturas dos Tarugos no Cenário 1



Assim como esperado, os tarugos do meio terminam o processo com uma temperatura inferior aos externos. Além disso, nota-se um aumento na inclinação da curva de temperatura dos tarugos frios quando as temperaturas dos tarugos quentes do meio e das extremidades são próximas.

A troca de calor radiante é proporcional à temperatura elevada na quarta potência. A diferença de temperatura de saída comparando os cenários 1 e 2 elucidada o impacto que uma diferença de 200°C nos tarugos de entrada pode trazer. O cenário 1 tem uma redução 60% maior que o cenário 2. Esse fator deve ser levado em conta na hora de fazer o projeto para que os tarugos de entrada percam o mínimo de calor possível antes de chegar no trocador.

4.2 TEMPO DE TROCA

Conforme descrito anteriormente, cada seção de tarugo tem um ritmo de entrada no forno da laminação. A fim de entender o quanto isso é representativo, simularam-se diferentes tempos de trocas de calor. Os tempos foram múltiplos dos ritmos utilizados atualmente, já que tem duas fileiras de tarugos frios e só entra um tarugo por vez no forno da laminação.

Analisando os resultados, é notável o efeito multiplicador que o tempo de troca teve no cenário 1, com uma diferença de mais de 100°C se o tempo de troca for 360 segundos em vez de 180 segundos.

Analisando os cenários 6 e 8, nota-se o mesmo efeito. O dobro de tempo de troca resultou em uma redução de consumo de gás 60% maior.

4.3 CORRELAÇÃO

A temperatura, tempo de troca e seção tem influência na temperatura final dos tarugos frios. Para entender qual dessas variáveis foi a mais impactante, levantou-se os valores de correlação de cada conjunto de dados Variável-temperatura final dos tarugos frios. Como demonstrado na tabela abaixo, a temperatura foi o fator mais preponderante. Esse resultado já era esperado, tendo em vista que a única variável elevada à quarta potência é a temperatura.

Tabela 5 – Correlação entre as variáveis

Variável	Correlação
Temperatura	0,756
Tempo de troca	0,602
Seção	0,290

4.4 ERROS E INCERTEZAS

Os métodos numéricos resolvem o problema com algum tipo de erro associado. Nesse caso, resolvemos o problema para que o valor da troca térmica se aproxime do calor ganho por cada tarugo. Naturalmente, não teremos um balanço perfeito, isto é, todos os x do problema igual a zero.

Como mostrado na Tabela 1, a ordem de grandeza para as trocas é MJ, e os erros estão em J. Nos ótimos locais, a média das razões entre o erro e o calor trocado é 0,0016%. Já globalmente, essa razão é 0,0002%. A convergência se deu para valores de temperatura com 3 casas decimais.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo estudar uma solução de reaproveitamento de calor radiante dos tarugos da aciaria e assim aumentar a temperatura de enformamento na laminação. Dado o contexto da usina, com as restrições de programação e de processo, simulou-se um trocador de calor com grandes dimensões que não interferisse no fluxo de programação existente. Tendo em vista a complexidade do problema, fez-se necessário algumas simplificações importantes para torná-lo factível de ser resolvido.

Os resultados obtidos foram animadores e demonstram o enorme potencial existente de reaproveitamento térmico. Tendo em vista a necessidade de reduzir o impacto ambiental e o custo crescente das commodities, como gás natural, é fundamental que as companhias invistam em soluções de eficiência energética.

As diferentes reduções de consumo variando a temperatura de entrada reforçam a importância de um bom isolamento na saída do lingotamento. Conjuntamente a isso, os tempos de troca exercem uma influência importante nos resultados, e para que seja possível esses grandes tempos sem perda térmica, o sistema como um todo precisa estar muito bem isolado termicamente.

Deve-se ressaltar, porém, que o modelo tem diversas simplificações e a sua execução na prática teria diversos desafios. A construção de um trocador de calor dessa dimensão seria algo personalizado e a sua operação por si só já consumiria uma grande quantidade de energia. Além disso, a logística por trás teria que ser modificada, desde a etiquetagem até o transporte.

Para os trabalhos futuros, poderia ser desenvolvido uma abordagem ainda mais refinada, com a temperatura variável dentro de cada troca, saídas intermitentes dos tarugos frios, calor específico variável, sistema com perda de calor, entre outros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

WORLD RESOURCES INSTITUTE. **World Greenhouse Gas Emissions: 2016**. Disponível em: <<https://www.wri.org/data/world-greenhouse-gas-emissions-2016>>. Acesso em 4 de Outubro de 2021

Portal PUC RIO, Sistema Maxwell. PUC RIO, 2003. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/3762/3762_3.pdf>. Acesso em 10 de Outubro de 2021.

VILLAR, ARTURO; **Waste heat recovery technology in continuous casting process**, 2014

INCROPERA, F.P.; BERMAN, T.L.; DEWITT, D.P. **Fundamentos de Transferência e Calor e Massa**, 6ª Edição., Editora LTC, 2008

FLUKE. **Tabela de Emissividade**, 2008. Disponível em: <<https://dokumen.tips/documents/tabela-de-emissividade-fluke.html>> Acesso em 15 de Setembro de 2021

PROTOLAB. **Tabela de condutividade térmica de materiais de construção**. Disponível em: <<http://www.protolab.com.br/Tabela-Condutividade-Material-Construcao.htm>>. Acesso em 15 de Setembro de 2021

APÊNDICE

Gráficos de temperaturas para os demais cenários analisados.

