



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Especialização em Ciência de Dados



Simulação do processo produtivo da laminação a frio em uma siderúrgica mineira

Alexandre Rodrigues Sirimarco
Bremio de Souza Cândido
Thiago Schuab Valério Almeida

João Monlevade, MG
2023

Alexandre Rodrigues Sirimarco
Bremio de Souza Cândido
Thiago Schuab Valério Almeida

Simulação do processo produtivo da laminação a frio em uma siderúrgica mineira

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Ciência de Dados do Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Especialista em Ciência de Dados.

Orientador: Prof. Dr. Paganini Barcellos de Oliveira

João Monlevade, MG

2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S619s Sirimarco, Alexandre Rodrigues.

Simulação do processo produtivo da laminação a frio em uma siderúrgica mineira. [manuscrito] / Alexandre Rodrigues Sirimarco. Bremio de Souza Cândido. Thiago Schuab Valério Almeida. - 2023. 27 f.

Orientador: Prof. Dr. Paganini Barcellos de Oliveira.
Produção Científica (Especialização). Universidade Federal de Ouro Preto. Departamento de Engenharia de Produção.

1. Siderurgia. 2. Metais - Tratamento térmico - Recozimento. 3. Simulação por computador. I. Almeida, Thiago Schuab Valério. II. Cândido, Bremio de Souza. III. Oliveira, Paganini Barcellos de. IV. Universidade Federal de Ouro Preto. V. Título.

CDU 669.1:004.94

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



FOLHA DE APROVAÇÃO

Alexandre Rodrigues Sirimarco

Bremio de Souza Cândido

Thiago Schuab Valério Almeida

Simulação do processo produtivo da laminação a frio em uma siderúrgica mineira

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Especialização em Ciência de Dados da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Ciência de Dados.

Aprovada em 28 de março de 2023

Membros da banca

Doutor - Paganini Barcellos de Oliveira - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto

Doutor - Alexandre Xavier Martins - Universidade Federal de Ouro Preto

Doutor - Thiago Augusto de Oliveira Silva - Universidade Federal de Ouro Preto

Mestre - Rafael Ricardo Magalhães - Usiminas

Paganini Barcellos de Oliveira, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 15/05/2023



Documento assinado eletronicamente por **Paganini Barcellos de Oliveira, COORDENADOR(A) DE CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO DE JOÃO MONLEVADE**, em 11/07/2023, às 10:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0556255** e o código CRC **B9C6A3DA**.

Resumo

Este trabalho tem como foco a elaboração e validação de um modelo de simulação computacional capaz de representar o processo de recozimento contínuo de uma empresa siderúrgica de grande porte. A metodologia utilizada se baseou no procedimentos padrões de trabalhos de modelagem e simulação, utilizando-se de dados nominais dos equipamentos disponíveis em manuais dos fabricantes e também do processo real, para um grupo de específico de produtos. As variáveis consideradas no modelo de simulação incluem modos (ciclos) de tratamento térmico e suas temperaturas, velocidades de processos, dimensionais dos produtos, utilização de processos em paralelo como a tesoura para aparar lateral dos produtos, quantidade de produtos gerados por bobina, tempos de soldagem e de preparação da linha. A produtividade da linha foi a referência principal de saída do modelo de simulação. Os cenários estudados, tiveram como foco a comparação dos resultados com os dados reais de processo referentes ao ano de 2022, uma análise da utilização de ciclos altos de recozimento (maiores temperaturas) e uma avaliação do impacto da introdução de processo adicional de resfriamento em uma etapa do processo produtivo. Como resultado pôde-se evidenciar que a aderência dos cenários propostos se mostrou satisfatória, uma vez que ao comparar os resultados do simulador com as condições realísticas, obteve-se uma diferença média de 1,7%.

Palavras-chaves: Siderurgia. Recozimento. Simulação.

Abstract

This work has a focus on the elaboration and validation of a computing simulation model able to represent the process of continuous annealing of a large steelwork plant. The methodology used was based on standard procedures of modeling and simulation, using nominal data of the equipment available from manufacturer's manuals and also from the real process data of a specific group of products. The variables considered in the simulation model include ways (cycles) of thermic treatment and your temperatures, speeds of process, product dimensions, utilization of process simultaneous like the scissor to the lateral shave of the products, the quantity of generated products from coils, welding times and line preparation. The line productivity was the principal reference to the exit of the simulation model. The studied scenarios have as a focus the comparison of results with the real data of the process of the 2022 year, an analysis of the use of high annealing cycles (higher temperatures), and an assessment of the impact of the introduction of the additional cooling process in a part of the productive process. Based on the results, it is possible to conclude that the match of the proposed scenarios turned out to be satisfactory since when comparing simulator results with realistic conditions, an average difference of 1,7% was obtained.

Keywords: Steel industry. Annealing. Simulator.

Lista de ilustrações

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Retração no Mercado de Aços Planos | 1 |
| Figura 2 – Metodologia | 9 |
| Figura 3 – Recozimento contínuo CAPL da empresa estudada | 14 |
| Figura 4 – Fluxograma de processo do Recozimento contínuo CAPL | 15 |
| Figura 5 – Exemplo de dados de entrada provenientes do Microsoft Access | 17 |
| Figura 6 – Animação do modelo de simulação do CAPL | 17 |

Lista de tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Comparação dos resultados simulados com os dados reais para todos os meses de 2022 | 19 |
| Tabela 2 – Resultados da produção em situações em que há maior participação de materiais de alto ciclo de recozimento | 20 |
| Tabela 3 – Comparação do desempenho esperado do simulador com e sem a de novos ciclos de resfriamento | 21 |

Sumário

| | | |
|------------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 | Contextualização | 1 |
| 1.2 | Objetivo geral | 3 |
| 1.2.1 | Objetivos específicos | 3 |
| 1.3 | Justificativa | 3 |
| 1.4 | Organização do Trabalho | 4 |
| 2 | REVISÃO DA LITERATURA | 5 |
| 2.1 | O processo de recozimento na laminação | 5 |
| 2.2 | Simulação computacional | 5 |
| 2.2.1 | Softwares de simulação | 6 |
| 2.2.2 | Aplicações de simulação na indústria siderúrgica | 7 |
| 3 | METODOLOGIA | 8 |
| 3.1 | Classificação metodológica da pesquisa | 8 |
| 3.2 | Procedimento metodológicos | 8 |
| 4 | RESULTADOS | 12 |
| 4.1 | Descrição do processo | 12 |
| 4.1.1 | Caracterização das variáveis e indicadores do processo de simulação | 16 |
| 4.2 | Modelo de simulação | 16 |
| 4.3 | Análise dos cenários simulados | 18 |
| 4.3.1 | Cenário 1 - Real <i>versus</i> Simulado em 2022 | 18 |
| 4.3.2 | Cenário 2 - Maior participação de materiais de alto ciclo de recozimento | 19 |
| 4.3.3 | Cenário 3 - Alteração dos ciclos de resfriamento | 20 |
| 5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 22 |
| | REFERÊNCIAS | 23 |

1 Introdução

1.1 Contextualização

A necessidade de se reduzir os custos de produção e de se aproveitar os recursos existentes de forma eficiente vem sendo uma tendência geral nas indústrias de commodities (PRATES, 2007). A falta de ferramentas de gestão eficientes agravam a situação, elevando os custos operacionais e, em consequência, a dificuldade para determinar a real capacidade dos equipamentos (DIAS, 2020).

O setor siderúrgico tem passado por diversas instabilidades econômicas nos últimos anos, seja devido à pandemia causada pela Covid-19, seja devido a oferta de produtos no mercado internacional com preços mais competitivos (CROSSETTI; FERNANDES, 2005). A retração nas vendas no último ano, no horizonte de curto prazo, em relação a 2021 (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2022) corrobora com a necessidade de se ter processos e serviços cada vez mais eficientes, caso as empresas queiram garantir o atendimento aos clientes do mercado no longo prazo (MARINS, 2011). A Figura 1 exemplifica a retração no mercado de aços planos, comparando-se os anos de 2021 e 2022. Há uma redução de consumo projetado na ordem de 2 milhões de toneladas no ano no país.

Figura 1 – Retração no Mercado de Aços Planos

| Produto Product | Jan-Jun / Jan-Jun 2021 | | | Jan-Jun / Jan-Jun 2022 | | |
|--------------------|--------------------------------|------------------------------|------------------|--------------------------------|------------------------------|------------------|
| | Consumo/ Consumption (A) | Importação/ Import (B) | (B / A) (%) | Consumo/ Consumption (A) | Importação/ Import (B) | (B / A) (%) |
| | Planos / Flats | 8.187.539 | 1.195.185 | 14,6 | 6.863.235 | 1.020.113 |
| Longos / Longs | 5.763.326 | 746.136 | 12,9 | 4.916.482 | 506.940 | 10,3 |
| Total | 13.950.865 | 1.941.321 | 13,9 | 11.779.717 | 1.527.053 | 13,0 |

Nota / Note: Para evitar dupla contagem, excluídas as importações diretas pelas usinas. / *To avoid double counting, it was excluded the imports made by the mills.*

Fonte / Source: Aço Brasil / Min. da Economia

Fonte: Instituto Aço Brasil (2022, p. 8).

A necessidade de redução de custos de produção, do melhor aproveitamento dos recursos disponíveis, e do desenvolvimento de ferramentas de gestão quando associados ao fato da iminente retração de mercado, instiga a proposição de ferramentas de otimização e análise de dados, capazes de nos orientar na determinação de metas de produtividades coerentes com os recursos e o ambiente estudado. No caso do processo de recozimento contínuo, foco deste trabalho, há uma série de desafios e oportunidades para a proposição de estratégias de otimização, considerando o escopo da empresa analisada.

As ferramentas para determinação das metas utilizadas no processo de recozimento da empresa, não consideram as condições de sequenciamento na linha de recozimento. Há também certa dificuldade em se determinar a influência de variáveis operacionais nos índices de produtividade da linha. Dentre as variáveis de processo que influenciam na produtividade do equipamento, os ciclos de recozimento, determinados pela temperatura e tempo de exposição da chapa nos fornos, juntamente com o sequenciamento dos produtos são os principais pontos analisados. Como citado anteriormente, uma das maiores dificuldades dos gestores das linhas operacionais, é a de oferecer para os setores de planejamento e venda da empresa, disponibilidades concretas, baseadas nos cenários produtivos estimados. Ademais, a diversificação de produtos, processos de recozimento e a interferência de seu sequenciamento na linha produtiva do recozimento contínuo, também conhecido como *Continuous Annealing Process Line* (CAPL) podem interferir na produtividade do equipamento.

O CAPL é um processo contínuo em que várias etapas são feitas em sequência (DE OLIVEIRA, 2019). Entre elas, solda, enformamento, cortes em tesouras e formação da bobina. Assim, uma alteração em um desses processos tem impacto nos demais, com maior ou menor intensidade. Entretanto, é difícil mensurar esse impacto e qual o resultado dessas alterações na produtividade final da linha, ou seja, tonelagem horária. Nesse sentido, a proposição de uma ferramenta que permita analisar diferentes cenários para aumento de produtividade se mostra pertinente. A questão fundamental é conseguir entender o perfil de tonelagem horária teórica, ou seja, a produtividade máxima possível em cada situação, bem como avaliar possíveis efeitos de modificações/investimentos em equipamentos e/ou na sequência de produção.

Neste contexto, o presente trabalho tem como foco a construção de um modelo de simulação para o sistema de recozimento de uma empresa siderúrgica localizada no estado de Minas Gerais, bem como analisar diferentes cenários e seus respectivos impactos produtivos, em função das variáveis consideradas. O uso da simulação computacional via softwares especializados pode ser vista como um instrumento de auxílio nas tomadas de decisão que permite aos gestores efetuar testes antes de operacionalizar de fato mudanças no ambiente real do problema (PINTO; PINTO, 2005).

Cabe acrescentar que, a escolha da metodologia proposta neste trabalho está alinhada com a literatura sobre o assunto, como relatado por Paracampos (2018), que destaca a importância da utilização de modelos de comportamento contínuo como acontece no caso de uma correia transportadora ou em outros processos de produção contínua.

1.2 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho consiste na construção de um modelo de simulação computacional capaz de representar o processo de recozimento contínuo (CAPL) de uma empresa siderúrgica localizada no estado de Minas Gerais, e analisar os impactos nos indicadores da linha de produção para diferentes cenários produtivos por meio do software Arena.

1.2.1 Objetivos específicos

Para cumprimento do objetivo geral é necessário atender aos seguintes objetivos específicos:

- Mapear e descrever o processo de recozimento contínuo (CAPL);
- Construir um modelo de simulação capaz de representar o (CAPL) utilizando o software Arena;
- Analisar diferentes cenários de simulação com foco na interpretação do impacto das condições operacionais no volume de toneladas hora resultante.

1.3 Justificativa

A escolha do tema deste trabalho se deu em função da dificuldade em se determinar a capacidade do processo de recozimento, tendo em vista os seus parâmetros nominais, descritos em manual original do fabricante, frente a condição atual de processamento, a deterioração do equipamento, qualidade dos produtos processados e as alterações no processo original.

Espera-se que o modelo permita analisar a tonelagem horária teórica, ou seja, a produtividade máxima possível considerando a configuração utilizada pela empresa atualmente, o que também contribui para a literatura sobre o assunto. Outra vantagem é a possibilidade de se testar modificações/investimentos nos equipamentos e sequência de produção, analisando o resultado em tonelagem horária, fornecendo subsídios inclusive para análise de investimentos e melhorias nos equipamentos do processo produtivo.

1.4 Organização do Trabalho

O trabalho está dividido em cinco capítulos. O Capítulo 1 apresenta uma breve descrição e contextualização do problema estudado, bem como os objetivos da pesquisa. O Capítulo 2 apresenta a revisão da literatura utilizada, e uma breve explicação sobre o processo estudado e das ferramentas utilizadas na simulação. Já no Capítulo 3 é relacionada a base metodológica do trabalho. Na sequência, no Capítulo 4, caracteriza as variáveis do processo, apresenta os modelos conceitual e de simulação e mostra os resultados provenientes dos cenários simulados. Por fim, no Capítulo 5 apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 Revisão da Literatura

2.1 O processo de recozimento na laminação

O processo de laminação a frio é um processo metalúrgico de conformação mecânica da tira de aço, que confere ao aço novas características dimensionais e propriedades mecânicas, e que consiste em passar a tira de metal entre dois cilindros que giram em sentidos opostos, separados por uma distância menor (espessura original da tira), o que lhe confere espessuras conforme a especificação para uso final e acabamento superficial de alta qualidade no material (TEIXEIRA; TEIXEIRA; LACERDA, 2019).

O processo de recozimento contínuo de bobinas de aço laminadas a frio, é um processo composto de várias etapas que ocorrem em sequência, são elas: solda, enforamento, cortes em tesouras, inspeção e geração de bobinas destinadas diretamente a clientes ou a processos subsequentes em outros equipamentos (DE OLIVEIRA, 2019). Este processo confere ao aço novas propriedades de tração, nova estrutura cristalina e principalmente novos valores de limites de escoamento e alongamento total (FERNANDES, 2007).

Entre os parâmetros e variáveis associados ao processo de recozimento, destaque para o grau de influência exercido pela temperatura nos fornos, a velocidade de processo, a espessura, a composição química e a estrutura cristalina do material (DA SILVA, 2013).

Assim, qualquer alteração em um desses processos tem impacto nos demais, com maior ou menor intensidade. O principal processo do equipamento é o recozimento da chapa que acontece nos fornos contínuos, seguindo parâmetros de processos como tempo de permanência, velocidade de resfriamento e temperatura nos fornos (FARIA, 2019). Nessa etapa o objetivo é ajustar os parâmetros metalúrgicos do aço laminado, como microestruturas e propriedades mecânicas.

2.2 Simulação computacional

A simulação se resume à uma ferramenta de planejamento, não necessariamente computacional que auxilia e serve como base para estratégias operacionais de corporações (DOS SANTOS; DE CARVALHO, 2011). A simulação computacional é um método de auxílio à tomada de decisão, que permite uma visão ampliada dos processos estudados de forma mais rápida e com menos custos (OLIVEIRA; CORRÊA; NUNES, 2014). A simulação, por exemplo, permite avaliar impactos em leiautes produtivos, fluxo de documentos, filas em processos, entre outros, sem haja a necessidade de se realizar os eventos na prática (DE CARVALHO, 2006).

Segundo Vieira (2006), a simulação visa responder questões do tipo:

- Como indústrias podem definir melhores leiautes produtivos ou o mix de produtos para nova temporada?
- Quais setores devem ser automatizados e quais equipamentos devem ser adquiridos?
- Como um novo sistema produtivo, ou a substituição de parte do sistema atual, irá afetar a produtividade da indústria e quão significativa será esta mudança?
- Como avaliar se a nova reestruturação produtiva trará os benefícios esperados?
- Será que o investimento gerará o retorno desejado?

Na simulação computacional são representados os processos ou etapas, os recursos, que podem ser de transporte, humanos, capital, equipamentos e tempo (CHWIF, 1999). Fora estes elementos se tem as entidades que são os objetos de interesse do modelo, que, em uma simulação de atendimento bancário seriam os clientes e os atributos, por exemplo, que, por sua vez, possuem atributos que podem modificar o seu *status*, como o caso de clientes satisfeitos (ou não) com o tempo de espera nas filas (CHWIF, 1999).

As principais etapas do desenvolvimento de uma simulação são a concepção ou formulação do modelo, a implementação do modelo e a análise dos resultados do modelo (CHWIF, 1999). Ademais, devido à disponibilidade de ferramentas computacionais e também aos avanços das metodologias, se tem uma vasta gama de ofertas de softwares de simulação no mercado atual (CARDOSO; JOAQUIM JÚNIOR, 2016).

2.2.1 Softwares de simulação

Um software destinado a simulação suporta uma representação de um sistema produtivo por meio de um modelo computacional matemático lógico (PINHO; MORAIS, 2010). Esta representação é realizada em um ambiente livre de riscos e com custos reduzidos, onde se pode criar diferentes cenários para analisar um sistema com o objetivo de suportar um planejamento de alterações no processo. A simulação e seu planejamento podem melhorar a eficiência de um processo visando obter redução nos custos de produção (VIEIRA, 2006).

Há no mercado vários tipos de softwares capazes de permitir a construção de modelos computacionais de simulação. Como exemplo, pode-se citar os simuladores de circuitos eletrônicos (MEHL, 1990), de análise de reações químicas (NAVARRO HOYOS, 2019), de cálculo de cargas estruturais (DE SOUZA JÚNIOR, 2004), de análise de esperas em filas para serviços e processos industriais (CARNEIRO; PINTO, 2010).

Segundo Miyagi (2006) os modelos de simulação podem ser classificados como instantâneos ou dinâmicos, determinísticos ou estocásticos e, discretos ou contínuos. No presente trabalho será construído um modelo híbrido de simulação discreta e contínua.

Dentre os softwares disponíveis no mercado, tais como ProModel, Arena, Anylogic, FlexSim, Simul8, e o Simcad Pro, o Arena da Rockwell Softwares foi o escolhido para este trabalho, por se tratar de ferramenta acessível dentro da organização estudada. O Arena possui uma linguagem de alto nível para a construção dos modelos, bem como apresenta uma interface gráfica destinada ao desenvolvimento de modelos, animação e análise estatística de dados de entrada e saída (PINTO; PINTO, 2005).

A facilidade de utilização do Arena na simulação dos processos de uma indústria siderúrgica se deve ao fato de sua modelagem ser orientada a processos, com a possibilidade de simulação de eventos discretos e contínuos como a utilização de tanques de substâncias químicas ou pátios de estocagem de friáveis (HAUSER, 2016). A simulação recria a competição por recursos para execução de algumas operações e/ou cooperam entre si para execução de outras (PINTO; PINTO, 2005), tendo sempre em mente a capacidade de responder a questão "O que aconteceria se o sistema operasse em determinada cenário?"

2.2.2 Aplicações de simulação na indústria siderúrgica

O trabalho de Coelho (2011) mostra a utilização do Arena na simulação da operação de manuseio de pátios de matérias-primas em uma usina siderúrgica, visando redução de manobras e retrabalhos. No mesmo contexto siderúrgico, Pinto e Pinto (2005) utilizaram o Arena como ferramenta para auxílio na tomada de decisão de configuração produtiva no setor de trefilaria, com foco no dimensionando da equipe necessária para operação dos equipamentos, dada uma possibilidade de investimento para modificação do *modus operandi* e considerando fatores ergonômicos associados ao trabalho. Já Soares, Júnior e Sampaio (2016) utilizaram o Arena para análises de cenários vinculados ao processo de lingotamento contínuo de uma siderúrgica.

Trabalhos mais recentes no ambiente siderúrgico podem também serem relacionados, como o modelo de simulação para melhoria do desempenho na descarga de vagões de ferro gusa (DA SILVA, 2022), a simulação da logística em pátios de matérias primas em uma usina siderúrgica (FRANCO et al., 2018) e a simulação de alterações no processo produtivo de uma aciaria (DOS SANTOS, 2018).

3 Metodologia

3.1 Classificação metodológica da pesquisa

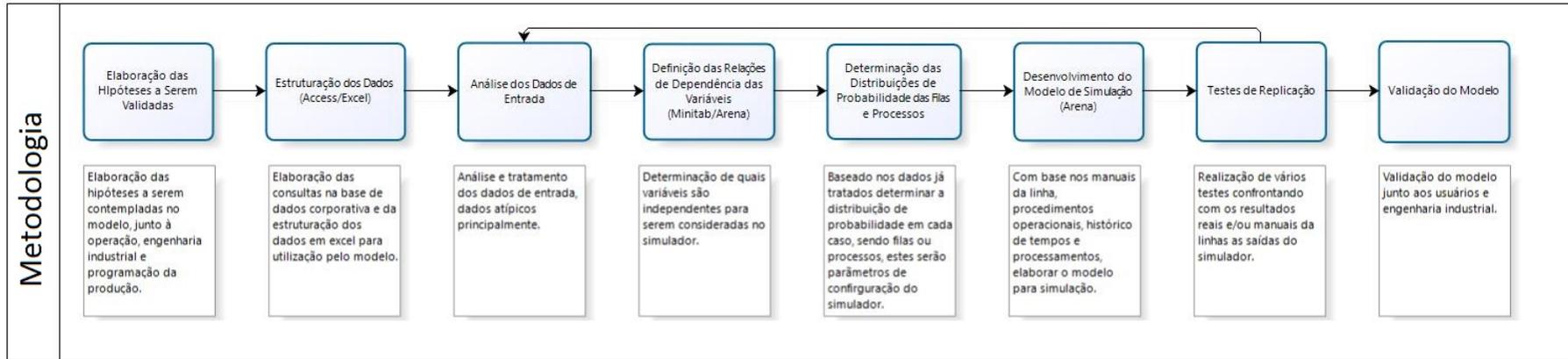
Este trabalho se baseia na aplicação do método de pesquisa quantitativo denominado “modelagem e simulação”, que possui caráter racional e cujo objeto de estudo pode ser classificado como empírico-normativo (TURRIONI; MELLO, 2012; CAUCHICK-MIGUEL et al., 2018). Esse tipo de pesquisa tem como foco o desenvolvimento e resolução de modelos de simulação e/ou otimização que são elaborados a partir da projeção de sistemas reais em linguagem matemática e computacional (CAUCHICK-MIGUEL et al., 2018). A ideia é que o modelo proposto neste trabalho seja capaz de representar um conjunto de políticas, regras, e procedimentos que juntos simulem o ambiente real do estudo, ou seja, deve-se estabelecer quais são as relações entre as entradas e saídas de cada etapa do processo produtivo.

Para que o estudo seja desenvolvido de forma apropriada é de grande importância que sejam explicitados corretamente a relação de influência entre as variáveis do processo e que seja definida a ordem de sequenciamento e/ou relações de paralelismo das atividades produtivas (TURRIONI; MELLO, 2012; CAUCHICK-MIGUEL et al., 2018). Nesse sentido, considerando o objetivo geral do trabalho que consiste em construir um modelo de simulação capaz de rerepresentar o processo de recozimento contínuo na laminação de uma siderúrgica, é fundamental que as relações entre as variáveis e os recursos do processo sejam adequadamente estabelecidos, visando obter uma ferramenta de apoio às tomadas de decisão, que sintetize o efeito do sequenciamento de produção na etapa de tratamento térmico da planta industrial e permita levantar os dados sobre alguns indicadores de interesse.

3.2 Procedimento metodológicos

A Figura 2 sintetiza quais são os procedimentos metodológicos necessários para o cumprimento dos objetivos do trabalho. Os procedimentos metodológicos propostos permitem avaliar o desempenho esperado de capacidade produtiva da linha dado sequenciamento de materiais, avaliar o desempenho operacional de produtividade realizado e identificar a necessidade de implantação (ou não) de intervenções no sequenciamento ou no processo, consiste em uma série de etapas, representado por meio de 8 (oito) passos, sendo apresentados em sequência.

Figura 2 – Metodologia



Fonte: Elaborado pelos autores.

A Elaboração das hipóteses a serem validadas (passo 1) visa estabelecer a caracterização dos equipamentos da linha que operam simultaneamente e podem interferir na velocidade da linha, definir as variáveis necessárias para estipular o tempo de cada operação. Após estas definições, será possível representar a estrutura da linha produtiva em fluxograma, que pode ser usada para testar o modelo de simulação proposto e fazer apresentação de seus resultados através de recursos de animação do software. Os recursos de animação são utilizados para facilitar o entendimento da relação entre as entidades e atividades envolvidas no modelo. Os resultados podem ser mostrados de várias formas, tais como: variáveis, ocupação de recursos ou outras expressões (SANTOS; PORTUGAL; RIBEIRO, 2019).

Uma das mais importantes tarefas consiste na medição adequada do grau de autonomia e/ou flexibilidade do sequenciamento. Trata-se de uma variável determinante para avaliação da capacidade de velocidade de processo da linha para o sequenciamento ideal a ser empregado na etapa de tratamento térmico para obtenção dos melhores resultados de produtividade do equipamento. Os ciclos de tratamento térmico (temperaturas dos fornos e tempo de permanência), velocidades de processos, dimensionais dos produtos (espessura e largura), *side trimmer*, ocupação dos acumuladores de tiras, tempos de ajuste, aceleração da linha, quantidade de produtos por bobina (geração de produtos na linha), tempo de preparação, retirada de amostras e soldagem são algumas das principais variáveis consideradas no processo simulado.

A etapa de levantamento de dados (passo 2) exige a padronização da etapa anterior, relativa a informações preliminares, da coleta de dados, baseada nos registros históricos do processo e das coletas em campo (*in loco*). Nesta etapa são obtidos os dados das variáveis a serem anexadas ao modelo de simulação, dados de resultados de cada material processado associadas as fases do processo (SANTOS; PORTUGAL; RIBEIRO, 2019).

Uma vez levantados os dados, operacionaliza-se um procedimento de análise preliminar dos dados (passo 3). Caso os dados coletados não sejam suficiente para representar o processo real, as saídas do modelo vão influenciar negativamente na qualidade da decisão. A ideia principal da análise de dados é assegurar que os dados coletados refletem exatamente o processo real, excluindo-se os *outliers*, falhas de medições e resultados fora do padrão pré-definido. A validação tem como objetivo garantir que o modelo representará com acuracidade o sistema real (SARGENT, 2010).

A definição das relações de dependência das variáveis (passo 4) é feita com o auxílio do software Minitab, que permite utilizar o método de regressão múltipla para definir a relação da variável dependente (velocidade) com as variáveis independentes (BAKKE; LEITE; SILVA, 2008). O principal objetivo é prever as mudanças na variável dependente de acordo com as variações nas variáveis independentes. Será definido o grau de dependência e relação entre as variáveis, o quanto cada variável de um material e a sequência de processamento interferem na velocidade do processo. Em conjunto com esta análise foram realizados os testes de distribuições de probabilidade das filas e dos processos (passo 5).

Após os passos iniciais de preparação e análise da massa de dados a ser utilizada, inicia-se o desenvolvimento do simulador propriamente dito (passo 6), esta etapa é feita elaborando a lógica do simulador com base nos manuais originais da linha, procedimentos atualizados (principalmente devido a alterações nas condições originais e desenvolvimento de novos produtos que não foram contemplados na época da instalação da linha operacional), e fazendo a utilização dos históricos de tempo de processamentos, através de consultas nos bancos de dados no Microsoft Access.

A simulação é, em geral, entendida como a “imitação” de uma operação ou de um processo do mundo real. Assim, a simulação envolve a geração de uma “história artificial” de um sistema para a análise de suas características operacionais (MULLER, 2008). A validação do simulador (passos 7 e 8) é feita com base nos resultados de várias análises de replicação de cenários produtivos reais comparando-se os resultados obtidos no simulador e os resultados reais de processo. Note que, caso seja constatado que há diferenças entre o modelo proposto e o contexto real (passo 7), é necessário voltar alguns passos na metodologia, desde a análise de dados de entrada (passo 3) para ajustes e melhorias no modelo conceitual e computacional.

Uma vez desenvolvido e validado, o modelo pode ser usado para investigar uma grande variedade de questões sobre o processo. Mudanças no processo podem ser simuladas a fim de prever seu impacto no desempenho da planta. Ademais, vale destacar que o processo de simulação de um modelo já validado, pode ser usado como uma ferramenta para prever os efeitos de uma mudança em processos existentes e também como uma ferramenta de projeto para avaliar e validar o desempenho de novos processos. Portanto, os resultados de simulação no Arena poderão ser utilizados não somente nos cenários estudados neste trabalho, mas também em situações em que se deseja aprimorar o processo de tomada de decisão no tocante à melhoria no sequenciamento de produção, seguindo procedimentos operacionais correspondentes aos descritos nos manuais técnicos da linha e complementados por adaptações e/ou melhorias no sistema.

Cabe acrescentar que, neste trabalho, serão avaliados aspectos relacionados as tarefas operacionais para inclusão e exclusão de sequenciamento na linha com dependência e prescrição direta do supervisor e as necessidades de serem flexíveis para responderem as flutuações de sequenciamento de produção. Com relação ao período de coleta de dados para validação e estudo dos cenários, será utilizada a produção correspondente a cada um dos meses de 2022.

4 Resultados

4.1 Descrição do processo

Para se descrever o processo produtivo estudado neste trabalho é necessário entender que a diversificação de produtos, as etapas dos processos de recozimento e a interferência de seu sequenciamento na linha produtiva do CAPL são exemplos de elementos que podem interferir na produtividade da planta e também nos atributos dos diferentes tipos de aço. Nesse sentido, desenvolver um simulador que considere todos esses fatores se torna pertinente dentro da perspectiva esperada pela empresa.

Os aços bifásicos (*Dual Phase*), por exemplo, são caracterizados por uma microestrutura normalmente constituída de ilhas de martensita dispersas em uma matriz ferrítica. Contudo, pequenas quantidades de outros constituintes como bainita, perlita e/ou austenita retida podem estar presentes, sendo que, o percentual da fração volumétrica está relacionado diretamente com o tratamento térmico.

A combinação especial de resistência e ductilidade está relacionada com a microestrutura, onde a rede ferrita macia fornece boa capacidade de plasticidade e as ilhas de martensita fornecem maior capacidade de resistência devido a sua maior dureza. Neste contexto, a definição do sequenciamento deve ser pensada em função dos ciclos de tratamento térmico que poderão afetar a performance da linha de produção.

Em linhas gerais, o processo de recozimento contínuo possui grandes vantagens econômicas e metalúrgicas quando comparado à rota tradicional (recozimento em caixa), tais como (RABELO, 2016):

- Melhoria de qualidade: melhor planicidade, maior uniformidade das propriedades mecânicas, maior limpeza superficial;
- Menores custos de produção: devido ao tempo de processo reduzido e menos perdas na produção, aliados à adequação da mão de obra devido às operações combinadas de limpeza eletrolítica, recozimento e encruamento;
- Aumento da versatilidade de produtos: possibilita a produção de maior variedade de aços.

A linha de recozimento contínuo da empresa foco deste estudo possui um resfriamento primário do tipo *High Gas Jet Cooling*, que permite atingir taxas de resfriamento entre 20°C/s e 70°C/s, dependendo da velocidade de processo, tipo de material e espessura da tira. Quanto menor a espessura, maior a velocidade, menor o tempo de permanência no resfriamento rápido e maior a taxa de resfriamento. Vários equipamentos estão acoplados a esta linha, sendo os principais: a limpeza eletrolítica, responsável pela remoção do excesso de óleo de laminação da superfície da chapa; o recozimento para realizar o tratamento térmico do material; e o laminador *Skin Pass* para melhorar a forma, ajustar propriedades mecânicas e imprimir a rugosidade final da chapa.

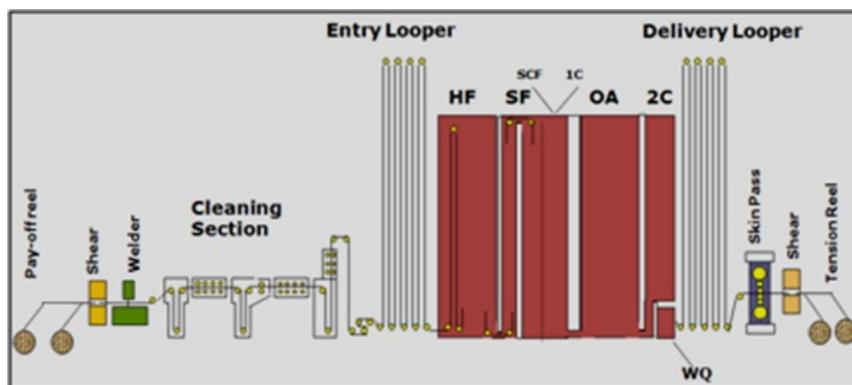
Como o objetivo do trabalho consiste na construção de um modelo de simulação, é natural que algumas simplificações e adaptações sejam necessárias para sua representação computacional. A ideia é tentar construir um modelo que permita ajudar no processo de tomada de decisão da empresa, bem como permita acompanhar o desempenho de alguns indicadores-chave no processo. Assim, os equipamentos que foram considerados na lógica do processo mapeado são:

- Duas desbobinadeiras na entrada da linha (*Pay-offreel*), que permitem a preparação simultânea de duas bobinas, para soldagem;
- Uma tesoura de entrada (*Shear*) com a função de preparar as pontas da chapa para soldagem;
- Uma seção de limpeza mecânica e eletrolítica (*Cleaning Section*), que tem a função de limpar a tira para o processo nos fornos sem contaminações;
- Uma máquina de solda que tem a função de unir bobinas subsequentes permitindo o processo contínuo;
- Um acumulador de tira na entrada dos fornos (*Entry Looper*), que permite que se faça soldas e preparações nas bobinas entrantes, sem a necessidade de se paralisar o processo nos fornos, este acumulador deve sempre ser mantido em plena ocupação se acelerando a linha logo após as soldas e preparações das bobinas entrantes;
- Fornos: um forno de aquecimento (HF), um forno de encharque (SF), um forno de resfriamento lento primário (SCF), um forno de resfriamento rápido (1C), um forno de super-envelhecimento (OA), que atuam nas propriedades mecânicas do metal conforme a especificação requerida;
- Um resfriamento em água (WQ), utilizado para acertos finais de propriedades mecânicas;
- Um forno de resfriamento lento secundário (2C), utilizado para acerto final de curvas de escoamento no metal;

- Um acumulador de tira na saída dos fornos (*Delivery Looper*). Esse elemento permite que, em caso de alguma intervenção na saída da linha, se consiga manter o processo de recozimento nos fornos. Este acumulador deve sempre ser mantido vazio;
- Um laminador de encruamento (*Skin Pass*), que tem a função de se adequar as propriedades mecânicas do material após o recozimento;
- Uma tesoura lateral (*Shear* ou *Side Trimmer*), que tem a função de adequar a largura da chapa à tolerância dimensional do pedido do cliente;
- Duas desbobinadeiras de saída (*Tension Reel*), que tem a função de gerar produtos, seccionando a tira, e manter a tensão correta por toda linha.

A Figura 3 ilustra a relação entre as principais seções e equipamentos da linha de recozimento, conforme dito anteriormente, divididas em *pay-off reel* (desbobinadeira), *shear* (tesoura de preparação de pontas), *welder* (máquina de solda), *cleaning section* (limpeza de tira), *entry looper* (acumulador de tiras da entrada), fornos (HF, SF, OA e 2C); *delibery looper* (acumulador de saída), *skin pass* (laminador de encruamento), *shear* (tesoura de saída), *tension rell* (bobinadeiras de saída).

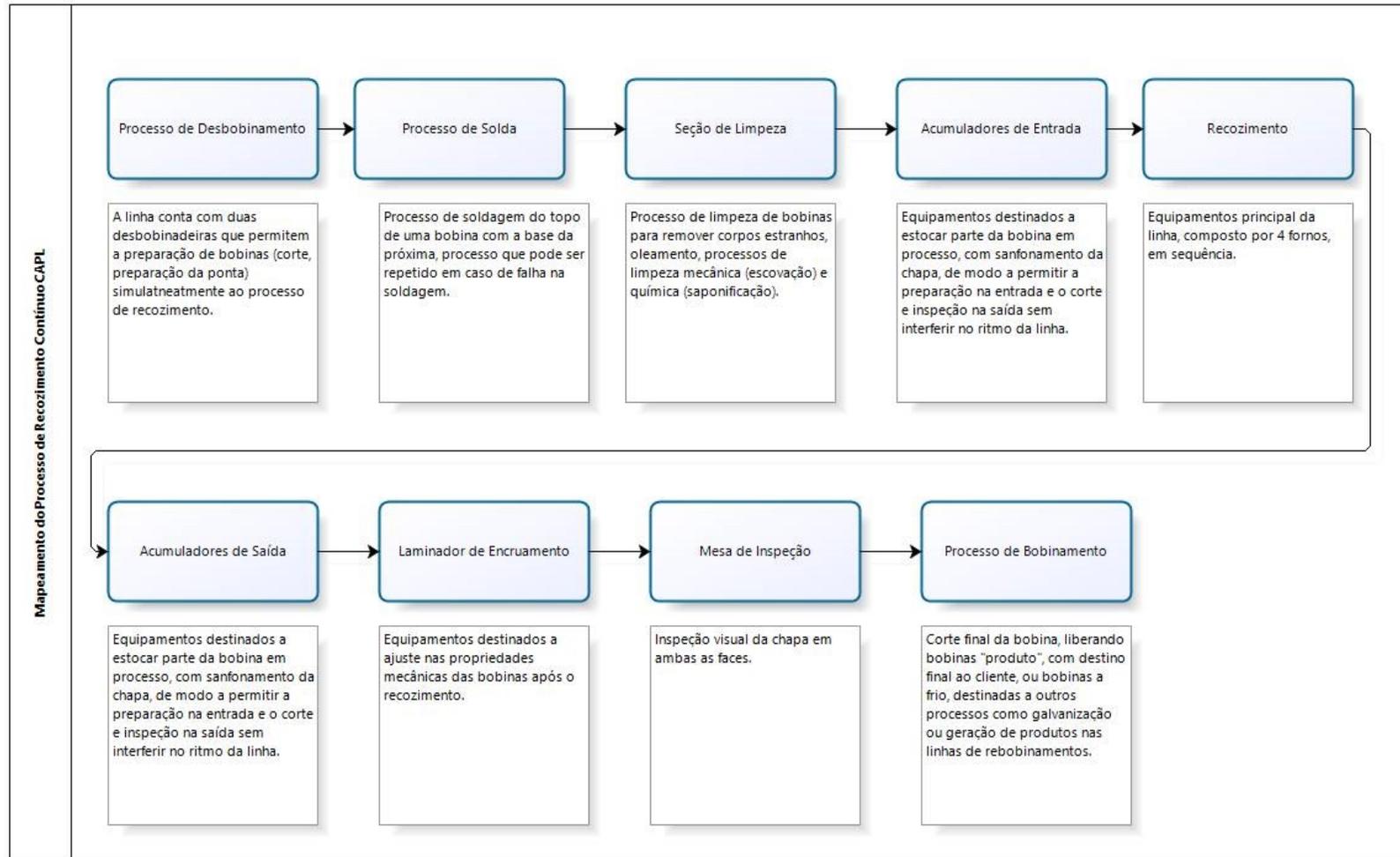
Figura 3 – Recozimento contínuo CAPL da empresa estudada



Fonte: Documento interno da empresa.

A linha do CAPL apresentada na Figura 4 ilustra o fluxo do processo que corresponde ao modelo conceitual proposto neste trabalho. Note que, no processo de recozimento e encruamento, há várias etapas ocorrem simultaneamente, entre elas, solda, tratamento térmico e inspeção de produtos. Desta forma, alterações em um desses processos tem impacto nos demais, com maior ou menor intensidade.

Figura 4 – Fluxograma de processo do Recozimento contínuo CAPL



Fonte: Elaborado pelos autores.

4.1.1 Caracterização das variáveis e indicadores do processo de simulação

As variáveis que influenciam a produtividade da linha produtiva e que serão consideradas neste estudo incluem os ciclos de tratamento térmico (temperaturas dos fornos e tempo de permanência), velocidades de processos, dimensionais dos produtos (espessura e largura), utilização de *side trimmer* (tesoura de apara lateral da tira), ocupação dos acumuladores de tiras, tempos de ajuste, aceleração da linha, quantidade de produtos por bobina (geração de produtos na linha), tempo de preparação, retirada de amostras e soldagem.

O levantamento das características destas variáveis são feitos por meio de medições em campo e também especificações técnicas baseadas nas características nominais do equipamento no manual especificação da linha.

No que tange os indicadores de desempenho que serão utilizados como saídas do processo simulado, destaca-se a granulometria das informações de produtividade, obtendo-se as informações detalhada de produtividade, por tipo de ciclo de recozimento, qualidade e dimensional dos produtos, bem como a produtividade geral da linha.

4.2 Modelo de simulação

A parametrização dos dados de entrada do simulador proposto se dá por meio de consulta aos dados do Microsoft Access, e que relaciona, produto a produto, as grandezas e informações de registro da bobina, registros como a espessura visada, largura visada, ciclo de recozimento, quantidade de produtos gerados na bobina, peso de entrada no processo, condição de utilização de tesoura lateral (*trimmer*) e comprimento da tira, conforme mostrado na Figura 5.

A lógica de programação do simulador foi desenvolvida com a utilização de “templates” disponíveis no simulador Arena e da programação lógica dos processos existentes. A lógica do simulador se comporta de acordo com os dados das bobinas que entram na linha e suas informações de dimensões de qualidade e do tipo de ciclo de recozimento. Assim, a dinâmica do sistema projetado pode ser resumida em formulações dos principais tempos nominais dos processos de desbobinamento, solda e de velocidade do material no centro da linha, de acordo com o ciclo e temperatura pré-determinados, da ocupação dos acumuladores de tiras, da utilização da tesoura lateral e da decisão de formação de produtos, o que permite gerar bobinas de menores dimensões nas bobinadeiras. Esta lógica envolve uma série de testes lógicos baseados nas informações pré-carregadas na planilha de entrada dos dados das bobinas a serem processadas.

Do mesmo modo, os submodelos de comportamento/determinação da velocidade e temperatura dos fornos HF e 1C, respectivamente, forno de aquecimento e resfriamento rápido, contam, em cada um deles, dois testes lógicos baseados na informações de entrada para decidir a adequação de cada processo (temperatura e velocidade) ao procedimento estabelecido.

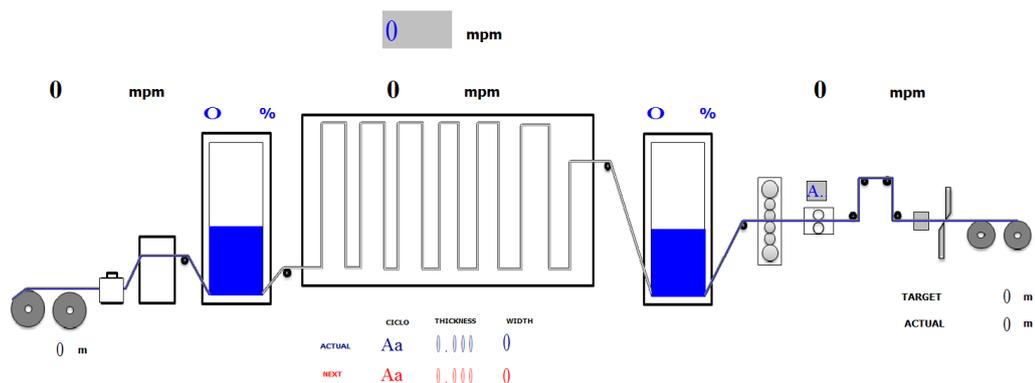
Figura 5 – Exemplo de dados de entrada provenientes do Microsoft Access

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L |
|----|------------|---------|-------------|-------|--------|------|---------|------|---|---|----------------------|---|
| 1 | BF ENTRADA | ESP_VIS | LARG_MIN_OV | CICLO | QTD_PR | PESO | TRIMMER | COMP | | | ENTRADA DE DADOS | |
| 2 | 24550182 | 0,47 | 1200 | 73 | 1 | 23,4 | N | 5301 | | | Sequência de bobinas | |
| 3 | 24481995 | 0,41 | 1100 | 73 | 2 | 24,4 | N | 6898 | | | Colunas A. até H | |
| 4 | 24478339 | 0,41 | 1100 | 73 | 2 | 24,5 | N | 6908 | | | | |
| 5 | 24491558 | 0,41 | 1100 | 73 | 2 | 24,8 | N | 7002 | | | | |
| 6 | 24478327 | 0,41 | 1100 | 73 | 2 | 23,0 | N | 6512 | | | | |
| 7 | 24539731 | 0,40 | 1150 | 7D | 2 | 27,5 | N | 7608 | | | | |
| 8 | 24541136 | 0,47 | 1250 | 7D | 2 | 26,5 | N | 5801 | | | | |
| 9 | 24543191 | 0,47 | 1250 | 7D | 1 | 13,2 | N | 2894 | | | | |
| 10 | 24500640 | 0,41 | 1200 | 7D | 2 | 26,5 | N | 6862 | | | | |
| 11 | 24544476 | 0,40 | 1200 | 73 | 1 | 26,8 | N | 7099 | | | | |
| 12 | 24477423 | 0,40 | 1200 | 73 | 1 | 12,5 | N | 3322 | | | | |
| 13 | 24456661 | 0,40 | 1200 | 73 | 1 | 11,6 | N | 3094 | | | | |
| 14 | 24509498 | 0,41 | 1150 | 7D | 2 | 26,2 | N | 7082 | | | | |
| 15 | 24497121 | 0,41 | 1150 | 7D | 2 | 25,4 | N | 6883 | | | | |
| 16 | 24497089 | 0,41 | 1100 | 7D | 2 | 25,3 | N | 7137 | | | | |
| 17 | 24497133 | 0,41 | 1100 | 7D | 2 | 26,1 | N | 7361 | | | | |
| 18 | 24491560 | 0,41 | 1100 | 73 | 2 | 23,1 | N | 6527 | | | | |
| 19 | 24559232 | 0,45 | 1000 | 73 | 2 | 21,9 | N | 6283 | | | | |
| 20 | 24530287 | 0,49 | 1050 | 7F | 2 | 24,9 | N | 6258 | | | | |
| 21 | 24485195 | 0,41 | 1000 | 73 | 2 | 23,6 | N | 7357 | | | | |
| 22 | 24510922 | 0,40 | 1000 | 73 | 1 | 23,6 | N | 7541 | | | | |
| 23 | 24500744 | 0,46 | 1000 | 73 | 2 | 20,2 | N | 5680 | | | | |
| 24 | 24505684 | 0,46 | 1000 | 73 | 2 | 22,0 | N | 6189 | | | | |
| 25 | 24507339 | 0,46 | 1000 | 73 | 2 | 23,2 | N | 6544 | | | | |
| 26 | 24507340 | 0,46 | 1000 | 73 | 2 | 23,7 | N | 6686 | | | | |

Fonte: Planilha de dados internos da empresa.

Ademais, para melhor visualização do fluxo dos materiais e tempos de processos durante as rodadas de simulação, foi desenvolvida a animação do modelo (ver Figura 6), cujas informações de velocidade de processo na entrada, nos fornos e na saída da linha, da ocupação dos acumuladores de entrada e saída, do ciclo de recozimento atual e da próxima bobina e suas características dimensionais como espessura e largura são explicitados.

Figura 6 – Animação do modelo de simulação do CAPL



Fonte: Elaborado pelos autores.

É importante destacar que, por se tratar de um simulador do processo real com caráter estratégico e confidencial para a empresa, a lógica detalhada do simulador no software Arena não será aqui apresentada. Tais informações foram entregues às áreas operacionais da empresa, o que inclui um tutorial discricional completo, explicando tanto a lógica do sistema quanto as instruções para modificação de parâmetros para realização de testes em cenários de interesse institucional.

4.3 Análise dos cenários simulados

Antes de apresentar os testes computacionais realizados, é importante destacar que, para garantia de proteção dos dados da empresa, os valores apresentados nas análises serão discriminados apenas em porcentagens.

Em resumo, os cenários simulados podem ser divididos em duas partes: uma primeira rodada de testes de validação do simulador desenvolvido (cenário 1 - C1); e a investigação de dois contextos de interesse da organização (cenários 2 e 3 - C2 e C3), focados em avaliar previsibilidade dos níveis de produtividade da planta em condições diferentes das praticadas no contexto atual. Em resumo os cenários simulados são:

- C1 - Comparação dos resultados do simulador com os dados reais de processo no período de janeiro a dezembro de 2022, mês a mês, com foco na validação do simulador desenvolvido.
- C2 - Análise de um mix produtivo simulado de maior utilização de materiais com ciclos altos de recozimento.
- C3 - Análise de uma situação em que é alterada a capacidade de resfriamento do CAPL, considerando a produção de materiais de alta resistência para indústria automobilística.

O desdobramento dos resultados provenientes de cada um dos três cenários propostos são apresentados na subseções a seguir.

4.3.1 Cenário 1 - Real *versus* Simulado em 2022

Para validação dos resultados obtidos no simulador, foram realizadas simulações para cada um dos meses de 2022, considerando toda a produção mensal na sequência em que foi produzida. A Tabela 1 relaciona mensalmente os resultados da simulação, **Sim (th)**, e sua diferença em relação ao realizado efetivamente pelo equipamento no contexto real, **Real (th)**, ambos medidos em tonelada hora (th), bem como a diferença absoluta, Δ (**th**), e percentual, Δ (**%**), entre eles.

Na média os resultados apresentados na Tabela 1 pela simulação ficaram dentro de uma margem média de 1,7% indicando uma boa aderência do modelo ao padrão de operação da linha. Neste sentido, ficou estabelecido que o simulador proposto poderia ser considerado como validado, uma vez que o desvio esperado pelos autores e pela empresa estavam aceitáveis, considerando as simplificações do sistema em relação ao contexto real.

Tabela 1 – Comparação dos resultados simulados com os dados reais para todos os meses de 2022

| Mês | Sim (th) | Real (th) | Δ (th) | Δ (%) |
|--------------|--------------|--------------|------------------|-----------------|
| jan. | 62.31 | 63.79 | -1.48 | -2.30 |
| fev. | 61.54 | 61.32 | 0.23 | 0.40 |
| mar. | 62.73 | 64.60 | -1.87 | -2.90 |
| abr. | 60.14 | 63.46 | -3.32 | -5.20 |
| mai. | 60.21 | 62.76 | -2.55 | -4.10 |
| jun. | 59.86 | 61.23 | -1.37 | -2.20 |
| jul. | 62.21 | 64.70 | -2.49 | -3.80 |
| ago. | 58.94 | 61.08 | -2.14 | -3.50 |
| set. | 61.96 | 61.08 | 0.88 | 1.40 |
| out. | 62.87 | 62.39 | 0.48 | 0.80 |
| nov. | 63.62 | 63.50 | 0.11 | 0.20 |
| dez. | 62.24 | 61.56 | 0.68 | 1.10 |
| Média | 61.55 | 62.62 | -1.07 | -1.70 |

Fonte: Elaborado pelos autores.

4.3.2 Cenário 2 - Maior participação de materiais de alto ciclo de recozimento

No segundo cenário simulado, com objetivo de avaliação da previsibilidade do simulador, verificou-se a influência da participação de materiais com exigência de ciclo alto, cuja condição real levantada no período representava um total de 12,41% do total processado pelo equipamento, e foi elevada para 31,92%. A Tabela 2 mostra o impacto na produtividade da linha. É possível notar que a utilização de ciclos com maior temperatura exigida no forno de pré-aquecimento HF impacta negativamente a produtividade do equipamento.

Na Tabela 2 a primeira linha mostra o valor real, assim como a segunda linha indica o valor projetado com aumento de participação destes materiais mais nobres. No tocante às colunas, são descritos o período de análise (**Mês**), a produção real (**Produção (t)**), o volume em toneladas de participação de materiais que necessitam de ciclos altos de recozimento (Δ (%)), seguido do resultado do simulador para ambos os casos ((**Sim (th)**) e dos resultados reais ponderando-se a produção real do equipamento (**Real (th)**). A coluna intitulada “**Aderência**” relaciona a diferença entre o simulado e o real, já a coluna “**Padrão (th)**” relaciona o modo empírico atual de elaboração dos padrões e metas de produtividade adotados pela empresa.

Cabe ressaltar que, este cenário foi escolhido devido a tendência de constantes aumento da participação no mercado de aços planos deste tipo de produto. O cenário simulado mostra que a variação de mix de produção gerou resultados semelhantes entre o simulador e os valores obtidos no contexto real. Note que, houve uma redução de produtividade da ordem de 7%, valor este, que ocorre com a ferramenta atualmente utilizada para elaboração das metas da empresa, porém com menor impacto, 1,8%, o que se mostra pouco aderente à realidade da linha. Provavelmente, tal situação ocorre pois a metodologia utilizada na prática não considera o sequenciamento de produção, ciclo e questões dimensionais de cada material.

Tabela 2 – Resultados da produção em situações em que há maior participação de materiais de alto ciclo de recozimento

| Mês | Produção (t) | Ciclo alto (t) | Δ (%) | Sim (th) | Real (th) | Aderência (%) | Padrão (th) |
|---------|-----------------|-------------------|-----------------|-------------|--------------|------------------|----------------|
| out-dez | 94.076,2.0 | 11.675,5 | 12.41 | 62.91 | 62.60 | 100.51 | 65.22 |
| | 94.076,2.0 | 30.029.5 | 31.92 | 58.45 | 57.65 | 101.40 | 64.06 |
| | | | Δ (%) | 7.10 | 7.90 | | 1.80 |

Fonte: Elaborado pelos autores.

4.3.3 Cenário 3 - Alteração dos ciclos de resfriamento

O terceiro e último cenário estudado, ainda com objetivo de avaliação da previsibilidade do simulador, avalia a possibilidade de investimento em melhorias no forno de resfriamento rápido 1C, alterando a taxa de resfriamento ($^{\circ}\text{C}/\text{s}$) em 50% para materiais de alta resistência, que exigem resfriamento acelerado para formação de um valor micro-estrutura adequado. Neste cenário, a taxa de resfriamento destes materiais limita a produtividade do equipamento. Cabe destacar que, a participação deste material no mix do recozimento contínuo em 2022 foi de 11%.

A avaliação deste cenário se mostra pertinente, pois o equipamento atual, quando comparado a plantas siderúrgicas atuais, é menos eficiente no resfriamento, limitando a produtividade comparativamente a estas linhas.

As colunas da Tabela 3 apresentam, mês a mês, entre setembro e dezembro de 2022, respectivamente: o valor apontado pelo simulador utilizando-se dados reais; os dados reais; a diferença destes resultados em th e %; o resultado do simulador com a lógica de resfriamento dos materiais restritivos; e a diferença % entre as colunas 2 e 6.

O contexto projetado levaria a um ganho de produtividade médio no equipamento superior à 3%. Embora se trate de um cenário hipotético, ao projetar situações de produção que são de interesse da organização, amplia-se a capacidade de tomadas de decisão frente à projetos de melhoria da linha.

Tabela 3 – Comparação do desempenho esperado do simulador com e sem a de novos ciclos de resfriamento

| Mês | Sim (th) | Real (th) | Δ (th) | Δ (%) | Sim _{resf} (th) | $\Delta_{resf \times Sim}$ (%) |
|--------------|--------------|--------------|------------------|-----------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| set. | 61.96 | 61.08 | 0.88 | 1.40 | 63.41 | 2.34 |
| out. | 62.87 | 62.39 | 0.48 | 0.80 | 64.96 | 3.33 |
| nov. | 63.62 | 63.50 | 0.11 | 0.20 | 66.19 | 4.05 |
| dez. | 62.24 | 61.56 | 0.68 | 1.10 | 64.29 | 3.30 |
| Média | 62.67 | 62.13 | 0.54 | 0.90 | 64.71 | 3.26 |

Fonte: Elaborado pelos autores.

Por outro lado, é importante destacar que, para se obter este cenário na prática, seria necessário avaliar a viabilidade técnica, financeira e econômica desta iniciativa, o que incluiria investimentos em equipamentos e alterações operacionais, por exemplo, frente ao ganho produtivo médio estimado.

5 Considerações Finais

A dificuldade em se avaliar impactos na produtividade, utilização de recursos, ocorrências de esperas operacionais e sequenciamento da produção é um problema comum em usinas siderúrgicas integradas. Neste sentido esse trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um simulador para o processo de recozimento contínuo que permitisse visualizar os resultados de performance do processo produtivo em consequência de mudanças das condições de operação, sem a necessidade de realização de experimentos reais que implicariam em dispendimento de tempo do equipamento, mobilização de equipes e o surgimento de novos custos operacionais.

A metodologia proposta consistiu na modelagem e simulação do processo, via software Arena, utilizando-se dados de manuais de equipamentos e outros coletados no processo real de produção dos produtos associados com a linha. Para validação do simulador foram propostos 3 cenários produtivos, comparando-se os dados reais com os resultados da simulação (validação), outrora com variação da participação de materiais com restrições de produtividade, e, finalmente, outro com foco na análise de um cenário de investimento em melhorias no processo.

Como principais resultados verificou-se o modelo de simulação se aproxima bem do resultado obtido no contexto real, possuindo uma diferença média de produtividade de cerca de 1.7%, o que indica uma boa aderência do modelo. As respostas da simulação associadas ao cenário que se propôs a estudar mudanças do mix de produtos também se mostrou coerente na medida que o simulador apresentou uma variação bem próxima ao contexto real, de cerca de 7%.

Contudo, pode-se dizer que o desempenho do simulador é suficiente para o objetivo deste estudo e cumprem com as expectativas da empresa, na medida em que permite, por exemplo, a projeção de cenários diversos, tal como a análise da produção proposta no último cenário estudado. O ganho potencial médio de 3,26% na produtividade do equipamento com a melhoria no forno de resfriamento rápido, conforme mostrado no ambiente simulado, pode, eventualmente justificar o investimento mudanças reais no processo, a depender de uma avaliação econômico-financeira de tal investimento.

Como oportunidades e sugestões de trabalhos futuros pode-se citar a calibração e adequação do simulador para novas faixas de produtividade, produtos e processos, avaliação de cenários que se baseiam em mudanças/alterações no período e forma de levantamento do orçamento, bem como a criação/integração de outros simuladores associados aos demais processos integrados da fábrica.

Referências

- BAKKE, H. A.; LEITE, A. S. de M.; SILVA, L. B. da. Estatística multivariada: aplicação da análise fatorial na engenharia de produção. **Revista Gestão Industrial**, v. 4, n. 4, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.3895/S1808-04482008000400001>>. Acesso em: 16 dez. 2022.
- CARDOSO, L. E. Z.; JOAQUIM JÚNIOR, C. F. Simulação computacional: análise comparativa dos softwares Arena® e ProModel®. **Tekhne e Logos**, v. 7, n. 1, p. 14–30, 2016. Disponível em: <<http://revista.fatecbt.edu.br/index.php/tl/article/view/378>>. Acesso em: 16 dez. 2022.
- CARNEIRO, W. M.; PINTO, L. R. Comparação entre o desempenho dos modelos de teoria das filas e simulação computacional para estimar o atraso de linhas ferroviárias singelas. In: **Anais do Simpósio de Pesquisa Operacional e Logística da Marinha - SPOLM**. Rio de Janeiro, RJ: Centro de Análises de Sistemas Navais, 2010. p. 1–13. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/spolm/sites/www.marinha.mil.br/spolm/files/73768.pdf>>. Acesso em: 16 dez. 2022.
- CAUCHICK-MIGUEL, P. A.; FLEURY, A.; MELLO, C. H. P.; NAKANO, D. N. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018. 244 p. ISBN 9788535291346. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/books/9788595153561>>. Acesso em: 04 abr. 2022.
- CHWIF, L. **Redução de modelos de simulação de eventos discretos na sua concepção: uma abordagem causal**. 151 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 1999. Disponível em: <https://livrosimulacao.eng.br/download/tese_chwif.pdf>. Acesso em: 16 dez. 2022.
- COELHO, R. J. **Modelo de simulação operacional do manuseio de matérias-primas de uma usina siderúrgica integrada**. 169 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB, 2011. Disponível em: <<https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/tede/5196>>. Acesso em: 16 dez. 2022.
- CROSSETTI, P. d. A.; FERNANDES, P. D. Para onde vai a china? o impacto do crescimento chinês na siderurgia brasileira. **BNDDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 22, p. 151–204, 2005. Disponível em: <<http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2658>>. Acesso em: 16 dez. 2022.
- DA SILVA, E. P. **Estudo da influência dos parâmetros de recozimento em caixa nas propriedades mecânicas de aços para estampagem de limite de escoamento máximo de 230 MPa**. 64 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas - PPGEM, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2013. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1843/BUBD-9DKEGR>>. Acesso em: 16 dez. 2022.

DA SILVA, N. **Desenvolvimento de um modelo de simulação para melhoria do desempenho na descarga de vagões de ferro gusa**. 86 p. Monografia (Graduação em Engenharia de Produção) — Coordenadoria do Curso de Engenharia de Produção do Instituto Federal do Espírito Santo, Cariacica, 2022. Disponível em: <<https://repositorio.ifes.edu.br/handle/123456789/2260>>. Acesso em: 16 dez. 2022.

DE CARVALHO, L. S. **Análise das potencialidades e vantagens do uso da simulação computacional em operações logísticas complexas, como ferramenta de auxílio à tomada de decisões: estudo de caso em uma organização industrial**. 114 p. Dissertação (Mestrado Mestrado Profissional em Administração) — Escola de Administração da Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2006. Disponível em: <<https://repositorio.ufba.br/handle/ri/10227>>. Acesso em: 16 dez. 2022.

DE OLIVEIRA, F. C. **Análise da influência dos ciclos térmicos de diferentes projetos de fornos recozimento contínuo na microestrutura e propriedades mecânicas de aços bifásicos galvanizados**. 105 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas - PPGEM, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2019. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1843/BUOS-96TF8W>>. Acesso em: 16 dez. 2022.

DE SOUZA JÚNIOR, V. **Simulação computacional do comportamento de estruturas de aço sob incêndio**. 147 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2004. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/6303>>. Acesso em: 16 dez. 2022.

DIAS, S. I. B. **Determinação da capacidade real de equipamentos recorrendo a dados históricos de produção: um caso de estudo na indústria da pasta e do papel**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial) — Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2020. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10316/92586>>. Acesso em: 16 dez. 2022.

DOS SANTOS, I. L.; DE CARVALHO, A. R. N. Um passo em direção às nuvens: viabilização da tecnologia de simulação computacional para programação da produção em pequenas e médias empresas. In: **Anais do XV PROFUNDÃO - Encontro de Engenharia de Produção da UFRJ**. Rio de Janeiro, RJ: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <<http://trilhaprojetos.com.br/home/sites/default/files/Tecnologia%20de%20simulacao%20computacional.pdf>>. Acesso em: 16 dez. 2022.

DOS SANTOS, T. G. **Utilização da simulação computacional para análise do impacto causado pela alteração no processo produtivo de uma aciaria**. 63 p. Monografia (Graduação em Engenharia de Produção) — Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas, Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, MG, 2018. Disponível em: <<http://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/1140>>. Acesso em: 16 dez. 2022.

FARIA, C. B. M. **Influência das temperaturas de recozimento contínuo na microestrutura e nas propriedades mecânicas de aço TRIP laminado a frio**. 39 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) — Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas - Mestrado Profissional, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2019. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1843/32995>>. Acesso em: 16 dez. 2022.

FERNANDES, R. C. O. **Efeito da temperatura de encharque no recozimento contínuo e da deformação na laminação de encruamento sobre as propriedades mecânicas de um aço microligado laminado a frio**. 93 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas - PPGEM, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2007. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1843/MAPO-7QPRNK>>. Acesso em: 16 dez. 2022.

FRANCO, G. N.; MOREIRA, F. d. S.; NASCIMENTO, D. M. d.; NATAL, Y. D. d.; LOUREDO, R. C.; FERREIRA, D. I. Simulação em computador do pátio de matérias-primas na usina presidente vargas. In: **48º Seminário de Redução de Minérios e Matérias-primas**. São Paulo: ABM, 2018. p. 258–269. ISSN 2594-357X. Disponível em: <<https://abmproceedings.com.br/ptbr/article/simulao-em-computador-do-ptio-de-matrias-primas-na-usina-presidente-vargas>>. Acesso em: 07 dez. 2022.

HAUSER, A. J. **Simulação computacional de incêndio em tanque contendo óleo combustível: avaliação em tanques isolados conforme NBR 17505-7**. 65 p. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) — Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2016. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/148762>>. Acesso em: 16 dez. 2022.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Estatística mensal – Nota Nº 087 (junho/2022)**. [S.l.], 2022. Disponível em: <https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2022/07/EM_Julho_2022_957871593.pdf>. Acesso em: 17 ago. 2022.

MARINS, Â. M. F. **Modelagem física e computacional do fluxo de aço em panela com agitação por gás inerte, com ênfase na separação de inclusões**. 111 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2011. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufop.br/jspui/handle/123456789/2536>>. Acesso em: 16 dez. 2022.

MEHL, E. L. d. M. **Simulação de circuitos eletrônicos em computadores**. 1990. 18 p. Apostila do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná. Disponível em: <<http://www.eletrica.ufpr.br/mehl/te236/apostilaPSpice.pdf>>. Acesso em: 07 dez. 2022.

MIYAGI, P. E. **Introdução a simulação discreta**. São Paulo, 2006. Disponível em: <<https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4122712/course/section/1030600/PMR3305-ApostilaSimulacao.pdf>>. Acesso em: 26 out. 2022.

MULLER, A. **Simulação estocástica: O método de Monte Carlo**. 75 p. Monografia (Graduação em Estatística) — Universidade Federal do Paraná, 2008. Disponível em: <http://www.leg.ufpr.br/lib/exe/fetch.php/disciplinas:ce229:tcc2008_ademir.pdf>. Acesso em: 28 fev. 2023.

NAVARRO HOYOS, J. S. **Simulação computacional de Processo de Pirólise Rápida, utilizando o Software Unisim, para estudos de variação na temperatura e na composição da reação química de diversos tipos de biomassa**. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Energia) — Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2019. Disponível em: <<http://dspace.unila.edu.br/123456789/5149>>. Acesso em: 07 dez. 2022.

OLIVEIRA, R. B. M. d.; CORRÊA, V. A.; NUNES, L. E. N. d. P. Mapeamento do fluxo de valor em um modelo de simulação computacional. **Revista Produção Online**, v. 14, n. 3, p. 837—861, Ago. 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.14488/1676-1901.v14i3.1461>>. Acesso em: 16 dez. 2022.

PARACAMPOS, M. P. S. **Métodos para modelagem de sistemas contínuos presentes em uma planta de processamento de minério usando software Arena Simulation**. 32 p. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) — Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2018. Disponível em: <<https://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/1607>>. Acesso em: 21 set. 2022.

PINHO, A. F.; MORAIS, N. S. Utilização da simulação computacional combinada à técnica de otimização em um processo produtivo. **Revista P&D em Engenharia de Produção**, v. 8, n. 2, p. 88–101, 2010. Disponível em: <https://web.archive.org/web/20180421131445id_/http://www.revista-ped.unifei.edu.br/documentos/V08N02/v8n2_artigo_06.pdf>. Acesso em: 17 ago. 2022.

PINTO, E. B.; PINTO, L. R. O uso da simulação como ferramenta de apoio à tomada de decisões em uma indústria siderúrgica: estudo de caso. In: **Anais do XXXVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**. Gramado, RS: Departamento de Informática da Universidade Estadual de Maringá, 2005. p. 2231–2238. Disponível em: <<http://www.din.uem.br/sbpo/sbpo2005/pdf/arq0011.pdf>>. Acesso em: 16 dez. 2022.

PRATES, D. M. A alta recente dos preços das commodities. **Brazilian Journal of Political Economy**, SciELO Brasil, v. 27, p. 323–344, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0101-31572007000300001>>. Acesso em: 16 dez. 2022.

RABELO, J. J. L. **Estudo comparativo entre aço recozido em caixa e aço recozido no contínuo com alteração do laminador de encruamento**. 56 p. Monografia (Graduação em Engenharia Metalúrgica) — Universidade Federal do Ceará, 2016. Disponível em: <<https://www.repositoriobib.ufc.br/000039/0000395f.pdf>>. Acesso em: 07 mar. 2023.

SANTOS, T. S.; PORTUGAL, L. da S.; RIBEIRO, P. C. M. Procedimento metodológico de análise de desempenho de praças de pedagio. In: **Anais do 9º CRP–Congresso Rodoviário Português**. LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal: [s.n.], 2019. p. 1–10. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Tulio-Silveira-Santos/publication/342702986_Procedimento_metodologico_de_analise_de_desempenho_de_pracas_de_pedagio/links/5f023a4a45851550508da14a/Procedimento-metodologico-de-analise-de-desempenho-de-pracas-de-pedagio.pdf>. Acesso em: 16 dez. 2022.

SARGENT, R. G. Verification and validation of simulation models. In: **Proceedings of the 2010 winter simulation conference**. Baltimore, MD, USA: IEEE, 2010. p. 166–183. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/WSC.2010.5679166>>. Acesso em: 16 dez. 2022.

SOARES, G.; JÚNIOR, A. d. C. G.; SAMPAIO, I. O uso da simulação computacional para a determinação da melhor velocidade de lingotamento em uma aciaria. In: **Anais do XLVIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**. Vitória, ES: Departamento de Informática da Universidade Estadual de Maringá, 2016. p. 2994–3005. Disponível em: <<http://www.din.uem.br/sbpo/sbpo2016/pdf/155996.pdf>>. Acesso em: 16 dez. 2022.

TEIXEIRA, R. L. P.; TEIXEIRA, C. H. S. B.; LACERDA, J. C. d. Case study: description of the total quality system in a cold steel rolling unit. **Research, Society and Development**, v. 8, n. 1, p. e1781570, Jan. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.33448/rsd-v8i1.570>>. Acesso em: 16 dez. 2022.

TURRIONI, J. B.; MELLO, C. H. P. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção: Estratégias, métodos e técnicas para condução de pesquisas quantitativas e qualitativas**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG: Unifei, 2012. 191 p. Disponível em: <http://www.marco.eng.br/adm-organizacao-I/Apostila_Metodologia_Completa_2012_%20UNIFEI.pdf>. Acesso em: 04 abr. 2022.

VIEIRA, G. E. Uma revisão sobre a aplicação de simulação computacional em processos industriais. In: **Anais do XIII Simpósio de Engenharia de Produção**. Bauru, SP: Unesp, 2006. p. 1–10. Disponível em: <https://simpep.feb.unesp.br/anais/anais_13/artigos/676.pdf>. Acesso em: 16 dez. 2022.