

## **Validação de tecnologias da indústria 4.0 na operação logística em uma siderúrgica mediante o uso de simulação computacional**

### **Validation of industry 4.0 technologies in logistics operations at a steel plant through computational simulation**

(Cecília Toledo Hernandez - UFF - [ctoledo@id.uff.br](mailto:ctoledo@id.uff.br))

(Paulo Vitor Bianchini Silva - UFF - [pv.bianchini@gmail.com](mailto:pv.bianchini@gmail.com))

(Eliane da Silva Christo - UFF - [elianechristo@id.uff.br](mailto:elianechristo@id.uff.br))

(Kelly Alonso Costa - UFF - [kellyalonso@id.uff.br](mailto:kellyalonso@id.uff.br))

(Marília Rios de Paula - IFRJ - [marilia.paula@ifrj.edu.br](mailto:marilia.paula@ifrj.edu.br))

#### **Resumo**

A produção do aço gera resíduos sendo um deles a escória de alto forno, que tem sua principal aplicação na fabricação de cimentos. A movimentação da escória de alto forno ocorre por meio de uma logística rodoviária complexa, a partir de caminhões ou carretas basculantes. A indústria 4.0 viabilizou diversas soluções para os mais diversos segmentos, entre eles a logística, que permitem obter ganhos operacionais e econômicos. É objetivo deste artigo mostrar os ganhos obtidos mediante a avaliação de soluções da indústria 4.0 na operação e transporte da escória de altos fornos em uma planta siderúrgica. Foi utilizada a simulação computacional para estabelecer cenários e testar diferentes modelos. A coleta de dados foi realizada mediante questionários, observações e análises de documentos. Foram testados 4 cenários diferentes que se alternam entre a produção atual e uma produção máxima, com o uso ou não das ferramentas da solução da indústria 4.0 a fim de obter o melhor dimensionamento de recursos. Como resultados foram identificadas 3 soluções de tecnologias da indústria 4.0 e uma delas testada com duas de suas ferramentas em 4 cenários diferentes. Esses cenários foram simulados mostrando ganhos econômicos de 15 a 30% quando adotadas as soluções da indústria 4.0. Os ganhos também podem ser vistos na maior disponibilidade dos recursos e menor tempo de ciclo para as operações. O modelo de simulação computacional desenvolvido e validado pode ser replicado em outras situações e pode ser adaptado em outros casos da logística respeitando as mudanças pertinentes e suas premissas.

**Palavras - Chave:** Logística; Indústria 4.0; Simulação.

#### **Abstract**

The steel production generates residues, one of which is blast furnace slag, primarily used in cement manufacturing. The movement of blast furnace slag involves a complex road logistics system, using trucks or dump trailers. Industry 4.0 has enabled various solutions across different sectors, including logistics, allowing for operational and economic gains. This article aims to showcase the benefits achieved through evaluating Industry 4.0 solutions in the operation and transportation of blast furnace slag within a steel plant. Computational simulation was employed to establish scenarios and test different models. Data collection was conducted through questionnaires, observations, and document analyses. Four different scenarios were tested, alternating between current production and maximum production, with or without the use of Industry 4.0 solution tools, to optimize resource allocation. As a result, three Industry 4.0 technology solutions were identified, one of which was tested with two of its tools across four different scenarios. These simulated scenarios demonstrated economic gains ranging from 15 to 30% when adopting Industry 4.0 solutions. These gains also manifest in increased resource availability and reduced cycle time for operations. The developed and validated computational simulation model can be replicated in other situations and adapted for other logistics cases, considering relevant changes and their underlying assumptions.

**Keywords:** Logistics; Industry 4.0; Simulation.



## 1. Introdução

A globalização impôs uma grande competitividade que obriga as empresas a focarem nas áreas estratégicas de produção. Devido isso, a necessidade não é só de manter a atual participação de mercado, mas também aumentá-la. Essa pressão faz com que as empresas procurem maneiras de se manterem competitivas (Soares, 2022).

Tudo isso faz com que as empresas sejam obrigadas a retirar o máximo rendimento possível de todos os seus recursos, bem como investir em novos equipamentos e tecnologias para seus processos, impulsionando diretamente o desempenho e a competitividade. A logística é uma das áreas afetadas por essa busca constante do melhor desempenho. O *Council of Supply Chain Management Professionals* – C.S.C.M.P. (2013) sugere que a logística é um processo que inclui todas as atividades importantes para a disponibilização de bens e serviços aos consumidores quando e onde eles quiserem adquiri-los. Entende-se por consumidores não só as pessoas físicas, mas também áreas da indústria e/ou comércio que necessitam e demandam os serviços logísticos.

A indústria do aço não é uma exceção, a nova rotina do mercado demanda cada dia mais produtos específicos e de maior valor agregado, o que muitas vezes leva o atual layout de produção ao colapso. A mudança de processos e fluxos logísticos em uma indústria desse porte causam impactos em diversas áreas, sendo a logística uma das mais impactadas. Buscando minimizar esses impactos, uma boa aposta é a aplicação de soluções pautadas no conceito da logística 4.0, oriundo da indústria 4.0, que diz respeito a quarta revolução industrial focada na transformação na forma como as organizações compram, fabricam, vendem e entregam produtos (Correa et al., 2020; Kagermann et al., 2013).

Essa revolução tem papel importante na transformação do atual modelo de negócios, incorporando tecnologia e digitalização aos processos, mesclando processos físicos com virtuais, adicionando assim maior velocidade e melhores ferramentas de gestão para os negócios. Kolberg e Zühlke (2015) dizem que é necessário que haja uma ruptura nos modelos tradicionais para que seja possível essa mescla de processos físicos com virtuais e consequentemente a virada de chave para a indústria 4.0. Aliando a necessidade de mudanças impostas pela globalização e o acirramento da competitividade, se faz necessário avaliar os impactos gerados, bem como avaliar melhores alternativas dado a aplicação de soluções oriundas desse novo conceito da quarta revolução industrial.

Há diversas formas de analisar os impactos que uma nova planta, bem como novos processos de produção e logísticos trazem, Gunal e Karatas (2019) enfatizam que a simulação é uma das formas mais efetivas e utilizadas desde a década de 50 e que continua se aprimorando na indústria 4.0.

As usinas siderúrgicas integradas, que operam todas as fases de produção do aço (redução, refino e laminação) em uma mesma planta, possuem uma complexa malha logística devido aos numerosos equipamentos e linhas de produção, que por sua vez necessitam de diversos recursos logísticos para o pleno atendimento do programa de produção e manutenção. Essa malha logística basicamente se divide em dois grandes modais de transporte, o ferroviário e o rodoviário, que por sua vez são compostos por diversos tipos de vagões e equipamentos diferentes, respectivamente. Dado aos numerosos recursos circulando na planta todos os dias e pelo custo elevado de operação e manutenção desses, as siderúrgicas estão buscando cada vez



mais otimizar os processos logísticos, a fim de aplicar melhor o recurso na atividade fim e em reduzir a quantidade de ativos.

Tendo isso em mente, como é possível analisar as melhores configurações de quantidade de equipamentos necessários para a retirada e transporte de escória dos altos fornos, seja para uma fábrica de cimentos ou para áreas específicas dentro da planta? Quais ferramentas podem ser utilizadas para melhoria desses fluxos? É possível o uso de soluções oriundas da indústria 4.0 para auxiliar na melhor configuração e consequente melhoria desses fluxos?

Neste sentido, é objetivo deste artigo avaliar soluções da indústria 4.0 que permitam a obtenção de melhorias na operação e transporte da escória de altos fornos em uma planta siderúrgica. Na realização do estudo foi utilizado software específico de simulação computacional para analisar os diversos cenários da operação logística, bem como para testar cenários de melhoria a serem estudados e propostos.

Este trabalho se estrutura em cinco seções, a seção 1 diz respeito a uma introdução, a seção 2 traz uma fundamentação teórica sobre logística, simulação e indústria 4.0, a seção 3 aborda as questões metodológicas da pesquisa, a seção 4 mostra os resultados obtidos e a seção 5 apresenta as considerações finais e por último aparecem as referências bibliográficas.

## 2. Referencial Teórico

Como parte da fundamentação teórica foram analisados diferentes aspectos sobre logística, simulação e indústria 4.0, destacando conceitos e aplicações que envolvem a integração destes três elementos.

### 2.1. Logística

Nos dias de hoje fala-se muito que o sucesso de uma organização está atrelado a sua eficiência na logística. Ballou (2009) explica que a logística é a essência do comércio, pois ela possui uma contribuição considerável para melhorar o padrão econômico de vida em geral.

Durante séculos a logística ficou atrelada a atividade militar. Porém, na segunda guerra mundial, com o avanço da tecnologia, a logística passou a abranger outros ramos da administração militar e os civis passaram a ter contato com esses conhecimentos e experiências. Atualmente, a logística é definida segundo o C.S.C.M.P. (2013) como um processo para planejar e controlar processos para um transporte eficiente de mercadorias e informações desde o ponto de origem até o ponto de consumo, esse ponto de consumo pode ser tanto consumidores intermediários da cadeia como o cliente final.

Trata-se de uma excelente definição, pois sugere que a logística é um processo que inclui todas as atividades importantes para a disponibilização de bens e serviços aos consumidores quando e onde eles quiserem adquiri-los. Quando se reflete sobre o futuro da logística, Ballou (2009) chega à conclusão de que a logística passou de atividades e fluxos geridos individualmente para um gerenciamento da cadeia de suprimentos, que abrange todos os processos logísticos a fim de atender a demanda dos clientes e que encontrará um desafio muito grande no futuro, visto a necessidade da gestão do custo dessas atividades derivado dos níveis de serviços praticados.

Wang (2016) fala sobre as 3 primeiras fases da logística e as evoluções que ocorreram nas mesmas, tendo como ênfase a transição da logística 3.0 (introdução dos microcomputadores, tecnologias de comunicação e a sistematização do gerenciamento



logístico) para a logística 4.0, que é o principal elo para que a indústria 4.0 entregue todo o potencial que possui. Drees (2016) reforça que um dos pré-requisitos para a indústria 4.0 é a logística 4.0.

A logística 4.0 é uma evolução tecnológica da logística tradicional que deriva do próprio conceito da indústria 4.0. Motta e Lusvargui (2018) comentam que os conceitos apresentados na logística 4.0 podem ajudar na redução do lead time, economias no custo de combustível, gerenciamento de estoques e apresentação de informações em tempo real dentro da cadeia de suprimentos.

## 2.2. Indústria 4.0

No decorrer dos anos, a sociedade e o modelo industrial sofreram diversas transformações para se adaptarem a demanda por quantidade, qualidade e velocidade de produtos e serviços. Lima e Neto (2017) dizem que as diversas revoluções industriais que aconteceram tiveram papel fundamental e transformador para empresas, governos e sociedades.

A primeira revolução industrial teve início no século XVIII e foi marcada pela transição do trabalho manual para o trabalho realizado por máquinas, a vapor no caso (Sacomano, 2018). No final do século XIX e início do século XX, após o avanço da descoberta e desenvolvimento de novas fontes de energia houve a segunda revolução industrial que de acordo com (Santos, 2018) se deu a partir da introdução da eletricidade e do petróleo nos processos produtivos, além da criação das linhas de produção que possibilitaram a produção em massa e a divisão do trabalho. A terceira revolução industrial que teve início após a segunda guerra mundial é caracterizada por Dantas (2003) como a era da informação e por Sacomano (2018) como a era em que houve um amplo uso da tecnologia da informação e da eletrônica para melhorar os processos produtivos por meio da automação, sistemas de gestão e pelo advento de sistemas de produção com menos desperdícios e mais enxutos. A criação da internet possibilitou avanços no que diz respeito a integração remota de processos e setores.

Barreto et al. (2017) e Kagermann et al. (2013) discorrem que o principal valor da indústria 4.0 está na otimização de forma inteligente dos recursos e processos das organizações, ou seja, a quarta revolução industrial tem como marcas a maior flexibilidade, qualidade e robustez das áreas de manufatura, logística, engenharia, planejamento e operações, além de permitir a obtenção de respostas em tempo real para tomada de decisões e a criação de produtos e serviços de alto valor agregado para o cliente.

Costa (2019) enfatiza que a proposta da indústria 4.0 para que aconteça a transformação do modelo industrial atual propõe a informatização e interconexão de processos, produtos e serviços que possibilitará o fornecimento de produtos customizados em massa, a flexibilização da cadeia produtiva, a redução de prazos de entrega, bem como maior produtividade e redução de custos.

A informatização e interconexão de processos é fundamental no conceito de indústria 4.0. Neste sentido as plataformas digitais estão se expandindo de forma global e levando ao surgimento de novos modelos de negócios (Nambisan et al., 2019). Estudo realizado por Andrade e Gonçalo (2022) corroborou esta informação destacando a importância de criar políticas norteadoras para que as plataformas se relacionem com as políticas estratégicas da inovação. As organizações já compreenderam a importância da manufatura digital na indústria



4.0 e o desafio é a transformação digital e plataformas digitais permitem agrupar as informações internas e externas da organização para ajudar na tomada de decisão.

Embora o conceito de indústria 4.0 seja relativamente novo, já aparecem estudos de aplicações em diferentes setores e processos. Tessarini e Saltorato (2018) analisam os impactos da indústria 4.0 na organização do trabalho. Yamanda e Martins (2019) fazem uma análise da indústria brasileira perante o mundo em relação à aplicação das tecnologias e conceitos da indústria 4.0. Ferreira e De Paula (2021) fazem um estudo sobre os primeiros impactos da indústria 4.0 sobre um setor específico, o Setor de Papel e Celulose, demonstrando a importância do uso deste conceito e as tecnologias associadas a ele.

Ainda existem vários paradigmas na indústria 4.0 já que com o avanço da transformação industrial, as máquinas, equipamentos e processos se tornam cada vez mais autônomos e independentes dos seres humanos no que diz respeito a tomada de decisões, coordenação de processos e resolução de problemas (Golovianko, 2023; Oztemel & Gursev, 2020). Esse paradigma traz uma fragilidade no que diz respeito aos valores humanos, que são deixados de lado para que a tecnologia passe a ser o centro dos processos de manufatura e produção. No decorrer dos anos após o surgimento da indústria 4.0, várias discussões e estudos foram realizados, os quais deram origem ao conceito da indústria 5.0. Este novo conceito, conforme com Golovianko (2023) busca colocar o ser humano de volta no centro dos processos de manufatura e produção, aliados a toda a evolução tecnológica da indústria 4.0. Para Nahavandi (2019) e Saw et al. (2021) a indústria 5.0 tornará a indústria mais sustentável, resiliente e preocupada com o bem-estar da sociedade.

### 2.3. Simulação computacional

A simulação é uma das técnicas da Pesquisa Operacional que utiliza de um modelo para descrever um processo ou sistema que usualmente possui parâmetros que permitem que o modelo seja configurável de forma a representar diferentes tipos de configurações. Para Goldsman (2007), a simulação é utilizada para analisar sistemas que são complexos para serem atacados por métodos analíticos, como cálculo, probabilidade, estatística ou teoria das filas.

Abreu et al. (2018) avaliam a importância da aplicação da simulação no contexto da quarta revolução industrial ou indústria 4.0, destacando que a simulação será o caminho para o processo de manufatura industrial incluindo nesses destaques seu uso na logística.

Há vários caminhos para a aplicação da simulação, podendo ser mediante a programação de um simulador nas mais diversas linguagens de programação de computadores existentes, ou por meio de softwares de simulação de mercado, sendo os mais conhecidos: Arena® e Promodel®.

Noronha (2020) evidenciou o uso dos softwares Arena® e Promodel®, mostrando, mediante critérios, a facilidade de uso e implementação da simulação entre os dois. Rocha et al. (2013) mostrou que a simulação foi uma ferramenta imprescindível para a identificação de gargalos na logística ferroviária de uma planta siderúrgica, bem como para identificar e validar os investimentos necessários para que a demanda fosse atendida. Com o uso da simulação, Franco (2016) desenvolveu um modelo para uma planta siderúrgica, no qual o objetivo foi identificar e propor soluções para melhorar a logística interna da planta a fim de diminuir o tempo de permanência de veículos em sua unidade, evitando assim multas e aumento de desembolso com estadias. Costa (2019) mostrou em seu trabalho, mediante o uso da simulação,



que soluções da indústria 4.0 são mais efetivas do que trabalhos manuais nos processos logísticos estudados na indústria cimenteira.

### 3. Método de pesquisa

Para classificar uma pesquisa é usual utilizar critérios definidos, em relação da natureza, os objetivos, como se aborda o problema e os procedimentos técnicos que serão usados (Yin, 2015).

O Quadro 1 resume a classificação da presente pesquisa a partir do entendimento das definições propostas por vários autores.

**Quadro 1. Classificação da pesquisa**

Critérios	Classificação	Definições
Natureza	<b>Aplicada:</b> Vai verificar o impacto da aplicação de tecnologias da indústria 4.0 em um novo dimensionamento de frota de caminhões para transporte de escória em operações logísticas com foco na retirada de escória dos altos fornos e envio para a fábrica de cimentos.	Pesquisa que gera conhecimento para a aplicação prática e está voltada para a solução de problemas específicos (Gil, 2022)
Objetivos	<b>Exploratória:</b> Inicialmente procurou-se na literatura os principais conceitos a serem estudados para um melhor entendimento do problema. A busca teve como foco inter-relacionar conceitos de logística, indústria 4.0 e simulação computacional. Embora o conceito de indústria 4.0 seja relativamente novo e em desenvolvimento no Brasil e no mundo, foi detectado que já se fala de indústria 5.0 que busca colocar o fator humano no centro do processo produtivo para poder utilizar os avanços tecnológicos de forma correta. De qualquer forma, para o objetivo do trabalho o foco esteve nas soluções tecnológicas da indústria 4.0. Posteriormente, mediante a coleta de dados qualitativos e quantitativos, se propõe compreender um problema (neste caso quais soluções da indústria 4.0 são as mais utilizadas na logística integrada) para finalmente se aprofundar em estudos mais específicos e avaliar ganhos que podem trazer estas soluções em um caso específico.	Esse tipo de pesquisa é utilizado quando há necessidade de familiarização com o problema, tendo como objetivo torná-lo mais explícito e de fácil compreensão (Gil, 2022) Permite conseguir novas compreensões do problema, de modo a permitir formular hipóteses ou esclarecer conceitos sobre o tema a partir de novas perspectivas (Andrade, 2017)
Abordagem	<b>Métodos mistos:</b> Usa dados qualitativos coletados numa primeira fase, para definir as principais soluções da indústria 4.0 com respeito as plataformas digitais usadas na logística integrada. Para a estratégia quantitativa, dados numéricos são levantados a partir de documentos e observações. Estes dados são usados para simular o sistema em diferentes cenários que incluem ou não as soluções tecnológicas da indústria 4.0 levantadas inicialmente	A pesquisa mista combina dados gerados pelas pesquisas qualitativa e quantitativa, uma destas formas prevalece ou se complementa para gerar os resultados (Creswell & Creswell, 2021).



Critérios	Classificação	Definições
Procedimentos técnicos	<b>Modelagem:</b> A modelagem matemática neste caso de estudo se deu por meio do uso da simulação computacional de eventos discretos. Esta simulação permite analisar os ganhos derivados do uso das tecnologias ou soluções da indústria 4.0 na realidade estudada.	Muitos autores têm abordado a importância da modelagem como um procedimento técnico de pesquisa. A modelagem serve como uma ferramenta essencial para explorar, entender e prever o comportamento de sistemas e fenômenos complexos.

Fonte: Autores (2023).

Como foi mencionado anteriormente, a modelagem matemática nesta aplicação foi a partir do uso da simulação computacional. Freitas Filho (2008) estabelece o ciclo de vida de um modelo de simulação que consiste em 4 fases ou etapas: planejamento; modelagem, experimentação e tomada de decisão. Para este caso, dado que se trata de um trabalho mais amplo, a primeira fase de planejamento foi considerada inicialmente quando se decidiu pelo tema e objetivos do estudo, portanto as etapas para a condução da simulação, descritas na Figura 1, contemplam somente as atividades incluídas nas 3 últimas etapas.

**Figura 1.** Fluxograma das etapas do estudo



Fonte: Autores (2023).

Para o melhor entendimento do processo, foi realizado um acompanhamento das atividades existentes *in loco* para que houvesse um entendimento correto da operação a ser estudada. A partir do entendimento, foram identificados quais dados da atual operação seriam coletados para o correto desenvolvimento do estudo de caso. A coleta de dados operacionais foi realizada mediante aos controles de viagens existentes e da extração de dados de um sistema de rastreamento dos equipamentos. Grande parte desses dados se encontram em formulários de papel e/ou em planilhas eletrônicas.

Além dos dados do processo, foi necessário procurar aqueles dados referentes a solução da indústria 4.0 a ser aplicada no estudo de caso. Neste sentido foi realizada uma pesquisa de mercado com outras siderúrgicas, empresas e *startups*. O público-alvo dessa pesquisa de



mercado foram outras indústrias siderúrgicas e alguns operadores logísticos, que prestam serviço de logística interna para as indústrias. Ao todo foram abordadas 10 empresas, porém somente 6 responderam. Das 6 empresas que responderam ao questionário, duas soluções se destacam no que diz respeito a gestão de operações de logística interna de plantas industriais.

Todos os dados foram analisados e tratados para serem incorporados no modelo conceitual e computacional. A validação do modelo foi realizada em conjunto com um especialista (engenheiro formado, com mais de 20 anos de experiência em logística de plantas industriais) da área de transportes interno da siderúrgica.

Após a validação do modelo conceitual foi construído o modelo computacional e utilizada a versão do *software* Arena® 16.20.00000 no modo Treinamento/Avaliação (Estudante), ou seja, uma versão gratuita que permite funcionalidade limitada ao tamanho do modelo.

A validação do modelo computacional para o cenário atual, foi realizada novamente em conjunto com o especialista da área de transportes interno da siderúrgica mencionado anteriormente, e os resultados obtidos com o modelo foram comparados com a operação atual.

Após esta etapa foram realizados testes de cenários que contemplaram a aplicação de uma solução da indústria 4.0 na operação de transporte de escória de altos fornos em estudo. A solução diz respeito a uma plataforma capaz de centralizar todo o processo logístico a partir dos módulos de solicitação, programação e despacho de recursos, rastreamento e telemetria com geoprocessamento, gestão de atividades via *tablets* e medição dos serviços de forma digital e automática.

Por último a análise de resultados realizou-se comparando os diferentes cenários incluindo ou não a solução da indústria 4.0 definida e em função dos ganhos econômicos e operacionais obtidos.

## 4. Resultados

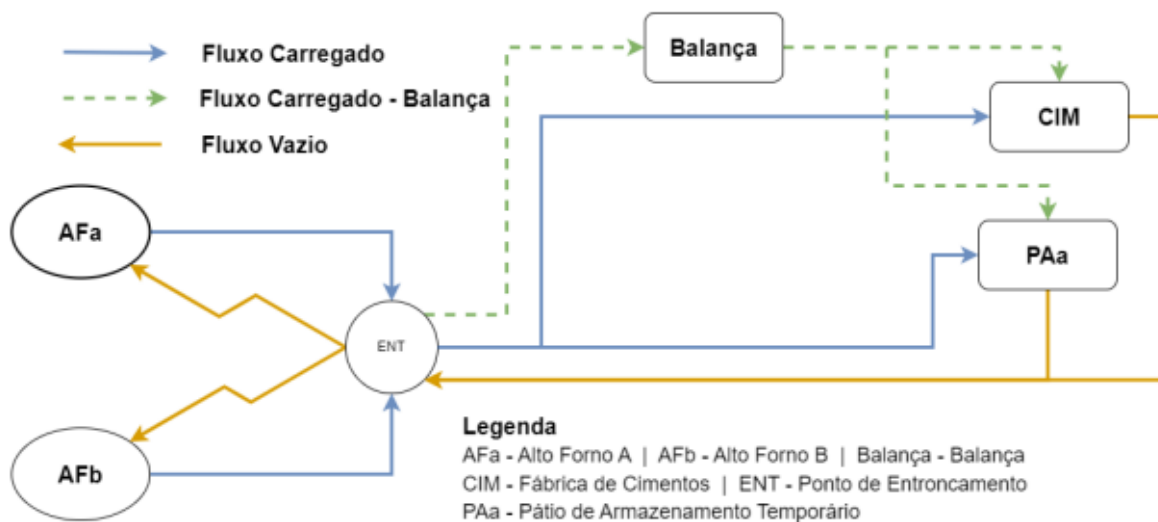
### 4.1. Características do processo

A operação em estudo diz respeito a retirada e o transporte de toda a escória gerada em dois altos fornos de uma siderúrgica do estado do Rio de Janeiro para uma fábrica de cimentos e área de armazenamento temporário que ficam localizados na mesma área industrial. Esse transporte é realizado a partir do modal rodoviário e normalmente é utilizado caminhões e carretas basculantes, o fluxo do funcionamento é mostrado na Figura 2.





**Figura 2.** Representação dos locais de interação do transporte de escória.



Fonte: Autores (2023).

A gestão do dia a dia da operação de transporte de escória dos altos fornos é realizada de forma manual e são usados diferentes documentos: formulário de controle de viagens preenchidos pelos motoristas dos caminhões no momento do carregamento, descarregamento e retorno para o local de espera para o carregamento; *tickets* de viagem e pesagem que são entregues a liderança de equipe ao final de cada turno de trabalho; informações enviadas à liderança pela balança para consolidação das informações de aferição de peso dos caminhões e planilhas eletrônicas que são consolidadas por equipe administrativa a fim de agrupar e organizar todas as informações mencionadas anteriormente, que irão compor os indicadores do transporte de escória.

#### 4.2. Uso de soluções da indústria 4.0 na logística

Na pesquisa de mercado realizada foram encontrados três tipos de soluções da indústria 4.0 para a logística de plantas industriais referentes ao uso de tecnologias de informação integradas, aqui chamadas de Solução A, B e C:

- Solução A: Composta de dois módulos, um de rastreamento e telemetria com geoprocessamento, controle de combustível e painéis interativos de dados e a outra de gestão de solicitações e programações, despacho e gestão de atividades mediante apontamentos em tablets;

- Solução B: Solução capaz de centralizar todo o processo logístico em uma única plataforma. Possui módulos de solicitação, programação e despacho de recursos, rastreamento e telemetria com geoprocessamento, gestão de atividades via tablets e medição dos serviços de forma digital e automática. Utiliza todos os módulos da solução e vislumbra uma rápida adaptação do time, bem como o retorno rápido do investimento mediante melhor gestão dos serviços logísticos e consequentemente, melhor gestão dos contratos;



- Solução C: Similar à Solução B, capaz de centralizar todo o processo logístico em uma única plataforma. Possui módulos de solicitação, programação e despacho de recursos, rastreamento e telemetria com geoprocessamento, gestão de atividades via tablets e medição dos serviços de forma digital e automática. Esta solução foi criada em parceria com uma empresa de mercado e embora tem as mesmas características da Solução B, não opera igual. Fornece a solução no pacote dos serviços prestados aos seus clientes e coloca todos os módulos a disposição. Os módulos mais utilizados são os de medição dos serviços de forma digital e automática e os de rastreamento e telemetria com geoprocessamento.

Das 10 empresas pesquisadas, somente 6 responderam ao questionário, duas soluções se destacam no que diz respeito a gestão de operações de logística interna de plantas industriais, Solução A e Solução B, ambas com ferramentas/módulos similares.

Para esse estudo de caso, a solução escolhida foi a B, que diz respeito a uma plataforma capaz de centralizar todo o processo logístico, pelo motivo de ser a solução em maior uso pelas empresas entrevistadas.

As funcionalidades escolhidas para os testes de cenários dizem respeito a:

1. Ferramenta de *checklist* digital, que é capaz de substituir a necessidade dos formulários de papel para esse fim, tendo como consequência o aumento do tempo de disponibilidade dos recursos devido a digitalização da atividade;
2. Ferramenta de ciclos operacionais, que é capaz de gerenciar atividades cíclicas a partir de dados de rastreamento, telemetria e georreferenciamento, evitando assim o uso de controles diários (boletins diários de veículo) em papel, tendo como consequência o aumento do tempo de disponibilidade dos recursos e a diminuição do tempo das atividades devido a automatização do controle.

#### 4.3. Resultados da simulação computacional

Para realizar a simulação foi necessário transformar os fluxos de transporte, locais de origem e destino (Figura 2) em dados numéricos que podem ser observados na Tabela 1.

**Tabela 1.** Distância e tempos dos fluxos de transporte

Fluxo	Origem	Destino	Distância (Km)	Velocidade (Km/h)	Tempo (h)
AFa x Entroncamento	Alto Forno A	Entroncamento	0,95	30,00	0,0317
AFb x Entroncamento	Alto Forno B	Entroncamento	0,60	30,00	0,0200
Entroncamento x CIM	Entroncamento	F. Cimentos	1,15	30,00	0,0383
Entroncamento x Balança	Entroncamento	Balança	2,25	30,00	0,0750
Entroncamento x PAa	Entroncamento	P. Armazém A.	0,85	30,00	0,0283
Balança x CIM	Balança	F. Cimentos	0,65	30,00	0,0216
Balança x PAa	Balança	P. Armazém A.	2,30	30,00	0,0766

Fonte: Dados da pesquisa (2023).

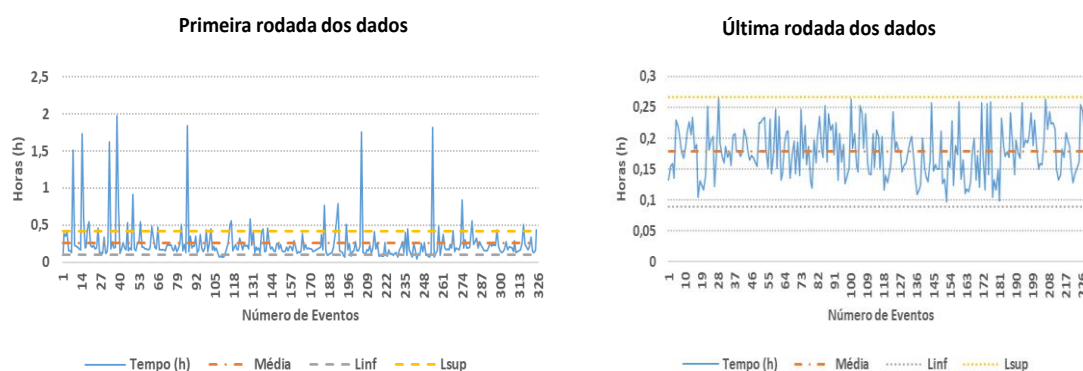
Os outros dados quantitativos (volumes de geração de escória, volumes de consumo de escória de alto forno na fábrica de cimentos, capacidade dos pátios de recebimento e

armazenamento, tempos de processo, quantidade de viagens dos caminhões entre outros) foram obtidos a partir dos documentos da empresa e quando necessário mediante observação das operações.

Com todos os dados coletados foi necessário fazer o tratamento estatístico para verificar a existência de *outliers* e determinar a aderência dos dados a determinadas distribuições de probabilidade, aspecto este imprescindível para a criação do modelo computacional.

A modo de exemplo a Figura 3 mostra a existência de *outliers* para o tempo de carregamento dos altos fornos. Na imagem a esquerda aparecem os dados da primeira rodada mostrando picos no número de eventos. A imagem da direita aparece a última rodada dos dados mostrando que muitos dados foram retirados (93 *outliers* que representam o 28,6% da base de dados inicial).

**Figura 3.** Representação dos *outliers*.



Fonte: Dados da pesquisa (2023).

Com esses últimos dados foi realizado o teste de aderência mostrado na Tabela 2 onde consta a distribuição de probabilidade obtida para os dados de carregamento de escória nos altos fornos, bem como o erro quadrático.

**Tabela 2.** Distribuição de probabilidade, carregamento de escória nos altos fornos

Sumário da Distribuição	
Distribuição:	Triangular
Expressão:	TRIA (0,08; 0,164; 0,29)
Erro quadrático:	0,001296

Fonte: Dados da pesquisa (2023).

O mesmo procedimento foi realizado para os outros tempos de processo, e todas as distribuições de probabilidade foram determinadas e colocadas dentro do modelo computacional.

Com o modelo computacional criado, foi realizada a validação e os testes de cenários propostos neste estudo. Na validação do modelo participou um especialista com mais de 20 anos de experiência na atividade logística.



O sistema foi configurado para retratar 1 (um) mês de operação, ou seja, 720 horas, configuradas com premissas e dados da operação real para analisar os seguintes cenários:

- **Cenário 1:** Dimensionamento da frota de equipamentos para os volumes de produção e consumo atuais sem a aplicação da solução da indústria 4.0;
- **Cenário 2:** A partir do dimensionamento da frota de equipamentos para os volumes de produção e consumo atuais, aplicar a solução da indústria 4.0 e verificar se houve ganhos operacionais;
- **Cenário 3:** Dimensionamento da frota de equipamentos para os volumes máximos de produção e consumo sem a aplicação da solução da indústria 4.0;
- **Cenário 4:** A partir do dimensionamento da frota de equipamentos para os volumes máximos de produção e consumo, aplicar a solução da indústria 4.0 e verificar se houve ganhos operacionais.

Os modelos computacionais retornaram resultados para os 4 cenários propostos e a partir desses foi possível identificar os benefícios da aplicação das ferramentas da solução da indústria 4.0 no dimensionamento dos equipamentos para a operação de retirada e transporte de escória dos altos fornos. A seguir são mostrados todos os ganhos obtidos.

A Tabela 3 mostra a quantidade de minutos economizados com a utilização das ferramentas da solução da indústria 4.0 quando o preenchimento de *checklist* pelos motoristas passou a ser digital.

**Tabela 3.** Benefício da ferramenta de *checklist* digital

Ferramenta da Indústria 4.0	Preenchimento do <i>Checklist</i> (Minutos por turno)
<i>Checklist</i> digital	12

Fonte: Dados da pesquisa (2023).

Anteriormente o preenchimento era manual, com a solução passa a ser digital mediante a utilização de *tablets*.

A Tabela 4 apresenta a quantidade de minutos economizados por evento nos processos de carregamento de escória nos silos dos altos fornos, descarregamento de escória no pátio de matérias primas da fábrica de cimentos e no pátio de armazenamento temporário e na pesagem na balança rodoviária.

**Tabela 4.** Benefícios da ferramenta de ciclos operacionais

Ferramenta da Indústria 4.0	Carregamento (minutos por viagem)	Descarregamento (minutos por evento)	Pesagem (minutos por evento)
Ciclos Operacionais	3	1	1

Fonte: Dados da pesquisa (2023).

Esta economia foi proporcionada pela ferramenta de ciclos operacionais, que digitaliza o controle de viagens, evitando assim o preenchimento dos formulários de viagem pelos motoristas.



A Tabela 5 consolida os melhores dimensionamentos de frota dos 4 cenários conforme visto nos testes de cenários.

**Tabela 5.** Dimensionamento de recursos nos cenários testados

#	Descrição do Cenário	Caminhão Basculante 19t AFa	Caminhão Basculante 19t AFb	Caminhão Basculante 24t AFb	Carreta Basculante 29t AFb
1	Atual   Sem solução Ind. 4.0	2	-	2	1
2	Atual   Com solução Ind. 4.0	2	1	-	1
3	Máx.   Sem solução Ind. 4.0	2	-	2	1
4	Máx.   Com solução Ind. 4.0	2	3	-	-

Fonte: Dados da pesquisa (2023).

Ao se comparar os cenários 1 e 2, foi possível remover um caminhão basculante de 24t de capacidade e substituir o outro por um menor, de 19t de capacidade. Já ao se comparar os cenários 3 e 4, os ganhos foram ainda maiores, foi possível substituir uma carreta basculante de 29t de capacidade e 2 caminhões basculantes de 24t de capacidade por 3 caminhões basculantes de 19t de capacidade.

Essa substituição foi possível devido a maior disponibilidade dos equipamentos nas frentes de trabalho e pelo menor tempo necessário para realizar as atividades do ciclo do transporte ocasionadas pela inserção das ferramentas da solução da indústria 4.0.

O simples fato de ser possível diminuir a capacidade de um caminhão e/ou carreta basculante traz um retorno financeiro interessante devido ao menor valor de aquisição e operação do equipamento.

A análise dos resultados permite calcular os ganhos econômicos (além dos já vistos nas Tabelas 2 e 3 referentes às economias de tempo nos ciclos operacionais).

Para os cenários 1 e 2:

- Custo total de aquisição da frota:
  - Cenário 1: R\$ 4.845.000,00
  - Cenário 2: R\$ 3.285.000,00
- Custo total para manter a solução da indústria 4.0 (Plataforma de Gestão de Logística Integrada), considerando 5 anos para a depreciação dos ativos:
  - Cenário 2: R\$ 120.000,00
- Ao se comparar o custo total de aquisição mais o custo da solução da indústria 4.0 entre os cenários 1 e 2 é possível concluir que a economia é de aproximadamente 30%.

Para os cenários 3 e 4:

- Custo total de aquisição da frota:
  - Cenário 3: R\$ 4.845.000,00
  - Cenário 4: R\$ 3.950.000,00
- Custo total para manter a solução da indústria 4.0 (Plataforma de Gestão de Logística Integrada), considerando 5 anos para a depreciação dos ativos:
  - Cenário 4: R\$ 150.000,00



- Ao se comparar o custo total de aquisição mais o custo da solução da indústria 4.0 entre os cenários 3 e 4 é possível concluir que a economia é de aproximadamente 15%.

Quanto aos custos da implementação da solução da indústria 4.0, na Tabela 6 pode ser observado custo mensal da solução de gestão de logística integrada por equipamento.

**Tabela 6.** Valor do serviço de plataforma de gestão de logística integrada

Serviço	Valor do Serviço (R\$/mês por Equipamento)
Plataforma de Gestão de Logística Integrada	500.00

**Fonte:** Dados da pesquisa (2023).

Como pode ser apreciado, em ambos os cenários de produção em que a solução da indústria 4.0 foi inserida houve ganhos econômicos na operação de retirada e transporte de escória de alto forno.

Além dos ganhos econômicos mencionados, houve também um aumento da disponibilidade dos recursos de 12 minutos por turno de trabalho e uma redução de 4 a 5 minutos por ciclo do processo.

No decorrer do trabalho pode se apreciar a importância da ferramenta usada, simulação computacional, na visualização dos resultados obtidos. Estabelecimento de diferentes cenários para avaliar comportamentos pode ser um processo complexo pela quantidade de variáveis que envolve e muitas vezes é necessário definir de um conjunto de cenários quais seriam os mais convenientes a usar. Neste trabalho optou se por seguir o procedimento de Noronha (2020) que propõe a seleção dos cenários usando outros métodos de tomada de decisão, no objeto de estudo a pesquisa de mercado foi o balizador para indicar quais soluções da indústria 4.0 deveriam ser incluídas nos cenários.

Com respeito ao uso da simulação para validar os cenários com as soluções implementadas, trabalho similar foi realizado por Costa (2019), quem avalia diferentes soluções da indústria 4.0 para melhorar o fluxo logístico em fábrica de cimentos mostrando que a simulação computacional tem muitas vantagens porque modelos de simulação podem chegar muito próximo do sistema real fazendo com que as decisões possam ser tomadas sem que o sistema real seja perturbado.

## 5. Considerações finais

Os avanços tecnológicos proporcionados pela indústria 4.0 mostraram que a indústria está em constante atualizações e que soluções estão sendo desenvolvidas e aperfeiçoadas a todo momento para a melhoria dos processos de produção e logísticos.

A partir do desenvolvimento desse trabalho, foi realizado um estudo dos fluxos de retirada e transporte de escória de altos fornos, que foram mapeados em fluxogramas e esquemáticos de rotas. Foi desenvolvido um modelo computacional capaz de dimensionar a quantidade de recursos necessários para a realização da operação de retirada e transporte de escória de altos fornos.



Uma pesquisa de mercado foi realizada a fim de identificar soluções da indústria 4.0 e suas ferramentas que são aplicadas na logística de plantas industriais, com 6 empresas participantes e um resultado de 3 soluções em potencial identificadas. Das 3 soluções identificadas, foi selecionada uma a fim de testar duas de suas ferramentas em diferentes cenários com o objetivo de buscar o melhor dimensionamento de recursos para a operação de retirada e transporte de escória de altos fornos.

Foram definidos 4 cenários que contemplaram os volumes atuais e máximos de produção, bem como o uso ou não das ferramentas da solução da indústria 4.0. Esses cenários foram simulados no modelo computacional desenvolvido mostrando que em todos os cenários em que houve a adoção das ferramentas da solução da indústria 4.0 houve ganhos econômicos de 15 a 30%, bem como houve maior disponibilidade dos recursos e um menor tempo de ciclo para as operações.

Entre as principais contribuições do trabalho está o modelo de simulação computacional desenvolvido que pode ser replicado em outras situações. Este modelo pode ser adaptado em outros casos da logística do referido processo, a outros cenários a serem testados e a outras soluções da indústria 4.0 respeitando as mudanças pertinentes e suas premissas.

Para esse trabalho, não foi considerado outros fatores externos e internos que podem vir influenciar nos resultados, como uma crise mundial, ou outros fatores que podem alterar a produção de aço e consequente geração de escória de alto forno, bem como o consumo dessa escória na fábrica de cimentos.

Como recomendações de trabalhos futuros, seria de extrema valia aumentar o período de análise, efetuando testes com cenários que contemplem paradas de produções, ou seja, de geração e de consumo de escória de altos fornos. Seria importante também adicionar outros fluxos menores que podem fazer parte do transporte de escória, não se limitando somente aos fluxos estudados nesse trabalho.

## Referências

Abreu, C. E., Gonzaga, D. R. B., Dos Santos, F. J., Oliveira, J. F., Oliveira, K. D. M., Morais Figueiredo, L., Nascimento, M. P., Oliveira, P. G., Yoshinaga, S. T. S., Oliveira, T. T., Mata, V. S., & Gonçalves, G. A. S. (2018). Indústria 4.0: como as empresas estão utilizando a simulação para se preparar para o futuro. *Revista de Ciências Exatas e Tecnologia*, 12(12), 49. <https://doi.org/10.17921/1890-1793.2017v12n12p49-53>

Andrade, M. M. (2017). *Introdução à Metodologia do Trabalho Científico*. 10ª edição, São Paulo: Atlas.

Andrade, C., & Gonçalo, C. (2022). Plataformas e ecossistemas. *Revista de Administração, Sociedade e Inovação*, 8(2), 96–118. <https://doi.org/10.20401/Rasi.8.2.573>

Ballou, R. H. (2009). *Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos: Logística Empresarial*. (Bookman, Ed.; 5th Ed.).

Barreto, L., Amaral, A., & Pereira, T. (2017). Industry 4.0 Implications in Logistics: An Overview. *Procedia Manufacturing*, 13, 1245–1252.



Corrêa, J. S., Sampaio, M., & Barros, R. De C. (2020). An exploratory study on emerging technologies applied to logistics 4.0. *Gestão & Produção*, 27(3). <https://doi.org/10.1590/0104-530x5468-20>

Costa, R. A. (2019). *Soluções da indústria 4.0 para melhoria da eficiência logística de processos logísticos*. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal Fluminense.

Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2021). *Projeto de Pesquisa: Métodos qualitativo, quantitativo e misto*. 5ª edição, Porto Alegre: Penso, E-book.

C. S. C. M. P. (2013). *Council of supply chain management professionals*. Supply chain management terms and glossary.

Dantas, M. (2003). Informação e trabalho no capitalismo contemporâneo. *Lua Nova: Revista de Cultura e Política*, 5–44.

Drees, J. (2016). Logistics 4.0: tailored solutions for the future. In: *International Press Workshop*. Gopali & Co.

Ferreira, S. C., & De Paula, G. M. (2021). Primeiros impactos da indústria 4.0 sobre o setor de papel e celulose. *Revista de Administração, Sociedade e Inovação*, 7(1), 124–139. <https://doi.org/10.20401/Rasi.7.1.522>

Franco, G. N. (2016). Estudo Para Redução De Permanência De Veículos Apoiado Pela Simulação Em Computador. In: *35th Logistic Seminar*, pp. 35–42).

Freitas Filho, P. J. (2008). *Introdução à modelagem e simulação de sistemas: com aplicações em arena*. 2ª edição, Florianópolis, Visual Books Ltda.

Gil, A. C. (2022). *Como elaborar projetos de pesquisa?* 7th Edition.

Goldsmán, D. (2007). Introduction To Simulation. *2007 Winter Simulation Conference*, 26–37.

Golovianko, M. (2023). Industry 4.0 Vs. Industry 5.0: Co-Existence, Transition, Or A Hybrid. *Procedia Computer Science*, 217, 102–113.

Gunal, M. M., & Karatas, M. (2019). Industry 4.0, digitisation in manufacturing, and simulation: a review of the literature. *Simulation for Industry*, 4(0), 19–37.

Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). Securing the future of german manufacturing industry: recommendations for implementing the strategic initiative industrie 4.0. *Acatech - National Academy of Science and Engineering*.

Kolberg, D., & Zühlke, D. (2015). Lean automation enabled by industry 4.0 technologies. *Ifac-Papersonline*, 48, 1870–1875.

Lima, E. C., & Neto, C. (2017). Revolução Industrial: Considerações Sobre O Pioneirismo Industrial Inglês. *Revista Espaço Acadêmico*, 1(194), 102–113.

Motta, M. J., & Lusvargui, G. C. (2018). *Logística 4.0 desafios e oportunidades na gestão da cadeia de suprimentos moderno*.



- Nahavandi, S. (2019). Industry 5.0 — A human-centric solution. *Sustainability*, 11(16), 4371.
- Nambisan, S., Zahra, S. A., & Luo, Y. (2019). Global platforms and ecosystems: Implications for international business theories. *Journal of International Business Studies*, 50(9).
- Noronha, G. D. (2020). *Estudo de um modelo logístico viável para implantação de uma linha de bandagem através da simulação*. Anais do simpósio brasileiro de pesquisa operacional, João Pessoa.
- Oztemel, E., & Gursev, S. (2020). Literature review of Industry 4.0 and related technologies. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31, 127–182.
- Rocha, A. M., Silva, P. V. B., Andrade, J. C. E., & Franco, G. N. (2013). *Modelo computacional da movimentação ferroviária na usina Presidente Vargas* (48–59). XXXII Seminário de Logística.
- Sacomano, J. B. (2018). *Indústria 4.0*.
- Santos, B. P. (2018). Indústria 4.0: desafios e oportunidades. *Revista Produção e Desenvolvimento*, 4(1), 111–124.
- Saw, H. S. (2021). *Sustainability and Development of Industry 5.0*.
- Soares, V. R. (2022). Elaboração de um plano de manutenção em uma empresa do setor de sacarias de cimento de Santa Catarina com base nas metodologias de manutenção preventiva. In *Monografia (Engenharia de Produção)*. Instituto Federal de Santa Catarina.
- Tessarini, G., & Saltorato, P. (2018). Impactos da indústria 4.0 na organização do trabalho: uma revisão sistemática da literatura. *Revista Produção Online*, 18(2), 743–769. <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v18i2.2967>
- Wang, K. (2016). Logistics 4.0 solution: new challenges and opportunities. *Proceedings of the 6th International Workshop of Advanced Manufacturing and Automation*.
- Yamanda, V. Y., & Martins, L. M. (2019). Indústria 4.0: um comparativo da indústria brasileira perante o mundo. *Revista Terra & Cultura: Cadernos de Ensino e Pesquisa*, 34.
- Yin, R. K. (2015). *Estudo de Caso: Planejamento e Métodos*. 5ª edição, São Paulo: Bookman, E-book.