

## GÊMÊO MATEMÁTICO DIGITAL: PESQUISA OPERACIONAL DE DISTRIBUIDOR \*

Siviero Sibemberg, Lucas<sup>1</sup>  
Moreira Nabinger, Bruno<sup>2</sup>  
Guimarães, Mateus<sup>3</sup>  
Dalla Vecchia, Rodrigo<sup>4</sup>  
Visintainer Lerman, Laura<sup>5</sup>  
Hippler, Cristian<sup>6</sup>

### Resumo

A crescente complexidade da produção de aços especiais e a necessidade de reduzir perdas de refratários levaram as usinas a buscar métodos de pesquisa operacional capazes de otimizar o sequenciamento do chão de fábrica. Este estudo descreve o desenvolvimento e a implantação industrial de um **Gêmeo Matemático** — um modelo de programação baseado em física e dados — em uma usina brasileira de aços especiais. O modelo converte dados históricos e em tempo real em restrições de equações de balanço que contemplam vida útil de distribuidor (*tundish*) e panela, janelas térmicas e químicas, logística de pontes-rolantes e tarifas de energia por horário; um núcleo de otimização embarcado avalia centenas de cenários por hora e entrega a sequência de menor custo em menos de 20 s. A validação industrial mostrou um ganho de 35 % na eficiência operacional global, e a economia anual de 31% distribuidores. Esses avanços resultam em menor consumo de refratários, redução da formação de crostas, menos paradas não programadas e maior throughput. Ao combinar algoritmos de pesquisa operacional com fluxos de dados da Indústria 4.0, o Gêmeo Matemático demonstra como gêmeos digitais avançados podem elevar os referenciais de eficiência e transformar a gestão de distribuidores em uma vantagem competitiva mensurável para produtores de aços especiais.

**Palavras-chave:** Produção de aço; Pesquisa operacional; Otimização de processos.

### MATH TWIN-DRIVEN SEQUENCING FOR SPECIAL STEEL: OPERATIONAL-RESEARCH OPTIMIZATION OF TUNDISH

#### Abstract

The growing complexity of special-steel production and the need to curb refractory losses have prompted mills to explore operation research that can optimize shop-floor sequencing. This study details the development and industrial deployment of a **Math Twin**—a physics-based, data-driven scheduling model—at a Brazilian special-steel plant. The model converts historical and live process data into balance-equation constraints covering tundish and ladle life, thermal and chemical windows, crane logistics and time-of-use energy prices; an embedded optimization kernel then enumerates hundreds of scenarios per hour and delivers a best-cost sequence in under 20 seconds. Industrial validation showed a **35 % gain in overall operational efficiency**, and the annual savings of 31% distributors. These improvements translate into lower refractory consumption, reduced skull formation, fewer unplanned stoppages and higher throughput. By combining operations-research algorithms with Industry 4.0 data streams, the Math Twin demonstrates how advanced digital twins can lift efficiency benchmarks and turn tundish management into a measurable competitive advantage for special-steel producers.

\* Contribuição técnica ao 27º Seminário de Automação e TI, parte integrante da ABM Week 9ª edição, realizada de 09 a 11 de setembro de 2025, São Paulo, SP, Brasil.

**Keywords:** Steel production, Operatios management, Process optimization.

1. *Mestre em Matemática, Diretor de Inteligência Artificial, EvcomX, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.*
2. *Engenheiro Elétrico, Cientista de Dados, EvcomX, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil*
3. *Astrofísico, Cientista de Dados, EVCOMX, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil*
4. *Doutor em Matemática, Diretor Executivo, EvcomX, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.*
5. *Doutorado em Engenharia de Produção, Pesquisadora e Cientista de Dados, EvcomX, Porto Alegre, Rio Grande do Sul e Brasil*
6. *Analista e Desenvolvedor de Sistemas, Dono de Produto, EvcomX, Porto Alegre, Rio Grande do Sul e Brasil*

## INTRODUÇÃO

A produção de aço especial impõe desafios adicionais ao uso do distribuidor (tundish), considerado o elo crítico entre o refino e o lingotamento. Quando o distribuidor atinge o limite de vida refratária ou é contaminado por sucessões químicas na produção, a sequência de vazamento se interrompe, gerando trocas não planejadas, perda de metal (skull) e paradas na produção. Estudos relatam desperdícios de 50 % a 60 % de rendimento associados apenas ao skull acumulado no fim de cada sequência [1], enquanto García-Menéndez et al. [2] identificam o controle de vida do distribuidor como uma das restrições menos atendidas pelos modelos de programação atuais, o que demonstra a oportunidade de estudos e casos aplicados no sentido de otimizar a vida do distribuidor. Além disso, considerando o contexto da indústria brasileira, Soares Júnior [3] mostrou que ignorar essa restrição leva a intervenções manuais extras e perdas de produtividade. Portanto, as perdas relacionadas ao uso do distribuidor são numerosas.

Para mitigar essas perdas, a literatura converge no sequenciamento como ferramenta central de otimização. O sequenciador ordena a produção aplicando regras metalúrgicas, logísticas e energéticas, por exemplo. Modelos matemáticos e heurísticos comprovam ganhos concretos no uso do sequenciamento para otimização da produção e redução das perdas: Wang et al. [4] elevaram a utilização dos lingotadores em aproximadamente 30 % numa planta de aços especiais; Rezende [5] obteve redução de 23 % em setup. Complementarmente, meta-heurísticas mais recentes focam em minimizar o tempo de espera das panelas [6].

Entretanto, o pleno potencial do uso do distribuidor e da otimização de sequência ainda depende de modelagem. Considerando esse contexto, o presente artigo tem como objetivo demonstrar, por meio de estudo de caso real, que um algoritmo de sequenciamento baseado nos princípios de Math Twin é capaz de capturar restrições operacionais, maximizar a eficiência operacional de aciarias de aços especiais e redefinir o uso do distribuidor como vantagem competitiva mensurável. Para isso, propõe-se um algoritmo de sequenciamento implementado em um Math Twin desenvolvido pela Evcomx. O Math Twin é uma abordagem que utiliza técnicas avançadas da Indústria 4.0, como inteligência artificial, Big Data, Pesquisa Operacional e Modelagem Matemática, para criar uma réplica digital dos processos produtivos — neste caso, da aciaria.

A solução desenvolvida foi validada industrialmente, alcançando: (a) ganho médio de 35 % na eficiência operacional; (b) economia anual de 31% dos distribuidores; (c) tempo de replanejamento inferior a 20 segundos - resultados que superam ou igualam os melhores casos relatados na literatura. Ademais, a solução integra-se ao ecossistema de transformação digital da Indústria 4.0, funcionando como gêmeo matemático digital [7]. Os resultados dependeram da aplicação conjunta de conhecimentos matemáticos, operacionais e tecnológicos que possibilitaram o desenvolvimento de um Math Twin alinhado aos objetivos operacionais da indústria.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Entendimento do processo industrial da aciaria e suas restrições

O conhecimento detalhado do processo de produção de aços especiais é indispensável para o desenvolvimento do Math Twin, pois, como em outras indústrias, esse segmento apresenta gargalos técnicos inexistentes em outras usinas

siderúrgicas. Entre eles, destacam-se as janelas térmicas estreitas, compatibilidades químicas, vida útil limitada dos refratários utilizados, conflitos logísticos e pesos das placas. Quando o foco é entender o processo, qualquer falha na coordenação desses recursos provoca trocas não planejadas de distribuidor, formação de skull e perda de throughput [1,2], o que pode se tornar um obstáculo à modelagem. Compreender, de forma clara e objetiva, tais particularidades é, portanto, um dos pré-requisitos para facilitar a construção de um Math Twin capaz de representar o sistema real, gerar sequências de produção de forma mais assertiva e maximizar a eficiência operacional.

## 2.2 Modelagem e restrições detalhadas

Para refletir essa realidade, o modelo do Math Twin pode incluir: (i) vida útil dinâmica de placa e distribuidor, atualizada por sensores de temperatura e peso refratário; (ii) janelas químicas que proíbem sucessões entre ligas incompatíveis; (iii) janelas térmicas que limitam o intervalo entre tapping e lingotamento; (iv) capacidade das pontes-rolantes e regras de colisão; (v) otimização com data e prazo; e (vi) curvas de tarifa de energia, permitindo deslocar operações energeticamente intensivas para fora dos horários de pico [3,4]. A escolha dessas restrições pode variar conforme o contexto industrial: o Math Twin pode adotar apenas um subconjunto ou incorporar restrições adicionais (por exemplo, disponibilidade de vácuo, limitação de sopro de oxigênio) para representar de maneira flexível e precisa a realidade operacional da usina.

## 2.3 Integração de técnicas de Pesquisa Operacional no Math Twin

A Pesquisa Operacional (PO) ajuda a apoiar a tomada de decisões nos negócios, sobretudo na otimização de processos industriais [8,9]. Em termos gerais, a PO oferece um conjunto de ferramentas para modelar problemas e encontrar soluções ótimas, levando em conta restrições de capacidade e outros fatores relevantes do processo produtivo. Um problema típico de PO (Figura 01) envolve: (i) o entendimento e a modelagem do problema; (ii) a conversão do desafio real em um modelo matemático — por exemplo, definição de variáveis e restrições [8,10]; (iii) x. Entre os principais métodos, destacam-se:

- (a) Programação Linear e Inteira, como simplex e branch-and-bound [8,9];
- (b) Programação Dinâmica, que resolve problemas por decomposição em subproblemas [9];
- (c) Métodos de Grafos (Fluxos em Redes), úteis para roteamento, alocação de recursos e fluxo máximo [11,12];
- (d) Heurísticas e Meta-heurísticas, empregadas quando métodos exatos são muito complexos ou lentos, como tabu search, simulated annealing e algoritmos genéticos [8,13];
- (e) Simulação, que avalia cenários em ambientes dinâmicos quando o modelo exato é difícil de construir [9];
- (f) Sequenciamento e Programação de Tarefas, que definem a ordem de execução de jobs em máquinas [14-17].

Posteriormente, na etapa de (iv) Análise de Resultados, interpreta-se a solução obtida e verifica-se se ela atende às metas de negócio (custo, tempo, qualidade

etc.), ponderando eventuais trade-offs [8,11]. Quando necessário, aplicam-se análises de sensibilidade ou ajustes de premissas para lidar com incertezas [9]. Assim, conforme a modelagem escolhida, as técnicas de PO podem ser combinadas para desenvolver o Math Twin mais adequado ao contexto industrial.



**Figura 01: Resolução de um problema típica de PO**

## 2.4 Desenvolvimento do Math Twin

O Math Twin da Evcomx representa cada estágio da aciaria por meio de equações de balanço e restrições alimentadas por dados históricos [7]. O kernel de otimização recebe dados operacionais da indústria e devolve um DataFrame: cada linha corresponde a um produto com rota e a sua respectiva data, posição na sequência, família química, consumo acumulado de capacidade e custo energético previsto. Essa estrutura permite simular centenas de cenários por hora e apontar, em segundos, a sequência com menor custo de setup e maior vida de distribuidor, obtendo assim ganhos operacionais.

## 2.5 Avaliação quantitativa dos resultados do Math Twin

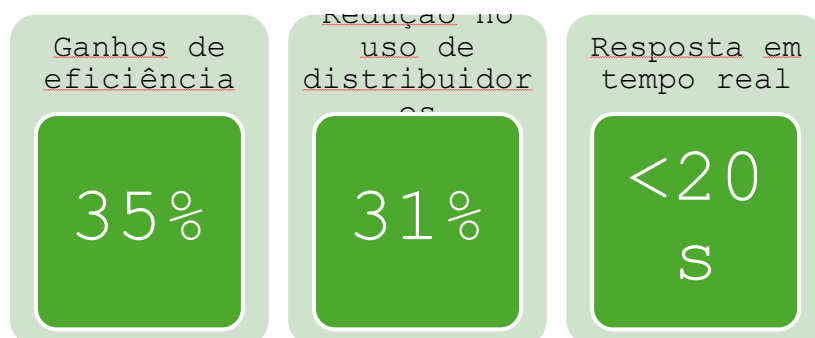
Para avaliar o desempenho do Math Twin proposto, podem-se adotar três grupos principais de indicadores: (a) ganho de eficiência global, expresso em termos percentuais, calculado pela comparação da produtividade antes e depois da implantação do Math Twin; (b) economia operacional, medida pelo número de trocas de distribuidor evitadas, pela quantidade de corridas adicionais viabilizados e pelos dias produtivos efetivamente recuperados ao longo do ano e (c) performance computacional, avaliada pelo tempo médio e pelo tempo máximo necessários para gerar cada novo plano de produção. Esses indicadores revelam tanto o impacto industrial direto da solução quanto sua viabilidade prática em um cenário de replanejamento quase em tempo real. Outros indicadores podem ser incluídos conforme a necessidade do cliente; os citados são apenas exemplos. Além disso, os resultados devem ser analisados em conjunto com demais informações da fábrica para subsidiar decisões estratégicas e táticas mais robustas.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No contexto do Math Twin, o uso do sequenciador obteve diversos resultados importantes para a indústria e para a literatura. Desde a adoção da nova solução de sequenciamento, ocorreu um ganho médio de 35 % na eficiência operacional. Esse ganho médio está dentro do intervalo relatado por estudos nacionais e internacionais (entre 15 % e 40 %). Por exemplo, Rezende [5] integrou VNS/ILS ao dimensionamento e ao sequenciamento de lotes em uma aciaria brasileira, e o modelo reduziu o tempo total de setup em 23 % e elevou o throughput em 12 %. Já Soares, Gomes e Sampaio [18] usaram simulação discreta para ajustar a velocidade de lingotamento; a simples

mudança possibilitou a liberação de cerca de 15 % de capacidade no pátio de estocagem. Os estudos, em geral, reforçam os seguintes aspectos: (i) o sequenciamento pode alinhar restrições metalúrgicas, logísticas e energéticas em tempo real, dependendo do contexto analisado; (ii) algoritmos híbridos (GA, VNS, DRL) podem entregar soluções de alta qualidade dentro da janela de replanejamento de minutos [6,13,19-21]; (iii) modelagem detalhada reduz paradas produtivas — o que se converte em ganho agregado de eficiência. Dessa forma, os resultados do estudo mostram que ele está de acordo com a literatura nacional e internacional, principalmente em relação aos modelos, embora exista oportunidade de integrar outras tecnologias e análises para melhorar ainda mais a eficiência.

O sequenciamento (Figura 2) obteve outros resultados importantes, como economia de 31% distribuidores, liberando recursos para usos mais estratégicos. Nesse caso, o sequenciador não só se alinha aos resultados detalhados pela literatura, como se posiciona no patamar superior do que é reportado nacional e internacionalmente; por exemplo, Pan et al. [19] recuperaram de três a quatro dias de produção por ano. Esses resultados, combinados com a literatura, reforçam a robustez da solução proposta e indicam que metas adicionais são uma nova oportunidade.



**Figura 2 – Resultados do sequenciador**

Além disso, o processo de otimização reduziu o tempo gasto em atividades operacionais internas e apoiou a tomada de decisão: o tempo máximo de processamento é de apenas 20 segundos, assegurando respostas quase em tempo real e elevando a qualidade do serviço prestado. Considerando a literatura nacional e internacional, o novo algoritmo de sequenciamento demonstra bom desempenho: mostra um bom desempenho em relação a abordagens de horizonte muito curto já treinadas [19-21], mas duas a três vezes mais rápido que heurísticas industriais da década passada [4] e permanece bem abaixo da janela de replanejamento típica das usinas (10 – 15 min). O tempo também se mantém dentro da faixa indicada por Rezende [5] para problemas integrados de dimensionamento e sequenciamento em cenário nacional. Com base nesses resultados, o novo algoritmo de sequenciamento obteve sete recordes históricos de aumento médio da vida do distribuidor em 24 meses, posicionando a usina de forma competitiva no mercado. Os resultados refletem menos trocas, maior economia de refratários, menor consumo de energia de aquecimento, redução de horas improdutivas e diminuição de custos e uso de recursos.

Consequentemente, com a aplicação de algoritmos de Pesquisa Operacional no contexto da aciaria, baseada no desenvolvimento de um Math Twin, o estudo alcançou: eficiência operacional de referência; economia de recursos críticos (distribuidores e tempo); capacidade de resposta quase em tempo real; e recordes

históricos de desempenho do distribuidor — evidenciando o potencial estratégico do Math Twin fundamentado em princípios de Pesquisa Operacional.

#### 4 CONCLUSÃO

Os resultados comprovam que o sequenciador baseado em Math Twin se consolida como uma aplicação prática de Pesquisa Operacional na Indústria 4.0. O modelo transforma um conjunto inicial de pedidos –em um plano de produção otimizado, capaz de organizar de forma inteligente os pedidos. Além disso, aplicando conceitos de flexibilidade, em que as regras de negócio e restrições podem ser ativadas, desativadas ou re-parametrizadas por etapa do processo, permitindo adaptar o Math Twin a diferentes cenários.

Em ambiente industrial, essa abordagem possibilitou diversos resultados. Entre eles, destacam-se 35 % de ganho médio de eficiência, tudo com tempo de replanejamento realizado em segundos. Esses resultados superam ou igualam os melhores casos nacionais e internacionais relatados para aciarias de aços especiais.

Portanto, o Math Twin mostrou-se como uma nova solução 4.0 robusta e escalável com intuito de suportar decisões em tempo (quase) real, integrando-se naturalmente ao ecossistema digital da planta das indústrias siderúrgicas. Os resultados obtidos sugerem que a mesma arquitetura pode ser replicada em outras usinas siderúrgicas ou ampliada para estágios adjacentes – laminação, logística interna, pensando em diferentes atores e atividades das cadeias de suprimentos – consolidando o Math Twin com base na Pesquisa Operacional como pilar decisivo na jornada de transformação digital do setor do aço.

#### REFERÊNCIAS

1. Mazumdar D, Singh OP, Dutta J, Ghosh S, Chakraborty S. Reduction of tundish skull and yield improvement in steel plants through physical modeling of steelmaking tundish systems. Transactions of the Indian Institute of Metals. 2011;64(6):593-605.
2. García-Menéndez D, Morán-Palacios H, Ortega-Fernández F, Díaz-Piloñeta M. Scheduling in continuous steelmaking casting: A systematic review. ISIJ International. 2020;60(6):1097-1107.
3. Soares Júnior AC. Otimização na programação de aços de uma aciaria através de um modelo matemático de setup dependente da sequência [Trabalho de Conclusão de Curso]. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto; 2017.
4. Wang C, Liu Q, Wang B, Mu Y, Xie F, Lu X. Scheduling model of steelmaking–continuous casting processes in special steel plants. Chinese Journal of Engineering. 2013;35(3):371-378.
5. Rezende LV. Métodos heurísticos para a resolução do problema integrado de dimensionamento e sequenciamento de lotes em uma indústria siderúrgica [Trabalho de Conclusão de Curso]. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto; 2021.
6. Hong Y, Liu Q, Yang J, Wang J, Gao S, Li H. Genetic optimization of ladle scheduling in empty-ladle operation stage based on temperature-drop control. Journal of Iron and Steel Research International. 2022;29:563-574