

CONTROLE LOGÍSTICO DE UM PÁTIO DE PLACAS COM EMPILHAMENTO UTILIZANDO LÓGICA FUZZY

Marcus Vinícius Pimentel Gomes, Leandro Colombi Resendo

Instituto Federal do Espírito Santo - Campus Serra
Av. dos Sabiás, 330, Morada de Laranjeiras - Serra, ES
marcuspimentel@gmail.com, leandro@ifes.edu.br

Beatriz Laiate

Escola de Matemática Aplicada, Fundação Getúlio Vargas (FGV/EMAp)
Praia de Botafogo, 190 - Rio de Janeiro- RJ, 22250-900
beatrizlaiate@gmail.com, Beatriz.Laiate@fgv.br

RESUMO

O pátio de placas em uma usina siderúrgica integrada é crucial para o fluxo eficiente de produção. Este trabalho apresenta um estudo do gerenciamento dinâmico do pátio de placas, combinando simulação e regras operacionais para otimizar o processo. Nessa proposta, um método, encontrado na literatura, para alocação de placas no pátio de siderúrgicas foi aprimorado com a utilização de um controlador fuzzy via inferência de Mamdani. As variáveis de entrada, como ocupação do pátio e sequenciamento de placas, foram fuzzificadas, definindo conjuntos fuzzy para cada variável linguística empregada. Neste caso específico, as regras do sistema foram definidas para mapear as combinações de variáveis de entrada para a ação de alocação de placas. Nos experimentos, usando o simulador 3S-SIM, demonstramos que o desempenho do método de decisão encontrado na literatura pôde ser melhorado com o controlador fuzzy proposto.

PALAVRAS CHAVE. Armazenamento de placas, Otimização, Controlador Fuzzy.

Tópicos: IC – Inteligência Computacional, POI – PO na Indústria.

ABSTRACT

The slab yard in an integrated steel mill is crucial for the efficient flow of production. This work presents a study of the dynamic management of the slab yard, combining simulation and operational rules to optimize the process. In this proposal, a method found in the literature for allocating slabs in the steel mill yard was improved using a fuzzy controller via Mamdani inference. The input variables, such as yard occupancy and plate sequencing, were fuzzified, defining fuzzy sets for each linguistic variable used. In this specific case, the system rules were defined to map the combinations of input variables to the plate allocation actions. In experiments using the 3S-SIM simulator, we demonstrated that the performance of the decision method found in the literature could be improved with the proposed fuzzy controller.

KEYWORDS. Steel Plate Storage, Optimization, Fuzzy Controller.

Paper topics: IC – Computational Intelligence; POI – OR in Industry

1. Introdução

O aço, material versátil e resistente, desempenha um papel vital na história da humanidade. Suas propriedades de resistência, durabilidade e versatilidade o tornam essencial na sociedade moderna, tanto para infraestrutura quanto para a produção de bens de consumo. Isso posiciona o setor siderúrgico e a indústria do aço como peças-chave na economia global.

O processo de produção em uma usina integrada de aço é composto por 5 etapas principais: Preparação de carga; Redução; Refino; Lingotamento e Laminação. Na fase de Lingotamento são produzidas placas de aço que em seguida são processadas em equipamentos conhecidos como Laminadores, gerando novos produtos tais como bobinas, chapas, perfis e outros produtos acabados. O Pátio de Placas atua como um elo estratégico na produção siderúrgica, funcionando como um repositório temporário de placas entre a Máquinas de Lingotamento Contínuo (MLC) e o Laminador de Tiras a Quente (LTQ). Essa função garante o fluxo contínuo de placas para o LTQ, mesmo com interrupções na MLC. Além disso, o Pátio de Placas concilia a produção otimizada de placas uniformes na MLC com a demanda do LTQ por placas de diferentes larguras. Essa compatibilização é crucial para a eficiência e a competitividade da usina siderúrgica [Ge et al., 2022].

A gestão de um pátio de armazenamento de placas de aço envolve uma complexidade logística significativa devido à necessidade de otimizar o espaço disponível e manter a eficiência operacional. Cada placa deve ser empilhada estrategicamente para maximizar a utilização do espaço vertical e horizontal, enquanto se leva em consideração a ordem de chegada e a previsão de saída. Em linhas gerais essa gestão é dividida em 3 subproblemas: o Recebimento, que trabalha das decisões sobre aonde a placa será alocada e qual equipamento fará essa atividade; a Retirada, que deve decidir qual placa deve ser retirar, pois a cada solicitação pode ser atendida por um conjunto de placas, e qual equipamento fará essa atividade; e a Reorganização [Lehnfeld and Knust, 2014].

Na literatura encontramos trabalhos tratando desse problema de forma separada (apenas o Recebimento, ou Retirada ou Reorganização), ou em conjunto. A seguir destacamos alguns trabalhos da literatura tratando especificamente de pátios de placa de aço. Em [Tang and Ren, 2010] os autores desenvolveram a abordagem de programação dinâmica e uma heurística segmentada para resolver o problema de reorganização de pilhas de placas (SSS - *Slab Stack Shuffling*), em pequena escala e em escala real. Em [Shi and Liu, 2021] foi desenvolvido um algoritmo de busca de vizinhança em grande escala (VLSN - *Very Large-Scale Neighborhood Search*) para resolver iterativamente o problema de programação de laminação a quente de aço considerando o SSS. No trabalho de [Rajabi et al., 2022] foi considerado duas variantes diferentes do problema SSS, sendo proposto um modelo de programação inteira para cada variante. Tratando apenas da retirada de placas, o trabalho de [Zhao et al., 2020] investiga a otimização da programação dos guindastes de carga dupla. Para isso, uma heurística de duas fases foi desenvolvida para minimizar o tempo de trabalho. Em [Bruno et al., 2023] propuseram um modelo matemático bi-objetivo visando minimizar o número de movimentações na reorganização de placas. Propondo uma heurística baseada na busca de vizinhança variável (VNS - *Variable Neighborhood Search*) o trabalho de [Botelho et al., 2021] investiga a otimização do mesmo pátio tratado nesse trabalho, porém considerando um cenário estático. Diferentes dos trabalhos mencionados, considerando incerteza na tomada de decisão, o trabalho de [Ries et al., 2014] propõem o uso de Lógica Fuzzy na regras de logística de um pátio de empilhamento, porém tratando de containers.

Nesse trabalho propomos a investigação da otimização da logística de um pátio de placas de aço, como tomadas de decisão em tempo real via um *Sistema Baseado em Regras Fuzzy* (SBRF). Dessa forma, representamos os qualificadores de entrada das operações como variáveis linguísticas, que são as entradas do SBRF. Embora a otimização de pátios com estocagem por empilhamento seja um problema muito investigado na literatura, poucos tratam das decisões em tempo

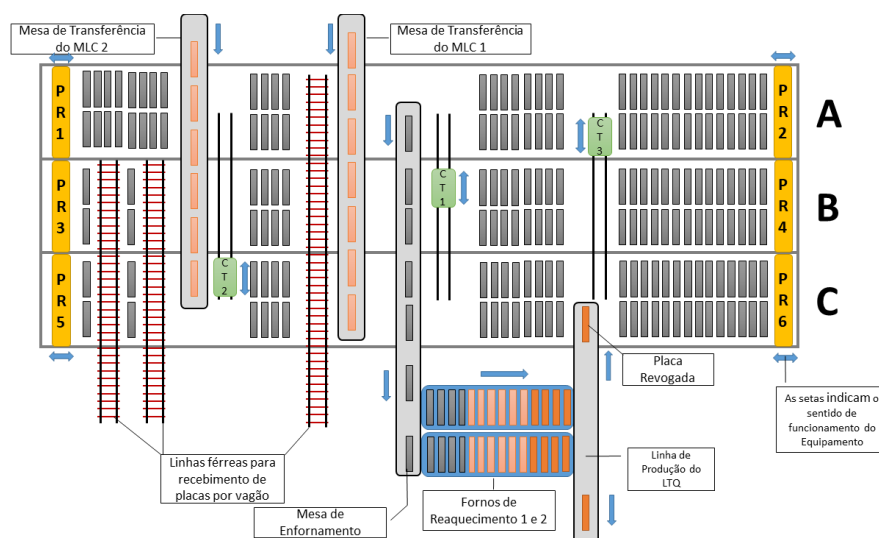
real. Como mencionado, a modelagem comumente encontrada considera uma otimização estática em um horizonte de tempo. Tratando decisões em tempo real, as soluções encontradas propõem regra de decisão baseadas no estado atual do pátio [Almeida et al., 2015]. Contudo, na prática, dada a dinâmica de intercorrências nesses ambientes, boa parte das decisões são tomadas pelos operadores do pátio. Assim, inspirado em [Ries et al., 2014] que utiliza lógica Fuzzy para a logística de empilhamento de containers, nesse trabalho é proposto a implementação de Lógica Fuzzy para a criação de regras de logística de um pátio de placas de aço. Para análise das regras fuzzy proposta será utilizado o simulador 3S-SIM do pátio de placas [Almeida et al., 2020], onde as regras aqui propostas serão comparadas com as regras usadas pela empresa gestora do pátio investigado.

Este artigo está organizado da seguinte maneira: a Seção 2 apresenta a descrição do problema de alocação de placas em um pátio, além de um breve referencial teórico sobre controladores fuzzy. A Seção 3 descreve o Simulador 3S-Sim, utilizado para avaliar as tomadas de decisão. Na Seção 4, é detalhada a proposta deste trabalho. A Seção 5 expõe os experimentos realizados e seus resultados. Por fim, a Seção 6 oferece as considerações finais sobre o trabalho.

2. Descrição do Problema

O pátio de placas analisado nesse trabalho pertence a uma siderurgia real e é dividido em três subpátios (A, B e C), cada um com capacidade para cerca de 100 pilhas de placas. Para movimentar as placas, são utilizadas Pontes Rolantes e Carros de Transferência. As Pontes Rolantes têm capacidade para até 66 toneladas, podendo movimentar até 3 placas por vez dentro do subpátio. Os Carros de Transferência movem placas entre os subpátios, podendo transportar até 4 placas por vez. Esse pátio está ilustrado na Figura 1.

Figura 1: Pátio Placas de aço considerado, [Rodrigues, 2020]



As placas entram no pátio por Mesas de Recebimento, vindas das máquinas de lingotamento ou de vagões ferroviários. A saída das placas é feita pela Mesa de Enfornamento, direcionando-as para os Fornos de Reaquecimento. Após o reaquecimento, as placas são movimentadas lateralmente dentro do forno e, se necessário, podem ser devolvidas ao pátio pela Mesa de Revogamento. O desafio do pátio é gerenciar as movimentações das Pontes e Carros de Transferência para atender às demandas dos Fornos de Reaquecimento e receber novas placas, com eficiência e dentro dos prazos estipulados. Devido à natureza dinâmica do processo e à variedade de cenários possíveis,

métodos estáticos de otimização são impraticáveis, sendo sugerido o uso de métodos baseados em regras e simulação para determinar as melhores práticas de movimentação das placas.

Este trabalho propõe uma abordagem para o planejamento de um Pátio de Placas, incluindo recebimento, despacho e organização das placas, por meio de um controlador fuzzy. Para isso, estabelecemos um conjunto de regras para a tomada de decisão em cada atividade prevista em uma operação normal. As atividades pré-definidas incluem a entrada da placa no pátio, a escolha do subpátio para onde a placa deve ser encaminhada, a seleção da ponte rolante que irá manusear a placa e a determinação do endereço (pilha) onde a placa será alocada. Além disso, outras características são consideradas nessa tomada de decisão, tais como a ocupação do pátio, a proximidade do enformamento, a altura das pilhas, as instruções relativas às placas e a carga das pontes rolantes.

2.1. Sistemas Baseados em Regras Fuzzy

A Teoria dos Conjuntos Fuzzy possibilita que a subjetividade do raciocínio humano possam ser representadas matematicamente [Pedrycz and Gomide, 2007]. Com isso, é possível modelar e controlar sistemas complexos com incertezas, lidar com informações vagas e imprecisas na tomada de decisão e representar conhecimento impreciso em sistemas especialistas. Nesta última categoria, podemos citar os *Sistemas Baseados em Regras Fuzzy* (SBRF) [Nguyen et al., 1995], amplamente utilizados em processos de tomada de decisão e aplicações industriais. Como parte fundamental dos controladores fuzzy, ao trabalhar com um SBRF é preciso definir o método de inferência aplicado. Takagi-Sugeno [Takagi and Sugeno, 1985] e Mamdani [Mamdani and Assilian, 1975] são os mais comumente estudados e aplicados ao longo das últimas décadas.

São diversos os trabalhos na literatura que fazem uso da lógica fuzzy nos cenários portuários para alocação de contêineres. Em Ries et al. [2014], o problema de alocação de espaço de armazenamento em um porto marítimo terminal é tratado. Soluções de problemas em cenários portuários via ferramentas da lógica fuzzy também são fornecidas em Lujan and et.al. [2021], Malyszko [2022], Liu et al. [2021], Rashed et al. [2021] e Li et al. [2021]. No âmbito dos processos de tomada de decisão, destacamos [Abdullah and Abdolrazzagah-Nezhad, 2014], onde o problema de *Job-Shop Scheduling Problem* (JSSP) via Lógica Fuzzy é estudado por meio de um *review* de oito modelos já desenvolvidos. Para estes modelos as variáveis de decisão e restrições dos modelos difusos são as mesmas. No entanto, as incertezas (tempo de processamento e data de vencimento), o critério usado para aproximar números difusos e as funções objetivo criam diferenças entre eles.

Abdullah and Abdolrazzagah-Nezhad [2014] propuseram uma caracterização das metodologias que classificam os problemas de programação fuzzy em JSSP em três categorias: métodos exatos, abordagens heurísticas e algoritmos meta-heurísticos. Os métodos exatos são baseados em modelos matemáticos precisos e fornecem soluções ótimas, mas podem ser computacionalmente intensivos e impraticáveis para problemas de grande escala. As abordagens heurísticas são baseadas em regras práticas e heurísticas para encontrar soluções de boa qualidade em um tempo razoável, mas não garantem a otimalidade. Os algoritmos meta-heurísticos são técnicas de busca baseadas em inteligência artificial que combinam elementos de métodos exatos e heurísticas para encontrar soluções de alta qualidade em um tempo razoável.

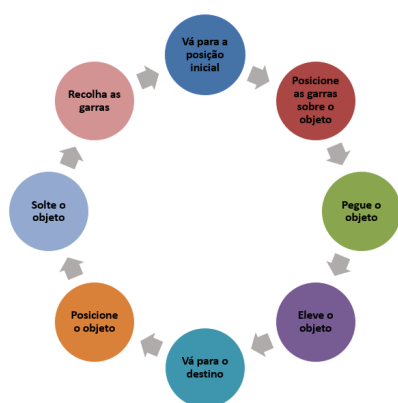
Neste artigo, analisamos o problema do pátio de placas ao descrevê-lo como um SBRF. Para isso, consideramos o processo de decisão de alocação de placas definido por um controlador fuzzy com inferência de Mamdani. A abordagem do problema de SSP em pátio de placas via lógica fuzzy consiste na principal contribuição deste trabalho para a literatura.

3. Simulador 3S-Sim

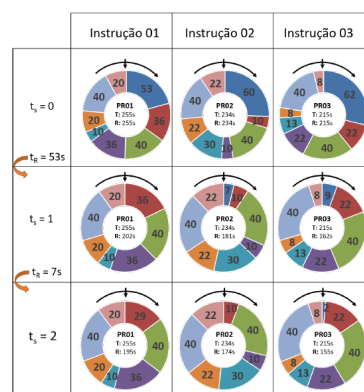
Aqui descrevemos a parte técnica do simulador de pátio de empilhamento, que foi usado nesse trabalho para avaliar a tomada de decisão. O 3S-SIM é um simulador para pátios de placas

de siderurgia que acompanha a movimentação de produtos empilhados [Almeida et al., 2015]. Utilizando o modelo de simulação por eventos discretos, o 3S-SIM permite a modelagem do pátio de placas, incluindo a representação dos equipamentos de movimentação, as regras de armazenamento e as interações entre os elementos do sistema. Uma característica importante do 3S-SIM é a possibilidade de simular diferentes estratégias logísticas, permitindo a análise do desempenho do pátio em condições variadas. Com a utilização desse *framework*, foi possível avaliar o impacto de mudanças nas políticas de movimentação.

Os estados do simulador 3S-SIM representam as diferentes etapas e ações realizadas pelos equipamentos de movimentação de carga, como pontes rolantes e carros de transferência, durante a execução das movimentações de placas de aço no pátio. Esses estados indicam o progresso das operações logísticas, desde a captura e movimentação das placas até o empilhamento e desempilhamento. O ciclo de execução dos estados permite simular o fluxo de trabalho no pátio, facilitando a visualização e análise do processo de movimentação de placas. A Figura 2(a) apresenta as 8 etapas do ciclo de uma atividade da ponte rolante.



(a) Ciclo de estados do simulador.



(b) Controle de Avanço do Tempo Real de Simulação

Figura 2: Representação do Simulador [Rodrigues, 2020].

As movimentações no pátio são controladas por instruções de movimentações. Cada instrução é essencial para coordenar as operações logísticas, garantindo a eficiência e a organização no armazenamento e movimentação das placas. As instruções contêm informações, como a origem e o destino da movimentação, a prioridade da ação e as placas envolvidas no processo. Essas instruções são classificadas de acordo com o tipo de movimento a ser realizado, sendo os principais tipos: **Enfornamento; Organização; e Recebimento**.

Cada tipo de instrução possui uma prioridade de execução, determinando a ordem em que as movimentações devem ser realizadas. O simulador 3S-SIM calcula o tempo necessário para a execução de cada instrução com base em fatores como a distância entre os pontos de origem e destino, a velocidade dos equipamentos e a carga de trabalho existente. A Figura 2(a) ilustra esse mecanismo de controle temporal. O eixo horizontal representa o tempo discreto de simulação (t_s), enquanto o eixo vertical representa o tempo real (t_r) necessário para a execução de cada tarefa.

A cada avanço do tempo de simulação, o 3S-SIM verifica qual a tarefa atual com o menor tempo real restante e atualiza o tempo simulado de acordo. Dessa forma, a simulação avança considerando a duração real de cada etapa da movimentação, como deslocamento, pegar, elevação, transporte e posicionamento do objeto. À medida que as etapas das tarefas são concluídas, seus

tempos reais são zerados e não aparecem mais no próximo *timestep* de simulação. Esse controle detalhado do tempo permite que o 3S-SIM represente de maneira realista a dinâmica de execução das movimentações no pátio de placas. A Figura 2(b) ilustra a atividade de 3 pontes rolantes (PR1, PR2 e PR3) em 3 *timestep* ($t = 0, 1, 2$).

4. Proposta

Para comparar o método proposto nesse trabalho, consideraremos as regras de movimentação de placas utilizados pela empresa investigada. Aqui chamaremos tais regras de movimentação de Método Padrão (MP). O MP pode ser encontrado em [Rodrigues, 2020].

4.1. Método Padrão - MP

O MP foi elaborado visando otimizar o número de movimentações realizadas pelas Pontes Rolantes (PRs), por meio do agrupamento de materiais com características semelhantes. Além disso, são consideradas regras para evitar sobrecarregar os subpátios que estejam operando em momentos críticos de enformamento. Para alocação de uma placa é usado o conceito de Custo de Alocação (CA) das PRs de cada subpátio, tentando evitar designar novas placas a subpátios com alta demanda (Equação 1). Além disso, também é considerado o Custo Médio de Alocação de Pátio (CMP) para todas as PRs (Equação 2).

$$CAPR = \sum_{i=0}^3 (4 - i) \times I(i) \quad (1)$$

$$CMP = \frac{1}{n} \times \sum_n CAPR_n \quad (2)$$

Sendo:

- i : Grau de prioridade da instrução, sendo que quanto menor o valor de i , maior é a prioridade de execução dessa instrução.
- $\sum I(i)$: Somatório das instruções com prioridade i .

Adicionalmente o MP introduz o conceito de **Peso de Enformamento** (pe) para cada subpátio (p) (Equação 3).

$$pe(p) = 1 + \frac{1}{(sq - up)} \quad (3)$$

- sq : **Sequência de Próximas Placas**, definida com $sq = \frac{p.NextSeq2 + p.NextSeq1}{2}$, onde:
 $p.NextSeq1$: Sequência de enformamento da próxima placa que está no subpátio p .
 $p.NextSeq2$: Enformamento da placa seguinte à $p.NextSeq1$ e que está no subpátio p .
- up : **Última Placa Enfornada**.

A implementação da Equação (3) eleva o custo de alocação do equipamento para o subpátio que contém as próximas placas a serem enfornadas em até 66%, conforme determinado pela Equação (2). Esse aumento significativo no custo de alocação diminui a probabilidade de que esse subpátio obtenha a maior pontuação e seja selecionado para receber a nova placa.

O subpátio com a maior pontuação (calculada pela Equação 4) será escolhido para alocar a nova placa. Por fim, a busca pelo melhor endereço específico dentro do subpátio selecionado é feita priorizando pilhas que tenham o mesmo tipo de placas e endereços mais próximos.

$$R_p = C_{eq} \times (q_1 \times \sum PL_i + q_2 \times \sum PS_i + q_3 \times \sum E_p) - CMP_R \quad (4)$$

- R_p : Ranking do subpátio, onde é escolhido o subpátio com o maior R_p .
- C_{eq} : Coeficiente usado para equiparar a escala com a segunda parte da equação.
- $\sum PL_i$: Total de pilha com, todas as placas iguais e acima da média de altura das pilhas localizadas no subpátio.
- $\sum PS_i$: Total pilhas com placas variadas, mas com a placa do topo igual à placa a ser alocada.
- $\sum E_p$: Total de endereços disponíveis no subpátio p .
- CMP: Custo de alocação médio das PRs do subpátio p (Equação 2).
- q_1, q_2, q_3 : Parâmetros de calibração. O parâmetro q_1 favorece o conceito de empilhamento em “pilhas com placas iguais”, q_2 influencia a escolha de “pilhas com placas diferentes”, e parâmetro q_3 busca regular o recebimento no subpátio com mais endereços vazios. Como no trabalho de [Rodrigues, 2020], aqui usaremos $q_1 = q_2 = q_3 = 1$.

Dessa forma, o Método Padrão tenta evitar a sobrecarga de subpátios operando em momentos críticos, ao mesmo tempo em que mantém o conceito de agrupar placas similares para otimizar as movimentações.

4.2. Pátio de placas como um SBRF

Durante a operação do pátio de placas, os operadores têm a prerrogativa de não seguir as orientações do método definido para a gestão. Essa premissa se dá devido às situações não previstas no agendamento da operação. Assim, como as regras de gestão são rígidas, não raramente os operadores ignoram tais regras e utilização o conhecimento tácito para as tomadas de decisão. Buscando modelar o raciocínio dos operadores, propomos nesse trabalho o desenvolvimento de um controlador fuzzy para as decisões de gestão do pátio.

Nessa proposta realizaremos a fuzzificação do Peso de Enfornamento (pe) do método MP, (Equação 3). Para isso apresentaremos as funções de pertinências das variáveis de entrada de pe , sendo a Sequência de Próximas Placas (sq) e a Última Placa Enfornada (up). A definição dessas funções será a essência do controlador fuzzy, pois permitirão a transição das regras rígidas do MP para variáveis linguísticas que representem as decisões dos operadores de maneira mais flexível. A título de comparação, nos referiremos à abordagem via SBRF como *Método Fuzzy* (MF).

As variáveis de entrada (sq e up) são categorizadas em cinco categorias: *Baixa, Média Baixa, Média, Média Alta e Alta*, cada uma representada por um conjunto fuzzy triangular. Além disso, as funções de pertinência das variáveis linguísticas são ajustadas um fator α , que permite a calibração dos conjuntos em conjuntos base distintos, como será mostrado nos experimentos numéricos. O método de inferência considerado será o de Mandani.

As expressões usadas para definir os conjuntos fuzzy seguem um padrão, onde as expressões que aparecem dentro da função min possuem a mesma estrutura lógica:

Parte Interna: As expressões $\frac{a\alpha - x}{b\alpha}$ ou $\frac{x - c\alpha}{d\alpha}$ define a inclinação e interceptação da função, ajustando a pertinência conforme o valor de x e o parâmetro α . Esses parâmetros permitem a calibração das funções de pertinência conforme necessário. Nas expressões apresentadas a seguir, 5 à 17, os valores de a, b, c e d foram apresentados após um ajuste prévio para garantir a factibilidade do modelo. Enquanto o ajuste de α , usado na melhoria dos resultados, é apresentado na seção de experimentos.

Limitação Superior: A função min garante que a pertinência não ultrapasse 1, assegurando que o valor máximo de pertencimento seja respeitado.

Limitação Inferior: A função max assegura que a pertinência não seja menor que 0.

Essas equações são usadas para avaliar o grau de pertinência de um valor x em categorias fuzzy específicas, permitindo uma análise flexível e ajustável de dados incertos ou imprecisos. A seguir apresentamos as expressões que definem o modelo fuzzy.

Sequência de Próximas Placas (sq):

$$u_{baixa}(sq, \alpha) = \max \left(\min \left(\frac{60\alpha - sq}{60\alpha}, 1 \right), 0 \right) \quad (5)$$

$$u_{media_baixa}(sq, \alpha) = \max \left(\min \left(\frac{sq - 40\alpha}{20\alpha}, \frac{80\alpha - sq}{20\alpha} \right), 0 \right) \quad (6)$$

$$u_{media}(sq, \alpha) = \max \left(\min \left(\frac{sq - 70\alpha}{30\alpha}, \frac{130\alpha - sq}{30\alpha} \right), 0 \right) \quad (7)$$

$$u_{media_alta}(sq, \alpha) = \max \left(\min \left(\frac{sq - 120\alpha}{35\alpha}, \frac{190\alpha - sq}{35\alpha} \right), 0 \right) \quad (8)$$

$$u_{alta}(sq, \alpha) = \max \left(\min \left(\frac{sq - 180\alpha}{70\alpha}, 1 \right), 0 \right) \quad (9)$$

Última Placa Enfornada (up):

$$u_{baixa}(up, \alpha) = \max \left(\min \left(\frac{50\alpha - up}{50\alpha}, 1 \right), 0 \right) \quad (10)$$

$$u_{media_baixa}(up, \alpha) = \max \left(\min \left(\frac{up - 20\alpha}{30\alpha}, \frac{80\alpha - up}{30\alpha} \right), 0 \right) \quad (11)$$

$$u_{media}(up, \alpha) = \max \left(\min \left(\frac{up - 60\alpha}{40\alpha}, \frac{140\alpha - up}{40\alpha} \right), 0 \right) \quad (12)$$

$$u_{media_alta}(up, \alpha) = \max \left(\min \left(\frac{up - 130\alpha}{35\alpha}, \frac{200\alpha - up}{35\alpha} \right), 0 \right) \quad (13)$$

$$u_{alta}(up, \alpha) = \max \left(\min \left(\frac{up - 190\alpha}{60\alpha}, 1 \right), 0 \right) \quad (14)$$

O Peso de Enfornamento (pe), é categorizado em três variáveis linguísticas: Alta, Média e Baixa, como podemos ver a seguir.

Peso de Enfornamento (pe):

$$u_{baixo}(pe, \alpha) = \max \left(\min \left(\frac{1.5\alpha - pe}{0.75\alpha}, 1 \right), 0 \right) \quad (15)$$

$$u_{medio}(pe, \alpha) = \max \left(\min \left(\frac{pe - 1\alpha}{0.5\alpha}, \frac{2\alpha - pe}{0.5\alpha} \right), 0 \right) \quad (16)$$

$$u_{alto}(pe, \alpha) = \max \left(\min \left(\frac{pe - 1.75\alpha}{0.25\alpha}, 1 \right), 0 \right) \quad (17)$$

A Tabela 1 apresenta as regras fuzzy definidas para o controlador fuzzy. Essas regras são formuladas com base nas variáveis de entradas (sq) e (up), determinando a saída (pe). Cada regra estabelece uma relação lógica entre as entradas e a saída.

Regra #	<i>sq</i>	<i>up</i>	<i>pe</i>
1	Baixa	Baixa	Baixo
2	Média Baixa	Média Baixa	Baixo
3	Média	Média	Médio
4	Média Alta	Média Alta	Médio
5	Alta	Alta	Alto
6	Baixa	Média	Baixo
7	Média Baixa	Alta	Médio
8	Média Alta	Baixa	Médio
9	Baixa	Alta	Médio
10	Média	Baixa	Médio

Tabela 1: Base de Regras para o problema do Pátio de Placas, com antecedentes dados pela Sequência de Próximas Placas (*sq*), Última Placa Enfornada (*up*), e consequente dado pelo Peso de Enfornamento (*pe*).

5. Experimentos

Os experimentos realizados foram divididos, a fim de comparar o método (MP) com o Método Fuzzy (MF) proposto. Nos experimentos consideramos dois estados do pátio, os cenários C01 e C02, onde foram enfornadas 100 placas em cada cenário. No Cenário C02 todas as placas da Chance de Laminação estavam sequenciadas, ou seja, posicionadas nas pilhas de modo que, ao serem movidas para a mesa de enfornamento, não seria necessário realizar movimentações de desbloqueio. No Cenários C01 apenas as 60 primeiras placas estão sequenciadas. Assim, além de comparar os métodos de decisão, a comparação entre os cenários analisa o impacto do sequenciamento das placas na produção do LTQ. Cabe destacar que a empresa analisada atualmente não trabalha com métodos para sequenciamento das placas, como um processo de decisão totalmente dinâmico. Utilizamos o *Python* para a programação do SBRF via biblioteca *skfuzzy*.

Como primeira etapa do processo de avaliação do Método MF, foi necessário o ajuste das funções de pertinência das variáveis *sq*, *up* e *pe*, na Expressões 5 - 17. Esse experimentos de ajustes foram realizados utilizando $\alpha = 1$. Após a calibração das funções de pertinência, nos experimentos de avaliação do MF ajustamos parâmetros variando o fator α , buscando a melhor combinação dos resultados. Na Tabela 2 são apresentados os resultados dos experimentos, com os métodos M03 e MF, para diferentes valores de α . A tabela possui as seguintes colunas: Cenário, (C01 e C02)); Id, com a identificação da instância; MD, indicando o método utilizado no experimento; α , com o fator de variação no conjunto de pertinência; Tempo Real, que é o tempo obtido pelo 3S-SIM, para o atendimento de todas as demandas. Aqui usaremos o Tempo Real como parte da função de avaliação dos resultados dos métodos; MLC, que indica a quantidade de placas recebidas das MLCs. Este é a segunda parte da avaliação dos métodos, pois quanto mais placas forem para a mesa de enfornamento, melhor; Mov., indicando a quantidade de movimentações realizadas pelas de ponte; Med. Enf., indica o intervalo médio de enfornamento entre placas; e σ , com o desvio padrão do intervalo de enfornamento.

Como primeira observação destacamos que as instâncias 2, 14, 15 e 21 não obtiveram resultados, isto é, o método MF se tornou ineficaz nesses cenários. No cenário C01, as instâncias 2 e 14 com $\alpha < 0.92$ e $\alpha > 3.3$, respectivamente, os valores *crisp* não puderam ser calculados devido à falta de cobertura das entradas, insuficiência de regras ou valores de entrada fora do alcance dos conjuntos de pertinência. O mesmo ocorre para o cenário C02, instâncias 16 e 21, com $\alpha < 0.98$ e $\alpha > 1.3$. Esse comportamento sugere que a escolha adequada do fator de variação é crucial para garantir a viabilidade e eficiência do método proposto.

Para o cenário C01, observou-se que em algumas instâncias o MF (por exemplo, as instâncias 5 e 6) apresentou resultados muito próximos ao MP (Instância 1), em termos de quanti-

Cenário	Id	MD	α	Tempo Real	MLC	Mov.	Med. Enf	σ
C01	1	MP	-	03:43:05	96	227	00:02:13	00:00:27
	2	MF	0.91	-	-	-	-	-
	3	MF	0.92	03:44:20	95	226	00:02:14	00:00:34
	4	MF	0.95	03:44:20	95	226	00:02:14	00:00:34
	5	MF	0.98	03:44:18	95	226	00:02:14	00:00:33
	6	MF	1	03:44:18	95	226	00:02:14	00:00:33
	7	MF	1.2	03:41:52	96	227	00:02:13	00:00:25
	8	MF	1.5	03:39:30	91	222	00:02:11	00:00:22
	9	MF	1.8	03:39:30	91	222	00:02:11	00:00:22
	10	MF	2	03:39:30	90	221	00:02:11	00:00:22
	11	MF	2.5	03:38:19	97	228	00:02:10	00:00:20
	12	MF	3	03:38:19	97	228	00:02:10	00:00:20
	13	MF	3.3	03:38:19	97	228	00:02:10	00:00:20
	14	MF	3.4	-	-	-	-	-
C02	15	MP	-	03:46:12	86	186	00:02:15	00:00:24
	16	MF	0.97	-	-	-	-	-
	17	MF	0.98	03:46:12	86	186	00:02:15	00:00:24
	18	MF	1	03:46:12	86	186	00:02:15	00:00:24
	19	MF	1.2	03:46:12	86	186	00:02:15	00:00:24
	20	MF	1.3	03:46:12	86	186	00:02:15	00:00:24
	21	MF	1.4	-	-	-	-	-

Tabela 2: Resultados da Simulação, onde MP denota o Método Padrão, e MF denota o Método Fuzzy.

dade de placas recebidas, movimentações de ponte realizadas e intervalo médio de enformamento. Esse resultado indica que, para alguns conjuntos de pertinência fuzzy, o MF foi capaz de obter desempenho similares ao método padrão (M03). Porém, nesse cenário, para valores de α entre 2.5 e 3.3 (instâncias 11, 12 e 13), o MF demonstrou um desempenho superior ao MP, onde a diferença do Tempo Real foi de aproximadamente 6 minutos, movimentando 1 placa a mais que o método tradicional. Para avaliar os resultados é necessário saber que, na indústria investigada, o ritmo de laminação exige o enformamento de uma placa a cada 2 minutos. Assim, analisando um horizonte de 24 horas (1440 minutos) e calcularmos uma taxa de movimentação para cada método por número de placas movimentadas, teremos uma diferença de 37 placas por dia. Esse resultado também pode ser percebido pelo tempo médio de enformamento, onde o MF conseguiu reduzir esse tempo em 3 segundos por placa. Adicionalmente, ainda cabe destacar a variância do tempo de enformamento, onde os métodos MF e M03 obtiveram 20 e 27 segundos, respectivamente, uma menor variância significa que o MF mantém o trabalho das pontes rolantes e mesa de enformamento mais estável.

Em relação ao cenário C02, com todas as placas sequenciada, excluindo as configurações infactíveis do MF, todos os experimentos obtiveram o mesmo resultado, como esperado. Pois, nesse cenário não há tomada decisões relevantes, bastando retirar as placas em ordem. Destacamos que, como dito, esse cenário não é realista, sendo usado apenas para avaliação do método MF. Para uma avaliação realista seria necessário investigar o método usado para o sequenciamentos das placas, que está fora do escopo desse trabalho.

Em resumo, os resultados experimentais demonstraram que o Método de Fuzzificação (MF) proposto, com as devidas calibrações, superou o desempenho do Método Padrão (MP) padrão. No entanto, foram identificados valores de α que resultaram na inviabilidade do MF, indicando que uma análise desse parâmetro é fundamento para a viabilidade dessa proposta de fuzzificação.

6. Conclusões e Trabalhos Futuros

O gerenciamento eficiente das movimentações de placas no pátio é essencial para o bom desempenho da produção siderúrgica. Gerenciar as demandas de enformamento, recebimento e

sequenciamento de placas é uma tarefa complexa que requer soluções otimizadas para minimizar os tempos de movimentação, mantendo o ritmo de produção da laminação.

Dado o tamanho do pátio e a dinamicidade dos eventos, métodos convencionais de otimização estática são inviáveis, demandando grande poder computacional para cada decisão. Nesse contexto, métodos dinâmicos baseados em regras de logística inteligentes utilizando o conhecimento tácito dos operadores são mais comuns em aplicações reais. Considerando tal cenário nesse trabalho é proposto um conjunto de regras de logística baseadas em lógica fuzzy.

A abordagem fuzzy desenvolvida, incorporada ao simulador 3S-SIM, permitiu levar em consideração incertezas operacionais e variáveis qualitativas na tomada de decisões para a alocação e retirada de placas do pátio. As regras fuzzy definidas mapeiam as condições do pátio para as ações de movimentação utilizando graus de pertinência, sendo uma alternativa aos cálculos exatos utilizados no método padrão da empresa investigada.

Para avaliar o método proposto foi utilizado um simulador de movimentações do pátio de placas, o 3S-SIM. Os resultados numéricos demonstraram método MF precisa ser calibrado para o uso apropriado. Pois, uma configuração ruim nas funções de pertinência da lógica fuzzy pode inviabilizar o uso. Por outro lado, a calibração apropriada demonstrou que o método MF pode ser mais eficiente do que o método padrão, obtido pelo conhecimento dos operadores, usado pela empresa. Na comparação constatou-se que o método proposto seria capaz de enfiar aproximadamente 37 placas a mais do que o método padrão, em um dia de atividade.

Para trabalhos futuros buscaremos expandir o escopo desse trabalho para investigar a tarefa de pré-sequenciamento da demanda de placas. Para isso deverá ser proposto um novo método, também baseado em lógica fuzzy, para criar regras de sequenciamento. Adicionalmente, ainda pode ser investigado a integração da lógica fuzzy com outros métodos, gerando métodos híbridos.

7. Agradecimento

Os autores agradecem ao apoio da FAPES e CAPES (processo 2021-2S6CD, nº FAPES 132/2021) por meio do PDPG (Programa de Desenvolvimento da Pós-Graduação, Parcerias Estratégicas nos Estados).

Referências

- Abdullah, S. and Abdolrazzagh-Nezhad, M. (2014). Fuzzy job-shop scheduling problems: A review. *Information Sciences*, 278:380–407. ISSN 0020-0255.
- Almeida, G., Botelho, M., Breder, G., Bianchi, G., and Resendo, L. (2015). Operational rules and simulator to dynamic slab stack shuffling problem. In *45th International Conference on Computers & Industrial Engineering 2015 (CIE45)*.
- Almeida, G., Resendo, L., and Rodrigues, M. (2020). 3S-SIM. Certificado de Registro de Programa de Computador: BR512021002853-8.
- Botelho, M. B., Rodrigues, M., and Resendo, L. (2021). VNS para otimização da logística de movimentações em um pátio de placas de aço. In *Anais do SBPO*.
- Bruno, G., Cavola, M., Diglio, A., and Piccolo, C. (2023). A unifying framework and a mathematical model for the slab stack shuffling problem. *International Journal of Industrial Engineering and Computational*, 14(1):17–32.
- Ge, P., Zhao, R., Sun, D., and Dong, Y. (2022). Integrated optimisation of storage and pre-marshalling moves in a slab warehouse. *International Journal of Production Research*, 60(6).
- Lehnfeld, J. and Knust, S. (2014). Loading, unloading and premarshalling of stacks in storage areas: Survey and classification. *European Journal of Operational Research*, 239(2):297–312.

- Li, J., Zhou, C., Wu, K., and Bai, R. (2021). A fuzzy-based heuristic algorithm for online outbound container stacking problem with uncertain weight information. In *2021 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)*, p. 1–7.
- Liu, D., Shi, G., and Kang, Z. (2021). Fuzzy scheduling problem of vessels in one-way waterway. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(10). ISSN 2077-1312.
- Lujan, E. and et.al. (2021). A fuzzy optimization model for the berth allocation problem and quay crane allocation problem (bap + qcap) with n quays. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(2). ISSN 2077-1312.
- Malyszko, M. (2022). Fuzzy logic in selection of maritime search and rescue units. *Applied Sciences*, 12(1). ISSN 2076-3417. URL <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/1/21>.
- Mamdani, E. H. and Assilian, S. (1975). An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International journal of man-machine studies*, 7(1):1–13.
- Nguyen, H. T., Sugeno, M., Tong, R. M., and Yager, R. R. (1995). *Theoretical aspects of fuzzy control*. John Wiley & Sons, Inc.
- Pedrycz, W. and Gomide, F. (2007). *Fuzzy systems engineering: toward human-centric computing*. John Wiley & Sons.
- Rajabi, P., Moslehi, G., and Reisi-Nafchi, M. (2022). New integer programming models for slab stack shuffling problems. *Applied Mathematical Modelling*, 109:775–796. ISSN 0307-904X.
- Rashed, D., Eltawil, A., and Gheith, M. (2021). A fuzzy logic-based algorithm to solve the slot planning problem in container vessels. *Logistics*, 5(4).
- Ries, J., González-Ramírez, R. G., and Miranda, P. (2014). A fuzzy logic model for the container stacking problem at container terminals. In *Computational Logistics*. Springer International Publishing. ISBN 978-3-319-11421-7.
- Rodrigues, M. (2020). *Atualização do simulador 3S-SIM para análise da logística de movimentação em um pátio com empilhamento de placas de aço*. Master's degree, IFES.
- Shi, Y. and Liu, S. (2021). Very large-scale neighborhood search for steel hot rolling scheduling problem with slab stack shuffling considerations. *IEEE Access*, 9:47856–47863.
- Takagi, T. and Sugeno, M. (1985). Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, (1):116–132.
- Tang, L. and Ren, H. (2010). Modelling and a segmented dynamic programming-based heuristic approach for the slab stack shuffling problem. *Computers Operations Research*, 37(2):368–375.
- Zhao, G., Liu, J., Tang, L., Zhao, R., and Dong, Y. (2020). Model and heuristic solutions for the multiple double-load crane scheduling problem in slab yards. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 17(3):1307–1319.