LII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional
João Pessoa - PB, 3 a 5 de novembro de 2020

Framework Para Simulação em Pátios Com Empilhamento de Produto: Um Estudo de Caso em Pátio de Placas

Marcel Magno Dias Rodrigues
Instituto Federal do Espírito Santo - Serra
ES-010 Km-6,5 - Manguinhos, Serra - ES, 29173-087
mmdr16@gmail.com

Leandro Colombi Resendo
Instituto Federal do Espírito Santo - Serra
ES-010 Km-6,5 - Manguinhos, Serra - ES, 29173-087
leandro@ifes.edu.br

RESUMO

Este trabalho propõe a criação de um *framework* de simulação para pátios com empilhamento de produtos, com o objetivo de permitir a realização de análise de desempenho de movimentações de equipamentos. Desenvolvido baseado no modelo de simulação por eventos discretos, o simulador realiza o cálculo aproximado do tempo que cada equipamento necessita para realizar uma instrução de movimentação determinada pelo método de decisão. Simulando cronologicamente os eventos de entrada, organização e saída dos itens no local de armazenamento, o simulador fornece ao final da execução do cenário de simulação o número de movimentações realizadas e o tempo total para a execução do cenário. Afim de validar o *framework*, foi realizado um estudo de caso em um pátio de placas de uma usina siderúrgica, onde foi possível verificar o correto funcionamento do simulador e o impacto da configuração do método de decisão no desempenho das movimentações realizadas.

PALAVRAS CHAVE. Framework de Simulação, Logística, Armazenamento Por Pilhas

Tópicos (SIM - Simulação, POI - PO na Indústria)

ABSTRACT

This work proposes a simulation framework for a yard with stacking products, in order to allow performance analysis of equipment movements. The Development was based on the discrete event simulation model to calculate the expected time each equipment needs to perform a movement instruction determined by the decision method. Chronologically simulating the events of entry, organization and exit of items in the storage location, in the end of a simulation scenario execution, the simulator provides the movements amount and the elapsed time of the process. To validate the simulation structure,a case study was conducted in a slab yard of a steel mill, where it was possible to verify the correct functioning make the simulator and the impact of the configuration of the decision method on the performance of the movements performed.

KEYWORDS. Simulation Framework. Logistic. Stack Storage.

Paper topics (SIM - Simulation, ORI – OR in Industry)

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o **Galoá** proceedings

1. Introdução

Na indústria, de maneira geral, o processo de armazenagem está presente desde o recebimento da matéria prima até o momento em que o produto final é despachado para o cliente. Este processo pode ser subdividido em etapas como recebimento, estocagem e despacho. Sendo comum ainda ter estocagem do produto inacabado entre as etapas de produção. Assim, a logística e gerenciamento de estocagem é parte importante do processo produtivo [Gu et al., 2007].

Para cada tipo de material existe uma maneira mais adequada para o seu armazenamento. Por exemplo: silos são utilizados para o armazenamento de grãos; armazenamento em prateleiras é aplicável para produtos frágeis, que possuem dimensões distintas e são relativamente leves; o empilhamento é utilizado para produtos que apresentam tamanhos parecidos e que suportam o peso de outros sobre si, como *containers*, placas de aço e blocos de granito.

Neste artigo será abordado sistemas de armazenagem por empilhamento. Neste cenário os itens são empilhados uns sobre os outros, formando pilhas que se distribuem no local de armazenamento. Cada pilha possui um determinado endereço que permite sua localização em um mapa bidimensional. A movimentação dos materiais empilhados, é realizada por pontes rolantes que se deslocam sobre as pilhas ou com empilhadeiras.

O empilhamento de produtos é uma forma eficiente de armazenamento pois otimiza a utilização de todo o espaço físico disponível, sem a necessidade de instalação de prateleiras para acomodar os materiais. Porém, a movimentação de carga nesse sistema pode ser uma desvantagem, pois em geral necessita de desempilhamento e re-organização de itens empilhados sobre o objeto que se deseja remover. Assim, um fator determinante para o sucesso da logística é a escolha de um bom procedimento para empilhar, desempilhar e re-organizar os produtos [Lehnfeld e Knust, 2014].

Na literatura existem três tipos de problemas conhecidos para armazenagem por empilhamento: Problema de Recebimento, Problema de Despacho e Problema de Reorganização. No Problema de Recebimento nenhum objeto é removido das pilhas durante a chegada dos demais. Assim o único objetivo é receber todos os objetos e armazená-los nos locais mais adequados de acordo com suas características e disponibilidade do pátio [Lehnfeld e Knust, 2014].

Para determinar o local de armazenamento de cada item é necessário obedecer a uma série de restrições, as mais comuns são: altura máxima da pilha, diferença de largura e comprimento entre os itens do topo e o novo item da pilha, diferença de datas de saída, alcance do equipamento de movimentação de produtos, capacidade do equipamento em pegar mais de um produto por vez, entre outras [Bruns et al., 2016].

O Problema de Despacho é conhecido como o conjunto de movimentações necessárias para remover determinado item do seu local de armazenamento na pilha, para o seu endereço final [Lehnfeld e Knust, 2014]. Quando os itens armazenados são semelhantes, pode haver a possibilidade de selecionar o item do topo. Quando não existe essa possibilidade, o despacho pode gerar muitas movimentações para realocar os itens acima do produto que está sendo demandado. Neste problema não é considerado o recebimento de material durante o período de despacho.

Em alguns casos, a remoção dos objetos precisa ser efetuada de maneira ordenada. Assim, para garantir a eficiência durante a retirada, as pilhas devem ser reorganizadas. Essa situação é conhecida como Problema da Reorganização ou *Pre-Marshalling*, [Fechter et al., 2019].

O principal objetivo de um sistema de gerenciamento de pátio é atribuir a cada item recebido uma posição que atenda às restrições físicas de empilhamento, com o menor número de movimentações necessárias. Além de prevenir futuras movimentações de realocação relacionadas ao descarregamento deste produto,Bruns et al. [2016]. Como exemplos, destacamos os trabalhos de Malucelli et al. [2008], Tanaka e Mizuno [2018] e Lima et al. [2007] que propõem algoritmos

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o **Galoá** proceedings

de tomada de decisão para determinar o local em que cada item deverá ser armazenado, buscando evitar movimentações de realocação futuras.

Em geral, avaliar a eficácia do algoritmo de tomada de decisão de alocação considerando apenas a situação de chegada do produto, não é eficiente pois em um cenário real diversas operações acontecem simultaneamente. Em um cenário com mais de um equipamento de movimentação, existem itens sendo alocados, retirados e/ou reorganizados simultaneamente. Na literatura, não encontramos sistemas comerciais ou acadêmicos para a avaliação de estratégias de movimentação pilhas em ambientes dinâmicos.

Neste trabalho é proposto um *framework* de simulação para pátios com empilhamento de produtos, chamado de 3S-SIM. Após definir as regras de tomada de decisão de cada elemento, o simulador proposto é capaz de gerenciar vários equipamentos com alocação, retirada e reorganização, simultâneas. Centrado nas ações realizadas pelos equipamentos de movimentação de carga e no cenário de simulação definido, o simulador calcula o tempo e o número de movimentações necessárias para a execução de cada tarefa solicitada pelo método de alocação, respeitando a ordem prevista no cenário de simulação. Como estudo de caso, foi investigado um pátio de placas de aço de uma usina siderúrgica. Nesse cenário foram consideradas subdivisões do pátio, duas entradas de placas, uma saída e 6 equipamentos de movimentação (pontes rolantes). Nessa simulação foi possível analisar o método de tomada de decisão baseado em características recentes do pátio e ajustado por parâmetros. Adicionalmente, também foram analisadas três estratégias de ocupação do pátio, tentando prever possíveis situações. Nos experimentos numéricos o simulador se mostrou capaz de analisar e ajustar parâmetros dos métodos de decisão e investigar o comportamento dos elementos do pátio em diferentes situações.

O restante deste artigo está dividido da seguinte forma: Na próxima seção é apresentado o simulador 3S-SIM desenvolvido para analisar as movimentações de equipamentos de um pátio de empilhamento. Na Seção 3 é apresentado as características do estudo de caso realizado, o pátio de placas de uma siderúrgica. Na Seção 4 são apresentados os resultados obtidos com as simulações para cenários reais deste pátio de placas. Finalmente, na Seção 5 são apresentadas as conclusões obtidas e propostas para trabalhos futuros.

2. *Framework* de Simulação (3S-SIM)

O *Framework* de Simulação proposto nesse trabalho foi desenvolvido baseado no modelo de simulação por eventos discretos, para tratar do problema de sequenciamento de pilhas de placas (*Slab Stack Shuffling Problem*), e chamaremos de 3S-SIM. Neste modelo de simulação, um ou mais fenômenos de interesse mudam seu valor, ou estado, em pontos discretos (ao invés de continuamente) no tempo [Law, 2006].

A simulação por eventos discretos é composta por três elementos básicos: os estados, o relógio e a lista de eventos. Os estados representam as propriedades do sistema a ser estudado. O relógio mantém o controle da evolução temporal da simulação na unidade de tempo escolhida. A lista de eventos contém as atividade a serem simuladas. À medida em que o relógio da simulação avança, os eventos são realizados e o estado do sistema é atualizado.[Almeida, 2016].

2.1. Marcador de Tempo

Os estados representados no 3S-SIM, baseiam-se nas ações realizadas pelos equipamentos de movimentação de carga. O equipamento de movimentação, que pode ser uma ponte rolante ou empilhadeira, é o elemento central do simulador. No estudo de caso aqui apresentado será a ponte rolante. Para discretizar os eventos dividimos uma tarefa do equipamento de movimentação em 8 ações descritas a seguir:

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o **Galoá** proceedings

1. O equipamento se desloca da posição atual até a posição onde esta o objeto que será movimentado;
2. O equipamento posiciona sua garra ou garfo;
3. O equipamento pega o objeto desejado;
4. O objeto é erguido;
5. O equipamento se desloca até o endereço final;
6. O objeto é posicionado na pilha de destino;
7. O equipamento solta o objeto;
8. O equipamento recolhe sua garra ou garfo e aguarda próxima instrução.

É através da conclusão de cada uma dessas ações, realizadas pelo equipamento, que o simulador avança para o próximo estado e ao final do ciclo concluí a execução de uma tarefa. Esse ciclo é apresentado na Figura 1(a) em sua devida ordem de execução.

Para o cálculo do tempo de execução das tarefas 1 (“Vá para a posição inicial”) e 5 (“Vá para o destino”), o simulador considera a distância entre os pontos de origem e destino e velocidade de deslocamento do equipamento. As tarefas 2 (“Posicione as garras sobre o objeto”), 4 (“Eleve o objeto”), 6 (“Posicione o objeto”) e 8 (“Recolha as garras”) dependem da altura do objeto na pilha e a velocidade de deslocamento vertical da garra do equipamento. As tarefas 3 (“Pegue o objeto”) e 7 (“Solte o objeto”) possuem tempo fixo.

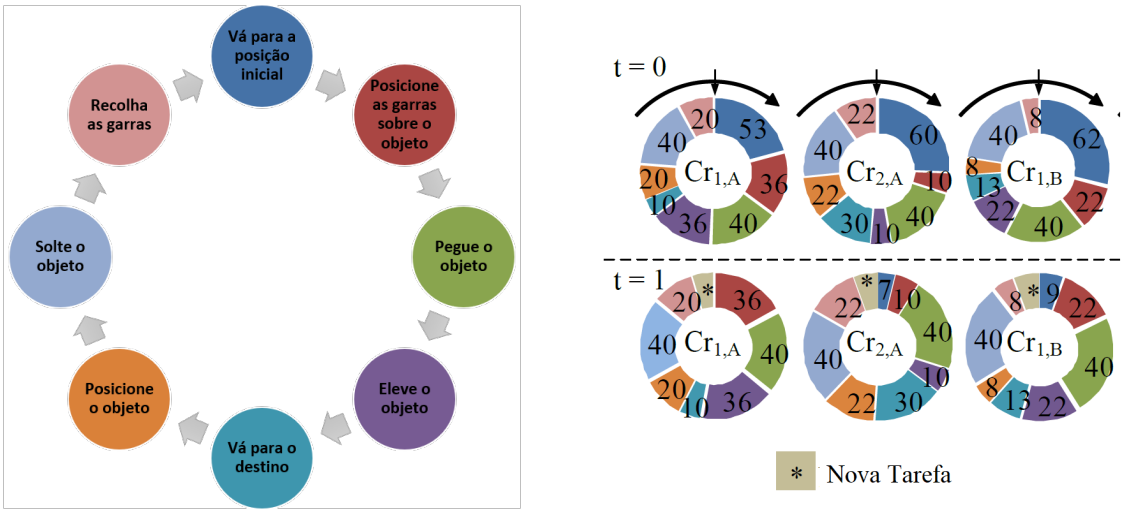
A Figura 1(b) ilustra a execução de uma ação de 3 equipamentos, nomeados de Cr_{1A}, Cr_{2A} e Cr_{1B}. No tempo zero (t = 0), o sistema calculou os tempos que os equipamentos Cr_{1A}, Cr_{2A} e Cr_{1B} levarão para executar cada ação necessária para realizar a instrução de movimentação recebida. A próxima atualização dos tempos dos equipamentos será o menor tempo da ação atual de todos os equipamentos. Assim, no t=1 (53 segundos após t = 0), o equipamento Cr-1A deslocou para a posição de origem do objeto a ser movimentado. Enquanto Cr-2A e Cr-1B ainda estão em deslocamento, faltando 7 e 9 segundos para concluírem a primeira ação, respectivamente. Ao término do ciclo, o equipamento se encontra disponível para executar a próxima movimentação.

2.2. Processo de Simulação

O processo de simulação do 3S-SIM pode ser resumido nos seguintes elementos: inicialmente são carregados os dados utilizados para criar o cenário de simulação, com as pilhas, equipamentos e restrições; em seguida devem ser definidos os métodos para tomar cada decisão. Tais métodos podem ser dinâmicos, como apresentado no estudo de caso desse trabalho, ou estático, onde todas as ações são pré-computadas por heurísticas ou modelos matemáticos e depois avaliadas no simulador; por último, a lista ordenada das demandas, que são as requisições de entrada, saída e reorganização que serão definidas pelo método de decisão e depois testada no 3S-SIM.

No processo de simulação, para cada chegada de objeto no pátio, o 3S-SIM solicita ao método de tomada de decisão qual pilha e equipamento será utilizado. Definido qual equipamento, o simulador adiciona a tarefa na fila de instruções do equipamento.

Outra aplicabilidade para o 3S-SIM, é a simulação de métodos de reorganização do pátio. No estudo de caso apresentado neste trabalho a reorganização é motivada pelo sequenciamento das placas que serão retiradas. No processo, após receber uma demanda de placas que devem ser retiradas, o simulador consulta um método de tomada de decisão para gerar movimentações e



(a) Ciclo de estados do simulador 3S-SIM.

(b) Representação do processo de marcação de tempo para 3 equipamentos.

Figura 1: Marcação de tempo no $3S - SIM$

reorganizar o pátio. Essa reorganização deve ser feita de tal forma que, durante a retirada, nenhuma placa gere movimentação extra além da própria retirada (movimentação para desbloquear itens). O conjunto de pilhas selecionadas com as placas que serão retiras receberá o nome de Área de Campanha. Assim, após definido cada movimentação o 3S-SIM acrescenta as tarefas nas filas de instruções dos equipamentos.

2.3. Implementação do 3S-SIM

O *Framework* de Simulação (3S-SIM) foi projetado utilizando o Paradigma Orientado a Objetos. Na Figura 2 é apresentado o diagrama de classes do Simulador 3S-SIM. A seguir são apresentadas as principais classes do simulador e suas relações.

A classe "Patio" apresentada no diagrama de classes da Figura 2, representa a principal estrutura do projeto. É possível visualizar seus atributos, métodos principais e o relacionamento com as classes "Mesa Rolante" e "Subpatio". A classe "Subpatio" apresenta um relacionamento de "Composição" com a classe "Pátio", ou seja não existe Subpátio sem a existência do Pátio.

A classe "SubPatio" foi criada para representar subdivisões de um pátio, como comumente acontece em problemas reais. Essa classe possui associação com as classes "Pilha" e "PonteRolante". A associação com a classe "Pilha" é do tipo um para muitos, ou seja, um subpátio possui diversas "Pilhas". Da associação com a classe "PonteRolante" podemos visualizar que o subpátio possui 2 pontes e que cada ponte pertence a somente um subpátio. Essa característica foi adotada para o estudo de caso apresentado.

A classe "PonteRolante", representa o equipamento responsável por realizar a movimentação dos itens empilhados. Ela possui atributos que representam o seu estado atual, instrução ativa e a lista de instruções a serem executadas. Na classe "InstrucaoAtiva" é onde são realizados os cálculos do tempo de cada ação necessária para concluir uma movimentação conforme demonstrado na Figura 1(b). As classes "Controle" e "ControleTempo" são responsáveis por gerenciar a simulação. Note que estas classes não possuem relação direta com nenhum objeto físico do cenário.

A classe "Controle", representa a classe que gerencia o funcionamento do simulador. Ela é responsável por verificar a situação da entrada de itens (placas na Mesa Rolante) e execução

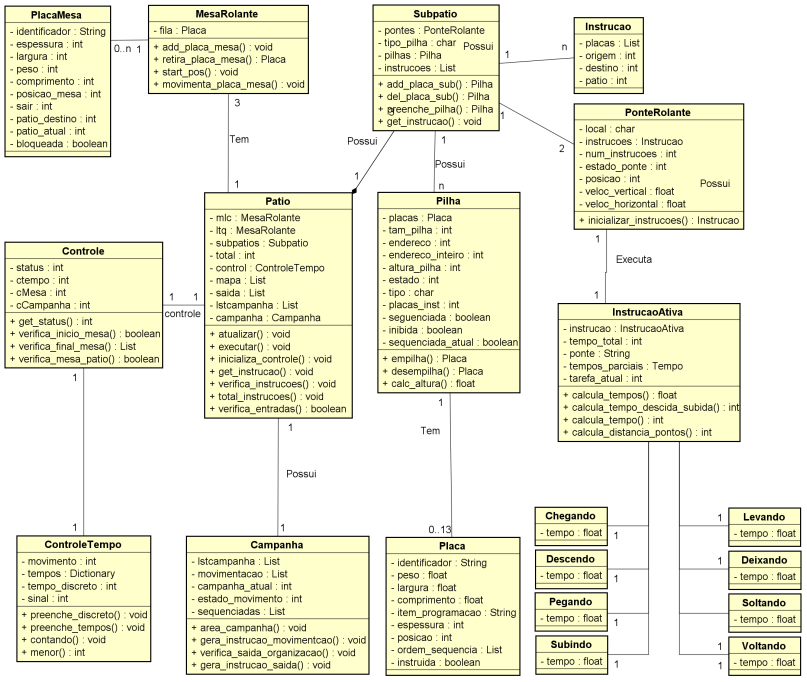


Figura 2: Diagrama de Entidade Relacionamento do *Framework* 3S-SIM.

das tarefas das pontes rolantes. A classe "ControleTempo" é responsável por controlar o tempo de simulação através do monitoramento da execução do menor tempo de cada ação em execução, como ilustrado na Figura 1(b). Para validar o (3S-SIM) foi realizado um estudo de caso em um pátio de placas de uma usina siderúrgica. Neste estudo, foram realizados testes considerando vários cenários de simulação com o objetivo de validar o comportamento "real" do simulador e calibração dos parâmetros do método de tomada de decisão.

3. Estudo de Caso

O pátio de placas exerce um papel estratégico no processo produtivo de uma usina siderúrgica. Ele é responsável por criar um repositório temporário de placas, que serão conduzidas para o Forno de Reaquecimento (FR) do Laminador de Tiras a Quente (LTQ). Garantindo assim que, em uma eventual interrupção na produção de placas, o LTQ não fique desabastecido. Assim, o bom gerenciamento do pátio de placas é fundamental para o funcionamento do laminador.

Nesse trabalho será investigado, como estudo de caso, o Pátio de Placas pertencente a uma usina siderúrgica. O pátio em questão é subdividido em três subpátios, chamados de pátio A, B e C. Cada subpátio possui capacidade para armazenar aproximadamente 100 pilhas de placas e cada pilha pode armazenar até 11 placas.Para realizar a movimentação das placas no interior deste pátio, são utilizados seis equipamentos do tipo Ponte Rolante (PR), duas em cada pátio, e três Carros de Transferência (CT).

O principal meio de recebimento de placas no pátio é através das Mesas de Transferência, que movimentam as placas produzidas nas Máquinas de Lingotamento Contínuo (MLC) 1 e 2 até os subpátios. Outra forma de recebimento é através de vagões ferroviários, que podem se posicionar em umas das duas linhas ferroviárias existentes em cada subpátio. Cada mesa pode armazenar até 6 placas, 2 por subpátio. Se a mesa estiver toda ocupada, as novas placas precisam ser desviadas para vagões para posterior retorno.

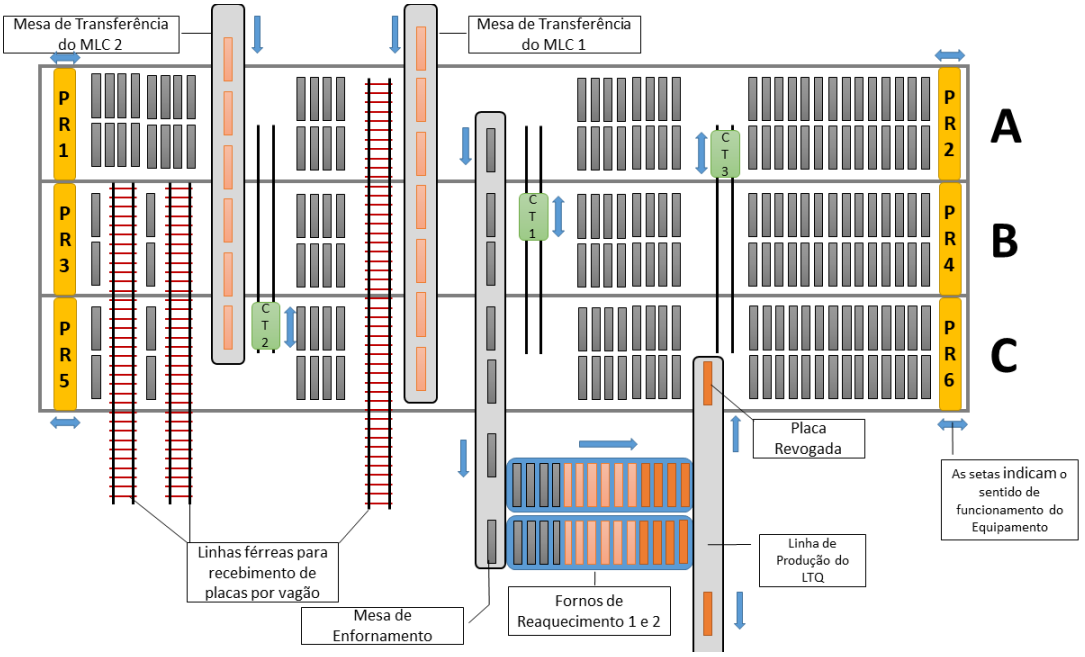


Figura 3: Layout do Pátio de Placas utilizado no estudo de caso.

A retirada das placas do pátio é realizada através da Mesa de Enfornamento, que desloca as placas até a entrada dos Fornos de Reaquecimento de placas do LTQ. A retirada é realizada baseada na sequência de enfornamento, que determina a ordem em que cada placa deve ser enfornada.

A Ponte Rolante (PR) é uma máquina de elevação do tipo guindaste que se locomove sobre as vigas de sustentação. Porém, sua movimentação fica restrita à movimentação da outra PR do mesmo subpátio, pois uma não pode passar pela outra. Cada PR tem a capacidade de içamento de até 66 toneladas, podendo movimentar até 3 placas por vez. A movimentação de mais do que uma placa por vez é conhecida como *Piling*.

Dado que uma PR está restrita a movimentar placas somente no subpátio em que está instalada, o Carro de Transferência é o equipamento utilizado para realizar a movimentação de placas de um subpátio para outro. O carro pode se deslocar do subpátio A até o subpátio C, carregando até 4 placas por deslocamento. Do cenário real foram coletados as informações de entrada necessárias para a realização da simulação com o 3S-SIM. Os dados obtidos foram: dados das placas que foram enviadas para o pátio através de cada Máquina de Lingotamento Continuo, a lista de placas demandadas para a Laminação e o posicionamento de todas as placas armazenadas no pátio.

4. Método de Decisão Utilizado

Quando entra uma placa no pátio, o Sistema de Gerenciamento do Pátio, possui regras para definir: Onde a placa será alocada (Pátio e Pilha); e qual (PR) será alocada para executar a movimentação, esse conjunto de regras é chamado de método de decisão. O método é definido através de equações que consideram: condições de armazenamento de cada subpátio; características do material recebido; e a carga de trabalho programada para as PR disponíveis no momento.

O método de decisão estudado nesse trabalho busca otimizar o número de movimentações realizadas por PRs, através do agrupamento de materiais com características semelhantes no pátio de placas. Objetos semelhantes tendem a ser removidos em conjunto, por exemplo, itens de um mesmo pedido de venda provavelmente serão despachados juntos.

No estudo de caso, placas de um mesmo tipo de aço e com dimensões parecidas tendem a ser programadas em sequência, e nesse caso podem ser movimentadas de uma só vez para a Mesa de Enfornamento do LTQ através da operação de *Piling*, reduzindo o número de movimentações necessárias para enfornar todas as placas.

Diferente do método apresentado em [Almeida et al., 2015], o método avaliado nesse trabalho não determina previamente qual PR deverá executar cada movimentação. Neste método, todo subpátio possui uma lista de instruções de movimentação, essas instruções possuem uma ordem de execução e precedência bem definidas para que uma movimentação não interfira em outra. Assim, cada vez que uma PR finaliza uma instrução, o método busca a próxima de maior prioridade que não possua interferência com a instrução em execução na outra ponte rolante do mesmo subpátio, e determina que a PR execute-á.

As instruções de movimentação são priorizadas da seguinte forma:

0. Instruções de enfornamento: A placa é movimentada do seu endereço de pátio para a Mesa de Enfornamento;
1. Instrução de recebimento: A placa é movimentada da Mesa de Transferência do MLC para o seu endereço de pátio;
2. Instrução de organização: A placa é movimentada do seu endereço de pátio para outro endereço no mesmo subpátio.

Dado que instruções com grau de prioridade "zero" devem ser atendidas prioritariamente, pátios com muitas instruções desse tipo não devem ser sobrecarregados com mais tarefas. Sendo assim, o método calcula o Custo de Alocação (CA) de cada PR de forma que quanto mais instruções com grau de prioridade baixo um subpátio possuir, maior será o custo de execução de uma nova instrução por uma PR do mesmo.

Deste modo, o método avalia a lista de instruções a serem executadas em cada subpátio, suas respectivas prioridades e calcula o Custo de Alocação (CA) de cada ponte conforme (1). Onde:

- i: Grau de prioridade da instrução. Quanto menor o valor de i, maior é a prioridade de execução dessa Instrução;
- $\sum I(i)$: Total de instruções com prioridade i;

$$CA_{PR} = \sum_{i=0}^{2}((3-i) \times \sum I(i)) \tag{1}$$

O Custo Médio de Alocação por subpátio é calculado conforme (2). Onde n é o número de PRs disponíveis no momento, uma PR pode estar parada para manutenção preventiva por exemplo.

$$CM_P = \frac{1}{n} \times (\sum_{n} CA_{PR_n}) \tag{2}$$

Por fim, de posse do Custo Médio de Alocação de cada subpátio, a Equação (3) é utilizada para determinar o melhor subpátio para armazenar cada placa. A seguir, são apresentados os elementos que compõem a Equação (3):

- R_p: Ranking do subpátio. O subpátio com o maior valor de R_p será o escolhido.

- C_{eq}: Coeficiente de equilíbrio para igualar a "escala" com a segunda parte da equação;
- $\sum PL_i$: Total de pilhas "limpas". Pilhas que possuem somente placas do mesmo item de programação;
- $\sum PS_i$: Total de pilhas "sujas". Pilhas que possuem placas de diversos itens de programação, mas com placa do mesmo item no topo;
- $\sum E_p$: Total de endereços disponíveis no subpátio p;
- CM_P: Custo de alocação médio das PRs do subpátio p, calculado pela Equação (2);
- $p1, p2, p3$: Parâmetros de calibração do método. O parâmetro $p1$ favorece o conceito de empilhamento em pilhas limpas, $p2$ influencia a escolha de pilhas sujas, mas que possuem item do mesmo tipo no topo. O parâmetro p_3 busca regular o recebimento no subpátio com mais endereços vazios;

A pontuação de cada subpátio é definida de acordo com a a Equação (3).

$$R_p = C_{eq} \times (p_1 \times \sum PL_i + p_2 \times \sum PS_i + p_3 \times \sum E_p) - CM_{PR} \quad (3)$$

Definido o subpátio que irá armazenar a placa, o método determina em qual pilha ela deverá ser armazenada seguindo as seguintes regras, na ordem:

1. Se existirem pilhas limpas, a placa deverá ser armazenada na pilha limpa mais próxima da origem;
2. Se a condição anterior não for atendida e existirem pilhas sujas, a placa deverá ser armazenada na pilha suja mais próxima da origem;
3. Por fim, a placa é direcionada para a pilha vazia mais próxima da origem.

Visando validar o correto funcionamento do 3S-SIM, e o impacto dos parâmetros (p_1, p_2 e p_3) no recebimento e saída de material do pátio, foram realizados experimentos numéricos que serão apresentados na próxima seção.

5. Simulações Realizadas

Os experimentos numéricos foram elaborados para analisar a influência de cada parâmetro na estratégia proposta para a logística do pátio. Cada parâmetro foi variado de 0 a 10, com passo de 1. Assim, temos 11^3 possibilidades para combinar os parâmetros (p_1, p_2 e p_3).

Os experimentos para simular todas as combinações dos parâmetros duraram aproximadamente 4 horas de processamento para cada cenário avaliado. Para os experimentos foi utilizado um computador com processador Corei7-8550 (1,8 GHz) e 16 GB de memória.

Foram realizados três experimentos a fim de avaliar o impacto de cada configuração dos parâmetros (p_1, p_2 e p_3) no enfornamento de 100 placas, que corresponde a aproximadamente 3 horas de funcionamento de um pátio de placas real. Todos os três foram realizados utilizado a mesma configuração de pátio com 277 pilhas, 1063 placas de 43 itens de programação distintos e recebimento de 1 placa por MLC a cada 4 minutos.

No primeiro experimento, todas as placas a serem enfornadas já se encontram sequenciadas e distribuídas em 13 pilhas. Dessa forma, não foi necessário realizar movimentações de organização para sequenciar as placas. No segundo, do total de 100 placas a serem enfornadas, 60 placas estavam sequenciadas. Então, o método precisou localizar e sequenciar as 40 placas restantes. No terceiro, somente as 30 primeiras placas estavam sequenciadas.

Os resultados dos experimentos estão apresentados nas Tabelas 1 - 4. Na Tabela 1 o cenário de teste possui todas as 100 placas sequenciadas, na Tabela 2 somente as 60 primeiras placas estão sequenciadas e na Tabela 3 somente as 30 primeiras. Na Tabela 4 é apresentado a quantidade de movimentações realizadas por cada PR em cada um dos resultados apresentados nas Tabelas 1 - 3. Para cada cenário foi encontrado o melhor e pior conjunto de parâmetros, em relação ao número de movimentações de PR, e em relação ao tempo total para enfornar as 100 placas. Também são apresentados o tempo médio por movimentação, o total de placas recebidas e quantidade de operações de *Piling* realizadas durante a simulação. Nas linhas 1 e 2 de cada uma das Tabelas 1 - 3 são apresentados os resultados em relação a melhor e pior configuração de (p_1, p_2 e p_3) em relação ao número de movimentações. Nas linhas 3 e 4, são apresentados respectivamente o melhor e pior resultado em relação ao tempo total de simulação.

Apesar de não ter que realizar movimentações de organização no Cenário 1, este apresentou resultados relativamente piores que os demais. Isto demonstra que apesar de sequenciadas, é importante que as placas estejam melhores distribuídas entre as pilhas do pátio, para que seja possível utilizar ambas as PR para atendar às movimentações. Conforme pode ser visto na linha T1-1ª da Tabela 4, a ponte B2 não recebeu nenhuma movimentação porque as pilhas selecionadas estavam sobe a área de atuação da ponte B1. Um aspecto positivo e também esperado nesse cenário, era a utilização de operações de *Piling* visto que existiam muitas placas agrupadas na mesma pilha.

Comparando os resultados obtidos, observa-se que nos Cenários 2 e 3 onde foi necessário escolher e sequenciar de 40 a 70 placas, o número de movimentações foi maior devido às movimentações de organização que foram demandadas para a realização do sequenciamento das placas. Contudo, esse acréscimo foi recompensado com a escolha e sequenciamento de placas próximas a mesa de enfornamento reduzindo o tempo de movimentação para alcançar cada placa.

Por fim, observou-se que não existe uma configuração única que apresente bons resultados em todos os cenários. A configuração ideal é aquela que retorna o menor tempo médio de movimentação e possibilita o maior número de placas recebidas das MLCs. Portanto, por se tratar de um ambiente bastante dinâmico, é preciso ajustar continuamente os parâmetros do método de decisão de acordo com a situação do pátio de placas visando obter os melhores resultados para cada situação.

Tabela 1: Todas as placas sequenciadas

Métricas		Parâmetros			Resultados		
Movim.	Tempo (s)	p_1	p_2	p_3	T. Med.	Rec.	Pil.
132	13438	7	8	3	101,80	45	13
179	13621	8	0	2	76,09	92	13
161	13106	9	3	1	81,40	74	13
149	13953	7	3	0	93,64	62	13

6. Conclusão

Este artigo apresentou a proposta de um *Framework* para simulação de logística de movimentação em pátios com empilhamento de produtos. O simulador, chamado 3S-SIM, foi desen-

Tabela 2: 60 placas sequenciadas

Métricas		Parâmetros			Resultados		
Movim.	Tempo (s)	p_1	p_2	p_3	T.Med	Rec.	Pil.
171	13335	6	0	5	77,98	30	7
221	14477	5	9	1	65,51	78	7
194	13213	3	9	3	68,11	53	7
213	15604	1	8	0	73,26	69	7

Tabela 3: 30 placas sequenciadas

Métricas		Parâmetros			Resultados		
Movim.	Tempo (s)	p_1	p_2	p_3	T.Med.	Rec.	Pil.
186	12673	5	0	0	68,13	38	10
218	12783	7	10	3	58,64	70	10
195	12188	8	1	4	62,50	47	10
201	13362	1	10	3	66,48	53	10

Tabela 4: Distribuição de movimentação por PR em cada linha das Tabelas 1, 2 e 3

Tabela	Ponte Rolante					
Linha	A1	A2	B1	B2	C1	C2
T1-1ª	32	28	35	0	29	21
T1-2ª	41	27	44	14	40	26
T1-3ª	32	27	36	22	31	26
T1-4ª	23	24	23	15	44	33
T2-1ª	35	27	28	35	11	53
T2-2ª	35	27	52	12	28	47
T2-3ª	54	30	28	37	21	51
T2-4ª	37	29	38	30	11	59
T3-1ª	22	34	54	18	44	30
T3-2ª	40	41	54	18	43	38
T3-3ª	28	40	47	27	36	33
T3-4ª	40	34	54	22	43	24

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o **Galoá** proceedings

volvido baseado no modelo de simulação por eventos discretos. Para a manipulação do tempo, o simulador é centrado nas ações realizadas pelo equipamento de movimentação de carga presente no local de armazenamento. Foi realizado um estudo de caso considerando o pátio de placas de aço de uma siderúrgica real. A construção do 3S-SIM permitiu a criação de entidades e métodos que refletem às características e operações, associadas aos equipamentos presentes no pátio investigado no estudo de caso.

No estudo de caso realizado foi possível verificar a eficácia do 3S-SIM, que conseguiu reproduzir as movimentações necessárias para atender às ordens do Método de Decisão utilizado no Pátio de Placas analisado. O simulador também demonstrou as melhores configurações para os parâmetros do Método de Decisão para cada cenário simulado. Tal análise proporcionou constatar que é possível ter ganhos com a calibração dos parâmetros de acordo com cenário do pátio no momento. Como trabalho futuro, propõe-se desenvolver e comparar métodos de decisão estáticos, como modelos matemáticos e heurísticas.

Referências

Almeida, G., Botelho, M., Breder, G., Bianchi, G., e Resendo, L. (2015). Operational rules and simulator to dynamic slab stack shuffling problem. In Kacem, I., editor, *45th International Conference on Computers & Industrial Engineering 2015 (CIE45)*, volume 1 of *264*, p. 369, Metz, France. Computers & Industrial Engineering.

Almeida, J. F. D. F. *Simulação por eventos discretos*. Instituto Federal de Minas Gerais - Campus Bambui, teoria & prática edition, aug 2016.

Bruns, F., Knust, S., e Shakhlevich, N. V. (2016). Complexity results for storage loading problems with stacking constraints. *European Journal of Operational Research*, 249(3):1074 – 1081.

Fechter, J., Beham, A., Wagner, S., e Affenzeller, M. (2019). Approximate q-learning for stacking problems with continuous production and retrieval. *Applied Artificial Intelligence*, 33(1):68–86.

Gu, J., Goetschalckx, M., e McGinnis, L. F. (2007). Research on warehouse operation: A comprehensive review. *European Journal of Operational Research*, 177(1):1 – 21. ISSN 0377-2217.

Law, A. (2006). *Simulation Modeling and Analysis (McGraw-Hill Series in Industrial Engineering and Management)*. McGraw-Hill Science/Engineering/Math. ISBN 0072988436.

Lehnfeld, J. e Knust, S. (2014). Loading, unloading and premarshalling of stacks in storage areas: Survey and classification. *European Journal of Operational Research*, 239:297–312.

Lima, J. S., Simões, J. A., Ângelo Campos Moreira, Zorzanelli, L. R., Barros, R. S. F., Filho, C. P., dos Santos, V., e Franco, G. N. (2007). Estratégica de operação do pátio de placas do ltq na arcelormittal tubarão. *44 Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos*.

Malucelli, F., Pallottino, S., e Pretolani, D. (2008). The stack loading and unloading problem. *Discrete Applied Mathematics*, 156(17):3248 – 3266. ISSN 0166-218X. Cologne/Twente Workshop on Graphs and Combinatorial Optimization.

Tanaka, S. e Mizuno, F. (2018). An exact algorithm for the unrestricted block relocation problem. *Computers Operations Research*, 95:12 – 31. ISSN 0305-0548.