



26º Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore - SOBENA 2016

Rio de Janeiro, 8 a 10 de Novembro de 2016

Aprimorando a gestão do pátio de aço usando otimização acoplada a simulação estocástica

Gabriel Premoli Monteiro

Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ

Gabriel Alberto Roppa

Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ

Camila Cardoso Linhares da Fonseca e Campos

Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ

Atakan Selamoglu

University of Liege, Belgium

Luiz Felipe Assis

Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ

Jean-David Caprace

Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ

jdcaprace@oceanica.ufrj.br

Resumo:

O ambiente atual da indústria naval vem exigindo cada vez mais sofisticação do planejamento estratégico com o objetivo de aumentar a competitividade. Dentro desse contexto, os estaleiros apresentam um enorme potencial de desenvolvimento. Para explorá-lo, destacam-se como ferramentas a otimização do aproveitamento de espaço e tempo dos processos referentes a seus pátios de aço. Esse artigo tem como objetivo o estudo da otimização do espaço e dos processos utilizados nas operações do pátio de aço, ou seja, a análise de diferentes disposições do pátio, assim como de diferentes maneiras de movimentação das chapas. Foram analisados diferentes cenários do pátio de aço, através da utilização de ferramentas de simulação estocástica associadas à otimização computacional. Foi analisado como o sistema responde às variações da frequência de chegada das chapas de aço e da área de armazenamento, representado pelo número de pilhas de aço e sua capacidade. Os resultados obtidos comprovam que é possível, por meio do planejamento de logística, a redução significativa dos tempos de operação e do trabalho em progresso (Work In Progress). O uso de técnicas de otimização auxiliadas por ferramentas de simulação apresenta-se como grande diferencial para o auxílio do planejamento estratégico garantindo uma maneira eficiente e de baixo risco de melhorar a produção na indústria de construção naval.

1 – Introdução

A construção de um navio é uma atividade complexa, formada por consecutivas etapas cujos processos vêm sendo constantemente transformados e aprimorados pelos estaleiros a fim de diminuir custos e maximizar a produção. O abastecimento de todo o processo é feito através do pátio de aço, o que destaca sua

importância e faz da etapa de estocagem uma etapa com ótimo potencial a ser explorado.

O pátio de aço tem como função o recebimento do material a ser processado nas oficinas, nas linhas de painéis e em estações de submontagem. A sua gestão consiste em garantir que a demanda de material e prazos estipulados estão sendo cumpridos, bem como a organização e empilhamento das chapas de acordo com os

Tabela 1 – Fatores de competitividade, segundo Koenig et al (2003), na indústria naval de alguns países. Considera-se o Japão como referência para o tempo de entrega (T).

	Japão	Coréia do Sul	China	Oeste europeu
Produtividade	1.0	0.7	0.2	0.6
Custo da mão de obra	1.0	0.5	0.2	0.8 - 1.2
Tempo de entrega	T	>T	>>T	>T

critérios estabelecidos previamente, conforme as particularidades de cada estaleiro, estejam sendo seguidas.

É notável que o pátio de aço é o principal responsável na alimentação de todo o processo de construção de uma embarcação, ainda que careça de atenção dos gestores, o que tem impacto direto no desempenho dos estaleiros.

Atualmente, o setor naval encontra-se em crise, o que torna a aplicação de ferramentas de otimização e melhorias em processos de construção naval extremamente importante para melhorar a produtividade do estaleiro. Isso é vital para a garantia de sua competitividade e atuação no mercado naval atual.

Por meio de uma breve pesquisa acerca das características de produção em importantes países ativos na área, nota-se que a China possui uma vantagem dada o baixo valor da mão de obra, enquanto a Coréia do Sul possui com maior produtividade. De fato, esses dois países estão competindo pela maior parte do mercado. A tabela 1 indica os fatores de competitividade para alguns países.

Os dados extraídos do trabalho de Koenig et al (2003), demonstrados na Tabela 1, indicam que a produtividade é um fator estratégico para a sobrevivência e competitividade no mercado naval. Como feito nesse trabalho, consideram-se como referências a produtividade e o custo dos estaleiros japoneses (dados como referência igual a 1.0).

Portanto, é válido afirmar que o estudo do processo produtivo tem importância cada vez maior na indústria naval, visando à otimização ou melhoria de sua gestão.

Várias ferramentas têm sido utilizadas, tais como a simulação de processos. Estudos e aplicações abrangendo simulação de processos na construção naval vêm crescendo nos últimos anos, todavia são poucos os casos visando a melhoria de aproveitamento do pátio de aço.

Pode-se destacar um trabalho desenvolvido pelo Instituto de Pesquisa do estaleiro Hyundai (Park et al., 2006), que simulando o pátio de aço, buscou avaliar o desempenho do

sistema e seu comportamento meio ao aumento da demanda de produção. O estaleiro procurou reduzir a longa permanência de chapas no pátio, causada por uma grande dispersão do tempo de fornecimento, e por mudanças na programação da produção (que alteram a organização das pilhas). As constantes mudanças no plano de produção evidenciam o problema de rearranjo do pátio, além da complexa gestão das pilhas contendo chapas com diferentes atributos de chapas devido às restrições físicas do pátio. A simulação forneceu indicadores dos níveis de estocagem, da taxa de atendimento da produção, e da ocorrência e duração de atrasos no atendimento das estações de processamento.

Estudos sobre modelos de simulação de pátio de aço são úteis para estaleiros, apresentando-se como uma ferramenta de auxílio na gestão e tomada de decisões (Pires et al., 2006).

Para estaleiros operantes, o presente estudo disponibiliza uma ferramenta para um melhor controle do processo de estocagem e, a partir de simulações, é capaz de testar novas alternativas para otimização das operações. Além disso, a simulação do pátio de aço é capaz de disponibilizar a análise de diversas configurações do sistema visando a auxiliar na tomada de decisões de gestores que objetivam modernizar ou ampliar seus estaleiros, bem como auxiliar projetos de estaleiros em fase de planejamento.

Neste estudo, simulou-se um modelo de pátio de aço semelhante a configuração de um estaleiro de grande porte em diversos cenários típicos do cenário da construção. Foram variados os trabalhos dos pórticos, configurações de estocagem, entre outras condições, visando analisar o comportamento do modelo e achar uma configuração otimizada.

2 – Modelo e Metodologia

O acúmulo de material no pátio de aço é comumente resultado de uma gestão ineficiente de fornecimento das chapas de aço e seu armazenamento. Por definição, tal fato tem impacto sobre o *Work-in-Progress* (WIP), ou seja, o tempo de permanência a matéria prima no pátio

de aço, levando a um considerável aumento de estoque, afetando diretamente a produção e seus custos.

O modelo de simulação do pátio de aço desenvolvido tem seu cenário baseado em um estaleiro de grande porte brasileiro e mostra-se como uma ferramenta genérica de simulação através de uma grande capacidade de representação de distintas configurações e sistemas do pátio de aço. A Figura 1 representa o modelo em 3D criado para a simulação do pátio de aço.

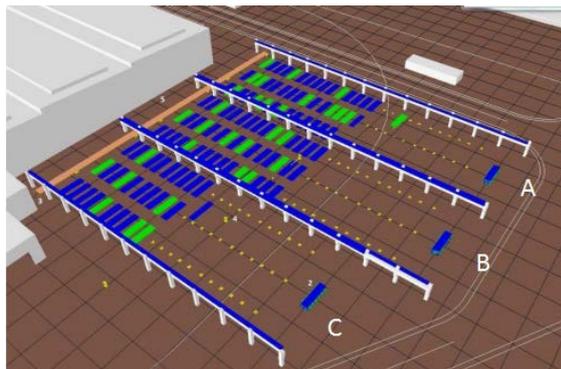


Figura 1 – Modelo 3D de simulação do pátio de aço.

O software de simulação por eventos discretos utilizado foi o *Delmia Quest*, da empresa Dassault Systems, que realiza simulações em 3D, conforme pode ser observado na Figura 1 o layout do modelo. O modelo simulou o funcionamento do pátio com chapas de aço para construção de navio tanque padrão Suezmax. A utilização de eventos discretos possibilita a simulação de um longo período de operação do modelo, e as variáveis estocásticas levam a

consideração de incertezas na entrada e saída de dados do modelo.

O comportamento de alguns elementos do programa foi alterado, segundo a necessidade da simulação, por meio de códigos de programação em linguagem específica. Para o funcionamento do sistema conforme o as regras estipuladas, algoritmos foram implantados nas lógicas dos elementos do programa, permitindo, então, o controle de todo o processo de armazenagem e estocagem das chapas metálicas, além da alimentação da produção segundo critérios e planos específicos.

Os dados e atributos dos produtos a serem representados no sistema podem ser acessados e facilmente alterados através de arquivos externos.

A verificação do modelo criado foi realizada a partir do próprio funcionamento dos resultados gerados. A validação, como o estudo não trata dados reais, foi realizada com consulta a pessoal familiarizado com esse tipo de operação.

Neste estudo, analisam-se os efeitos do planejamento do pátio de aço no WIP. O funcionamento do modelo segue a lógica do fluxograma expresso pela Figura 2.

O modelo representa fielmente as etapas de recebimento de lotes de chapas (geradas por uma fonte), programadas para ocorrer aleatoriamente uma vez por semana (mais ou menos dois dias), armazenamento e alimentação da produção (representada por um sorvedouro), de acordo com a necessidade e proporção.

As chapas são armazenadas em pilhas, distribuídas igualmente por 3 pistas principais (denotadas A, B e C na Tabela 2), com o auxílio de guindastes. As pistas A e B contam com 26 li-

Tabela 2 – Especificações das chapas de aço usadas na simulação.

Dimensões da chapa (mm)			Quantidade	Peso (toneladas)	Porcentagem de peso	Porcentagem de número de chapas
Espessura	Largura	Comprimento				
Aço tipo A						
11,0	2440	9200	244	434,19	9,03	12,03
12,0	2200	9200	223	425,17	8,84	11,98
12,0	2440	9200	163	344,68	7,17	8,75
12,5	2440	9200	190	418,51	8,71	10,21
13,0	2750	9200	120	309,82	6,44	6,44
14,0	2440	9200	206	514,72	10,71	11,06
15,0	2750	9200	144	428,98	8,92	7,73
Aço tipo AH36						
15,0	2750	9200	170	512,40	10,66	9,13
16,0	2750	9200	158	502,07	10,45	8,49
17,5	2750	9200	263	914,08	19,02	14,13
			1861	4804,66	100,00	100,00

nhas de 3 áreas de armazenamento cada, enquanto a pista C possui capacidade máxima de 21 linhas, dadas as limitações do estaleiro. O modelo conta com um total de 226 pilhas, com os demais buffers sendo utilizados para a lógica de transporte das chapas.

A duração da simulação é de 1 mês, o que é notoriamente um baixo período para uma análise de operação mais robusta. Não obstante, é período suficiente para comprovar que a gestão do pátio de aço gera grandes implicações no desempenho produtivo do sistema. Outro fator que corrobora essa escolha é o tempo de simulação que um experimento pode tomar, assim, a fim de obter melhores resultados na otimização, preferiu-se gerar um grande número de experimentos.

Primeiro, buscou-se a representação do pátio baseando-se, exclusivamente, na chegada de chapas no pátio de aço, alimentando a produção sem qualquer taxa de solicitação de chapas. A partir da verificação do funcionamento dos algoritmos e lógicas implementados, o modelo foi desenvolvido para alimentar a produção conforme sua necessidade.

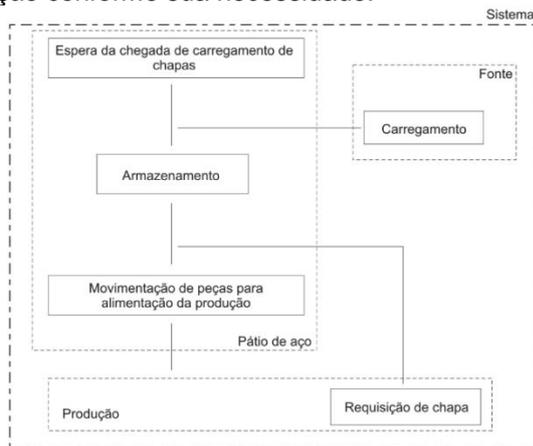


Figura 2 – Esquema do sistema utilizado na simulação.

A simulação obedece um cronograma estabelecido pela produção, que pode ser manualmente alterado em função da revisão do andamento da construção. Logo, todo o plano de estocagem está sujeito às alterações que comprometam a disponibilidade das chapas nos momentos em que são solicitadas. Isso porque o trabalho requerido para reorganizar pilhas já formadas é considerável.

As mudanças de planejamento na produção são eventos naturais e frequentes no ambiente do estaleiro para adaptação às diversas adversidades que surgem no decorrer do processo produtivo.

2.1 – Valores e decisões de projeto

Para o presente estudo, adotam-se valores teóricos padronizados de operação para alguns elementos da simulação (guindaste e esteira) expressos na Tabela 3. O modelo foi elaborado introduzindo-se simplificação em relação ao sistema real de forma a ser possível a sua implementação.

De quase 150 tipos diferentes de chapas de aço necessárias na construção de um navio-tanque são consideradas as 10 mais comuns, levando em conta suas respectivas frações e distribuições. Essas especificações foram obtidas de estaleiros reais e estão expressas na Tabela 2.

Outra modificação adotada foi a de agrupar as chapas de aço por seu tipo, o que é impossível na prática, dado o número de variantes. Isso se deu porque o modelo ainda não possui suporte para a operação de desempilhamento e empilhamento, que permitiria acesso a qualquer peça requisitada, em qualquer posição da pilha.

Tabela 3 – Velocidade de operação das esteiras e dos guindastes.

		Guindastes	Esteiras
Velocidade (cm/s)	movimento	50	30,48
	rotação (%/s)	10	—
	carregamento	25	—
	curvas	17,5	—
	gancho	75	—

Para o presente estudo, considera-se um estaleiro de médio porte, de capacidade de 40 mil toneladas por ano. Na tabela 4, são feitas as conversões necessárias para sua implementação no QUEST.

Diz-se que uma simulação é malsucedida se alguma das seções fica completamente cheia e outro lote é recebido; e como sucesso, se isso não ocorrer durante o mês em simulação.

Tabela 4 – Caso considerado de capacidades do estaleiro.

Tons /ano	Tons/s	Chapas/s	Período da fonte (s)
40.000	13E-3	05E-4	2034

3 – Otimização

Com o modelo pronto e funcional, utilizou-se o software *modeFRONTIER* para o processo de otimização (por sua interconectividade com o programa de simulação), suas funções de análise e algoritmos especializados para objetivos múltiplos de otimização.

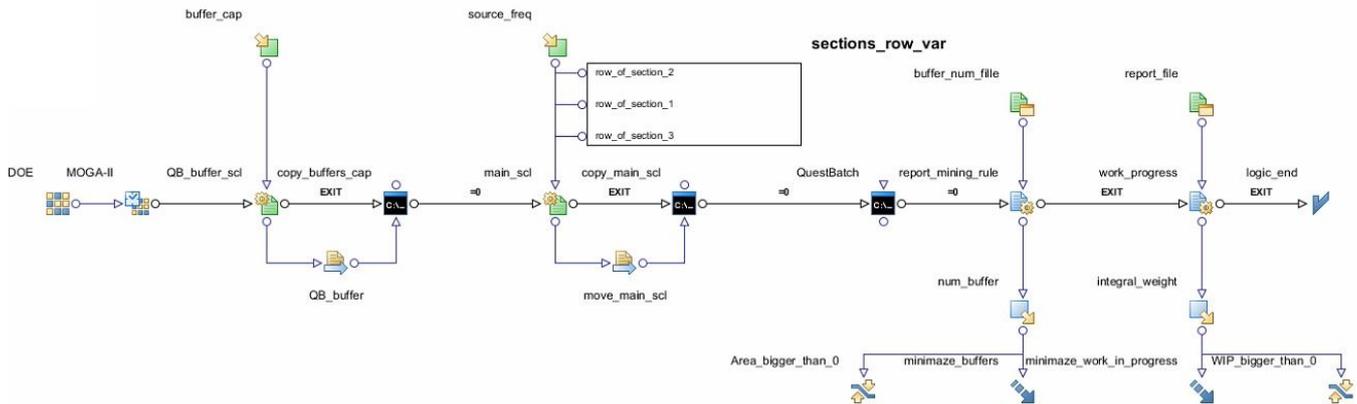


Figura 3 – Esquema implementado utilizando o software modeFRONTIER para o processo de otimização do pátio de aço.

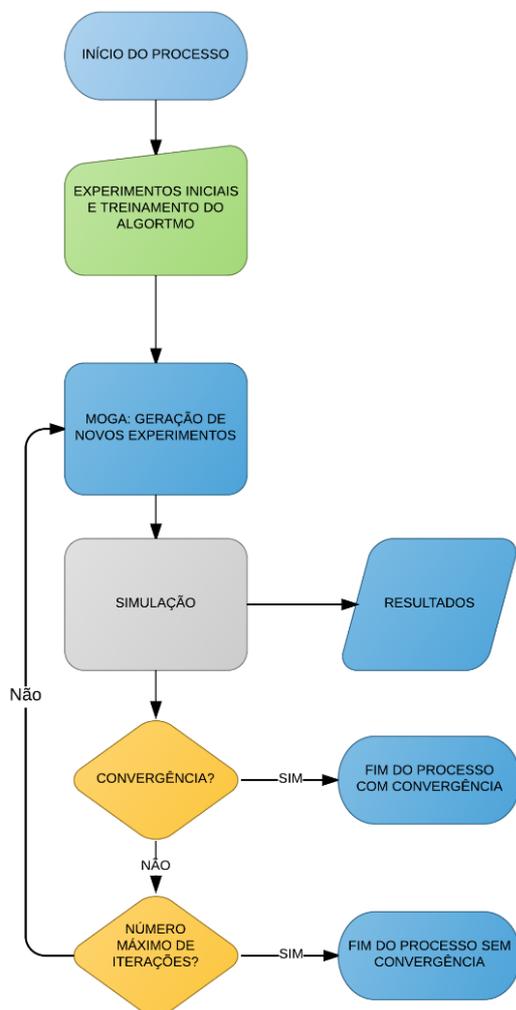


Figura 4 – Esquema da lógica de recursão do processo de otimização do pátio de aço.

As funções objetivo desejadas são a de maximizar a eficiência do pátio de aço minimizando o número de pilhas em atividade (e, assim, o custo de operação) e o WIP.

As variáveis utilizadas para o processo de otimização estão indicadas na Tabela 5. Através do período da fonte está uma variável estocástica interna ao programa de simulação relativa ao tempo de entrega do lote de placas. Essa variável possui distribuição de probabilidade triangular indicado na equação 1, onde c é igual a uma semana, ou seja 604800 s, e a e b correspondem a mais ou menos dois dias, ou seja, respectivamente 432000 s e 777600 s. No modelo, uma pilha especial armazena o lote (gerado pela fonte) a ser entregue, liberando-o quando o tempo de entrega gerado é alcançado. A cada entrega, o tempo de espera é recalculado e a cada iteração, uma nova semente estocástica é gerada.

$$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{for } x < a, \\ \frac{2(x-a)}{(b-a)(c-a)} & \text{for } a \leq x < c, \\ \frac{2}{b-a} & \text{for } x = c, \\ \frac{2(b-x)}{(b-a)(b-c)} & \text{for } c < x \leq b, \\ 0 & \text{for } b < x. \end{cases} \quad (1)$$

Tabela 5 – Variáveis de entrada e saída do modelo de otimização do pátio de aço.

Entrada	Saída
Capacidade das pilhas	Número de pilhas
Período da fonte	<i>Work In Progress</i>
Número de linhas de empilhamento por pista	—

Como esquematizado pela Figura 4, o processo de otimização consiste numa recursão de simulações utilizando um algoritmo genético multiobjectivo (MOGA) (Tadahiko e Ishibuchi, 1995) para controle e gerenciamento das variáveis do projeto, procurando a solução ótima via

diagrama de Pareto. A implementação dessa lógica no software está indicada na Figura 3.

O funcionamento do algoritmo genético utilizado pode ser sintetizado como: uma população inicial de experimentos é gerada com valores manuais – casos extremos e médios das variáveis – e com valores aleatórios. Essa população deve ter em média o tamanho de, pelo menos ($2 \times \text{número de variáveis} \times \text{número de objetivos}$), como recomendado pelo manual do *mode-FRONTIER*. Nesse estudo, a população inicial recomendada é de $2 \times 7 \times 2 = 28$ experimentos, mas, para melhores resultados, adotam-se 100 experimentos.

Obtidos os resultados, o algoritmo gera uma nova população de experimentos, por meio de cruzamento e mutação.

O cruzamento se caracteriza por combinar linearmente os valores de dois experimentos pais e gerar outros dois experimentos filhos. A ideia é possivelmente selecionar as melhores características da população paterna e passá-las adiante.

A mutação é responsável pela possibilidade de uma ou mais mudanças dos valores iniciais das variáveis. Essa técnica é adotada com o intuito de prevenir que o processo não fique estagnado em uma única zona ótima e também de acelerar o processo de otimização.

Esse procedimento é repetido até que haja convergência dos resultados ou até que o número máximo de iterações seja alcançado. Esse número é calculado de acordo com a quantidade de gerações desejado e o tamanho da população inicial.

3.2 – Variáveis de otimização

Como explicitado na Tabela 5, o modelo conta com cinco variáveis de entrada (visto que existem 3 pistas independentes como dito na seção 2). Cada variável possui sua própria margem de operação, indicadas nas Tabelas 6 e 7, estabelecendo o espaço de experimentos do algoritmo de otimização.

Os valores da Tabela 6 foram calculados tomando como margem 25% para mais e para menos em relação ao período médio de pedidos do sorvedouro.

Tabela 6 – Margem de operação do sorvedouro (pedidos) e da fonte na simulação.

Período de pedidos (s)	Períodos da fonte	
	Limite inferior (s)	Limite superior (s)
2034	1526	2543

Note que, na Tabela 7, como já comentado, a pista 3 possui menor capacidade máxima de

armazenamento, devido às limitações de área do estaleiro (ver Figura 1).

Tabela 7 – Margens de operação das áreas de empilhamento do pátio de aço.

	Limite inferior	Limite superior
Capacidade das pilhas	5	15
Pilhas nas pistas 1 e 2	1	26
Pilhas na pista 3	1	21

4 – Resultados e discussão

4.1 – Estaleiro de capacidade de 40 mil toneladas por ano

O cenário relativo a um estaleiro de capacidade de 40 mil toneladas por ano teve seu processo de otimização concluído após 928 experimentos, com um aproveitamento de 64%.

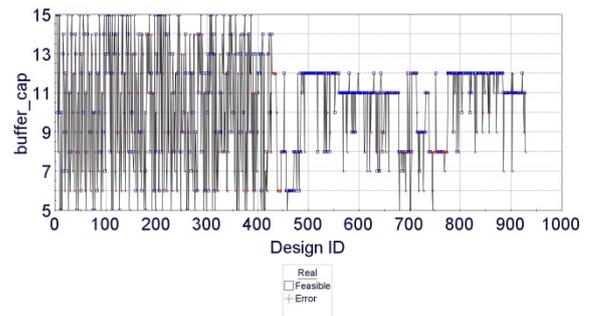


Figura 5: Resultados para a capacidade das pilhas.

As figuras 5, 6, 7, 8 e 9 são os gráficos das variáveis de entrada, respectivamente, para a capacidade das pilhas, o período da fonte e para o número de filas nas seções A, B e C.

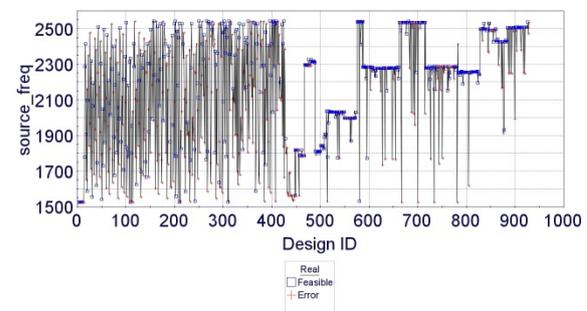


Figura 6: Resultados para o período da fonte.

Todos esses gráficos deixam evidente que o treinamento do algoritmo foi finalizado por volta

do experimento 400, quando o processo de otimização é realmente iniciado.

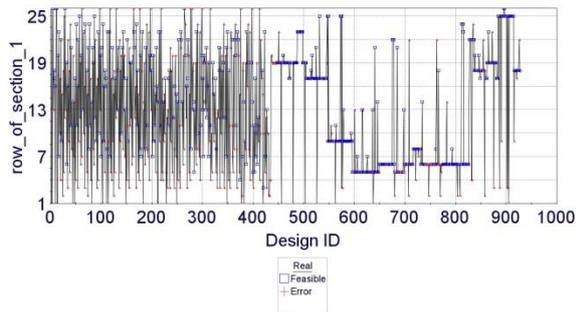


Figura 7: Resultados para o número de filas da seção A

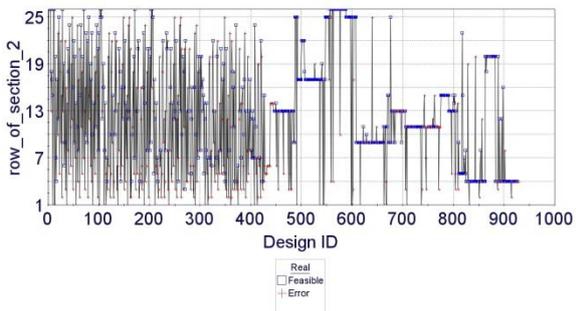


Figura 8: Resultados para o número de filas da seção B

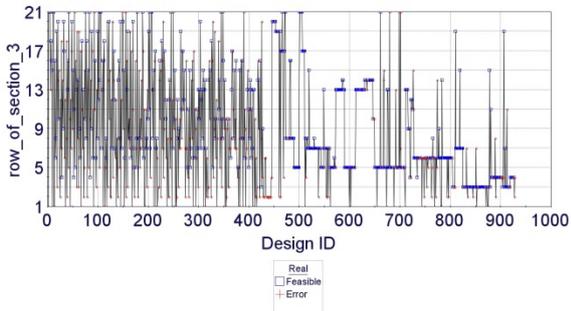


Figura 9: Resultados para o número de filas da seção C

Para as variáveis de objetivo, seus gráficos nas Figuras 10 e 11, são o número de pilhas e o *WIP*, nessa ordem. A evolução dos resultados é notável, tendendo para um valor mínimo após o fim do treinamento do algoritmo.

O diagrama de Pareto é representado pela Figura 12. Dele, extraem-se os casos ótimos, expressos pela Tabela 8. Julga-se como melhor resultado o experimento de número 674, por melhor minimizar ambas variáveis ao mesmo tempo.

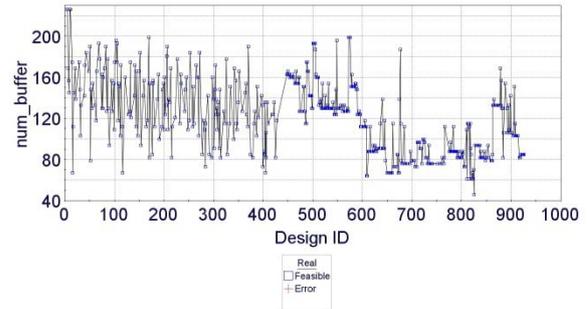


Figura 10: Resultados para o número de pilhas

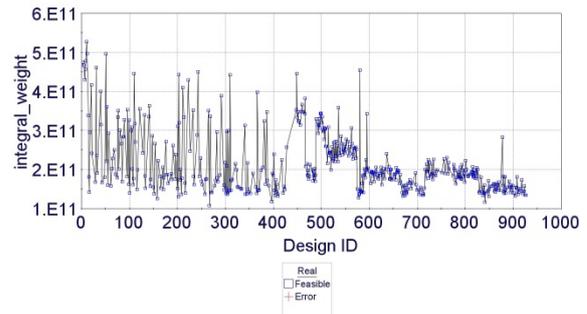


Figura 11: Resultados para o *WIP*

Considerando o pior caso de *WIP* encontrado ($5,27E11$ tons*s), a melhora de operação foi de 75%, usando uma área 70% menor.

5 – Conclusão e trabalhos futuros

A gestão inteligente do pátio de aço se torna cada vez mais necessária no ambiente atual de competitividade crescente da indústria naval, ainda mais em empreendimentos de grande porte.

Os resultados obtidos pela otimização do modelo provam que, independentemente de sua capacidade, é possível minimizar a área de estoque e o *work-in-progress* de suas operações consideravelmente. Isso possibilita que o processo produtivo seja mais eficiente e competitivo, gastando menos recursos.

Esses dados se fazem, portanto, valiosos para inúmeras aplicações. Estaleiros já em operação podem usufruir desse processo para re-aver e melhorar a estocagem de seus pátios de aço. Modelos mais eficientes podem ser desenvolvidos para cada caso particular, levando em consideração suas particularidades, e estudos prévios de dimensionamento de operação podem ser elaborados para estaleiros ainda por construir.

De fato, existe uma grande variedade de estudos que podem ser conduzidos como trabalhos futuros.

A análise do impacto que capacidades variadas do estaleiro ou das diferentes formas de distribuição das chapas para o armazenamento

trazem no processo produtivo, o tamanho e o tempo de entrega ótimos de lotes de material específicos para cada estaleiro ou mesmo associar o modelo do pátio de aço a outras fases do processo produtivo de um estaleiro real são algumas das possibilidades.

6 – Agradecimentos

Essa pesquisa foi parcialmente financiada pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) brasileiro Grant 456288/2013-9. Agradecemos aos revisores anônimos por seus comentários.

Tabela 8: Resultados ótimos para caso 3.

Experi- mento	Variáveis de entrada				Variáveis de saída		
	Capaci- dade das pilhas	Seção A	Seção B	Seção C	Perí- odo da fonte	Número de pilhas	WIP
266	12	20	20	11	2543 s	160	1,07E11
609	11	05	09	05	2267 s	64	1,69E11
674	11	06	09	05	2537 s	67	1,33E11
820	12	06	05	07	2259 s	61	1,78E11
825	12	06	04	03	2243 s	46	2,00E11
841	12	18	04	03	2499 s	82	1,17E11

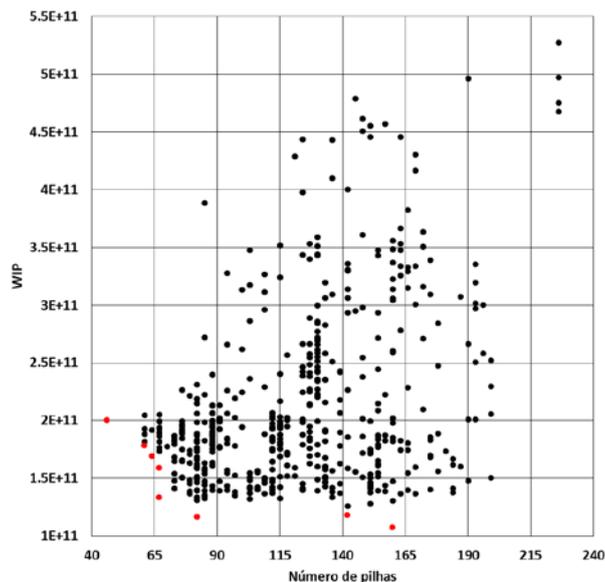


Figura 12: Diagrama de Pareto onde a fronteira destaca-se em vermelho (Número de Pilhas X WIP)

7 – Referências

KOENIG, PHILIP C., HITOSHI NARITA, e KOICHI BABA. "Shipbuilding Productivity Rates of Change in East Asia." *Journal of Ship Production*, 19.1, páginas 32-37, 2003.

MURATA, TADAHIKO, e HISAO, ISHIBUCHI. "MOGA: multi-objective genetic algorithms." *Evolutionary Computation, IEEE International Conference*, Vol. 1, 1995.

PARK, C., J.-C. PARK, G.-G. BYEON, H.-G. KIM, and J. KIM. "Steel Stock Management on the Stockyard Operations in Shipbuilding: A

Case of Hyundai Heavy Industries." *Production Planning & Control*, páginas 1-12, 2006.

PIRES JUNIOR, F. C. M. e DA SILVA, C. T., "Potencial de Aplicação de Simulação de Processos Industriais a Construção Naval", 23º Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore, 1-12, 2006.

WANG, G.; JIN, C.; DENG, X. "Modeling and optimization on steel plate pick-up operation scheduling on stockyard of shipyard", *IEEE International Conference on Automation and Logistics*, páginas 548-553, 2008.