



COPPE/UFRJ

SIMULAÇÃO DE PROCESSOS INDUSTRIAIS COMO
FERRAMENTA DE APOIO À GESTÃO DE ESTALEIROS

Clarice Trevisani da Silva

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientador: Floriano Carlos Martins Pires Jr

Rio de Janeiro
Junho de 2010

SIMULAÇÃO DE PROCESSOS INDUSTRIAIS COMO
FERRAMENTA DE APOIO À GESTÃO DE ESTALEIROS

Clarice Trevisani da Silva

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA OCEÂNICA.

Examinada por:

Prof. Floriano Carlos Martins Pires Junior, D.Sc.

Prof. Prof. Claudio Luiz Baraúna Vieira, Ph.D.

Prof. Luiz Felipe Assis, D.Sc.

Prof. Isaias Quaresma Masetti, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
JUNHO DE 2010

Silva, Clarice Trevisani

Simulação de Processos Industriais como ferramenta de apoio à gestão de estaleiros/ Clarice Trevisani da Silva. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010.

X, 149 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Floriano Carlos Martins Pires Jr.

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Oceânica, 2010.

Referências Bibliográficas: p. 143 – 149.

1. Simulação de Eventos Discretos. 2. Construção Naval. 3. Programas de simulação. I. Pires Junior, Floriano Carlos Martins. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

“Os ventos da graça estão soprando o tempo todo; Você só precisa içar suas velas”.

Sri Ramakrishna

Esse trabalho é dedicado a minha grande amiga Mônica que com sabedoria me ajudou a ter confiança e coragem.

AGRADECIMENTOS

À Deus,

Às minhas queridas amigas Angélica, Marcela, Alessandra e Clara pela amizade e motivação.

Aos queridos estagiários: Roberto, Rafael, Gabriel, Tatiana, Hugo, Luiz, e Fernando pela competência e dedicação motivadoras, e pela amizade inestimável.

Ao orientador prof. Floriano pelo incentivo ao meu desenvolvimento e apoio acadêmico e profissional.

À professora Nadia Schneider pelo exemplo de determinação e sucesso e pela amizade.

À amiga Elza por compartilhar momentos difíceis e felizes sempre torcendo por mim.

À amiga Luciana pelos momentos divertidos e apoio constante.

Às amigas Evelim, Raquel, Carla, Fernanda, Elisa, Maria, Paula pelo carinho.

Ao amigo Silvio pela amizade sincera e apoio nos momentos difíceis.

Ao prof. Mauro e prof. Marco Antônio por acreditarem no meu potencial.

Ao prof. Luiz Felipe pela constante ajuda e compreensão.

Ao prof. Qassim pela torcida e bom humor.

Ao prof. Barauna pelas dicas valiosas, pela atenção e amizade.

Às queridas amigas Glace, Sônia e Sôzinha pelo carinho e pela alegria.

À prof.^a Marta pelo carinho e exemplo de força.

Ao amigo Felipe pela colaboração, paciência e amizade.

Ao amigo Edson pelas conversas divertidas e filosóficas sobre família e religião.

Aos amigos Flávio, Josias e João por me acompanharem desde o início nessa jornada.

A amiga Lucimar pelo exemplo de otimismo e carinho.

A todos os professores e funcionários COPPE e da UFRJ.

Às queridas funcionárias do departamento de registro COPPE/ UFRJ pelo apoio e atenção.

Aos amigos Engenheiros Luiz Felipe e Diego pela colaboração e paciência.

Ao amigo Engenheiro William pela preocupação, incentivo e amizade sincera.

Ao amigo Edamatu pela motivação e amizade.

Aos funcionários da *Dassault* e ao Jun Matsumoto pela amizade e colaboração.

Às queridas primas Mariana, Krysthal e Glória, e a querida irmãzinha Helene por sempre estarem no meu coração.

Ao tio Helio e tia Tereza pelo carinho e apoio nos momentos difíceis.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

SIMULAÇÃO DE PROCESSOS INDUSTRIAIS COMO FERRAMENTA DE APOIO À GESTÃO DE ESTALEIROS

Clarice Trevisani da Silva

Junho/2010

Orientador: Floriano Carlos Martins Pires Junior.

Programa: Engenharia Oceânica

O presente estudo aborda a Simulação de Eventos Discretos como “Estado da Arte” destacando os diferentes setores que utilizam a técnica e a evolução da ferramenta. Uma estrutura hierárquica de critérios é apresentada para facilitar a escolha do simulador computacional mais adequado às necessidades corporativas.

Os estaleiros brasileiros foram classificados em grupos que estão em fase de planejamento do arranjo físico (ou de ampliação das oficinas), e em grupos que estão em fase de operação (funcionamento). De acordo com o perfil do estaleiro, e suas dificuldades, a Simulação de Processos Industriais foi apresentada como forma de auxiliar o tratamento e análise das questões pertinentes ao tipo de organização.

Foram descritos os principais processos de Construção Naval e citados exemplos do uso da técnica específicos a cada etapa construtiva. Finalmente são apresentados três estudos de caso, a partir do desenvolvimento de modelos do Pátio de aço, da Montagem, Pintura e Pré-edificação de blocos, e da Linha de Fabricação de Painéis Planos. Esses estudos de caso destacam a metodologia de um projeto de simulação, os requisitos para a modelagem e os resultados que podem ser obtidos.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

SIMULATION INDUSTRIAL PROCESS AS A
TOOL TO SUPPORT MANAGEMENT OF SHIPYARDS

Clarice Trevisani da Silva

June/2010

Advisor: Floriano Carlos Martins Pires Junior.

Department: Ocean Engineering

This study presents the Discrete Event Simulation as a State of the Art highlighting the various sectors that use this technique, and it presents the development of the tool. A hierarchical structure of criteria is presented to facilitate the appropriate choice of computational simulator for the corporation.

Shipyards were classified into groups that are in the planning stages of the physical arrangement (or extension of the workshops), and groups that are in operational phase. According to the profile of the shipyard, and its difficulties, the Simulation of Industrial Processes was presented as a way to assist the processing and analysis of issues relevant to the type of the organization.

We describe the main processes of Shipbuilding and cited examples of the use of this technology in specific constructive stages. Finally we present three case studies from developing models of Steel Sock Yard, Assembly, Painting and Pre-erections blocks, and Panel Line. These case studies highlight the methodology of a simulation project, the requirements for the modelling and the results that can be obtained.

ÍNDICE

1	Introdução _____	1
	1.1. Objetivos e Relevância da Dissertação _____	1
	1.2. Metodologia de Trabalho e Limitações da Dissertação _____	1
	1.3. Organização da Dissertação _____	2
2	Simulação – Estado da Arte _____	3
	2.1. Introdução _____	3
	2.2. Aplicações da Simulação _____	4
	2.3. Tipos de Simulação _____	8
	2.4. Componentes da Simulação de Eventos Discretos _____	9
	2.5. Metodologia para Projetos de Simulação de Eventos Discretos _____	11
	2.6. Evolução da Simulação _____	15
	2.7. Seleção de Simuladores _____	18
	2.7.1. Critério do Programa _____	19
	2.7.2. Critério do Fornecedor _____	20
	2.7.3. Critério do Usuário _____	21
	2.8. Simuladores Disponíveis Comercialmente _____	22
	2.8.1. Simulador Arena _____	23
	2.8.2. Simulador Promodel _____	27
	2.8.3. Simulador eM-Plant _____	31
	2.8.4. Simulador Flexsim _____	35
	2.8.5. Simulador QUEST _____	39
	2.9. Comentários sobre os simuladores _____	45
3	Simulação da Construção Naval _____	47
	3.1. Introdução _____	47
	3.2. Simulação na Construção Naval brasileira _____	51
	3.2.1. Perfil dos estaleiros _____	52
	3.2.2. Perfil do processo: Armazenamento e tratamento de chapas _____	56
	3.2.3. Aplicação da Simulação no Pátio de aço	57

3.2.4. Perfil do processo: Processamento de aço _____	60
3.2.5. Aplicação da Simulação no Processamento de aço _____	64
3.2.6. Perfil do processo: Introdução à Montagem de estruturas	69
3.2.7. Perfil do processo: Fabricação de Submontagens _____	70
3.2.8. Aplicação da Simulação nas Submontagens _____	70
3.2.9. Perfil do processo: Linha de fabricação de Painéis Planos	75
3.2.10. Aplicação da Simulação nas Linhas de Painéis Planos _	79
3.2.11. Perfil do processo: Montagem de blocos e Acabamento avançado _____	84
3.2.12. Aplicação da Simulação na Montagem de blocos _____	85
3.2.13. Aplicação da Simulação na Fabricação de módulos de tubulação _____	90
3.2.14. Perfil do processo: Pré-edificação e Edificação de blocos	91
3.2.15. Aplicação da Simulação na Pré-edificação e Edificação de blocos _____	92
4 Estudos de Caso _____	94
4.1. Introdução _____	94
4.2. Modelo de Simulação do Pátio de aço _____	95
4.2.1. Introdução _____	95
4.2.2. Desenvolvimento do modelo _____	97
4.2.3. Criação de lógicas _____	100
4.2.4. Definição dos cenários _____	102
4.2.5. Análise dos resultados e Considerações sobre o modelo	103
4.3. Modelo de Simulação da Linha de Fabricação de Painéis Planos	111
4.3.1. Introdução _____	111
4.3.2. Desenvolvimento do modelo _____	113
4.3.3. Criação de lógicas _____	117
4.3.4. Definição dos cenários _____	119
4.3.5. Análise dos resultados e Considerações sobre o modelo	121
4.4. Modelo de Simulação da Montagem e Pré-Edificação de blocos	125
4.4.1. Introdução _____	125
4.4.2. Desenvolvimento do modelo _____	126
4.4.3. Criação de lógicas _____	131

4.4.4. Definição dos cenários _____	133
4.4.5. Análise dos resultados e Considerações sobre o modelo	137
5 Conclusões _____	141
Referências bibliográficas _____	143

1. Introdução

1.1. Objetivos e Relevância da Dissertação

O presente estudo destaca a simulação como “Estado da Arte”, ressaltando as vantagens e desvantagens da técnica. Aplicações em diversos setores mostram que a simulação pode trazer grandes benefícios econômicos, e facilitar o aprimoramento de atividades, e a visualização do sistema segundo cenários determinados.

O estudo realizado procura contribuir para o meio acadêmico e profissional buscando o conhecimento teórico com relação às técnicas de simulação e sua associação ao processo de gestão, englobando o processo de construção naval. Pode-se considerar a pesquisa como dedutiva e qualitativa, porque não busca a mensuração dos fenômenos em questão, mas sua compreensão. A validação do estudo ocorre pelo processo lógico de interpretação e de reflexão em relação ao fenômeno, a partir de análise bibliográfica relacionada ao tema.

O sucesso da simulação pode estar associado à compreensão adequada do sistema a ser representado, à experiência na modelagem e o conhecimento das aplicações da ferramenta, a partir dos benefícios práticos do seu uso e as possíveis dificuldades. Nesse sentido, o estudo procurou levantar os tipos de atividades e tipos organizações do setor naval para identificar pontos onde a simulação poderia trazer resultados relevantes.

Foi realizada uma classificação dos estaleiros brasileiros quanto ao seu perfil, e foram mapeados os principais processos da Construção Naval. Finalmente, foram apresentados três estudos de caso, mostrando uma utilização prática da técnica e os dados necessários para a modelagem assim como os indicadores e estatísticas fornecidas pelos modelos.

1.2. Metodologia de Trabalho e Limitações da Dissertação

Através do método dedutivo e apoiado em uma pesquisa bibliográfica, procurou-se verificar as possíveis aplicações da Simulação de Processos Industriais na Construção Naval, de acordo com as atividades do estaleiro (planejamento de instalações, ou operação), e da etapa construtiva. As dificuldades do estudo são relacionadas ao entendimento e mapeamento dos processos na determinação das

aplicações da técnica. Na modelagem dos estudos de caso, problemas como a indisponibilidade de dados precisos de entrada restringiu a validação de alguns resultados obtidos.

1.3. Organização da Dissertação

No primeiro capítulo é citada a relevância do estudo, a metodologia de trabalho, limitações e organização da dissertação. No capítulo 2 são apresentados exemplos de aplicação da simulação em diversos setores, os tipos de simulação, os componentes da Simulação de Eventos Discretos, a metodologia para o projeto de simulação e a evolução da técnica. Ao final do segundo capítulo é apresentada ainda uma estrutura hierárquica de critérios para a seleção de programas de simulação. Em seguida, são comentadas as principais características de simuladores disponíveis comercialmente.

No terceiro capítulo são caracterizados os tipos de estaleiros e são levantadas questões inerentes ao respectivo perfil da organização, que podem ser abordadas com a simulação. Os processos de construção naval e aplicações específicas de cada etapa construtiva também são caracterizados.

No quarto capítulo são apresentados três estudos de caso, destacando os dados e requisitos para a modelagem e os possíveis resultados que podem ser obtidos. No quinto capítulo são realizadas as conclusões e propostas para trabalhos futuros.

2 Simulação - Estado da Arte.

2.1. Introdução

A simulação de eventos discretos apresenta grande potencial para auxiliar engenheiros e gestores no planejamento estratégico e operacional. A técnica pode melhorar a capacidade de análise de processos complexos e a tomada de decisões. De acordo com especialistas a simulação procura descrever o comportamento real do sistema ou parte do mesmo, construir teorias e hipóteses permitindo a observação de impactos e riscos [1,2].

Atualmente as organizações utilizam a simulação não apenas para resolver problemas específicos, mas incorporam a técnica em suas operações diárias obtendo constantes benefícios. Banks [2] afirma que quanto maior for o custo de mudanças no sistema, ou aplicação de novos projetos, mais vantajosa é a simulação para as organizações se manterem competitivas.

Shannon [1] destaca alguns objetivos da simulação como: o estudo de novas políticas e procedimentos, a determinação dos fatores mais significativos com relação aos impactos provocados no desempenho do sistema, a combinação de parâmetros que produzem o melhor resultado, e a análise de gargalos produtivos. A ferramenta pode ser usada para avaliar flutuações na demanda e mudanças na programação da produção além de auxiliar no treinamento e aprendizado de operadores, aprimorando suas práticas.

Outra vantagem do método se refere à possibilidade de testar novos arranjos físicos, e sistemas de movimentação, sem o comprometimento de outros recursos e estações de trabalho envolvidas. O tempo de simulação pode ser comprimido ou expandido, permitindo a análise de tarefas demoradas, de cenários de longo prazo ou de fenômenos complexos [3].

O fracasso de projetos de simulação pode ser atribuído a alguns fatores como: falha na definição do objetivo do estudo, falha no planejamento dos recursos necessários, participação inadequada dos envolvidos, desenvolvimento do código de programação antes da compreensão efetiva do sistema, detalhamento do modelo de forma exagerada ou insuficiente, e falta de gestão estratégica. Shannon [3] cita que a comunicação entre os envolvidos no projeto de simulação deve ser adequada assim como a documentação do planejamento e dos esforços com a modelagem.

A modelagem pode ser considerada uma arte que requer treinamento especializado. Os benefícios de um projeto de simulação, ou a qualidade da análise obtida, dependem da qualidade do modelo e das habilidades do modelador. Na interpretação dos resultados, pode ser difícil distinguir, por exemplo, se os resultados encontrados são baseados nas relações internas do sistema (comportamento) ou se representam à aleatoriedade. Essa interpretação geralmente demanda certa experiência do modelador [1].

A simulação é inadequada para problemas que podem ser resolvidos analiticamente. E o desenvolvimento de modelos de simulação pode consumir tempo e recursos financeiros elevados, caso não seja estruturado de forma efetiva. Banks [2] comenta que se dois modelos (de um mesmo sistema) forem construídos por dois diferentes modeladores, os modelos poderão ser semelhantes, mas provavelmente não serão idênticos.

Para compensar as desvantagens, Banks [2] afirma que os fabricantes de simuladores disponibilizam programas cada vez mais amigáveis, demandando apenas a entrada de dados e parâmetros do sistema real. Os programas, normalmente, apresentam relatórios e gráficos da simulação pré-definidos, além de não exigirem grandes conhecimentos de programação dos usuários como anteriormente.

2.2. Aplicações da simulação

Shannon [1] destaca algumas áreas de aplicação da simulação como: sistemas computacionais, manufatura, gestão de negócios, meio ambiente (ecologia), áreas sociais, políticas e militares. A simulação aplicada aos sistemas computacionais, por exemplo, pode atuar no estudo da produção de equipamentos e componentes, no desenvolvimento de programas e de banco de dados.

Na manufatura, a técnica pode ser aplicada: na logística interna, nas linhas de produção, na automatização de processos, na gestão de sistemas de armazenamento e controle de inventários, nas políticas de manutenção, no planejamento de arranjos físicos, no projeto de máquinas, entre outros [1]. A figura 1 apresenta exemplos de sistemas de manufatura modelados em simuladores avançados. A primeira figura mostra a simulação de processos automatizados utilizando robôs, e uma linha de produção, e a segunda mostra outro exemplo de linha de produção modelada.

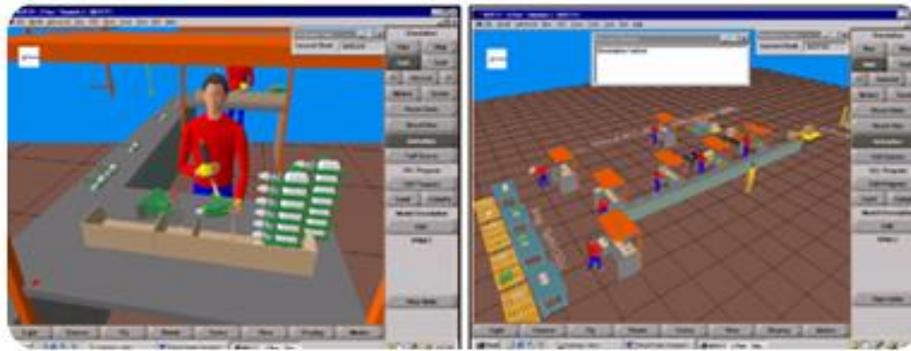


Figura 1: Linha de produção simulada pelo programa QUEST [4].

A simulação pode ser usada para avaliar políticas de preço e estratégias de vendas na gestão de negócios. Análises sobre aquisições, fluxo de caixa, planejamento de mão de obra e alternativas de transporte também são temas abordados com a técnica. A utilização de armas (ou de táticas militares) pode ser estudada com a simulação, assim como a logística de postos de saúde ou postos policiais [1].

O controle de tráfego é outro exemplo de aplicação política e governamental. Na área de ecologia e meio ambiente, a simulação pode auxiliar os estudos sobre métodos de despoluição (água, ar, etc.), e de controle (pestes, vacinação, etc.). Os impactos de tempestades e terremotos (planejamento emergencial preventivo), e da exploração mineral podem ser simulados, além de novos sistemas de energia. No campo social, a simulação pode beneficiar as análises populacionais, as políticas educacionais, administração de órgãos (universidades, empresas, etc.) [1].

A aplicação da simulação em operações logísticas complexas é citada em [5]. Os autores desenvolveram um modelo para analisar todas as etapas do processo de certificação de tambores com resíduos radioativos. Os resultados do modelo auxiliaram no planejamento estratégico e tático atendendo o cronograma e orçamento esperado. Standridge [6] desenvolveu um modelo de simulação para a análise de capacidades logísticas considerando estratégias alternativas de operação, e de investimentos em equipamentos de uma indústria química.

Parson e Siprelle [7] desenvolveram um modelo para estudar a junção de cadeias de suprimento de duas grandes empresas do setor alimentício. As empresas apresentavam estruturas operacionais diferentes, visto que uma se baseava em centros de distribuição e a outra se baseava na entrega direta a partir da planta industrial. Os resultados indicaram o tipo de operação que deveria ser mantida, e auxiliaram no

dimensionamento dos centros de distribuição, para acomodar novos produtos no sistema.

O tráfego interno de uma planta automobilística da empresa General Motors (EUA) foi simulado, determinando a melhor rota interna para cada tipo de produto. O tempo médio gasto por cada tipo de item, desde a entrada na planta até a doca de descarregamento foi estimado. E foi possível ainda, determinar o tamanho da área de espera dos caminhões, e o número de recursos necessários para suportar o recebimento de materiais [8].

Franzese e Joshi [9] buscaram melhorar a utilização de programas que definem as rotas de distribuição, agregando informações em tempo real sobre as condições de tráfego. Xu *et. al.* [10] apresentaram um modelo para estudar os efeitos das estratégias logísticas no transporte de mercadorias. Giacaman *et. al.* [11] apresentaram outra aplicação onde o comportamento de um sistema de manuseio de materiais de uma mina de exploração de nitrato foi simulado, com intuito de investigar as mudanças no tamanho da frota de carregamento.

O processo de embarque do aeroporto de Amsterdã foi modelado, onde diferentes regras operacionais foram testadas. Analisaram-se as configurações de postos de atendimento comuns e dedicados, e os horários (fixos ou dinâmicos) de abertura e fechamento dos postos em função do número de passageiros em filas.

Dessa maneira, a capacidade de atendimento foi estudada segundo o nível de serviço desejado [12]. Boesel e Bodoh [13] estudaram alterações necessárias para acomodar pousos e decolagens de uma nova pista. Foram estimados os atrasos, custos e o aumento da capacidade total de um aeroporto norte-americano no estado de Michigan.

A capacidade das pistas de um aeroporto na Filadélfia (EUA) também foi verificada, a partir de modelos de simulação, onde diferentes arranjos físicos foram testados [14]. Kiran *et. al.*, [15] utilizaram a simulação para descrever resultados da simulação de um terminal internacional na Turquia. O modelo permitiu o estudo do fluxo de passageiros e de aeronaves, os gargalos operacionais, e a capacidade do sistema. A simulação foi empregada para validar o projeto de um novo terminal e verificar seu comportamento nos horários de maior fluxo de passageiros.

Merrick *et. al.*, [16] desenvolveram um modelo para uma empresa de transporte marítimo. Foram estimados os fatores de risco em acidentes, principalmente após a incorporação de novos modelos de embarcações à frota. Um projeto voltado para o

porto de Rotterdam na Holanda avaliou o impacto de diferentes processos de chegada de embarcações, na eficiência das atividades de carregamento e descarregamento. [17].

Uma empresa, líder do setor europeu de equipamentos de aquecimento (boilers, aquecedores, etc.), modelou a junção de três linhas de produção com estações automatizadas com o simulador QUEST. Ao perceber o acúmulo de produtos na linha, a empresa pôde avaliar alternativas como, o aumento do número de carrinhos transportadores e das velocidades dos recursos, além de testar diferentes cenários, antecipando possíveis falhas do sistema. A figura 2 apresenta o modelo desenvolvido pela empresa citada.

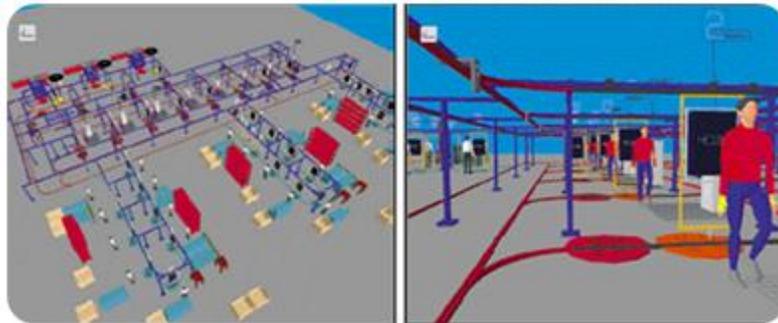


Figura 2: Simulação de Processos Industriais (Baxi Potterton) QUEST [18].

Kuo *et. al.* [19] descreveram uma aplicação da simulação de eventos discretos no estudo do fluxo contínuo de materiais de uma planta de manufatura química. O modelo indicou a utilização de equipamentos e as capacidades produtivas. Segundo a fabricante de simuladores Dassault Systems, uma empresa canadense que fabrica conectores e produtos para a indústria de comunicação modelou uma linha de produção flexível e automatizada reduzindo os tempos de produção, e minimizando as restrições a partir da variação das velocidades dos sistemas de transporte [20]

2.3. Tipos de Simulação

A simulação numérica pode ser dividida em categorias como: discreta ou contínua, estática ou dinâmica, determinística ou estocástica, local, paralela ou distribuída. De acordo com Carson [21], os modelos de simulação discreta apresentam de forma detalhada as relações internas do sistema, e avaliam apenas as mudanças ocorridas em tempos específicos (discretos e isolados).

Os modelos de simulação discreta são dinâmicos e a passagem do tempo representa um papel importante. Já os modelos matemáticos são estáticos e a passagem do tempo não é crítica. Nesses modelos, as relações internas do sistema são representadas de forma matemática (e menos detalhada), como exemplo a simulação de Monte Carlo para a estimação de uma integral. Quase todos os modelos de simulação de eventos discretos são estocásticos, e praticamente todos os simuladores disponibilizam funções estatísticas para representar variável de tempo [22]

Os modelos que não possuem variáveis aleatórias são classificados como determinísticos, e possuem um conjunto conhecido de entradas, que resulta em um único conjunto de saídas (resultados). Os modelos determinísticos são em geral usados para validar a simulação e compará-la com o sistema real [22].

A simulação local ou seqüencial utiliza apenas um computador. Já as simulações paralelas e distribuídas utilizam computadores conectados em redes, e buscam distribuir um modelo entre várias unidades de processamento que funcionam paralelamente. Os modelos de simulação paralela e distribuída são baseados na linguagem de programação Java e no uso dos recursos da Internet [22, 23, 24, 25]

Existem várias vantagens nessa abordagem de simulação, como a possibilidade de desenvolver modelos com alta densidade de eventos (que demandam muito esforço computacional) de forma mais rápida. Algumas questões, no entanto, ainda estão sendo estudadas como a utilização de algoritmos de sincronização entre os modelos, métodos de comunicação (transferência de dados) mais eficientes e melhores arquiteturas computacionais [23,24, 25].

Historicamente, o estudo da simulação paralela e distribuída foi iniciado pelo setor militar, que precisava de alternativas mais eficientes e econômicas para o treinamento de pessoal. Assim, o estudo buscou o desenvolvimento de ambientes virtuais (geograficamente distribuídos), para simular situações de combate. Com o tempo, a simulação distribuída deixou de ser estudada apenas pelo setor militar (no

treinamento e teste de novos sistemas de guerra) e passou a ter aplicações comerciais, como na indústria de entretenimento [24].

A simulação distribuída enfatiza a representação em tempo real dos processos (alta velocidade de comunicação e capacidade de transferência de dados), já a simulação paralela possui certa tolerância quanto à velocidade. Isso ocorre, pois o foco da simulação distribuída foi o treinamento em ambientes virtuais, enquanto na simulação paralela o foco foi a simulação analítica (como ferramenta de projeto e engenharia). Para a simulação paralela, por exemplo, a precisão dos dados e resultados é mais importante do que a velocidade de comunicação [24].

2.4. Componentes da Simulação de Eventos Discretos

Banks *et. al.* [26] descrevem os principais elementos da simulação como: o estado do sistema, as entidades, e as atividades. O estado do sistema é definido pelo estado interno de todas as entidades contidas no modelo. Esse estado corresponde às variáveis com as informações necessárias para descrever o sistema em um dado momento. Os eventos são condições que ocorrem em um ponto do tempo e que causam mudanças no estado do sistema.

A chegada de peças ou o início do processamento de uma máquina, por exemplo, são considerados eventos. As entidades são objetos ou componentes representados no modelo (peças, produtos, máquinas, etc.) e podem ser dinâmicas ou estáticas (nesse caso, atuando como recursos fixos atendendo outras entidades). Cada entidade possui um ou mais atributos, que são suas características individuais. Os estados dos recursos podem ser classificados como: disponível (ou ocioso), ocupado, bloqueado, parado por falha, entre outros [21, 26].

As filas são representações de uma lista ou relação de entidades que esperam para serem atendidas. As regras de atendimento variam de acordo com o sistema. Algumas regras são usadas como, FIFO (first in - first out), ou “a primeira entidade que entrou na fila será a primeira a ser atendida” ou LIFO (last in - first out), ou “a última entidade que entrou na fila será a primeira a sair ou ser atendida”. As regras podem considerar os tempos de processamento priorizando, por exemplo, entidades processadas em um tempo menor [21, 26].

As atividades representam um tempo com duração conhecida. As durações podem ser constantes, valores aleatórios (a partir de uma distribuição estatística),

resultados de uma equação, entradas de arquivos externos, etc. A duração pode também ser calculada com base nos atributos das entidades (por exemplo, tempo de soldagem baseado no comprimento de solda da peça). Já as esperas são ocorrências de tempo indeterminado, causadas por alguma condição do sistema. Quando uma entidade entra em uma fila, o tempo que ela permanecerá na fila pode ser desconhecido desde que dependa de outros eventos (parada por falhas, etc.) [21, 26].

Williams e Levasseur [27] comentam que a maioria dos simuladores possui as chamadas “geradores de números aleatórios”, que são ferramentas para representar a aleatoriedade dos sistemas reais. Os autores citam exemplos onde se pretende avaliar três tipos de arranjo físico (em três modelos diferentes). No primeiro exemplo, é determinada para os três modelos, uma semente de números aleatórios igual para a entrada de entidades (peças) e para seu processamento.

O método, segundo os autores, é ineficiente, pois demanda um longo tempo de simulação para que se consiga distinguir os melhores arranjos. Em um segundo exemplo, os autores mostram a semente de entrada de entidades sendo diferente da semente de processamento. Nesse caso, todos os três arranjos estão sujeitos a mesma semente de entrada (semente 1) e mesma semente de processamento (semente 2), o que de acordo com os autores facilita a diferenciação das alternativas de arranjo. A figura 3 ilustra os exemplos citados, a imagem à esquerda corresponde ao primeiro exemplo e a imagem à direita o segundo.

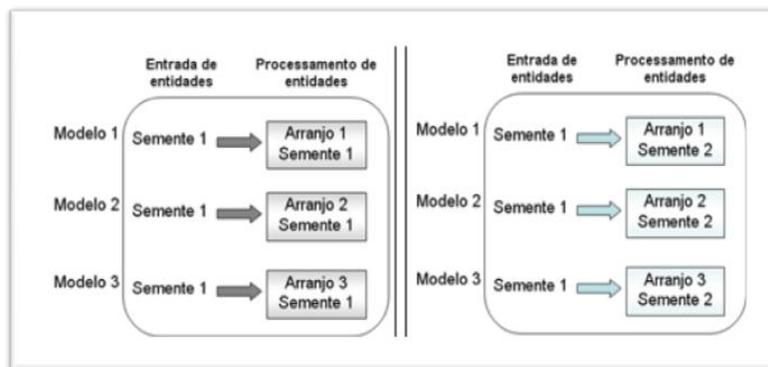


Figura 3: Uso das sementes de números aleatórios [27].

O terceiro exemplo, e mais eficaz na redução da variância dos resultados, é realizado com a determinação dos tempos (taxas) de entrada de peças em cada máquina, rotas percorridas, e tempos de processamento antes que sejam executados

os cenários. Dessa forma, as mesmas informações poderão ser usadas como dados de entrada do modelo para os três tipos de configuração. O método, contudo, não deve ser usado se os tempos de processamento, por exemplo, dependerem do arranjo. Ou seja, se uma peça em um arranjo tiver que passar por uma máquina diferente em outro arranjo [27].

2.5. Metodologia para projetos de Simulação de Eventos Discretos

Diversas metodologias para projetos de simulação de eventos discretos foram desenvolvidas nas últimas décadas. Shannon [3] e Banks [2] classificam o estudo em fases como: formulação do problema, planejamento do estudo, definição do sistema e do modelo conceitual, coleta de dados, construção do modelo, verificação e validação. Etapas como experimentação, interpretação de resultados e aplicação das soluções são comentadas por Carson [21], além da documentação final do estudo.

Banks *et. al.* [26] acredita que todo estudo de simulação começa com uma declaração do problema. Se a declaração for fornecida pelo cliente, o analista deve assegurar que o problema seja claramente compreendido. Se a declaração do problema for preparada pelo analista é importante que o cliente esteja de acordo com a formulação. Shannon [3] compara a descrição do cliente como os sintomas de uma doença, cabendo ao modelador, determinar um diagnóstico.

O objetivo dessa fase é estabelecer os propósitos do estudo, o suprimento de recursos, as fronteiras do sistema e seu comportamento. Alguns fatores devem ser assegurados, a saber, o suporte das partes envolvidas, o acesso aos dados relevantes, a competência dos modeladores, os equipamentos computacionais e programas disponíveis, e os canais de comunicação.

Os recursos se referem aos equipamentos computacionais, modeladores competentes, programas simuladores entre outros. O estabelecimento dos canais de comunicação, do acesso às informações e do suporte das partes dos envolvidos aumenta as chances do projeto de simulação ser bem sucedido.

Na formulação do modelo são utilizados fluxogramas de processos e de códigos (rotinas), para definir os componentes e as variáveis do sistema. As relações matemáticas e lógicas são estruturadas na fase de desenvolvimento do modelo conceitual. Especialistas em simulação recomendam começar a modelagem com modelos simples, adicionar a complexidade aos poucos.

O projeto de simulação de acordo com Shannon [3] deve ser planejado estrategicamente para que forneça as informações requisitadas, pelos custos esperados. Com as informações obtidas na fase de formulação, o analista deve desenvolver estimativas de tempo e prazos para as principais fases do projeto (desenvolvimento, verificação, validação, experimentação e análise dos resultados).

As medidas de desempenho e os fatores que serão variados na simulação devem ser definidos, assim como o tamanho da amostra de dados. Esse tamanho, por exemplo, pode influenciar na decisão de detalhamento visual do modelo. Caso a amostra seja grande, o tempo de desenvolvimento do modelo pode ser reduzido (com menor grau de detalhamento visual), não comprometendo os prazos do projeto.

Shannon [3] faz referência à “regra de Pareto”, afirmando que possivelmente oitenta por cento (80%) do comportamento do sistema pode ser representado por apenas vinte por cento (20%) dos componentes do modelo. A maior dificuldade é identificar os componentes realmente vitais para a simulação. A determinação de um nível apropriado de detalhes é uma decisão importante, pois muitos detalhes dificultam e consomem tempo de modelagem.

Os modelos, ao invés de imitarem exatamente o sistema real, devem conter apenas os elementos que contribuam para as questões em estudo. O nível de detalhes também pode estar associado à precisão exigida dos resultados. Em um extremo, uma estação de trabalho pode ser modelada como uma operação “caixa preta”, com entradas, saídas e tempos definidos. Em outro extremo pode ser simulado o movimento detalhado de uma máquina, correspondente a uma de suas operações.

Em linhas gerais, o projeto de simulação deve inicialmente considerar aspectos como a amplitude do modelo (quanto do sistema o modelo representará), o nível de detalhes, o grau de exatidão (precisão), o tipo de experimentação, e as formas de apresentação dos resultados. O alcance do modelo afeta apenas seu tamanho, e o nível de detalhamento, por exemplo, afeta seu tamanho e complexidade [22].

Os dados de entrada do modelo não devem ser os dados obtidos empiricamente, mesmo que sejam distribuições empíricas geradas diretamente com esses dados. Isso se deve pelo fato de que os valores que não estiverem contidos na amostra observada serão ignorados. No entanto, caso o modelador utilize uma distribuição probabilística aumentam-se as chances de abranger todos os valores [22].

As distribuições probabilística podem ser citadas como: Normal, Poisson, Gama, Lognormal, Exponencial, entre outras. Alguns programas (Expert Fit, Best Fit, Stat Fit,

etc.) aproximam os dados empíricos em distribuições formais e muitos simuladores já possuem esses programas acoplados aos seus módulos principais [22].

As fontes mais comuns de dados são os registros históricos e observações, o estudo de sistemas similares, as estimativas de operadores, as informações de fornecedores e as considerações teóricas. A indisponibilidade de dados seguros de entrada pode comprometer a exatidão do modelo, como quando se está simulando um sistema completamente novo [22].

A verificação do modelo procura responder se seu funcionamento está correto e de acordo com as expectativas do modelador. Carson [21] cita que essa fase pode ser realizada com experimentações ou alterando-se as condições e dados do modelo. Os depuradores de erros, fornecidos pelos simuladores atuais, podem ser usados, assim como ferramentas específicas do próprio simulador e a animação. A revisão de profissionais experientes em simulação também pode ser útil.

Balci [29] acredita que a verificação é a garantia de que o modelo possui o funcionamento lógico adequado e a validação é a garantia de que o modelo atende aos objetivos da análise. O fato de um modelo compilar, executar e produzir resultados, não garante que ele seja válido para o estudo, ou que os resultados da simulação sejam representativos. Nesse sentido, a validação pretende responder se os resultados gerados são característicos do comportamento do sistema real, e se são confiáveis.

Segundo Shannon [3] os possíveis erros gerados pelas simplificações (realizadas na modelagem) são avaliados nessa fase. Os indicadores de desempenho, obtidos após a simulação, podem mostrar a razoabilidade do modelo. Alguns testes podem ser feitos para comparar esses indicadores com os sistemas reais. Se não houver um sistema já existente, a melhor forma de validar um modelo é comparando-o com um sistema similar [21].

A fase de experimentação é onde os experimentos ou testes são planejados para se determinar o grau de confiabilidade dos resultados e para realizar a análise de sensibilidade de certos fatores. Para cada experimento são definidos fatores (ou parâmetros) que teoricamente afetam as saídas desejadas. Durante o experimento, esses fatores são ajustados até que se possa determinar qual combinação deles leva a uma melhor resposta.

Para que se possa alcançar a precisão estatística sobre os resultados desejados é importante que seja feito um estudo aprofundado das características do sistema. Essas características poderão indicar o período que deve ser simulado, o número de

execuções (replicações), e a necessidade de remoção de tempos onde o sistema apresenta comportamento transitório [1].

Os experimentos podem demandar tempo considerável de análise e processamento computacional. Para reduzir esse tempo, especialistas pesquisam diferentes técnicas que podem ser aplicadas dependendo do tipo de sistema. Um sistema dito terminativo possui eventos que cessam em algum ponto do tempo. Nesses sistemas, normalmente são estudados períodos particulares. A simulação de uma agência bancária poderia ser um exemplo de sistema terminativo onde ao final do expediente de trabalho o sistema se encerra [1].

Os sistemas não-terminativos não possuem um evento exato de encerramento. A simulação do setor de emergência de um hospital poderia ser considerada não-terminativa. Nesse caso, o sistema pode ser estudado por um período indefinido ou contínuo. Os sistemas podem também ser classificados em “estado-estável” e “estado-transitório”. Geralmente os sistemas que atingiram o equilíbrio (ditos como “estado-estável”) passaram por um período transitório (onde não se encontra regularidade nas estatísticas) [1].

A experimentação de sistemas terminativos deve ser realizada por meio de diversas execuções (replicações). O período para a obtenção de estatísticas pode ser o tempo desde que a simulação foi iniciada (se o período transitório for relevante), ou a partir do momento que em que o sistema atingiu o equilíbrio. O chamado tempo de aquecimento (ou período transitório) pode ser removido por ferramentas disponíveis nos simuladores comercializados, permitindo que a simulação ocorra sem que as condições iniciais do modelo interfiram nas análises [1].

Os métodos de experimentação de sistemas não-terminativos dependem se o período transitório deve ou não ser considerado. No caso negativo, podem ser realizadas múltiplas execuções, ou o método de observação por “lotes” de tempo. Esse método consiste em uma única e longa execução que deve ser dividida em períodos para a análise. Caso o período transitório seja relevante, a execução pode ser realizada em um período específico previamente determinado ou o estudo pode avaliar separadamente o período transitório e o período em equilíbrio [1].

Na fase de análise dos resultados deve ser considerado que a simulação dificilmente identifica a causa dos problemas, evidenciando apenas seu comportamento sintomático. Os processos chamados gargalos, por exemplo, são identificados pela formação de filas ou acúmulos de estoques.

Shannon [3] ressalta que os modeladores muitas vezes dedicam tempo considerável no desenvolvimento de eficientes formas de modelagem e pouco tempo nas etapas de documentação dos resultados. O autor ressalta que a documentação do modelo facilita o entendimento do estudo, reduzindo a curva de aprendizado para a construção de outros modelos.

2.6. Evolução da simulação

De acordo com Robinson [30] a história da simulação pode ser dividida em quatro fases: Pioneirismo (de 1950 até 1960); Inovação (1970); Revolução (1980) e Evolução (1990 até o presente). Nance [31] faz outra classificação definida em fases como: Pesquisa (de 1955 até 1960), Advento (de 1961 até 1965), Formação (de 1966 até 1970), Expansão (de 1971 até 1978), Consolidação e Regeneração (de 1979 até 1986). Banks, *et. al*, [26] considera uma fase adicional chamada de Período de Integração de ambientes (de 1987 até 1996).

O estudo da simulação (computacional) foi iniciado na década de cinquenta, a partir da primeira geração de computadores. Mas na década de sessenta, a introdução de linguagens de programação mais eficientes, e computadores melhores, permitiram um avanço maior da técnica. Nesse período a simulação foi realizada em FORTRAN e não dispunha de rotinas específicas (comandos), ou blocos de construção para facilitar a modelagem. Estudos foram iniciados no desenvolvimento de rotinas, que pudessem ser reutilizadas nos projetos de simulação.

O período de 1961 até 1965 contou com a divulgação de diversas linguagens específicas para a simulação como: GPSS (1961), SIMULA (1963), SPL SIMSCRIPT (1963) e o SIMSCRIPT 1.5 (1965). O avanço das linguagens de programação específicas para a simulação foi acelerado com os avanços computacionais. As simulações que inicialmente eram desenvolvidas a partir de linguagens genéricas foram facilitadas com a entrada de linguagens mais adequadas a cada tipo de estudo.

Os requisitos necessários às linguagens utilizadas pela simulação se mantiveram, contudo, as linguagens específicas atenderam esses requisitos de forma mais eficiente. Nance [31] destaca as características mantidas nas linguagens específicas: Geração de números randômicos representando incertezas; Representação de processos utilizando variáveis randômicas; Criação e manipulação de objetos; Criação de rotinas de análise estatística e Geração de relatórios.

O período denominado advento foi marcado pela introdução (em 1963) da linguagem SCL (Simulation Control Language). A linguagem GASP e a GPSS, também originadas nesse período, incorporaram o conceito de fluxogramas, e foram consideradas mais amigáveis que as anteriores. Avanços como o controle de tempo a partir da ocorrência de eventos programados, e a depuração ou verificação de erros foram incorporados nas rotinas.

No início dos anos setenta, foram revisadas as linguagens apresentadas nas décadas anteriores. As versões GPSS II e III, por exemplo, foram substituídas pela GPSS/360 com um número maior de blocos de construção (ferramentas que auxiliam a modelagem), e o com a aplicação do conceito de grupos de operações e objetos. A linguagem SIMULA, é outro exemplo de linguagem que foi melhorada e formou a versão SIMULA 67, introduzindo o conceito de Programação Orientada a Objeto [31].

A revisão da linguagem SIMSCRIPT 1.5 originou a SIMSCRIPT II. O conceito de entidades, caracterizadas por seus próprios atributos (introduzido pela linguagem SIMSCRIPT II) forneceu base para descrever as relações entre os objetos. A versão GPSS/H passou a ser compilada mais rapidamente e a linguagem GASP incorporou conceitos de eventos e depuradores interativos [31].

Robinson [30] destaca que a tecnologia computacional se desenvolveu assim como as linguagens de programação. Para o autor a década de setenta foi marcada pelo conceito de interatividade e animação, a partir das novas linguagens apresentadas. Todavia, até a década de oitenta, a aplicação comercial da simulação foi limitada pelos preços altos dos equipamentos computacionais.

Nos anos oitenta, a simulação contou com o aumento da utilização de micro-computadores pelas organizações, e com o desenvolvimento de programas contendo melhores recursos de visualização. Apesar dos programas não terem apresentado maior facilidade de uso puderam atrair mais usuários interessados nos resultados da experimentação [31].

Durante o início dos anos oitenta a linguagem GASP originou outras como, SIMAN e SLAM II. Nessa fase alguns simuladores ou pacotes de simulação foram projetados para acelerar o processo de modelagem. Esses simuladores possuíam elementos específicos para representar filas, transportadores, entre outros elementos. Outra característica dos pacotes de simulação foi à diminuição da exigência de conhecimento específico de programação como praticada nos períodos anteriores.

A década de noventa foi marcada pelo uso intenso dos micro-computadores, pela queda de preços dos equipamentos computacionais e pelo uso da tecnologia Windows e da Internet. Computadores mais potentes permitiram o desenvolvimento de modelos mais complexos e em tempos melhores. Os simuladores WITNESS e ProModel foram os primeiros a apresentar melhor interatividade e animação. Em seguida foram comercializados os pacotes: Arena, QUEST, Taylor II, AutoMod, AweSim, Micro Saint, Enterprise Dynamics e Flexsim.

Robinson [30] afirma que os simuladores da década de noventa não eram baratos, e que muitos dos simuladores comercializados atualmente ainda apresentam preços elevados (mais de € 10.000,00). O preço, segundo o autor, pode ser justificado pelos benefícios que as empresas obtêm com o uso da simulação. A exigência de um investimento inicial alto impediu que muitas organizações adotassem a técnica como ferramenta de análise.

Nesse contexto, ainda na década de 90, algumas empresas passaram a comercializar simuladores de baixo custo (menos de € 1.000,00) como o SIMUL8, Extend e ShowFlow. Apesar de mais baratos esses pacotes não foram massivamente aceitos pelo mercado. A comercialização desses programas mostrou a tendência dos fabricantes de reduzir preços e formar parcerias com esse objetivo.

Os simuladores de baixo custo atuaram em mercados completamente diferentes dos mercados dos pacotes mais caros. Os programas mais dispendiosos foram voltados para atender problemas mais complexos, e fornecer um nível de suporte maior, normalmente, exigido por grandes corporações. A segunda hipótese, levantada por Robinson [30], é a de que muitas empresas passaram a usar os simuladores, motivadas pelos preços mais baixos e a partir de mudanças em seus processos (aumento da complexidade das análises) migraram para os simuladores mais caros.

Outra característica dos simuladores disponibilizados são ferramentas de otimização já acopladas aos pacotes. Programas de otimização como Optimizer, SimRunner, AutoStat e OptQuest são encontrados nos pacotes atuais. A animação de modelos ou a chamada realidade virtual foi mais uma evolução dos programas de simulação. Os programas AutoMod, Flexsim e WITNESS VR. e QUEST foram um dos primeiros a incluir essa característica.

A animação além de incluir desenhos tridimensionais, permitiu a visualização sob diferentes perspectivas. A vantagem desse artifício é o melhor entendimento do sistema simulado, e uma melhor comunicação, principalmente entre os setores da alta

gerência. A animação pode ser aplicada ainda no treinamento de operações. A integração com outros programas (banco de dados, planilhas, etc.), permitida pelos simuladores atuais, é outro fator positivo, que mostra a evolução das ferramentas de simulação.

2.7. Seleção de simuladores

Os principais elementos que os simuladores atuais incorporaram foram: o ambiente para a modelagem, a animação, os relatórios personalizáveis, a interação com outros sistemas, as ferramentas de otimização, e os depuradores do modelo (nas linguagens tradicionais existiam apenas os depuradores de código). Diante de uma grande variedade de opções de ferramentas, Nikoukaran, *et. al.* [33] propõem uma metodologia de seleção de simuladores como é apresentado na figura 4.



Figura 4: Estrutura hierárquica de critérios para a seleção de simuladores [33].

A seleção de simuladores, segundo os autores, pode ser analisada a partir de uma estrutura hierárquica dividida em: fornecedor, programa e usuário. O critério do programa se refere às formas de desenvolver o modelo, de apresentá-lo visualmente (animação) de realizar execuções e gerar relatórios. O critério do fornecedor pode ser avaliado quanto às características da empresa e serviços oferecidos. O critério do usuário corresponde as suas necessidades específicas. Os tópicos a seguir abordam as principais considerações de cada critério.

2.7.1. Critério do Programa

A categoria que se refere ao programa verifica questões relacionadas com a forma de modelagem e introdução de dados no modelo. O desenvolvimento do modelo pode ser realizado graficamente ou inserindo-se códigos. Alguns simuladores apresentam telas e ferramentas que facilitam a modelagem (por exemplo, caixas de diálogo com sugestões sobre as medidas que devem ser tomadas).

A integração de outros programas com os simuladores é uma característica importante para os modeladores, pois permite ou restringe, dependendo do programa, a importação e exportação de dados. Os sistemas mais requisitados para a integração são: planilhas eletrônicas, programas estatísticos, banco de dados, sistemas de gestão, programas de modelagem (CAD), e processadores de texto. Diferentes políticas de armazenamento e formação de filas são disponibilizadas assim como o ajuste dos dados de entrada (empíricos).

A animação é a representação do modelo utilizando elementos gráficos que são apresentados na tela do computador. Esses quadros são atualizados a cada alteração do estado do sistema, o que, com o passar do tempo, compõe o filme da animação. Alguns simuladores dispõem de animação bidimensional ou tridimensional (originalmente ou obtida através de outros programas integrados).

As bibliotecas com desenhos são oferecidas e alguns simuladores permitem a edição de imagens ou a importação de desenhos de outros sistemas (CAD, por exemplo). A respeito da interatividade das animações, os simuladores permitem diferentes vistas do modelo (detalhadas ou gerais). E em simuladores com visualização tridimensional existe a possibilidade de rotação, ampliação ou redução das vistas. Os pacotes (geralmente) permitem a opção de execução do modelo com ou sem a animação.

A reutilização de modelos é outra capacidade importante visto que reduz os custos e os tempos de modelagem. Alguns pacotes fornecem a opção de edição do código ou da linguagem utilizada além de ferramentas de compilação. E todos os programas já oferecem distribuições estatísticas e a opção para o usuário definir distribuições de acordo com seu critério.

Os simuladores usualmente permitem a repetição de execuções de forma automática, alterando parâmetros aleatoriamente. Os resultados de cada execução são

gravados em arquivos para serem analisados. A definição do tempo de aquecimento (período transitório) e controle da velocidade da execução do modelo são recursos oferecidos pelos pacotes atuais.

O processo de validação e verificação dos modelos pode ser realizado com o auxílio de ferramentas específicas como rastreadores de eventos. E os relatórios de saída da simulação devem fornecer algumas estatísticas como: os comprimentos de filas, horas de espera, e utilização. Os resultados podem ser apresentados na forma de gráficos estáticos (histogramas, gráficos de pizza ou linha) ou dinâmicos [26].

2.7.2. Critério do Fornecedor

Os critérios do fornecimento do programa de simulação estão relacionados à reputação da empresa, a documentação e o suporte técnicos fornecido, e as atividades “pré-venda” (demonstrações do sistema, desenvolvimento de modelos de teste, etc.). Alguns fatores como a história e estrutura do fornecedor podem ser levantadas. Segundo Nikoukaran *et. al.* [33] devem ser investigados os tipos de usuários e produtos adicionalmente comercializados, as referências de utilização, e o tempo de mercado do programa.

Banks *et. al.* [26] acreditam que melhor forma de conhecer a qualidade do suporte técnico oferecido é avaliando-se a experiência de usuários. O suporte adequado significa o fornecimento de documentação clara e disponibilidade de pessoal qualificado para atender dúvidas e problemas, o que pode ser um fator diferencial na seleção dos programas.

A documentação técnica permite que o usuário possua certa autonomia para resolver problemas simples, sem a necessidade de atendimento do suporte. Manuais explicativos contendo principais comandos, e tutoriais aceleram o aprendizado do simulador. A inclusão de conceitos de simulação (modelagem e análise de resultados) pode ser útil para os usuários iniciantes.

Cursos e treinamentos devem ser oferecidos e atualizações do sistema devem permitir a conversão de arquivos (gerados em versões antigas), sem custos adicionais e preferencialmente com apoio técnico. A disponibilidade de contato telefônico gratuito é uma vantagem oferecida por alguns fabricantes além de sítios na Internet expondo casos de sucesso, ou dúvidas freqüentes de usuários.

Alguns pacotes com maior popularidade possuem diversos grupos de discussão na Internet. A grande vantagem desses grupos é a troca de experiências realizada pelos participantes. Os fabricantes de simuladores, normalmente, realizam demonstrações do programa na empresa cliente, ou fornecem versões de teste (gratuitas) para que o usuário descubra se o simulador atende suas necessidades antes de adquiri-lo.

2.7.3. Critério do Usuário

O critério do usuário trata de suas necessidades específicas. O cliente deve descobrir se precisa de um simulador discreto, contínuo, ou ambos. Os simuladores podem ter aplicações gerais ou serem específicos para um determinado setor (manufatura, área médica, transporte, etc.). As aplicações específicas trazem a vantagem da representação prévia de recursos relacionados ao setor que se pretende simular.

Conforme Banks *et. al.* [26] as linguagens de simulação podem ser analisadas de acordo com o tipo de sistema a ser modelado, com a aplicação e com a estrutura. O tipo de sistema pode ser contínuo, onde mudanças ocorrem continuamente, ou discreto, onde as mudanças ocorrem em pontos específicos no tempo.

A chamada linguagem de simulação faz referência aos códigos desenvolvidos para aplicações gerais. Já os simuladores são os programas com recursos específicos [26]. Na classificação quanto à estrutura, as linguagens se dividem dependendo da ênfase dada a determinado fator como os eventos, a interação de processos e as atividades.

Na linguagem com ênfase nos eventos, o sistema é modelado considerando uma lista com os possíveis eventos e seus efeitos. Na estrutura com ênfase na interação de processos, o sistema é representado por um conjunto de processos, onde diagramas de blocos são construídos. Na estrutura voltada para as atividades, são definidas as condições de início e término de todas as atividades.

Antes da finalização da compra do programa ou linguagem, os equipamentos e sistemas operacionais devem ser definidos. A portabilidade do sistema permite que o usuário desenvolva um modelo, em um computador, e possa executá-lo em outro computador (com configuração diferente). A compatibilidade é outra característica que

deve ser considerada, e se refere à capacidade de execução do simulador utilizando diferentes sistemas operacionais.

Na avaliação do critério do usuário podem ser levantadas questões como a necessidade de experiência e conhecimentos prévios de simulação (ou programação), além dos custos (licenças, instalação, equipamentos computacionais, manutenção e treinamento). A facilidade de uso dos programas se refere ao tempo médio de aprendizado (treinamento), e da modelagem (preenchimento de telas com parâmetros, por exemplo).

2.8. Simuladores disponíveis comercialmente

Atualmente dezenas de simuladores estão disponíveis comercialmente. Esses simuladores diferem quanto às suas principais aplicações, critérios do fornecedor e do usuário, tradução do modelo, animação e ferramentas específicas. Os simuladores Arena, Promodel, Flexsim, eM Plant e Quest serão abordados sobre esses aspectos.

A comparação entre esses simuladores foi possível a partir de informações obtidas por fabricantes, usuários (grupos de discussão na Internet) e artigos publicados em congressos de simulação. Manuais e livros didáticos também foram consultados. Os critérios abordados anteriormente serão considerados beneficiando o entendimento das principais diferenças e semelhanças entre os simuladores.

Na análise da tradução do modelo será destacada a forma como são apresentados os principais elementos de modelagem como atributos, filas, eventos e movimentações [28]. Baseando-se em uma pesquisa apresentada pela revista OR/MS [34] e por informações dos fabricantes, as principais aplicações específicas dos programas de simulação e os custos de aquisição são citados na tabela 1.

Tabela 1: Aplicações específicas de alguns programas de simulação [34].

SIMULADORES	APLICAÇÕES	CUSTO
ARENA	Manufatura, Gestão de processos de negócios, Call Center, Logística, Centros Médicos, organizações militares.	Baixo
PROMODEL	Produção enxuta, serviços, Cadeia de suprimentos, Desenvolvimento do conceito SIX SIGMA, Sistemas de estocagem e transporte de materiais.	Baixo
FLEXSIM	Manufatura, Logística, Distribuição, Monitoramento de processos em tempo real, Cadeia de suprimentos, Operações portuárias, Sistemas de estocagem.	Médio
EM-PLANT	Manufatura, Gestão de processos de negócios, Logística, Distribuição, Cadeia de suprimentos, Programação da produção e balanceamento de linhas.	Médio
QUEST	Manufatura e Automação	Médio

2.8.1. Simulador Arena

A primeira versão da linguagem de simulação SIMAN baseada na linguagem GPSS usada em computadores de grande porte, foi lançada em 1982 pela empresa System Modeling Corporation (EUA). Em 1990, foi lançado o pacote CINEMA, que integrado ao SIMAN apresentou animação colorida [35].

No ano de 1993, SIMAN e CINEMA foram integrados em um ambiente único de simulação, potencializando seus recursos e originando o sistema Arena. Com a compra da empresa System Modeling pela organização Rockwell (2001), o Arena obteve novas versões agregando melhorias [35].

O simulador é disponibilizado em versões básicas e profissionais. Além desse simulador, são fornecidos programas dedicados a análise de projetos, ou manufatura (integrados a sistemas de planejamento de recursos e de programação da produção). Existe uma versão específica para o estudo de linhas de montagem de alta velocidade, e uma versão que permite a troca de dados (em tempo real) com sensores e controladores de estações de trabalho. Organizações como a Bayer Corporation's Baytown (Texas) e a Danish Steel Works utilizam o simulador para aperfeiçoar seus processos [35].

Grande quantidade de tutoriais sobre o programa Arena é exibida na Internet. E alguns artigos e teses apresentam aplicações do sistema. O manual do fornecedor é

abrangente e contem exemplos e aplicações do simulador. Alguns livros didáticos fornecem versão acadêmica com limitação sobre a quantidade de dados de entrada do modelo.

Dúvidas quanto à instalação e utilização dos módulos de trabalho do programa podem ser tratadas a partir do acesso de sua documentação por conexão de rede ou por uma ferramenta de apoio a modelagem contida no simulador. O suporte técnico se dá por contato telefônico ou correio eletrônico. Clientes internacionais são atendidos por representantes e versões para demonstração não são disponibilizadas no sítio do fornecedor [35].

O sistema Arena foi desenvolvido sob a plataforma da Microsoft Windows, portanto possui compatibilidade com diferentes versões do sistema operacional Windows. As opções de ferramentas e botões do simulador utilizam o padrão do programa Microsoft Office. A tecnologia denominada Active X permite a integração dos modelos de simulação com dados de planilhas eletrônicas, de arquivos de texto, e apresentações [35].

Caso o usuário possua um sistema de banco de dados compatível com o padrão Microsoft, é possível o fornecimento automático de dados aos modelos. O simulador reconhece as linguagens C e VBA. De acordo com a revista OR/MS [34] os requisitos de instalação do programa são computadores com sistema operacional Windows (Vista, Server, XP Professional e XP Homer) e com memória RAM de 1 GB.

O simulador possui uma ferramenta que auxilia a criação de modelos, a edição de lógicas, e a criação de rotinas para automação de tarefas. Com relação aos resultados e estatísticas, o sistema possui ferramentas como Input Analyzer que fornece suporte à escolha da melhor distribuição estatística e o Output Analyzer que permite o estudo dos dados obtidos após a execução do modelo. A ferramenta Debugger realiza o levantamento de possíveis causas de problemas encontrados na modelagem [35].

O módulo OptQuest é utilizado como ferramenta para otimizar os resultados encontrados pela simulação. A animação dos modelos possui representação icônica (bitmaps 2 e ½ D). As imagens podem ser editadas ou importadas e essas imagens ou desenhos são armazenados em uma biblioteca e, caso haja necessidade, podem ser reutilizados.

Um módulo de visualização é comercializado separadamente e pode ser adquirido para se obter a animação tridimensional dos modelos. O programa Arena 3D

Player permite a importação de arquivos com formatos DXF (CAD) ou VRML. A partir desse módulo é possível gerar arquivos do tipo AVI (filme) e controlar a velocidade de animação (a versão básica também possui o mesmo controle de velocidade).

Com relação à tradução do modelo, um painel de construção agrupa uma coleção de blocos chamados de módulos. A seleção do módulo depende do processo que se pretende realizar. Os módulos devem ser clicados e arrastados até a tela principal do programa. Após serem dispostos na tela, os elementos gráficos podem ser parametrizados de acordo com os dados do sistema real. Segundo [36], os módulos são organizados em três tipos de painéis descritos na tabela 2.

Tabela 2: Módulos do painel de construção do programa Arena [36]

PAINEL DE CONSTRUÇÃO DE MODELOS			
	<i>Painel Básico de Processos</i>	<i>Painel Avançado de Processos</i>	<i>Painel de transferência Avançado</i>
FUNÇÃO	Agrupa os principais módulos para a realização da modelagem. Criação de peças, processamento, etc.	Usado para a modelagem de lógicas mais complexas (definição de atrasos, leitura de arquivos externos, etc.)	Usado para movimentação de materiais (criação e controle de sistemas de transporte como esteiras, pórticos, etc.)
MÓDULOS	<i>Create, Dispose Process, Decide, Batch, Separate, Assign, Record, Entity, Queue, Resource, Variable Schedule e Set.</i>	<i>Delay, Dropoff, Expression, Failure, File, Hold, Match, Pickup, ReadWrite, Release, remove, Search, Seize, Signal, Statistic, etc.</i>	<i>Access, Activate, Allocate, Conveyor, Distance, Enter, Exit, Free, Leave, Request, Route, Start, Stop, Transporter, etc.</i>

Peças ou produtos são definidos no painel básico de processos (no módulo ENTITY). Nesse mesmo painel, o módulo RESOURCE define os tipos de recursos (máquinas, estações de trabalho, etc.). Falhas ou paradas programadas podem ser inseridas. Os atributos são definidos no módulo ASSIGN. Esses atributos correspondem a características que diferenciam as peças e que podem provocar, por exemplo, uma mudança nos tempos de processamento [36].

As atividades ou tempos de processamento são definidas no módulo PROCESS. Os tempos podem ser determinados de acordo com atributos das entidades ou por funções estatísticas. A utilização desse módulo e associação de um recurso para a realização da atividade pode gerar automaticamente filas. O tamanho das filas pode ser um indicador de desempenho importante para estratégias de aperfeiçoamento do sistema real.

Os eventos podem ser considerados como as chegadas de peças em uma estação de trabalho, ou ocorrências que alteram o estado do sistema. A geração de peças é definida no módulo CREATE do painel básico de processos. Os elementos podem ser gerados com base em funções determinísticas ou estocásticas.

As conexões que permitem a movimentação das entidades ocorrem a partir do acionamento do botão CONNECT. Essa movimentação pode ser feita ainda por módulos específicos como o ROUTE e o STATION. Esses dois módulos são mais utilizados em modelagens complexas, pois facilitam a organização e transparência do modelo. As decisões de rotas são realizadas pelo módulo DECIDE que permite a utilização de distribuições de probabilidade e condições especiais de rotas. Esse módulo define o fluxo da entidade dado uma regra determinada. A figura 5 e 6 apresentam as telas do simulador.

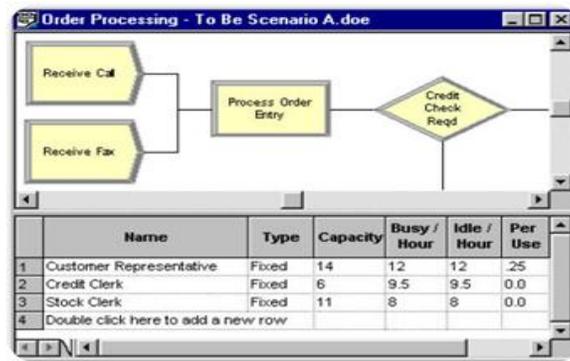


Figura 5: Tela do simulador Arena com a representação de processos [36].

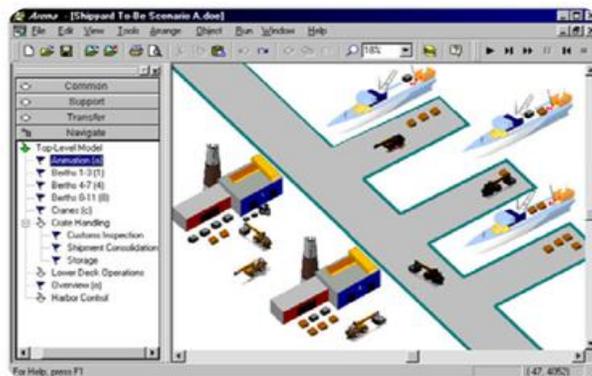


Figura 6: Modelo de operações portuárias (simulador Arena) [36].

2.8. 2. Simulador Promodel

O simulador Promodel foi desenvolvido pela ProModel Corporation. A empresa atua a mais de 15 anos fornecendo soluções e consultoria a setores industriais e de serviços. De acordo com o fornecedor existem mais de 4000 usuários do Promodel (considerando todas as versões) e a organização possui clientes como a Pfizer, a Johnson & Johnson, a Ford, a UPS e a General Motors. A figura 7 apresenta a tela do simulador [37].

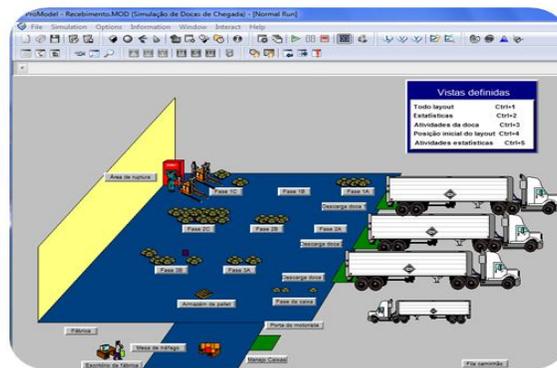


Figura 7: Modelo de sistema logístico (simulador Promodel).

Além do simulador Promodel, é comercializado o programa MedModel (sistemas de saúde), o Service Model (serviços), o Promodel PI (processos) e o Process Simulator (simulação utilizando a tela do sistema Microsoft Visio para criar fluxogramas). A empresa comercializa ainda um sistema que se conecta ao sistema Microsoft Project Server e simula a melhor carteira de projetos, facilitando o acesso desses projetos por meio da rede de comunicação [37].

O programa Promodel possui vasto material divulgado em sítios na Internet. E versões gratuitas de teste podem se adquiridas a partir de um cadastro realizado no sítio do fornecedor. É disponibilizado treinamento gratuito de 30 minutos (mensais) aos usuários que possuem a versão de teste [37].

O atendimento de dúvidas ou suporte técnico pode ser realizado por correio eletrônico, telefone ou diretamente no sítio. O programa possui diversos grupos virtuais de discussão que compartilham dúvidas, exemplos e aplicações do sistema. No sítio do fornecedor existe um campo contendo bibliotecas de recursos e documentação e técnicas para a modelagem [37].

A utilização do sistema não demanda conhecimento avançado de programação. Lógicas (do tipo “IF-THEN-ELSE”) podem ser desenvolvidas para representar situações específicas, e podem ser definidos variáveis, atributos, matrizes ou o acesso de arquivos externos (planilhas, texto, etc.). As rotinas devem são escritas na linguagem C ou VB [38].

O programa possui tecnologia que integra sistemas como Excel, Power Point entre outros programas da Microsoft Windows. O Promodel pode ser instalado em computadores com versões do Windows Vista, XP e 7 e demanda 2 GB de memória RAM [34].

Os relatórios com estatísticas básicas dos recursos podem são específicos para recursos com capacidade unitária e com capacidade múltipla. Estatísticas sobre entidades contêm informações como: nome da entidade, quantidade de peças que saíram do sistema e a quantidade final que permaneceu após a o término da simulação.

Os resultados podem ser apresentados de forma resumida contendo todas as unidades ou recursos, ou contendo as estatísticas coletadas individualmente em cada unidade. A figura 8 mostra um exemplo de relatório gerado pelo simulador e de gráfico de utilização de estações de trabalho.

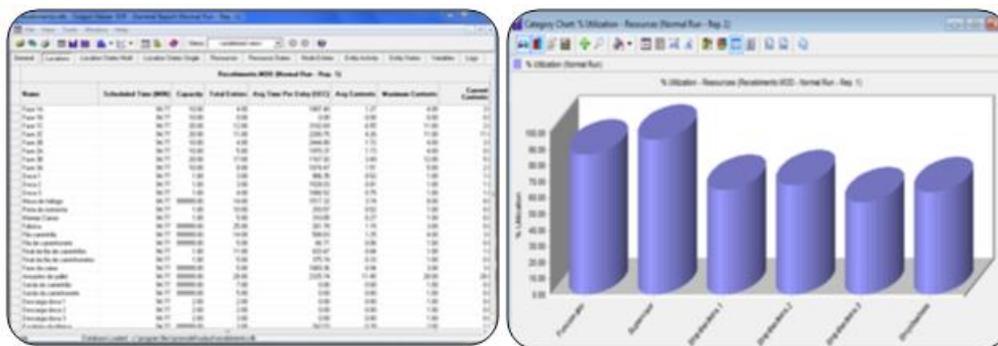


Figura 8: Exemplo de Relatórios simulador Promodel [38].

O simulador possui ferramentas como Stat-fit que auxilia a escolha da melhor distribuição estatística e o Output Result que auxilia o estudo dos dados coletados após a simulação. O programa possui rastreadores e a ferramenta Debugger para levantar possíveis causas de problema de modelagem. O módulo SimRunner Optimization realiza a otimização do modelo automaticamente e indica medidas para o melhoramento do sistema [37].

O simulador permite múltiplas execuções do modelo, definição de paradas baseadas em calendário, e turnos de trabalho. Os modelos podem ser executados com ou sem animação e a biblioteca de recursos permite a importação de desenhos de outros programas (CAD), porém com representação bidimensional. A representação tridimensional é possível e consideravelmente mais complexa de acordo com usuários de grupos de discussão do simulador.

A modelagem no Promodel é feita a partir de blocos que representam lógica e fisicamente os componentes do sistema real. As entidades (peças) são consideradas elementos móveis que sofrem transformação nos equipamentos (máquinas, etc.) fixados em um local. Essas entidades são definidas no módulo ENTITIES [38].

No módulo ENTITIES é definido o nome da entidade, a velocidade com a qual a entidade se movimenta no sistema, o tipo de estatística que se deseja coletar ao final da simulação e a imagem ou figura que a representará visualmente. Os chamados locais são lugares fixos de processamento e ou armazenamento para os quais as entidades são movidas.

Os locais são definidos pelo módulo LOCATION a partir de uma tabela. Dessa forma os recursos fixos são caracterizados quanto à capacidade, número de réplicas, regras de processamento, estatísticas procuradas, regras de decisão (roteamento) e tempos improdutivos (falhas aleatórias de equipamentos, manutenção de rotina, ajustes, etc.).

Esses elementos denominados locais podem comportar uma ou mais entidades simultaneamente. As regras de entrada nos locais determinam a prioridade de processamento e as regras de saída (definidas apenas para locais com capacidade múltipla) indicam a prioridade de liberação da peça.

Entidades e locais podem receber atributos de valor inteiro ou real. Os atributos são geralmente empregados para representar características das entidades como a cor, o número de vezes que foi processada, o tempo de movimentação para locais específicos, etc. Tanto para variáveis como para atributos é possível executar qualquer operação matemática, com a diferença de que os atributos estão associados a entidades e locais específicos.

A forma com que entidades entram no sistema é definida pelo módulo ARRIVALS. Nesse módulo são determinados os momentos em que as entidades são introduzidas no sistema, o número de novas entidades, a frequência, os locais e o instante da primeira chegada, assim como o número total de ocorrências. As chegadas

podem ser determinísticas, estocásticas, ou condicionais. No último caso, podem ser representadas por distribuições pré-definidas contendo horários e tamanhos de lotes.

As atividades do sistema são definidas no módulo PROCESSING. Nesse módulo é estabelecida a operação (incluindo tempo de processamento) e o destino da entidade (decisão de rota). Não existe no Promodel o módulo específico de decisão. As decisões são tomadas de acordo com a definição de operação (OPERATION) ou através de regras (RULE).

No módulo OPERATION é possível especificar os recursos necessários para a realização da atividade (comando GET) e os respectivos tempos de processamento (comando WAIT). A ferramenta Logic Builder permite a edição de regras. O conjunto de comandos que podem ser inseridos por essa ferramenta é agrupado em diferentes categorias como descrito na tabela abaixo.

Tabela 3: Módulos do painel de construção do Promodel [38].

COMANDOS DE CONSTRUÇÃO DE MODELOS			
<i>Ação</i>	<i>Controle</i>	<i>Relacionados com Entidades</i>	<i>Relacionados com Recursos</i>
<i>Activate, Animate, Assignment, Close, Comment, Dec, Display, Pause, reset, Stop, Trace, Warmup, Order, etc.</i>	<i>Begin/End, Break, Goto, Return, While-do, etc.</i>	<i>Accum, Combine, Breathe, Group, Load, Match, Unload, Wait, Move, Route, etc.</i>	<i>Free, Get graphic, Use, etc.</i>

Equipamentos de movimentação são tratados pelo módulo RESOURCE. O comando RESOURCE GROUPING estabelece um grupo de recursos com características semelhantes. O comando PATH NETWORK diferencia as rotas por onde os recursos se movimentarão. Regras de decisão podem ser utilizadas para alocar os recursos e priorizar os carregamentos e entregas.

Características de movimentação dos recursos como velocidades quando cheio e quando vazio aceleração, desaceleração, entre outros podem ser especificados. A figura 9 apresenta a tela do simulador com a vista principal do modelo, e o campo onde é realizada a definição dos parâmetros dos recursos.

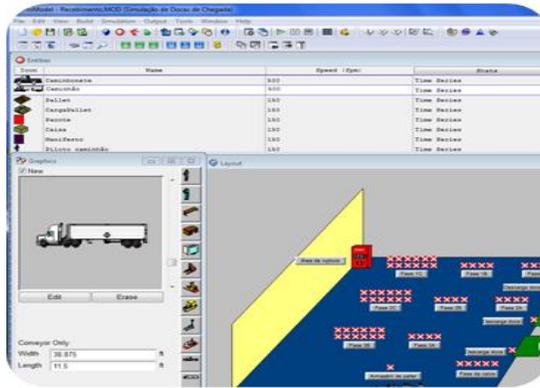


Figura 9: Tela do simulador Promodel e campo com definição dos recursos.

Rotas são elementos opcionais e definem o caminho utilizado por entidades e recursos para se moverem no sistema. Várias rotas podem ser definidas, e várias entidades e/ou recursos podem compartilhar a mesma rota. Os movimentos de entidades e recursos ao longo da rota podem ser representados pelo comprimento, velocidade de movimentação na rota, ou pelo tempo gasto no percurso. As distâncias são automaticamente computadas baseando-se na escala do arranjo físico, definido pelo usuário.

2.8.3. Simulador eM-Plant

A empresa Tecnomatix Technologies, que desenvolveu o simulador eM-Plant, foi criada em 1983. Reconhecida por desenvolver e comercializar soluções de gestão de processos para a manufatura, a empresa foi comprada em 2005 pela UGS Corp (Texas) também especializada em sistemas de gestão do ciclo da vida dos produtos. Em 2007, a empresa UGS Corp foi adquirida por uma divisão do grupo Siemens Automation and Drives [39].

A empresa Siemens Product Lifecycle Management Software Inc. responsável pela comercialização do programas Tecnomatix (antigo eM-Plant), possui 56 mil clientes em todo o mundo. Dentre os clientes-usuários dos sistemas podem ser citados como: Bosh, BMW, Allied Aerospace, Renault, entre outros. Além do simulador a companhia comercializa programas como: Teamcenter, NX, Parasolid, NX Nastran SDK e Solid Edge [39].

O Temcenter realiza o gerenciamento de documentos no desenvolvimento do produto, o sistema NX é voltado para o desenho industrial, simulação mecânica e

usinagem. O programa Parasolid modela peças industriais complexas, o NX Nastran SDK realiza análises de engenharia, e o Solid Edge analisa elementos finitos e fluxos de processo [39].



Figura 10: Representação 3D simulador eM-Plant [39]

O suporte técnico é fornecido por correio eletrônico ou por contato telefônico. Dúvidas e problemas podem ser reportados no sítio da empresa. Dicas, lista de erros do simulador são disponibilizadas no mesmo sítio. Grupos de discussão e a documentação são disponibilizados apenas para clientes [39].

Os usuários não precisam ter conhecimentos aprofundados em programação. O simulador utiliza o SimTalk que se assemelha a linguagem C. O programa possui arquitetura aberta e capacidade de integração com diversos sistemas (ActiveX, CAD, Oracle SQL, ODBC, XML, etc.). O sistema deve ser instalado em computadores com versão de sistema operacional Windows XP e Vista e com memória de 1GB [34].

A análise estatística pode ser realizada pelo pacote Datafit que é integrado ao simulador. O eM-Plant possui ferramenta de otimização baseada no conceito de algoritmos genéticos. Essa ferramenta pode auxiliar a gestão de recursos, planejamento de seqüência de produção (e de rotas), e definição dos tamanhos dos lotes de peças. Outra vantagem do simulador é um módulo específico de análise de gargalos que fornece representação gráfica da utilização de cada recurso (BOTLENECK ANALYSER).

Estatísticas de recursos, produtos ou sistemas de movimentação podem ser obtidas e ferramentas de verificação de erros de modelagem são disponibilizadas. Os eventos podem ser avaliados individualmente, segundo uma lista mostrada na tela principal, durante a simulação.

O fluxo de materiais é apresentado pelo SANKEY DIAGRAM, artifício que identifica problemas logísticos e de transporte. O sistema possui visualização tridimensional, e programação das atividades baseada em calendário determinado pelo usuário. Com relação à reutilização o simulador permite salvar objetos e modelos em bibliotecas que podem ser importadas e reaproveitadas.

As unidades móveis são elementos que são movimentados durante a simulação (peças, contêineres, etc.). O grupo que representa o fluxo de informações são tabelas e arquivos contendo dados necessários à simulação como a seqüência de processos, etc. Já a interface do usuário é definida por gráficos com informações que podem ser visualizadas durante a simulação. As figuras, 11 e 12, mostram as duas ferramentas de análise comentadas.

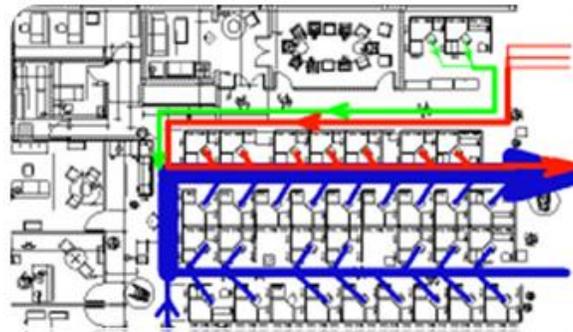


Figura 11: Ferramenta de análise de fluxos de materiais (eM-Plant) [40].

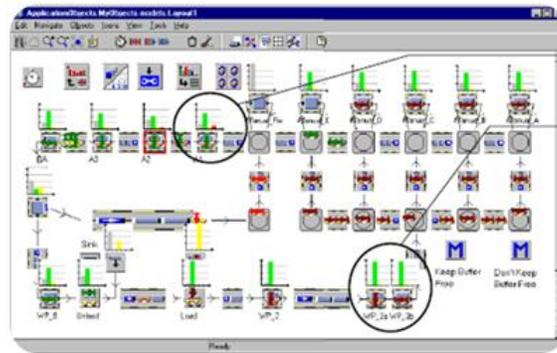


Figura 12: Ferramenta de análise de gargalos (eM-Plant) [40]

A estrutura hierárquica do simulador eM-Plant (versão 7.0) divide os objetos em classes como: Fluxo de materiais; Unidades móveis; Fluxo de informações; Módulo do usuário e Ferramentas e Modelos. A tabela 4 resume os principais módulos do simulador. Os componentes da classe de Fluxo de materiais correspondem aos

elementos fixos que representam um local específico no sistema modelado, como estações de trabalho, por exemplo.

Tabela 4: Principais módulos do simulador eM-Plant [40].

PAINEL DE CONSTRUÇÃO DE MODELOS		
<i>Material Flow</i>	<i>Mobile Unit</i>	<i>Information Flow</i>
Componentes fixos que por onde passam os materiais (Frames, ou Single Process Unit, etc.)	Elementos móveis (peças, containers, etc.)	Componentes onde são definidas as informações acessadas pelo modelo (agendamento de processos, etc.)
<i>User Interface</i>	<i>Tools</i>	<i>Models</i>
Componentes que mostram graficamente dados (gráfico de registros da simulação, etc.)	Ferramentas como <i>Sankey Diagram</i> e <i>Bottleneck Analyser</i>	Componentes que definem modelos e componentes básicos

As peças ou produtos são definidos como unidades móveis que são armazenados, produzidos ou transportados. O atributo padrão para essas entidades disponível é apenas o comprimento. A fonte (SOURCE) é um componente do fluxo de materiais que produz entidades de acordo com os parâmetros do usuário. A seqüência de geração pode ser obtida a partir de tabelas ou taxas de produção (determinísticas ou estocásticas). Os dissipadores (DRAIN) incluídos no simulador removem peças do sistema [40].

As unidades de processamento (SINGLE PROC) realizam um processo por vez. Já as unidades de processamento paralelo (PARALLEL PROC) podem processar simultaneamente diferentes entidades. O elemento denominado CONVEYOR LINE transporta entidades com velocidade constante. E o chamado CONTAINER é um elemento utilizado para agrupar entidades.

O elemento PLACE BUFFER representa o local que entidades deverão passar antes de deixar a estação de trabalho onde foram processadas. Esse elemento agrega um tempo determinado para a liberação das peças. O componente BUFFER apenas armazena peças enquanto essas não podem ser atendidas pelo elemento para o qual serão enviadas. Esse componente não agrega tempo às entidades quando essas podem ser liberadas.

O elemento STORE é como uma matriz onde as peças podem ser armazenadas no local de preferência do usuário. Esse componente possui atributos como comprimento, largura e espessura. A estação de montagem (ASSEMBLY STATION) agrupa entidades ao elemento CONTAINER. A estação de desmontagem (DISLMANTLE) desagrega os elementos, liberando-os.

O chamado FOOH PATH representa o caminho percorrido pelos operadores que pode ser definido pelo usuário. Os controladores gerais e específicos são chamados de EXPORTER e BROKER. No programa existe um local denominado WORK POOL onde os trabalhadores ficam alocados. Apenas no momento que são requisitados esses operadores se direcionam para a estação específica. Diferentes grupos de trabalhadores com diferentes habilidades podem ser alocados nesse recurso. As velocidades de locomoção de cada trabalhador também podem ser alteradas.

2.8.4. Simulador Flexsim

A Flexsim foi fundada por Bill Nordgren (Co-fundador da Promodel Corporation, 1988), Roger Hullinger, e Cliff King. A empresa, chamada originalmente de F&H Simulations, comercializava e fornecia suporte e treinamento para o simulador Taylor II [43].

Em 2000, a F&H Simulations tornou-se independente e mudou seu nome para Flexsim Software Products Inc. Atualmente, clientes como Volkswagen, Pfizer, Avon, Fedex, Alcan, Coca-Cola, Michelin, Boeing, Petrobrás, VALE, Votorantim Metais, FURNAS, Bematech, Bosch, Metrô-SP, Metrô-RJ, Itaú-Unibanco, entre outros utilizam o simulador [43].

A empresa Flexsim está sediada nos EUA, e possui escritórios no Canadá, México, Brasil, Índia, Alemanha e China. Distribuidores regionais fornecem suporte, treinamento e consultoria. Os produtos fornecidos pela empresa são: o Flexsim GP para propósitos gerais da simulação, o Flexsim Fabmodeler para manufatura de semicondutores, o Flexsim Port para as simulações de operações portuárias e o Flexsim SANS voltado para os sistemas de estoque e logística [43].

No sítio da empresa é fornecido material de apoio à modelagem, manuais, bibliotecas de componentes e documentos técnicos (com conceitos de simulação e otimização). Atualizações do programa e demonstrações também podem ser acessadas. Os usuários podem compartilhar informações sobre modelagem. O suporte

técnico para clientes que possuem contrato de manutenção e código de licença válido é feito por contato telefônico ou correio eletrônico. Serviços de consultoria são contratados adicionalmente [43].

Em 2007, a empresa introduziu a linguagem Flexscript que permitia a programação sem precisar compilar antes de se executar o modelo. A modelagem permite o uso de linguagens como o C ou Flexscript para modelar algoritmos complexos. Em 2008, a empresa introduziu um programa com capacidade para representar sistemas complexos utilizando Internet ou rede de computadores conectados [43].

De acordo com usuários em grupos de discussão, os códigos são editados diretamente na tela do programa e por esse motivo são mais difíceis de serem reutilizados. Já as referências aos arquivos externos são fáceis de serem inseridas no código editado. Para simular a entrada de diferentes peças, que precisam ser processadas em um mesmo processador, por processos diferentes é necessária a criação de um código computacional. Nesse caso, pode-se fazer uso de tabelas externas com as rotas.

As lógicas no simulador só são executadas quando ocorrem os eventos. Quando se pretende simular muitos recursos, utilizados simultaneamente, com seqüência complexas de processos é indicada a edição de um código contendo tabelas com a combinação dos grupos de recursos e as atividades.

O simulador deve ser instalado em computadores com o sistema operacional Windows XP ou Vista da Microsoft e memória de no mínimo 256 MB RAM sendo sugerido 1 GB RAM [34]. O programa demanda a instalação no computador de uma ferramenta denominada "NET framework versão 2.0" que pode ser obtida diretamente pela Microsoft.

Opcionalmente o programa Visual C++ Express Edition da Microsoft pode ser usado junto com o simulador para construir modelos compilados. Os resultados do modelo podem ser exportados para aplicações como Word ou Excel. Dados de entrada para a simulação também podem ser diretamente importados. O programa importa modelos tridimensionais (3D Studio MAX), WRL (VRML), DXF (AutoCAD), STL, e importa arquivos do Excel [43].

O programa possui ferramenta para gerar filme da simulação no formato AVI. Possui um botão com conexão direta com o programa Excel onde é possível importar dados de diferentes tabelas simultaneamente. E quanto à otimização possui integração

com o programa Optquest. A ferramenta TRACE DEBUGGER auxilia a depuração do modelo.

Os resultados da simulação podem ser visualizados em diferentes tipos de gráficos inclusive com o Grafico de Gantt. Relatórios financeiros também podem ser obtidos. Para realizar a leitura de um modelo em outro computador é necessária a transferência de apenas um arquivo (que possui todas as informações inclusive geometrias). As figuras, 13 e 14, apresentam a tela do simulador e o formato de um dos relatórios gerados, respectivamente.

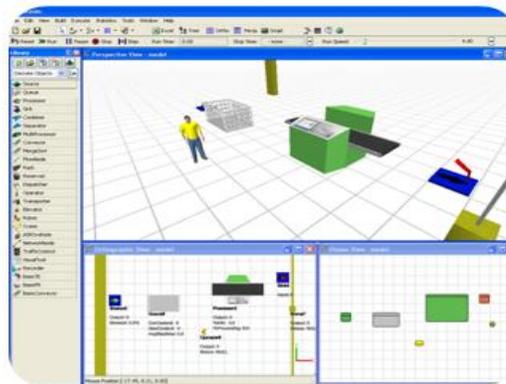


Figura 13: Representação 3D simulador Flexsim.

StateReport

State Report

Model Stop Time: 1000.000

Object	Class	idle	processing	busy	blocked	generating	empty
/Source2	Source	0.000%	0.000%	0.000%	85.561%	14.439%	0.000%
/Queue3	Queue	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.500%
/Processor4	Processor	38.534%	15.430%	0.000%	14.947%	0.000%	0.000%
/Processor5	Processor	35.493%	10.184%	0.000%	25.998%	0.000%	0.000%
/Processor6	Processor	30.516%	18.652%	0.000%	20.569%	0.000%	0.000%
/Dispatcher7	Dispatcher	0.000%	100.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%
/Operator8	Operator	5.400%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%
/Operator10	Operator	4.673%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%
/Operator11	Operator	10.280%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%
/Operator12	Operator	15.234%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%
/Operator13	Operator	21.591%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%
/Operator14	Operator	29.637%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%
/Processor15	Processor	38.682%	15.427%	0.000%	16.800%	0.000%	0.000%
/Processor16	Processor	37.764%	17.646%	0.000%	14.283%	0.000%	0.000%
/Processor17	Processor	40.363%	12.380%	0.000%	17.180%	0.000%	0.000%
/Sink18	Sink	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%
/Processor25	Processor	62.046%	37.954%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%

Figura 14: Relatório gerado pelo simulador Flexsim

Os objetos no Flexsim são classificados em dois grupos: Fixed Resources e Task Executors. Os primeiros são objetos estacionários ou fixos, como processadores ou elementos de estocagem. Esses elementos são classificados, segundo o distribuidor como: SOURCE, QUEUE, PROCESSOR, SINK, COMBINER, SEPARATOR, MULTI PROCESSOR, CONVEYOR. Os Task Executors podem ser operadores ou sistemas de

movimentação como: OPERATOR, TRANSPORTER, ELEVATOR, ROBOT e CRANE [43].

A fonte é considerada um recurso fixo que cria peças (ou FLOWITEMS), as quais se movimentam durante a simulação. Cada fonte cria uma classe de peças com seus respectivos atributos como cor, tipo, etc. Os modelos precisam ter pelo menos uma fonte. Essa entidade não possui conexão de entrada apenas de saída

A liberação de peças pode ser feita a partir da inserção de tempos (taxa entre chegadas), ou tabela com horários. Pode ser especificado o número de peças geradas simultaneamente na fonte. As peças são liberadas da fonte automaticamente ou com a ajuda de sistemas de transporte. O elemento que estoca peças pode ter limite de armazenagem e posições de armazenagem pré-definidas pelo usuário.

A entidade denominada fila armazena peças quando o objeto que deve recebê-las esta indisponível. Caso o usuário precise representar alguma regra para a saída das peças, diferente da FIFO (primeiro elemento a entrar será o primeiro a sair) deve ser criado um código específico.

Os processadores possuem um recurso denominado COMBINER que agrupa peças em lotes para processá-las ou movimentá-las. O recurso chamado SEPARATOR separa peças agrupadas pelo COMBINER.

O tipo específico de processador, denominado SEPARATOR, possui um módulo de duplicação de peças ou de desmembramento de peças agrupadas pelo recurso COMBINER. Após o processamento, quando as peças são desmembradas além das peças a “embalagem” também é liberada.

Utiliza-se o MULTIPROCESSOR quando se tem uma peça ou componente que precisa passar por diversas operações, com tempos de processamento distintos, ou utilizando diferentes recursos. Dessa forma é possível simular processos simultâneos. Se os processos ocorressem consecutivamente, processadores diferentes poderiam ser conectados entre si sem o uso do MULTIPROCESSOR.

Os sistemas de movimentação de peças podem ser definidos segundo regras de acúmulo ou não de peças, distância mínima entre peças além de parâmetros como velocidades e dimensões. Veículos, pórticos, pontes rolantes e elevadores podem ser criados. A figura 15 mostra os principais módulos de construção do simulador.

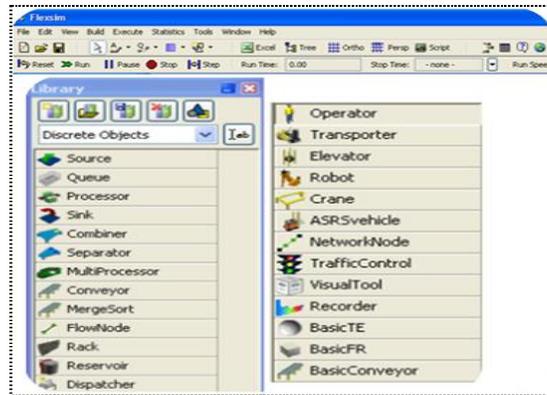


Figura 15: Módulos de construção do simulador Flexsim.

2.8.5. Simulador QUEST

O simulador QUEST (Queuing Event Simulation Tool) foi desenvolvido pelo grupo Dassault Systems. Esse grupo é reconhecido internacionalmente como fornecedor de soluções voltadas para o gerenciamento do ciclo de vida dos produtos (PLM). A organização possui 65.000 clientes em 80 países. Desde 1981, a Dassault desenvolve e comercializa programas voltados para os processos industriais e visualização tridimensional de produtos desde a concepção à fabricação [45].

O grupo comercializa produtos como o CATIA (modelagem tridimensional de produtos e recursos), ENOVIA (gerenciamento de banco de dados e integração de sistemas), DELMIA (modelagem tridimensional de produtos e recursos, simulação de processos e análise ergonômica), PROCESS ENGINEER (Gerenciamento da estrutura produto, processo e recurso), SMARTTEAM (Gerenciamento das atividades de setores como: Projeto, Produção, Planejamento, Comercial, Compras, etc.), QUEST (simulação de eventos discretos) [20].

Segundo o fabricante, o programa QUEST atende indústrias do setor: automotivo, aeroespacial, de manufatura, eletro-eletrônico, bens de consumo e naval. Pode-se citar como usuário do simulador o estaleiro Yantai Raffles Shipyard (YRS) Ltd. Localizado na China, o estaleiro aumentou a produtividade e reduziu a taxa de HH (homens/ hora) a partir de modelos de simulação desenvolvidos. A empresa Baxi Potterton líder do setor europeu de equipamentos de aquecimento utiliza o simulador para avaliar configurações de produção e arranjos [18, 20].

O programa foi utilizado pela empresa Siemens Transportation para auxiliar no arranjo físico da área de manutenção, aumentar a produtividade, e otimizar o número de

funcionários e equipamentos, no Reino Unido. O simulador ainda foi usado para realizar um planejamento dos processos de manutenção [20].

A documentação contendo a explicação de funções, comandos do programa e características são fornecidos apenas a clientes. O manual digital (mostrado na próxima figura) contém exemplos de utilizações, exercícios e extenso conteúdo sobre a utilização da linguagem SCL (Simulation Control Language). O treinamento básico e avançado é negociado a partir da aquisição de licenças comerciais ou acadêmicas. Grupos de discussão de usuários não são muito representativos comparados com outros simuladores.



Figura 16: Tela do manual virtual do simulador QUEST [44].

O suporte técnico pode ser feito através de correio eletrônico, contato telefônico, ou visitas programadas. Demonstrações do funcionamento do simulador podem ser agendadas, mas não são disponibilizadas versões de teste. O simulador possui integração com ferramentas de gerenciamento de processos, planejamento entre outras soluções do fabricante. Existe uma ferramenta para comprimir todos os arquivos necessários da biblioteca (incluindo geometrias) para poder visualizar o modelo em outro computador.

O simulador QUEST pode ser usado facilmente por usuários sem experiência anterior com outros simuladores. Contudo, para utilizar as funções avançadas que requerem a edição de lógicas é necessário algum conhecimento da linguagem Pascal e C (a tela de programação é mostrada na figura 17). O sistema pode ser executado em plataforma Unix ou Windows e os requisitos de instalação do programa são: sistema

operacional Windows XP ou Server, a placa de vídeo Intel Core 2 Duo e memória acima de 3.06 GHz.

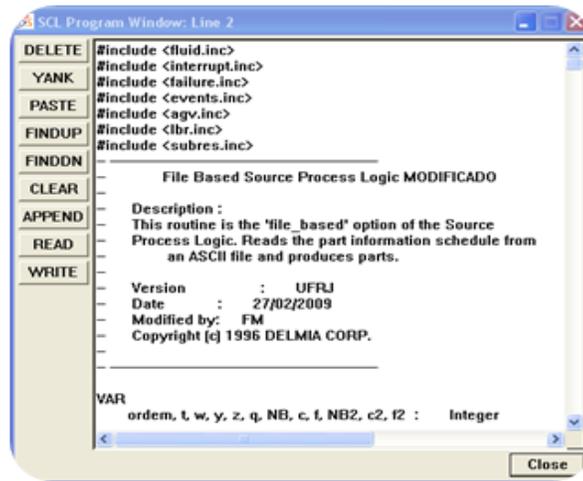


Figura 17: Tela de programação do simulador QUEST.

O programa possui visualização tridimensional realista e fornece relatórios estatísticos sobre filas, tempos de espera, utilizações, entidades no sistema, produção, etc. Gráficos dinâmicos podem ser visualizados enquanto o modelo está sendo executado. Relatórios podem ser gerados a partir de programação e vistas de áreas do modelo específicas podem ser definidas.

A tabela 5 apresenta os painéis de construção do simulador e a tabela 6 detalha os principais módulos e suas funções. Em cada módulo algumas atividades podem ser realizadas como a criação dos modelos, definição dos elementos, execução das simulações, entre outras.

Tabela 5: Painéis do simulador QUEST [44]

PAINEL DE CONSTRUÇÃO DE MODELOS						
<i>File</i>	<i>Model</i>	<i>Advanced</i>	<i>Run</i>	<i>CAD</i>	<i>Tools</i>	<i>Help</i>
<i>Abertura de modelos, seleção de bibliotecas, salvar e apagar mmodelos, etc.</i>	<i>Elementos básicos, definição de processos, gráficos dinâmicos, etc.</i>	<i>Cinemática</i>	<i>Simulação, Rastreamento de eventos, Geração de relatórios, etc.</i>	<i>Modelagem 3D</i>	<i>Medidas das distancias entre elementos, Anotações, etc.</i>	<i>Acesso ao manual</i>

Tabela 6: Principais módulos do simulador QUEST [44]

MÓDULOS PRINCIPAIS			
<i>BUILD</i>	<i>MHS</i>	<i>LAYOUT</i>	<i>AUX</i>
<i>Criação de peças, máquinas, fonte, etc.</i>	<i>Criação de controladores, trabalhadores, rotas, etc.</i>	<i>Criação de Sistemas de movimentação</i>	<i>Definição dos turnos de trabalho, adição de falhas, etc.</i>

Falhas, turnos de trabalho e processos de reparo são facilmente associados a múltiplas máquinas. A associação de diferentes classes de operadores à diferentes processos é simples, bem como a alteração de parâmetros dos elementos (velocidades, geometrias, condições iniciais como níveis de estoque, por exemplo, produção máxima, etc.).

Recursos como cinemática podem ser associados à geometria de máquinas e sistemas de transporte. Esse artifício permite uma representação mais realista dos movimentos e do funcionamento dos elementos como máquinas, por exemplo.

O simulador importa arquivos CAD em diversos formatos inclusive originados pelos programas Catia/Delmia V5 desenvolvidos pela Dassault. Arquivos externos como planilhas, documentos (no formato “txt”), e originados em sistemas de gestão de recursos e programação da produção podem ser importados.

Os arquivos contendo lógicas, modelos e geometrias de produtos e recursos são armazenados em uma biblioteca e podem ser totalmente reutilizados. O simulador utiliza o programa OptQuest para realizar a otimização de parâmetros de modelos. A figura 18 mostra a representação do modelo real e realizada pelo simulador QUEST.

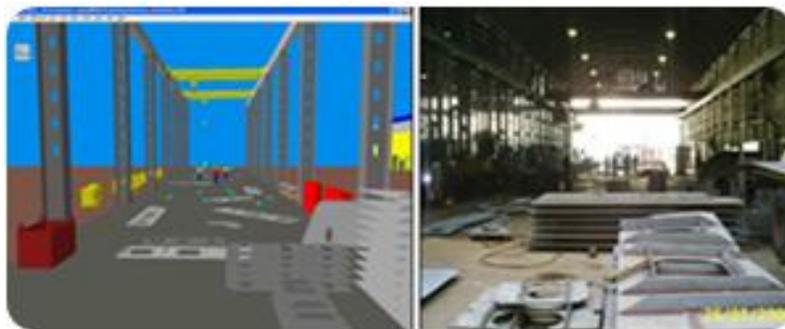


Figura 18: Representação 3D simulador QUEST.

No módulo de construção (BUILD), são criados (ou alterados) elementos como fontes, máquinas, dissipadores, armazenadores, esteiras e conexões (entre elementos) e peças. As classes de peças permitem o agrupamento de entidades com atributos comuns (dimensões, geometrias, etc.). A definição da rota é especificada de acordo com o tipo de peça.

O elemento fonte gera peças e permite a inserção de dados como limite de geração, tempo de aquecimento (ou preparação), estoque inicial e taxas entre as liberações (individuais ou em lotes). Operadores podem ser requisitados para a retirada das peças. Arquivos contendo a lista de peças que devem ser criadas podem ser lidos facilmente a partir de lógica pré-existente.

Os elementos chamados de Buffers representam o local onde as peças são armazenadas ou onde são formadas filas. A entrada de peças ou saída pode estar condicionadas às solicitações de outros elementos. Níveis de estoques iniciais e capacidade de armazenagem são definidos a partir de cliques nos elementos.

Tempos de carregamento e descarregamento podem ser definidos nos elementos e representados por distribuições determinísticas ou estocásticas. O simulador possui quantidade considerável de opções de regra de armazenagem e de liberação de peças. As máquinas podem conter diversos processos e realizá-los simultaneamente, caso haja necessidade.

As máquinas, fontes e dissipadores e locais de armazenagem (Buffers) podem funcionar segundo o conceito de produção puxada (requisição de outro recurso), ou empurrada (sem a necessidade de requisição de outro recurso). No caso de locais de armazenagem, quando esses realizam a produção puxada devem ser informadas as quantidades e tipos de peças que serão requisitadas.

Todos os processos são estruturados de acordo com as peças ou componentes de entrada e de saída (peças novas ou não), e com os tempos de processamento. A precedência entre processos pode ser estabelecida e regras de processamento e de rotas podem ser associadas utilizando-se lógicas pré-existentes do simulador ou editando-se a lógica interna dos elementos.

Os sistemas de movimentação são representados por veículos guiados, esteiras, pontes rolantes, e pórticos. Nesses elementos são parametrizados dados, a saber, a capacidade, tempos ou distribuições de carregamento e descarregamento, regras de definição de rotas, etc. No caso de esteiras rolantes existe a opção do

acumulo de peças, e pode se definir as respectivas distâncias quando a esteira esta parada ou em movimento.

Os sistemas de transporte possuem controladores com diversas lógicas de funcionamento. As rotas dos veículos guiados, ou o arranjo das pontes rolantes e pórticos podem ser modelados pelo usuário sem grande esforço. Nos sistemas de movimentação são criados pontos de decisão que indicam o local onde as peças devem ser deixadas ou retiradas.

A verificação de erros na modelagem é informada a partir e caixas de mensagem contendo a indicação do elemento com problemas e do tipo de erro. Durante a execução da simulação uma ferramenta estando acionada permite a diferenciação dos estados dos elementos a partir de cores. Dessa forma, os elementos que estão parados (quebra ou período de manutenção) adquirem cor diferente de outros em funcionamento.

O recurso de rastreamento identifica durante a simulação todos os processos e as suas ocorrências. Alguns comandos oferecem a identificação rápida das estatísticas dos elementos, em qualquer momento em que a simulação tenha sido interrompida como mostra a figura 19.

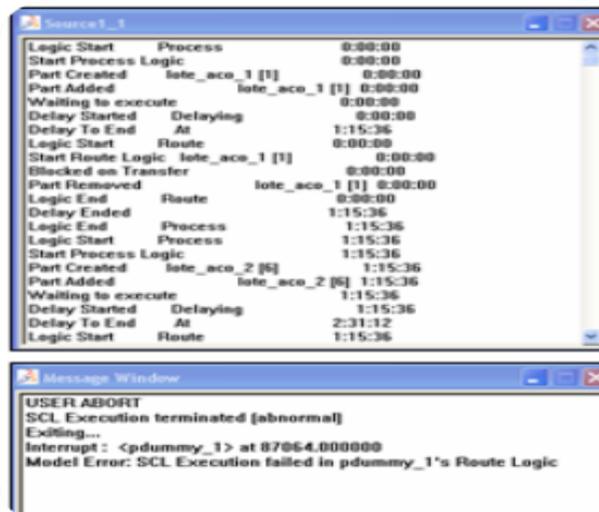


Figura 19: Estatísticas de um elemento (QUEST).

2.9. Comentários sobre os simuladores

Todos os simuladores comentados utilizam o contato telefônico ou correio eletrônico para realizar o suporte técnico. Quanto à documentação, o programa Arena possui tutoriais, artigos e teses disponibilizados na Internet. O fato de que alguns livros didáticos fornecem versão acadêmica (com limitações), é outro ponto positivo para a divulgação e teste do programa.

O simulador Promodel possui também grande quantidade de material divulgado e grupos virtuais de discussão na Internet. As versões gratuitas de teste e o treinamento gratuito são oferecidos atraindo usuários. O fabricante do simulador Flexsim utiliza seu sítio para oferecer manuais, apoio à modelagem, atualizações e bibliotecas de componentes. Nesse sítio, demonstrações do sistema são apresentadas, e os usuários podem compartilhar informações, além de participarem do grupo de discussão.

No programa eM-Plant as dúvidas podem ser reportadas no sítio da empresa e atualizações também podem ser acessadas. Os grupos de discussão, conferências e acesso à documentação são oferecidos apenas para os clientes. As demonstrações do simulador são possíveis mediante a visita de representantes e não são disponibilizadas versões de teste.

O simulador QUEST disponibiliza (virtualmente) para os clientes a documentação com funções, comandos e tutoriais. Os grupos de discussão não são muito representativos comparados aos outros simuladores. As demonstrações do programa podem ser agendadas com o fabricante (ou representante).

No critério de animação, o programa Arena possui representação bidimensional e o usuário deve adquirir outro sistema caso queira ter a visualização tridimensional. No simulador Promodel a representação mais comum também é bidimensional, e de acordo com grupos de discussão outra visualização demanda maior esforço.

Os programas Flexsim, eM-Plant e QUEST apresentam visualização tridimensional. O primeiro e o segundo importam geometrias em diversos formatos. O terceiro (QUEST) além de importar de diferentes programas de desenho possui integração com o sistema Catia/Delmia V5, permitindo que a simulação do projeto do produto seja integrada com a simulação de eventos discretos.

No critério que se refere às ferramentas, os programas Arena, Promodel e eM-Plant possuem módulos acoplados de tratamento de dados. Os simuladores Promodel,

eM-Plant, Flexsim e QUEST possuem sistemas de otimização. Módulos de verificação de erros e rastreadores são comuns a todos os simuladores comentados. Artifícios de identificação de gargalos e fluxos são oferecidos pelo eM-Plant.

O simulador QUEST possui ferramenta que comprimi todos os arquivos necessários da biblioteca (incluindo geometrias), facilitando a visualização de modelos em outros computadores. O programa Flexsim possui apenas um arquivo com todas as informações do modelo, contudo, devido a esse fato as lógicas são mais difíceis de serem desacopladas e reaproveitadas. A maior parte dos simuladores estudados apresenta boa compatibilidade com programas da plataforma da Microsoft Windows. A tecnologia denominada Active X, presente em alguns simuladores, permite a integração dos modelos com dados de planilhas eletrônicas, de arquivos de texto, e apresentações.

3 Simulação da Construção Naval

3.1. Introdução

Estaleiros e universidades recentemente passaram a utilizar a Simulação de Eventos Discretos para o estudo de etapas da Construção Naval (processamento de aço, montagem, pré-edificação e edificação). Alguns processos foram pouco explorados como o acabamento avançado de blocos (colocação de tubulações, acessórios, etc.) e processos inerentes à cadeia de suprimentos. As parcerias entre organizações, a troca de experiência e publicações de casos de sucesso estão encorajando novos usuários a aderirem ao método [45].

A vantagem da simulação é a possibilidade de testar cenários de forma precisa, ou a produção de diferentes tipos de embarcações, [45]. Para Shin *et. al.*, [46], em um futuro próximo, a integração da simulação com estágios de projeto deve ser acelerada. De acordo com os autores além do aprimorar o planejamento e a programação da produção, a simulação pode aperfeiçoar o projeto de embarcações. A simulação como ferramenta diária do controle das atividades produtivas também é uma tendência notória.

Para Kaarsemaker e Nienhuis [47] a simulação pode ser útil para avaliar, decidir e comunicar os planos de manufatura, permitindo a análise dinâmica e transparente da produção. A geração automática de dados para o modelo, e a aquisição contínua dos dados reais da produção (no chão de fábrica) é necessária, especialmente quando se pretende utilizar a simulação para planejamento da produção [46].

A Simulação de Eventos Discretos tem sido utilizada para auxiliar os gestores no entendimento da dinâmica do sistema real, e visualização de alternativas de melhorias do sistema. Todavia, mesmo que o sistema não exista, a simulação pode trazer benefícios quanto à definição de equipamentos, mão de obra, arranjos, etc. Os estudos de simulação que dispõem de pouca ou nenhuma informação normalmente utilizam dados de sistemas semelhantes, experiência de operadores (e gestores) e informações de fabricantes [49].

Shin *et. al.* [49] propôs uma metodologia para medir o desempenho de um sistema de manufatura, com o intuito de avaliar a produtividade. Essa metodologia estimou os custos e o desempenho do sistema quantitativamente. Foi considerada a influência de fatores como: as mudanças em equipamentos, o arranjo da planta, a

eficiência do trabalho, a gestão da produção, as fontes de matérias-primas, etc. A organização da estrutura PPR (Produto, Processo, Recursos) ajudou o projeto a definir melhor as estratégias.

A ferramenta STS (Simulation Tool-kit for Shipbuilding) foi desenvolvida em 2000, pelo estaleiro alemão Flensburger. O sistema representou funções específicas da Construção Naval e bibliotecas com elementos do setor. O desenvolvimento da ferramenta baseou-se no programa eM-Plant [45].

A formação do grupo denominado SimCoMar (Simulation Cooperation in the Maritime Industries) foi estabelecida entre estaleiros, universidades e outras entidades. O objetivo foi acelerar o desenvolvimento da simulação no campo da Construção Naval, distribuir e divulgar a tecnologia aos estaleiros europeus e americanos [51].

Atualmente, o SimCoMar é formado pelos estaleiros Flensburger e pelo Nordseewerke Emden. As universidades que apóiam são a TUHH (Technische Universität Hamburg-Hamburg), a DUT (Delft University of Technology) e a universidade ANAST (University of Liege). O Center of Maritime Technologies também faz parte da iniciativa [51].

Outra meta do grupo foi o aperfeiçoamento da ferramenta STS, e aumento da plataforma de teste, para facilitar seu aproveitamento por parte dos estaleiros. Dessa forma, foi buscada a redução dos tempos de modelagem e a promoção de uma maior confiabilidade da técnica de Simulação de Eventos Discretos [53].

Novas funções do STS são desenvolvidas e disponibilizadas pelo SimCoMar no sítio do grupo para parceiros e usuários. A iniciativa permite a troca de conhecimentos sobre aplicações da simulação e discussões que podem estimular parcerias de pesquisa. As figuras a seguir apresentam um exemplo da tela da ferramenta STS para inserção de parâmetros de um equipamento (máquina de corte) e a visualização (bidimensional e tridimensional) de um modelo.

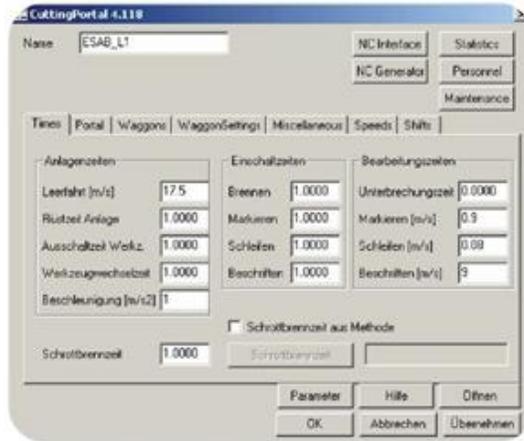


Figura 20: Inserção de dados de equipamentos ferramenta STS [45].

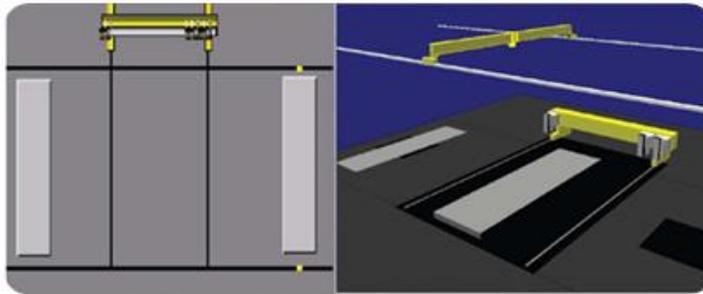


Figura 20: Tela com modelo de oficinas de corte simulador STS [45].

Nas últimas décadas houve um acelerado crescimento do uso da simulação pela indústria naval holandesa. O setor vem procurando reduzir os tempos de entrega, aumentar a qualidade dos produtos, e os custos de produção. A automatização de processos é outra questão que pode ser avaliada, uma vez que diversos estaleiros utilizam linhas mecanizadas ou robotizadas. O Meyer Werft (estaleiro alemão), por exemplo, utiliza técnicas avançadas de soldagem para fabricação de estruturas (soldagem a laser automatizada) [52].

Alguns estaleiros alemães estão muito avançados no uso da simulação. O estaleiro Flensburger e o Meyer Werft podem ser citados, nesse sentido. O primeiro fabrica navios cargueiros, veleiros, lanchas, diques flutuantes, petroleiros, pesqueiros, entre outros [51]. E o segundo é especializado na construção de cruzeiros [52]. Apesar de serem diferentes em muitos aspectos, se assemelham no que se refere ao desenvolvimento de modelos de simulação discreta, a integração de soluções e ao ambiente de planejamento de processos.

Os dois estaleiros comentados desenvolveram bases de dados para suportar os modelos de simulação. Alguns programas foram integrados a essa base de dados alimentando-a de forma contínua. Krause e Roland [45] citam os programas como: Sistemas de controle de materiais (MARS) e de projeto (NUPAS); Sistemas de otimização do corte (ALMA); Sistemas de programação da produção (ACOS); Sistemas de planejamento de pessoal; Sistemas definição de estratégias de construção e Banco de dados gerais.

A simulação no Flensburger pôde auxiliar o projeto de navios do ponto de vista da logística interna de uma embarcação. Operações de carregamento e descarregamento de navios, consideradas complexas logisticamente, quando se possui diferentes tipos de sistemas de movimentação foram analisadas. Os tempos de carregamento, ou gargalos puderam ser identificados a partir do modelo de simulação. A movimentação de passageiros em embarcações também é outra questão que pode ser abordada [45].

O Flensburger investigou o processo de carregamento de uma embarcação de transporte de rolos de papel. A sugestão inicial de projeto continha três elevadores e três esteiras rolantes. O impacto da eliminação de elevadores e esteiras foi visualizado, assim como a importância e utilização de cada recurso. Foram modelados diferentes tipos de sistemas de movimentação e o transporte de diferentes diâmetros de rolo de papel.

A simulação mostrou que a adição de esteiras não seria relevante para o aumento da produtividade, pois o gargalo do processo era o elevador de transporte. Foi possível verificar que para os rolos com maiores diâmetros, o número ótimo de empilhadeiras, no convés, divergia da quantidade ideal para rolos com menor diâmetro. O redimensionamento dos recursos contribuiu para uma economia de 1.3 milhões de dólares por ano [45].

A aplicação da simulação no planejamento da produção do Flensburger é dividida nas fases estratégica, tática e operacional. No planejamento estratégico, os métodos de construção e seqüências são definidos. No planejamento tático, a ênfase é dada à otimização dos planos de produção semanais para certas estações de trabalho. Nessa fase, os parâmetros e as seqüências são gerenciados por níveis. No planejamento operacional, a previsão da reação das estações diante de mudanças como, por exemplo, paradas pode ser estudada [45].

3.2. Simulação na Construção Naval brasileira

A Construção Naval no Brasil vive atualmente o seu momento mais próspero desde a década de 70, quando o país chegou a ser um dos principais construtores navais do mundo (1979). Fatores como as mudanças no mercado mundial e a crise econômica nos anos 80 promoveram estagnação do setor no país nas décadas seguintes [53, 54]. Atualmente os estaleiros brasileiros retomaram a construção de navios mercantes de grande porte.

A retomada da indústria está ligada à ampliação das operações petrolíferas da empresa Petrobras no litoral brasileiro. O cenário atual dos estaleiros nacionais conta com encomendas de navios de grande porte, embarcações de apoio e realização de reparos navais. Um dos desafios dos estaleiros nacionais para se inserir efetivamente no mercado mundial é a superação da defasagem tecnológica [53].

A modernização de equipamentos e instalações, a produção em linha e aperfeiçoamento de processos, são exemplos de atividades que podem minimizar os efeitos da recuperação tardia da indústria naval no país. Uma dificuldade enfrentada é a escassez de mão-de-obra qualificada, devido à dispersão da mesma no período de baixa da produção.

Nesse contexto, a Simulação de Eventos Discretos pode auxiliar os estaleiros brasileiros a obterem um perfil responsivo, estando mais preparados às mudanças em termos de variedade de produtos (navios) ou de volume de produção. A gestão da informação necessária ao suporte da simulação é outro benefício que pode estar associado ao uso da ferramenta.

A probabilidade de sucesso da simulação e atendimento das expectativas pode ser aumentada a partir do conhecimento das suas aplicações específicas ao tipo de estaleiro, e do processo construtivo a ser simulado. O perfil do estaleiro se refere às suas principais atividades. Dessa forma, os estaleiros podem ser divididos em: organizações em fase de planejamento do arranjo geral ou ampliação de oficinas, e organizações já em operação.

Os principais processos construtivos do setor naval são citados como: Armazenamento e Tratamento de chapas e perfis; Processamento do aço (corte e conformação); Fabricação de estruturas (painéis e submontagens); Montagem e Pintura de blocos; Pré-edificação e Edificação. As atividades de acabamento avançado são usualmente realizadas nas etapas de montagem de blocos.

Os tópicos a seguir apresentam aplicações da simulação na Construção Naval. Serão levantadas questões que podem ser estudadas com a técnica dependendo da fase do estaleiro, e em seguida, serão apresentados exemplos de processos construtivos e etapas da construção estudadas com a técnica.

3.2.1. Perfil dos estaleiros

A simulação para estaleiros em fase de planejamento de instalações pode auxiliar a avaliação dos investimentos e estratégias de longo prazo, permitindo um dimensionamento adequado de recursos. No processo de armazenagem de aço, por exemplo, a modelagem permite o teste de diferentes arranjos de pilhas e estratégias de estocagem.

Os estaleiros sem restrição de espaço podem ter custos menores com a pavimentação, uma vez que essa não precisa suportar grandes quantidades de peso localizado. A altura ideal de pilhas de chapas ou os níveis de estoque desejados podem ser estudados, além de formas de organização do material (separação por dimensões, fornecedor, obra de destino, etc.).

Freqüências e tamanhos dos pedidos de chapas, para abastecer o pátio, podem ser verificados quanto aos níveis de estoque, ocorrências, e durações de interrupções do atendimento da produção, devido às faltas de material. A quantidade e tipos de sistemas de movimentação (e de tratamento) podem ser estudados para atender a produtividade desejada, assim como atividades para o balanceamento das áreas e recursos.

A vantagem da simulação nas etapas de corte ou fabricação de painéis planos em linha é a possibilidade de teste de diferentes equipamentos, representando diferentes fornecedores e custos (aquisição, instalação, etc.). A produtividade obtida e as formas de operação podem ser visualizadas antes da concretização da compra.

Diferentes processos (automáticos, semi-automáticos ou manuais) podem ser estudados quanto aos impactos na organização da produção. A produção em linhas e a integração de processos (corte e fabricação de painéis planos, por exemplo) podem ser planejadas reduzindo os custos e tempos de integração.

O teste de diferentes posicionamentos de máquinas e do fluxo de materiais permite a definição de uma configuração que minimize as distancias e a movimentação antes que as máquinas sejam instaladas. Após a instalação de certos equipamentos, o

respectivo reposicionamento poderia ser inviável. A localização das sobras de material e dos estoques que alimentam as estações de trabalho pode ser investigada. A simulação pode auxiliar a determinação dos níveis de estoques de produtos que alimentam as oficinas, para que seja evitada a parada da produção por falta de insumos.

A dificuldade enfrentada nos processos de fabricação de submontagens ou painéis curvos esta relacionada à variabilidade dos produtos e na forma com que esses são processados (na maioria das vezes manual). A conformação de materiais pelo método de linha de calor é complexa e pode ser aperfeiçoada pela simulação, a partir da representação e estudo do método e de alternativas. A quantidade e tipos de recursos podem ser determinados baseando-se na demanda do estaleiro.

A montagem de blocos pode ser analisada virtualmente e de acordo com diferentes estratégias de edificação. Diferentes métodos podem ser investigados considerando a inclusão do acabamento avançado. Estações dedicadas à montagem de tipos específicos de blocos podem ser comparadas quanto à produtividade de estações genéricas (que produzem qualquer tipo de blocos).

O compartilhamento de recursos como pórticos, pontes rolantes e carros hidráulicos também pode ser verificado, além da quantidade e tipos de equipamentos. A produtividade e os tempos considerando de diferentes demandas podem ser estimados mais adequadamente, fornecendo um maior suporte aos gestores.

Na pré-edificação, diferentes tamanhos de grandes blocos podem ser modelados. O espaço físico e recursos necessários podem ser definidos dependendo do tamanho dos grandes blocos. A carga de trabalho de acordo com diferentes tipos de embarcações pode ser avaliada quanto às implicações operacionais, como a adequação dos níveis de estoque de produtos intermediários, e dos parâmetros dos equipamentos (velocidades, etc.).

A simulação da edificação pode fornecer informações importantes para que o estaleiro defina a melhor estratégia e escolha os mais adequados recursos. A edificação simultânea é outra questão que pode ser abordada, para que os tempos de uso do dique sejam reduzidos.

Entre o grupo dos estaleiros brasileiros em fase de planejamento e instalação, o de maior porte é o estaleiro Atlântico Sul S.A. Localizado no município de Ipojuca no complexo portuário de Suape, o estaleiro foi criado em novembro de 2005, e tem como sócios os grupos Camargo Corrêa e Queiroz Galvão e a empresa PJMR [59].

O estaleiro possui ainda como sócio o estaleiro sul-coreano Samsung Heavy Industries. O Atlântico Sul está apto a produzir navios de até 500 mil toneladas de porte bruto, plataformas de petróleo e está apto a desenvolver serviços de reparo navais [55]. A figura 22 apresenta um arranjo geral do estaleiro.



Figura 21: Estaleiro em fase de planejamento [55].

O grupo dos estaleiros em operação, para atender diferentes demandas e estabelecer diferencial competitivo, precisam constantemente aperfeiçoar seus processos e técnicas. Diante de mercados exigentes, esses estaleiros precisam adequar suas estratégias operacionais de forma a obter menores custos e tempos de produção.

Os sistemas de movimentação do pátio de aço podem ser testados sob diferentes parâmetros. No corte e fabricação de painéis planos, diferentes seqüências e planos de corte podem ser avaliados, reduzindo os tempos de preparação dos equipamentos e permitindo um maior aproveitamento dos recursos.

A fabricação de painéis curvos e de submontagens pode ser balanceada, e diferentes métodos de montagem dessas estruturas e de blocos podem ser estudados. As seqüências de produção (diárias ou semanais) podem ser planejadas de forma a otimizar a produção. Na montagem, pré-edificação e edificação, as restrições e conflitos entre os sistemas de movimentação podem ser previstos e as estimativas de tempo de construção podem considerar riscos e incertezas.

O estaleiro Mauá S.A. (RJ) pode ser classificado como uma organização em fase de operação. O estaleiro dispõe de três unidades industriais localizadas na Baía de

Guanabara e está habilitado a construir embarcações como: cargueiros, portas-contêiner, navios tanque, graneleiros, e plataformas petrolíferas. A figura 23 apresenta a vista do estaleiro [56].



Figura 22: Estaleiro em fase de operação [56].

3.2.2. Perfil do processo: Armazenamento e tratamento de chapas

O armazenamento de chapas e perfis (reforçadores pré-fabricados) na maioria dos estaleiros é realizado em áreas abertas chamadas Pátio de aço. O dimensionamento do pátio depende da necessidade da produção e dos intervalos de fornecimento. As incertezas de entrega (greves, atrasos, etc.), e os custos da compra influenciam no tamanho dos pedidos e na manutenção dos níveis de estoque. O aço pode ser recebido por via fluvial ou rodovia.

O solo do pátio deve ser preparado para suportar determinado peso em toneladas de pilhas de aço. Assim, a pavimentação deve ser calculada a partir do planejamento da necessidade de estoque. A área destinada ao pátio deve ser suficiente para que o fluxo de materiais ocorra de forma adequada, permitindo espaço para circulação das peças.

Os recursos envolvidos são guindastes, empilhadeiras motorizadas, pórticos e pontes rolantes que posicionam as chapas nas pilhas (carregamento) e posteriormente, entregam as chapas a uma esteira rolante ligada à linha de tratamento (descarregamento) ou a áreas específicas caso o estaleiro não realize o tratamento em linha (tratamento químico). Alguns estaleiros possuem calandras que realizam o desempenho de chapas antes da entrarem no processo de tratamento.

O tratamento do aço tem a finalidade de revestir as chapas e perfis com uma camada de tinta protetora contra corrosão ou deterioração de sua superfície (shop primer). A tinta deve ser adequada às instalações de pintura automática (normalmente com sistemas chamados "airless spray") e não deve interferir no processo de corte ou soldagem. Outro fator importante considerado é a toxicidade da substância que compõe a tinta, além dos custos [59].

Antes da pintura é necessária a preparação da superfície das peças de aço para a retirada da camada de óxido, permitindo melhor adesão e duração da tinta protetora. Alguns estaleiros substituem o método mecânico tradicional de preparação da superfície (que gera resíduos tóxicos), pelo método químico, reduzindo o impacto ambiental. Contudo, o método químico demanda um maior nível de cuidados no manejo das peças e da substância química (ácido) [59].

Os sistemas mais comuns de tratamento são: processo contínuo de jateamento abrasivo, processo químico descontínuo, e processo químico contínuo. O processo contínuo de jateamento é composto por uma linha automatizada onde ocorre o

jateamento com o material específico (granalha de aço), a limpeza com ar seco, a pintura automática e a secagem. O transporte é realizado por uma esteira automatizada com roletes que direcionam as peças para a cabine de tratamento [59].



Figura 23: Linha de tratamento por sistema de jateamento [59].

No processo químico descontínuo, as peças são movimentadas por pórticos e pontes rolantes, e mergulhadas em tanques com ácido fosfórico, água doce e tinta, respectivamente. No processo químico contínuo, o procedimento é automatizado, e possui uma correia de transporte intermitente e elevada, e pórticos para a movimentação das peças para os tanques (alimentação e retirada do sistema) [58].

3.2.3 Aplicação da Simulação no Pátio de aço

Segundo C. Park *et al.* [60] o departamento de engenharia de produção do estaleiro do estaleiro coreano Hyundai Heavy Industries (HHI), apoiado pelo seu Instituto de Pesquisa Industrial, desenvolveu um modelo de simulação computacional da armazenagem e tratamento do aço. A iniciativa ocorreu devido ao reconhecimento da importância da armazenagem para o desempenho da produção e as diversas interações do processo com os departamentos de marketing, de projeto, de compra e de produção.

A área do pátio de aço do estaleiro é de 65.000 m², com recebimento médio diário de 55.000 toneladas de aço. Cada chapa pesa em média 3,7 toneladas. O pátio é dividido em pistas e cada pista possui certo número de pilhas. Dentro de cada pista as chapas são movimentadas por pontes rolantes e dentro das pistas são movimentadas por esteiras. As estações de processamento requisitam do pátio aproximadamente 2.500 toneladas de aço por dia.

Desde 2003, o estaleiro desenvolveu um simulador discreto para identificar formas de aperfeiçoar as operações de armazenagem e amenizar as dificuldades de gestão. Além da necessidade de redução dos níveis de estoque de aço foram controlados fatores como a chegada de chapas (frequências, probabilidade de atrasos, etc.), a alocação das áreas de empilhamento e o atendimento eficiente da produção.

O departamento de projeto, com base no plano de divisão de blocos, estabelece a necessidade de chapas (quantidades e especificações), e solicita o material para o departamento de compras. Um dos problemas do processo de aquisição das chapas são as restrições de cotas que limitam a quantidade fornecida por siderúrgica.

A principal dificuldade encontrada é 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 re-arranjo do pátio e a complexa gestão dos lotes incompletos, devido aos tempos diferentes de fornecimento.

O pátio de aço possui uma área onde é armazenado temporariamente o material para que possa ser organizado na área principal de acordo com a necessidade da produção em termos do agrupamento dos lotes, priorizado em uma mesma pilha. As chapas que são entregues antes da requisição da produção permanecem no estoque temporário. Chapas que chegam com atrasos são alocadas em outra área (denominada de substituição).

O setor de planejamento define os lotes de produção compostos por chapas identificadas e específicas para um determinado bloco. Devido à falta de espaço para adotar a política de empilhamento de acordo com componentes do lote, é comum acontecer de lotes diferentes terem que compor a mesma pilha e nem sempre estarem completos, dificultando o processo de retirada de chapas e atendimento da produção.

A figura a seguir apresenta sistemas de informação acoplados ao simulador. Esses sistemas forneceram dados como a programação da produção, a frequência e tamanho dos pedidos de chapas estabelecidos com as siderúrgicas, a organização das pilhas (plano de pilhas), a disponibilidade e características das áreas e ferramentas estatísticas de análise de dados. O plano de pilhas é estabelecido baseado na necessidade inicial da produção (cronograma).

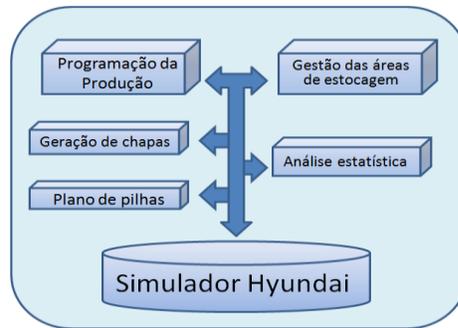


Figura 25: Sistemas utilizados pelo estaleiro Hyundai Heavy Industries [60].

A figura 26 mostra as principais variáveis de entrada do modelo como a frequência de fornecimento, turnos de trabalho, programações da produção, arranjo físico do pátio, plano diários de organização das pilhas, e parâmetros de recursos (velocidades, capacidade, probabilidade de falhas, etc.). Além dessas variáveis foi definido o tempo de simulação, o numero de execuções, entre outros.



Figura 26: Dados de entrada do modelo Pátio de aço [60].

As variáveis de entrada externas podem ser testadas de acordo com diferentes configurações, auxiliando decisões de controle do desempenho do sistema, ou permitindo a visualização dos impactos do aumento de turnos de trabalho, por exemplo. Já as variáveis de entrada internas podem permitir o estudo de alterações ambientais, e definição de recursos e áreas de estocagem.

Os cenários investigados foram configurados a partir da variação dos turnos de trabalho, do plano de pilhas, e do arranjo físico 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, e no fornecimento das chapas pelos fabricantes.

3.2.4 Perfil do Processo: Processamento de aço

O processamento corresponde às atividades de corte (obtenção de peças menores que a original ou eliminação de arestas) e conformação de peças. O objetivo dessas estações de trabalho é preparar as peças (chapas, perfis e partes) para serem montadas em estações posteriores (oficinas de submontagens, painéis curvos e linha de painéis planos). As peças tratadas, após a secagem da tinta protetora, são marcadas com a identificação do a sua rota de destino (blocos que farão parte) e em seguida, transferidas para as oficinas de processamento [66].



Figura 27: Planos de corte e chapas processadas.

Os processos de corte podem ser classificados em corte térmico (aplicação localizada de calor na peça), e corte a frio (deformação localizada do material). Os mais importantes processos de corte térmico são o corte a oxigênio (oxi-corte), o corte a plasma e o corte a laser. Os processos de corte térmico permitem mudanças bruscas da direção de corte, o que não é possível para a maioria dos processos de corte a frio (exceto para o corte com jato de água e abrasivo) [66].

Os cortes podem ser classificados ainda como: mecânicos, por fusão, por reação química, ou aplicação concentrada de energia. Os cortes mecânicos ocorrem por cisalhamento (através de guilhotinas, tesouras, etc.) e pela retirada de material (através de serras ou usinagem mecânica). O corte por fusão utiliza como fonte de calor um arco elétrico, e o por reação química ocorre através de reações exotérmicas de oxidação do metal. Os cortes que apresentam aplicação de altos níveis de energia são o corte a laser, a jato de água de elevada pressão e algumas variações do corte a plasma [66]. A seguir serão comentados os tipos de corte mais utilizados pelos estaleiros.

O corte a oxigênio (Oxyfuel Gas Cutting) é um processo de corte térmico que ocorre por uma reação química de combustão, localizada e contínua, provocando a separação do metal por um jato de oxigênio. Esse jato de oxigênio deve ter alto nível de pureza e deve agir sobre um ponto previamente aquecido por mistura de oxigênio com um gás combustível [66].

A tocha do equipamento de corte possui geralmente um bico com um orifício central, e pequenos orifícios, dispostos circularmente em torno do mesmo. Esses orifícios laterais permitem o pré-aquecimento da peça. Quando a região aquecida alcança a temperatura de ignição do metal, o fluxo de oxigênio é liberado pelo orifício central e o corte é iniciado com a tocha se deslocando. Como esse é um processo de corte basicamente por oxidação, não deve ser empregado sobre metais que formam óxido refratários como aços inoxidáveis.

O processo é usado basicamente para ligas de ferro, principalmente aços carbono e aços de baixa liga, podendo ser usado, também, para ligas de titânio, e para cortar peças de até 300 milímetros de espessura. Os equipamentos básicos para operação manual desse tipo de corte são normalmente de baixo custo, podendo ser portáteis e de fácil utilização. O processo permite que a direção de corte possa ser mudada rapidamente e permite a remoção de arestas (chanfros).

As desvantagens se voltam para o fato do processo gerar fumaça e faúlhas quentes comprometendo a segurança e higiene do ambiente. Alguns tipos de aços necessitam para o controle da estrutura, e propriedades mecânicas da região de corte, operações adicionais (pré-aquecimento, tratamento térmico, etc.) de custo elevado.

O corte a plasma (Plasma Arc Cutting) é realizado com uma alta corrente elétrica e um jato de plasma quente de alta velocidade. O processo pode cortar praticamente todos os metais, e peças de aço de baixo carbono de pequena espessura, mais rápida e precisamente do que o corte a oxigênio. Outra vantagem é que o corte pode ser iniciado sem o aquecimento prévio até a temperatura de ignição, como no processo de corte a oxigênio.

Para se obter o melhor rendimento do processo é preciso: Utilizar o gás adequado para corte de cada material; Controlar a vazão do ar e a tensão do arco elétrico; Considerar a capacidade de condução de corrente da tocha de plasma e as propriedades do metal a ser cortado. Esse processo é mais utilizado para corte mecanizado ou automático.

O método, contudo, gera partículas de poeira, luz ultravioleta e altos níveis de ruído, por essa razão tem sido operado submerso em água. Na maioria dos casos os sistemas comercializados realizam o corte sob uma camada de água para reduzir os seus efeitos ambientais inconvenientes como altos nível de ruído, fumaça de gases tóxicos e a intensidade de luz do arco plasma, que afeta a visão dos operadores. A radiação ultravioleta também é reduzida.



Figura 28: Estação de corte a plasma [61].

O chamado corte a laser (Laser Beam Cutting) é realizado pela ação de um feixe de luz coerente concentrado sobre a peça. A maioria dos sistemas trabalha com um jato de gás para facilitar a remoção de material da região de corte. O gás pode ser inerte, para gerar uma superfície da corte limpa e suave, ou pode ser reativo (em geral, oxigênio), para aumentar a velocidade de corte [66].

O equipamento mais comum consiste em mesas moveis, com capacidade de movimentação transmitida por motores elétricos (controlados por computador). O processo: gera ruídos em nível aceitável, permite o corte a seco, consome pouco eletrodo, produz menores distorções (comparativamente), e economiza o material cortado (a partir de corte mais estreito). As elevadas velocidades de corte e precisão fornecidas são atrativas, contudo, o alto custo do investimento inicial ainda restringe a utilização da técnica em maior escala.

Nos estaleiros, os cortes podem ser manuais, semi-automáticos ou automáticos. O corte automático ou realizado por controle numérico computacional (CNC) consiste em um processo computacional que controla o movimento das tochas e aciona os

planos de corte. Avançados sistemas computacionais são utilizados para estabelecer os melhores planos de corte.

Os planos de corte correspondem aos desenhos específicos com informações para o corte e identificação da rota das peças. No corte manual nenhum tipo de equipamento movido por alguma força motriz é utilizado, e no corte semi-automático a direção do corte depende tanto da máquina que é movida por um motor elétrico, como de operadores.

A conformação também é realizada nas estações de processamento, e corresponde a um processo aplicado em chapas e perfis para corrigir distorções de fabricação (originadas nos processos de corte e soldagem) ou dar forma específica às peças. A conformação pode ser mecânica ou térmica.

As máquinas de conformação mecânica utilizadas são prensas e calandras. Essas máquinas são operadas hidráulicamente e trabalham com aço a frio. As calandras são usadas para gerar formas cilíndricas, cônicas e circulares nas chapas. As prensas são usadas para a flexão, retificação e curvaturas variadas.



Figura 29: Prensa hidráulica vertical e Prensa hidráulica (conformação de perfis).



Figura 30: Prensa com rolos para conformação de chapas.

O princípio da conformação térmica está baseado na aplicação de calor controlado para produzir deformações permanentes. O aquecimento é feito com linha de calor. Os fatores que influenciam o processo são, a saber, o tipo de material, a espessura da chapa, a quantidade de calor, o tipo e tamanho da tocha, a velocidade de passagem da tocha, o método de resfriamento (água ou ar) e a distância entre o centro de aquecimento e o centro de resfriamento [66].

Guindastes magnéticos retiram as chapas tratadas de áreas adjacentes às máquinas ou de áreas centrais de armazenagem e posicionam essas peças nas máquinas de corte ou caso o corte seja manual, nas áreas delimitadas para o processo. As peças após serem cortadas são armazenadas em grupos de acordo com as quantidades e seqüências necessárias à montagem de estruturas. As sobras são numeradas e estocadas de forma que possam ser facilmente acessadas para o reaproveitamento.

3.2.5 Aplicação da Simulação no Processamento de aço

A modelagem do processamento de aço incluindo operações logísticas foi realizada pelo estaleiro Flensburger. O estudo procurou avaliar o melhor arranjo físico da estação. Um navio típico do estaleiro foi selecionado como referência e detalhado para a modelagem. Em seguida, a simulação incorporou a produção de diferentes navios considerando horas-extras e terceirização. Espessuras diferentes de chapas e a combinação de sistemas (de movimentação e de processamento) foram simuladas [47].

O modelo serviu de base para outros estudos, elementos e lógicas de funcionamento foram reutilizados e os dados do estaleiro foram atualizados. O controle das atividades operacionais e a avaliação da capacidade da estação foram realizados, de acordo com diferentes taxas de processamento dos equipamentos [47]. A tela do modelo desenvolvido é apresentada na figura 31.

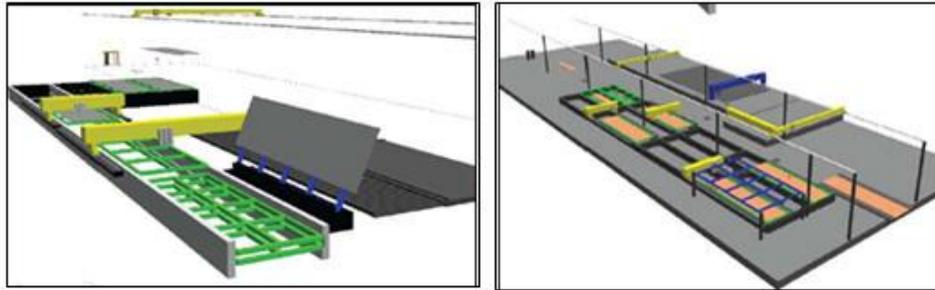


Figura 31: Modelo de Processamento de aço [47].

O estaleiro holandês IHC terceiriza a preparação e processamento do aço. Essas atividades apesar de estarem localizadas na mesma área do estaleiro, são administradas por outra empresa chamada Metalix BV. O objetivo da modelagem foi desenvolver um método para o gerenciamento de recursos. A ferramenta de simulação STS forneceu bibliotecas contendo elementos específicos da construção naval. Após a simulação foram obtidas estatísticas dos recursos, e quantidades produzidas [47]

Um modelo simulou operações da produção e dos processos logísticos da empresa contratada que fornece conjuntos de partes processadas de aço, para o estaleiro IHC e para outros. A figura 32 mostra o arranjo físico do modelo, dividido em: Uma área de estocagem; Duas áreas de processamento e Uma área de montagem dos conjuntos de peças para a expedição.



Figura 32: Esquema do modelo de Processamento de aço [47].

O modelo representou os processos de recebimento e estocagem de chapas e perfis, processamento do aço (corte e conformação), separação das peças e montagem

de conjuntos para a expedição. A empresa possui máquinas de corte a plasma, calandras, e sistemas de suporte logísticos (pontes rolantes, esteiras, etc.).

O fluxo de materiais se inicia com as chapas e perfis, que são recebidos por caminhões na área de estocagem. Esteiras rolantes fornecem as peças para a área de processamento e pontes rolantes realizam a movimentação das peças. Os conjuntos de peças são transportados por um caminhão e posteriormente expedidos por vagões até o estaleiro IHC.

A modelagem obteve dados do planejamento da produção, do pessoal e dados obtidos diretamente com o banco de dados dos produtos. Arquivos foram criados para serem acessados durante a execução da simulação. A figura 33 apresenta exemplos do conteúdo dos arquivos citados (lista de pedidos, plano de produção, plano das máquinas, plano de mão de obra).

<u>Plano da estação</u>	<u>Lista de pedidos</u>	<u>Plano de Produção</u>	<u>Plano de mão de obra</u>
Código da chapa Código peça cortada Atividade Atividade sucessora Máquina de corte Comprimento Largura Espessura Peso	Código do material Data de entrega Atividade Código da chapa Comprimento Largura Espessura Peso	Atividade Código da estação Código do Painel Peso Data da produção Data limite	Membros da equipe Qualificação Turnos Quantidade

Figura 33: Dados utilizados para a modelagem do Processamento de aço [47].

O planejamento de pessoal consiste na definição das equipes de trabalhadores. Essas equipes são representadas em termos de número de trabalhadores e qualificação por turno. A qualificação é o principal parâmetro visto que, indica se o trabalhador poderá ser alocado apenas para uma área ou atividade, ou se sua alocação pode ser mais flexível [47].

Os processos da máquina de corte foram detalhados da seguinte forma: Calibração dos equipamentos; Posicionamento de chapas; Configuração da máquina de corte de acordo com a chapa e com o pedido; Marcação; Submersão da chapa na máquina (em caso de corte a plasma); Corte; Eliminação de sobras de material; Anotações manuais para auxiliar as próximas operações; Remoção das partes cortadas (uma por uma ou um conjunto simultâneo) [47].



Figura 34: Exemplo de partes e perfis com anotações manuais.

Com relação às máquinas de corte foram obtidas as velocidades, os tempos de processamento, dimensões, requisição de pessoal qualificado e configuração dos equipamentos. Para as calandras foram necessários os tempos de trabalho e preparação e a necessidade de operadores (qualificação e quantidade). Os sistemas de movimentação foram modelados a partir das dimensões, velocidades, capacidades e necessidade de mão de obra.

As seqüências de partes pequenas cortadas foram planejadas, avaliando-se diferentes alternativas para os parâmetros dos recursos. Dessa forma pode-se verificar a influência das velocidades de pontes rolantes, tamanhos e organização das pilhas de peças, além do arranjo geral. A remoção das sobras e retirada do material foi estudada para que o corte não fosse interrompido.

O estaleiro Samsung Heavy Industries teve seu processamento modelado com o intuito de avaliar a eficiência e produtividade e validar o comportamento dos recursos com os seus processos e produtos relacionados [46]. O modelo de simulação auxiliou a melhor configuração de recursos considerando a circulação de produtos e a interação com outros recursos (colisões). O estudo mostrou que os sistemas de movimentação eram restrições críticas à produtividade.

O número ideal de pontes rolantes foi investigado a partir das taxas de utilização dos recursos. O aumento de parâmetros como velocidades ou o aumento de alguns recursos geraram acúmulo de produtos em estações posteriores. Assim, alterações na configuração do sistema puderam ser planejadas.

Foram investigadas atividades voltadas para o balanceamento da produção, evitando a formação de gargalos. Foi empregada uma metodologia específica orientada a objeto para analisar os produtos, processos e recursos do estaleiro. Os processos estudados foram o corte, a conformação a frio (prensas e calandras) e a conformação a

quente (linha de calor). Os processos de conformação obtiveram atenção maior por serem considerados complexos e imprevisíveis quanto aos tempos. As chapas retangulares foram definidas como produtos de entrada no modelo e partes planas ou conformadas foram definidas como as saídas do mesmo.

Na modelagem dos recursos alguns parâmetros foram selecionados. Para os guindastes foram informados os tipos, as velocidades, e as capacidades. Para os locais de armazenagem foram consideradas as dimensões e capacidade de empilhamento, e para as máquinas de corte foram inseridas as capacidades e os tipos de corte. O departamento de planejamento forneceu a seqüência de produção e as informações do produto.

O programa CATIA foi utilizado para a modelagem tridimensional de recursos (máquinas de corte, prensas, calandras, guindastes pontes rolantes, etc.). O artifício da cinemática (simulação da movimentação) permitiu uma representação dos recursos mais realista. As figuras, 35 e 36 apresentam imagens de recursos de conformação e movimentação reais, e dos recursos modelados pelo programa CATIA que foram utilizados nos modelos de simulação com o simulador QUEST.



Figura 35: Recursos de conformação a frio e a quente (linhas de calor).

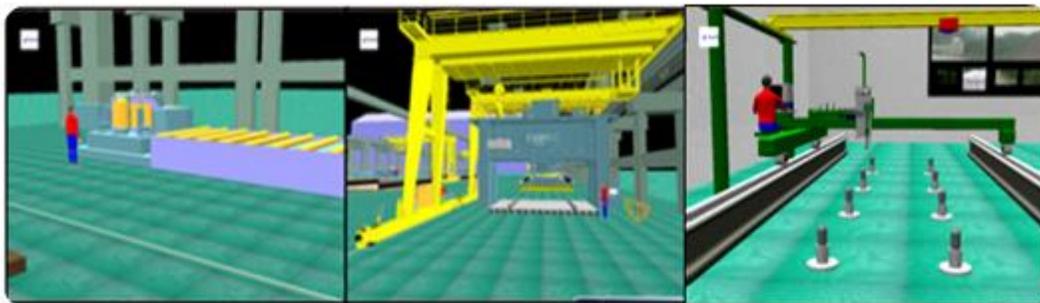


Figura 36: Conformações a frio e a quente modeladas (QUEST) [46].

3.2.6. Perfil do Processo: Introdução à Montagem de estruturas

As construções de painéis (planos e curvos), submontagens, blocos e grandes blocos, utilizam a soldagem como principal processo. Cada tipo de construção demanda uma determinada técnica definida de acordo com as espessuras a serem soldadas, as posições de soldagem, entre outros fatores. Uma técnica de soldagem usual é realizada através de um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico contínuo (consumível) e um metal base [66].

Nessa técnica a proteção contra a contaminação atmosférica do arco, do eletrodo, da zona fundida e da peça é obtida por um gás ou mistura de gases. Se o gás é inerte (Ar/He), o processo é também chamado MIG (Metal Inert Gas) se o gás for ativo (CO₂ ou misturas com Ar/O₂/CO₂), o processo é chamado MAG (Metal Active Gas) [62]. Misturas ricas em gases ativos ou CO₂ puro são usadas na soldagem de aços carbono. O método normalmente é semi-automático, podendo ainda ser totalmente automatizado, a partir de robôs. A utilização de arames contínuos e elevada taxa de deposição apresenta alta produtividade.

O método de soldagem por arco submerso (Submerged Arc Welding) é um processo onde ocorre a fusão simultânea das bordas dos metais, e de um ou mais eletrodos metálicos. O arco elétrico é protegido por uma camada de fluxo granulado que forma a escória sobre o cordão de solda. Como o arco ocorre submerso à camada de fluxo, a técnica foi chamada de arco submerso. [66].

A soldagem por arco submerso é muito usada em estruturas de aço, na fabricação de tubulações e na deposição de camadas de revestimento (fabricação e recuperação de peças desgastadas). Sua maior utilização é na forma mecanizada ou automática.

Devido à camada de fluxo e às elevadas correntes de soldagem, este processo tem de ser utilizado na posição plana ou horizontal (para soldas de filete), o que torna importante o seu uso em conjunto com dispositivos para o deslocamento e posicionamento das peças.

3.2.7. Perfil do Processo: Fabricação de Submontagens

As estações de submontagens ou de montagem de painéis curvos são caracterizadas pela produção em áreas específicas onde as peças e partes cortadas são soldadas de forma manual ou semi-automática [66].

Devido à grande variabilidade dos produtos finais (submontagens e painéis com curvaturas diferentes), os estaleiros dificilmente organizam esse tipo de montagem em linhas de produção. Comparativamente com a produção dos painéis planos, esses elementos não apresentam volume padronizado significativo para motivar investimento dessa natureza no processo.



Figura 37: Fabricação de Submontagens.

3.2.8 Aplicação da Simulação nas Submontagens

O laboratório pesquisa acadêmica da universidade da Coreia (NRL) em parceria com o estaleiro coreano Samsung Heavy Industries desenvolveu um modelo de estações de submontagens. O objetivo do modelo foi simular o funcionamento de robôs de soldagem já existentes, para obtenção de tempos de ciclo de produção sob diferentes cenários.

Posteriormente, avaliou-se o fluxo de materiais verificando o comportamento físico e lógico do sistema. As mudanças externas e internas, como a substituição de recursos, por exemplo, puderam ser estudadas [46]. A figura 38 apresenta a imagem do processo de soldagem automatizado e a tela do modelo desenvolvido pelo simulador QUEST.

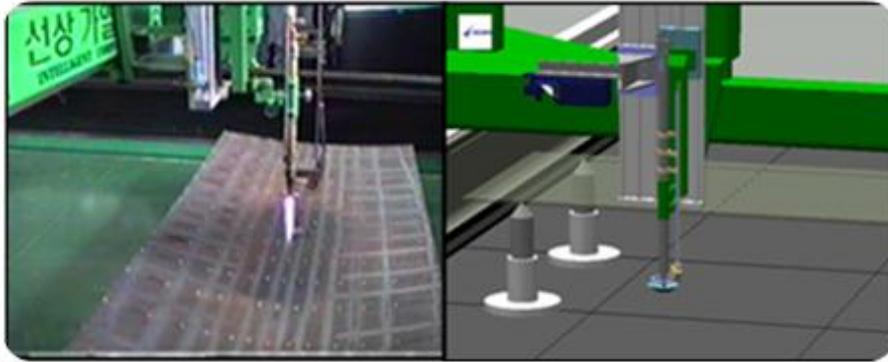


Figura 38: Fabricação de submontagens e tela do simulador QUEST [46].

Os tempos dos processos foram calculados segundo os comprimentos de solda reais das submontagens. O tempo de soldagem foi estimado de acordo com diferentes condições (posições, métodos, etc.). Os processos considerados foram: Alinhamento das chapas; Ponteamento de chapas a partir do processo de soldagem por Arco Submerso; Colocação das peças que compõem a submontagem; Soldagem realizada pelo robô de solda; Soldagem manual; Acabamento.

A estrutura de dados de entrada do modelo (produtos, processos e recursos) foi baseada na documentação interna do estaleiro, pesquisa de campo e entrevista com funcionários. A modelagem utilizou o simulador QUEST e o sistema Delmia para a modelagem tridimensional de elementos. A escolha se deu pelo potencial de visualização do simulador e a facilidade de integração com sistemas de modelagem avançada de produtos [46].

O modelo foi calibrado segundo a comparação com os tempos e produção do sistema real. Em seguida, foi simulado o sistema com um novo robô de solda com o dobro da velocidade do robô já existente. O tempo de simulação foi de 60 horas e a quantidade de peças que entraram no sistema equivalem a uma semana de produção. As falhas, e tempos de preparação foram desconsiderados [46].

Além de diferentes taxas de desempenho dos equipamentos, foi alterada a quantidade de trabalhadores (requisitados nos processo de soldagem manual). O resultado da simulação mostrou que um novo robô de solda reduziria o tempo de ciclo em 23,5%. O modelo original foi baseado nos dados reais do sistema, e pode fornecer um tempo de ciclo do processo mais realista, permitindo a investigação de métodos mais eficiente em termos de esforço (conteúdo de trabalho) e tempo [46].



Figura 39: Processo de soldagem manual de submontagens

Williams *et. al.* [48] desenvolveram um modelo a partir da integração de diferentes estações de trabalho. A simulação representou a entrada de chapas na linha de jateamento e posterior marcação indicando sua rota de destino. Em seguida, essas chapas são direcionadas às máquinas de corte.

Após as operações de corte as peças são agrupadas de acordo com o elemento que farão parte. Esses conjuntos de peças são direcionados às áreas específicas para ser iniciada a construção das submontagens. A maior parte das submontagens é pouco padronizada, possuindo geometrias e características diferentes.

A simulação foi realizada com o intuito de reduzir os custos associados aos processos de submontagens. O fluxo de materiais, os gargalos e os impactos na inclusão de novos processos foram visualizados. Outro benefício do estudo foi a investigação de formas de armazenagem (localização e empilhamento) dos conjuntos de peças que fazem parte das submontagens, buscando a redução de estoques, e o aproveitamento do espaço físico. A figura 40 mostra conjuntos de submontagens empilhados na estação de trabalho.



Figura 40: Conjunto de submontagens armazenados na estação de trabalho.

Uma das medidas de redução de custos avaliada com a simulação foi a inserção do processo de marcação da chapa, eliminando o desenho bidimensional convencional da montagem. Assim, a chapa seria marcada com o maior número de informações possíveis para a realização da montagem. Dados importantes como requisitos de soldagem, locais onde os componentes seriam soldados, entre outros, seriam adicionados nas chapas e peças [48].

Um mesmo modelo representou duas áreas. Uma área contendo o método tradicional de montagem, utilizando os desenhos, e outra área contendo a inclusão do processo de marcação detalhada. Ambas as áreas foram alimentadas pelos mesmos recursos.

O método tradicional de montagem exige maior experiência do montador para interpretar inúmeras folhas de desenho bidimensional da estrutura. Já o segundo método exige apenas um pequeno documento com instruções gerais e a imagem do produto montado. A inclusão do processo apresentou uma redução de 20% no tempo total de construção.

As peças que saem do processamento são armazenadas em pallets e permanecem nesses locais, até que todos os elementos que farão parte da mesma submontagem já estejam localizados no mesmo pallet. A modelagem permitiu a redução do número pallets, evitando a permanência de peças por mais de cinco dias. Formas de armazenagem e tempos de permanência foram verificadas.

O simulador escolhido para o estudo foi o QUEST devido à boa capacidade de visualização, e apresentação de gráficos de utilização das estações de trabalho, por exemplo, durante a simulação. Devido à indisponibilidade de dados para a modelagem, grande esforço foi concentrado na obtenção de informações com fornecedores de

equipamentos, e especialistas do setor. A figura 41 apresenta a tela do modelo desenvolvido pelo QUEST.

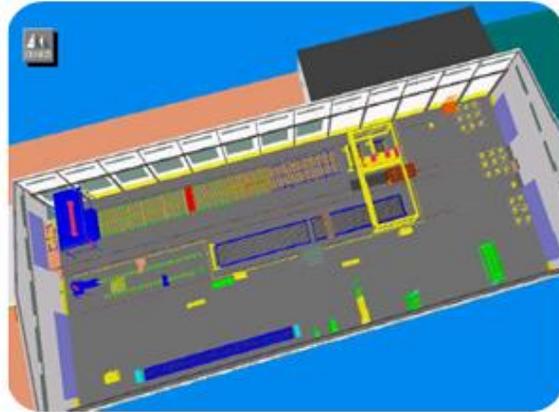


Figura 41: Modelo: Tratamento, Processamento e Submontagens [48].

Em resumo, a quantidade, a localização, o tamanho e o tipo de pallet para armazenagem foram testados com a simulação. Distribuições estatísticas foram usadas para representar os dados que não estavam disponíveis. Em função da complexidade dos processos simulados, o estudo exigiu não só da compreensão de todos os processos detalhadamente, como habilidades de programação para representar os processos utilizando códigos computacionais.

3.2.9. Perfil do processo: Linhas de Fabricação de Painéis Planos

A fabricação de painéis planos corresponde à montagem de estruturas planas com maior nível de padronização de geometrias e processos, em comparação à fabricação de submontagens. Os painéis são formados por chapas, reforços primários (perfis) e reforços secundários (gigantes). Os principais métodos de montagens dos painéis planos se diferem no número e ordem de etapas.



Figura 42: Exemplo de Painel Plano [52].



Figura 43: Linha de Painéis Planos [61].

Um dos métodos utilizados ocorre a partir da preparação de chapas (alinhamento e ponteameto), soldagem, e posterior marcação do local onde serão

soldados os reforços. Os reforços primários são posicionados e ponteados nas chapas marcadas [66].

Em seguida, os reforços secundários são encaixados nos reforços primários. A soldagem de todos os reforços é a última etapa desse método (como mostra a figura 44). Nessa técnica são definidos cortes com abertura maior para que os reforços possam ser encaixados.



Figura 44: Fluxograma do método de fabricação de painéis planos (I).

No segundo método de fabricação de painéis planos, os reforços primários e secundários são soldados formando uma estrutura única (chamada por alguns estaleiros de “grelha”). As chapas são preparadas e soldadas e recebem a estrutura de reforços para a etapa final de soldagem.

A estrutura de reforços deve ser posicionada de acordo com a marcação realizada nas chapas, e em alguns casos, pode ocorrer o ponteamto antes de sua soldagem nas chapas. Nessa técnica os espaçamentos entre os reforços são mínimos evitando a colocação de peças sobressalentes para a união dos reforços (preenchimento de espaços). O fluxograma do método é apresentado na figura 45.

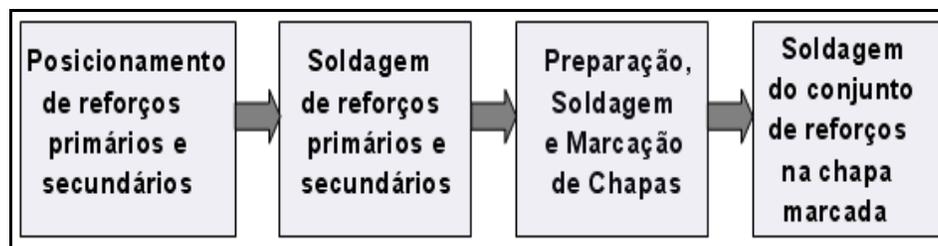


Figura 45: Fluxograma do método de fabricação de painéis planos (II).

No terceiro método (apresentado na figura a seguir), as chapas são preparadas, soldadas e marcadas como no primeiro método comentado. A diferença se dá pelo fato de que nessa técnica os reforços primários são posicionados e ponteados, mas antes

que ocorra o posicionamento dos reforços secundários, os reforços primários são soldados definitivamente. Somente após essa soldagem os reforços secundários podem ser inseridos no painel.

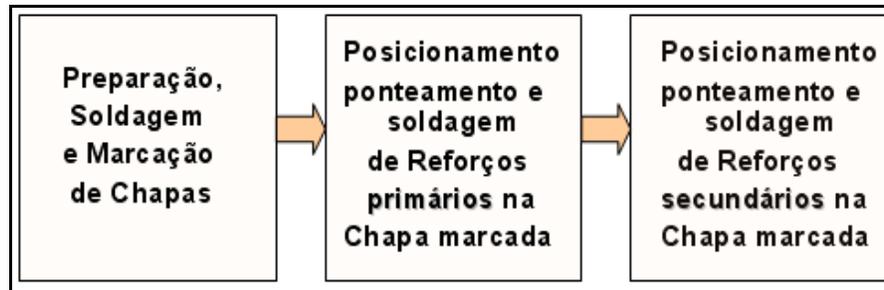


Figura 46: Fluxograma do terceiro método de fabricação de painéis planos.

A técnica pode gerar deformações após a aplicação de solda ao longo de todos os reforços primários, gerando um problema para o posicionamento e a montagem dos reforços secundários. Estaleiros que utilizam esse método podem estabelecer técnicas de desempenho, como a colocação estratégica de blocos de concreto com peso específico para eliminar as deformações.

A transferência de chapas é realizada por pórticos ou pontes rolantes. Essa movimentação é baseada na seqüência de produção de painéis. A soldagem das chapas é dita como soldagem de topo, devida a posição horizontal e utiliza equipamentos denominados separadores para a determinação do espaçamento específico necessário ao cordão de solda. Equipamentos de fixação de chapas e elevação (quando as chapas precisam ser cortadas sem danificar a esteira) são utilizados em todo o processo.

A ponteamto de chapas pode ser do manual do tipo MIG (como mostrado na próxima figura). No processo manual até dois soldadores podem dividir o mesmo comprimento de solda (denominado “bainha de solda” por alguns estaleiros). Os soldadores começam o processo na metade do comprimento da chapa sendo que cada um se direciona para extremidades diferentes, aumentando a produtividade do processo [66].



Figura 47: Processo de alinhamento e ponteamento de chapas [57].

A soldagem de chapas é feita automaticamente, por arco submerso, onde são aplicados os chamados passos de solda para o preenchimento dos comprimentos ponteados. Após esse processo, é realizada a inspeção de soldagem pelo controle de qualidade a partir de equipamento de ultra-som.

Caso seja detectada alguma imperfeição, a soldagem é refeita. Após aprovação do processo, a estrutura recebe um tratamento com tinta especial que evita a corrosão do cordão de solda e o acúmulo de impurezas durante o período de construção do painel e do bloco.

O processo de marcação é baseado nos desenhos de divisão dos blocos, onde é apresentado o local de soldagem de painéis e elementos estruturais que formarão o bloco. Após a marcação do painel eventualmente são efetuados os cortes para reduzir a dimensão real do painel, ou retirar as arestas das chapas [64].

Estoques de perfis são localizados próximos à linha para que sejam inseridos por sistemas de movimentação. O processo de ponteamento de reforços primários (soldagem de filete) pode ser realizado pela solda do tipo MIG e manualmente. Estaleiros acoplam um acessório automatizado (carrinho) ao cabo de suporte do equipamento de soldagem. O deslocamento do carrinho gera a progressão da solda dos reforços primários. Essa soldagem também recebe a inspeção de qualidade. A inserção dos reforços secundários deve evitar deformações e empenos nos reforços primários.

3.2.10. Aplicação da Simulação nas Linhas de Painéis Planos

Greenwood e Hill [62] desenvolveram um modelo de linha de fabricação de painéis planos do estaleiro Northrop Grumman Ship Systems Pascagoula Operations (NGSS). Normalmente quando o sistema de fabricação de painéis não consegue atender a demanda, o estaleiro opta por terceirizar a operação ou mesmo montar os painéis em áreas alternativas dentro do próprio estaleiro.

A terceirização de operações, contudo, promove grande aumento nos custos gerais, segundo o estaleiro, devendo ser evitada. Uma forma para reduzir os tempos de produção está na programação de pedidos. Como os painéis possuem atributos e tempos de processos diferentes (preparação, ponteamto, soldagem, etc.) o estudo de seqüências alternativas pode aumentar o desempenho da linha [62].

A modelagem foi realizada com os simuladores QUEST e Promodel (como apresentado nas próximas figuras) e considerou que todos os painéis dos navios seriam montados e fabricados nessa linha. Cada painel possui a mesma seqüência de atividades, mas o tempo de realização pode variar. Os processos foram divididos em: Posicionamento das chapas; Soldagem das chapas; Soldagem inversa (lado oposto); Posicionamento e Soldagem de perfis.

Os dados de entrada do modelo foram: o tamanho do painel, a capacidade da esteira rolante da linha, o conteúdo de trabalho, a disponibilidade dos recursos, as regras de operação, os tempos de paradas das máquinas, a variabilidade dos processos e do desempenho, os turnos de trabalho e a seqüência inicial de produção. A lógica do modelo foi modificada para realizar a leitura de arquivos externos contendo essas informações.

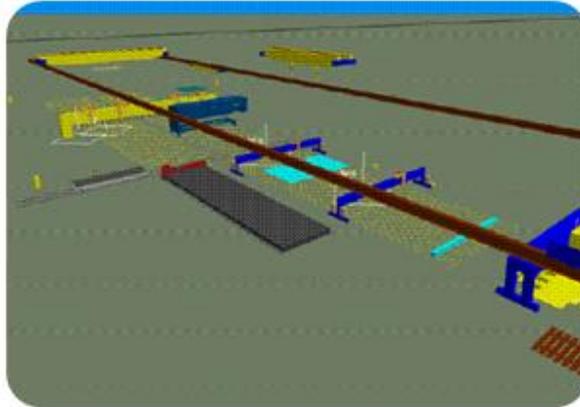


Figura 48: Simulação da Linha de Painéis Planos (QUEST) [62].

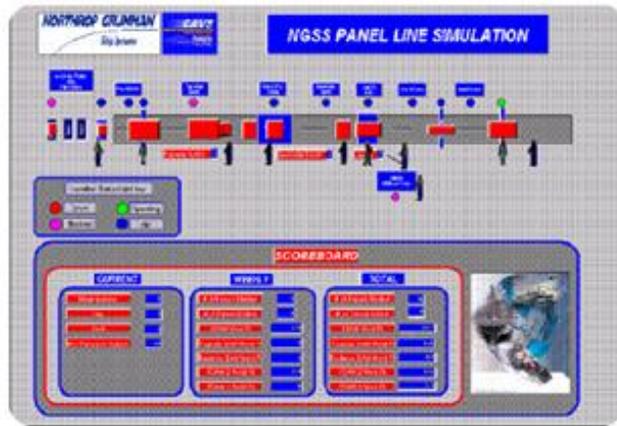


Figura 49: Simulação da Linha de Painéis Planos (Promodel) [62].

O tempo de simulação foi de quatro meses de produção e a simulação foi executada dez vezes para obtenção das estatísticas. O modelo foi calibrado com o sistema real apresentando diferença irrelevante entre os painéis produzidos (apenas cinco painéis de diferença entre o sistema real e o modelo de simulação). Foi testada ainda a utilização de um maior número de máquinas de soldagem, e comparados os valores totais de produção (número de painéis produzidos).

A partir da simulação notou-se que o gargalo do sistema dependia da seqüência de painéis. Os resultados do modelo foram validados, e em seguida foi possível a obtenção de conclusões mais precisas quanto ao impacto da adição, ou substituição de recursos, e da aplicação de diferentes seqüências. Após o desenvolvimento do modelo foi realizada a otimização de seqüências por ferramentas específicas, gerando dados de entrada (seqüências) para novas simulações.

Outro caso de aplicação da simulação para a análise de linhas de fabricação de painéis planos foi o estudo iniciado, com o apoio da universidade belga de Liege, desenvolvendo uma pesquisa em conjunto com o estaleiro francês Chantiers de L' Atlantic [41]. A linha de fabricação de painéis do estaleiro foi modelada com o objetivo de aumentar a produtividade e reduzir os tempos de atendimento às estações sucessoras (montagem de blocos).

A partir da técnica de otimização por algoritmos genéticos foram geradas seqüências de produção, que posteriormente, foram avaliadas pela simulação. O modelo de simulação representou três linhas, sendo duas para painéis do tamanho padrão (linha 1 e 2) e uma para a fabricação de painéis maiores com mais elementos (linha 3).

Em um mesmo modelo o arranjo foi duplicado, para que fossem verificados os resultados de diferentes configurações contidas em cada lado. Cada arranjo possui áreas de entradas, saídas e estocagem de peças. Apesar de possuírem independentes equipamentos e sistemas de movimentação, os dois lados dividem um robô de soldagem. Os arranjos e os modelo desenvolvido pelo simulador eM-Plant são apresentadas nas figuras 50 e 51, respectivamente.



Figura 50: Arranjos de Linha de Painéis Planos [41].

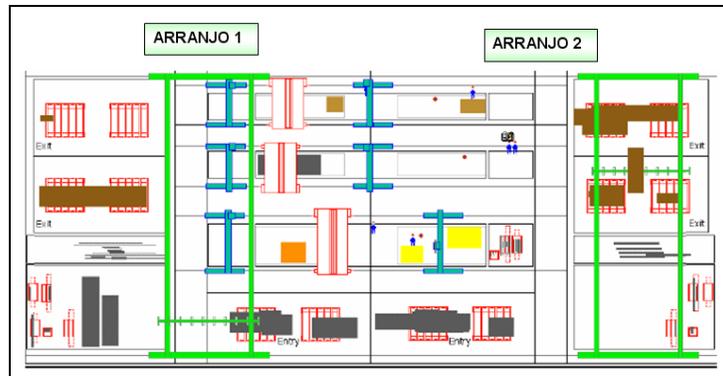


Figura 51: Simulação da Linha de Painéis Planos (eM-Plant) [41].

O compartilhamento do robô de solda entre as áreas pôde ser estudado por duas configurações. Na primeira foram fornecidas duas seqüências, uma para cada arranjo. Dessa forma, cada lado atenderia seus pedidos independentemente do outro, mas dividindo um dos recursos. Nessa configuração o balanceamento das células (arranjos) foi dificultado e os tempos de espera foram altos [41].

Na segunda configuração os dois arranjos atenderiam a mesma lista de pedidos, e assim trabalhariam quase que simultaneamente. Esse esquema apresentou maior taxa de utilização das células (lados) e um maior balanceamento. O problema levantado diz respeito às quebras de equipamentos, uma vez que, se ocorressem esses imprevistos, a programação e o atendimento dos pedidos ficariam comprometidos.

A modelagem considerou os processos como preparação das peças, ponteamento manual ou automático e soldagem por robô. Rotinas foram desenvolvidas para facilitar a entrada e saída de dados dos simuladores. Foram realizadas três simulações, sendo a primeira, iniciada após um “tempo de aquecimento”, ou seja, considerando o início da simulação com estações já em operação.

A segunda simulação foi iniciada no tempo zero, com as estações vazias e a terceira simulação foi encerrada antes que a lista de pedidos fosse atendida por completo e as estações estivessem vazias. As taxas de ocupação dos recursos, esquemas de produção e seqüências de pedidos foram avaliados quanto à produtividade oferecida [41].

O estaleiro Flensburger desenvolveu um modelo de simulação integrando a estação de corte de chapas com a linha de fabricação de painéis planos, a partir do simulador eM-Plant. Para avaliar as implicações e procedimentos mais adequados foi

desenvolvida a modelagem considerando o problema de restrição de espaço físico para a armazenagem de estoques intermediários [45].

O modelo simulou a produção de painéis para uma embarcação de transporte de passageiros e uma do tipo porta-contêiner [45]. A figura 52 apresenta a tela do modelo de simulação.

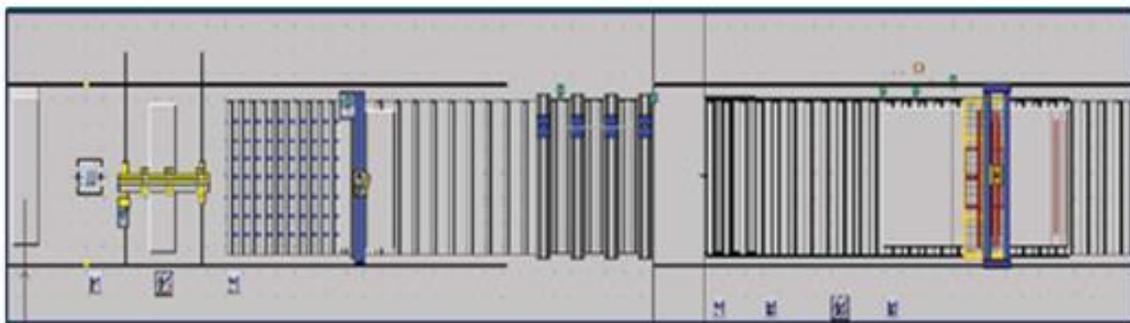


Figura 52: Simulação da Linha de Painéis Planos (eM-Plant) [45].

As estações-gargalo puderam ser identificadas de acordo com o tipo de navio produzido (como mostra a figura a 54). A máquina de corte à plasma foi o gargalo (em termos do tempo de ocupação e tempo de preparação) para uma determinada embarcação e para outra, a estação de soldagem de perfis passou a ser gargalo. No ano de 2001, a linha foi construída e após os estudos realizados pôde atingir o desempenho desejado.

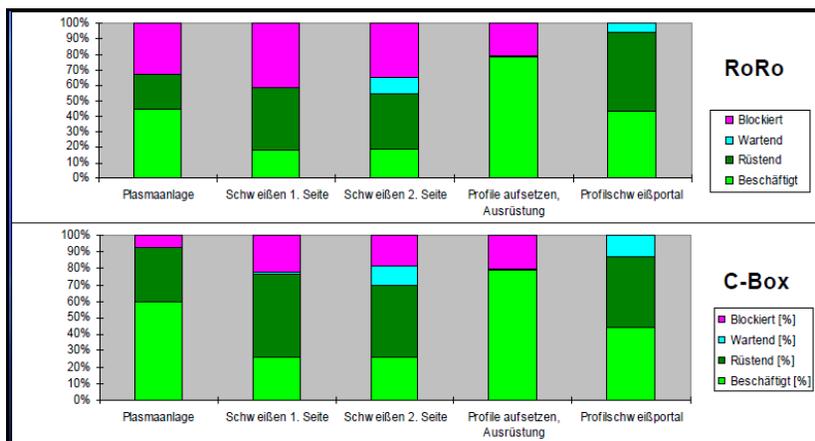


Figura 53: Relatórios do simulador eM-Plant (taxas de utilização por navio) [45].

3.2.11. Perfil do processo: Montagem de blocos e Acabamento avançado

A montagem de bloco corresponde à soldagem de painéis e submontagens formando estruturas maiores. O processo representa uma das etapas mais complexas e demoradas na construção de embarcações, devido à enorme quantidade de peças e elementos estruturais que são enviados pelas estações anteriores. Após a montagem é realizada a avaliação da qualidade das soldagens, pelo estaleiro, sociedades classificadoras e armadores.

Alguns estaleiros incorporam o conceito de Tecnologia de Grupo e classificam seus produtos de acordo com as características ou atributos semelhantes. Quanto maior a padronização de produtos e processos, maior a economia de escala, e mais fácil torna-se a aplicação de técnicas para balanceamento das estações de trabalho, e redução de estoques [63].

As semelhanças entre os blocos planos são mais facilmente identificadas. Devido a esse fato, muitos estaleiros já operam suas estações de montagem de blocos planos em linha de produção. Os blocos curvos, usualmente, são montados em galpões e necessitam de instrumentos como pontaletes reguláveis para serem posicionados. Na montagem de blocos é iniciado o acabamento avançado, ou a colocação de acessórios, tubulações, e outros elementos.

Após o término da montagem e aprovação dos blocos, esses são transportados para a cabine de jateamento e pintura, onde inicialmente recebem um processo de preparação de sua superfície (jateamento por granalha de aço, por exemplo) para a retirada da possível camada de ferrugem e para garantir uma boa aderência da tinta protetora [66].

Em seguida, é realizada a limpeza de todo o bloco removendo a granalha existente em seu interior. O bloco recebe duas camadas de uma tinta especial que evita corrosão por um período longo de serviço, o tipo e marca da tinta pode ser especificado pelo armador. Após a pintura, o bloco permanece na cabine para secagem. Um exemplo de estação de pintura e cabine de jateamento é apresentado na figura 54.



Figura 54: Estação de pintura e cabine de jateamento de blocos [61].

3.2.12. Aplicação da Simulação na Montagem de blocos

Steinhauer e Meyer-König [50] acreditam que a representação das estações de montagem é relevante visto que é uma área onde grupos de trabalhadores com diferentes habilidades são gerenciados (soldadores, eletricitas, técnicos, etc.). Além desse fato, atrasos nesse processo (falta de insumos para as estações, erros no planejamento, etc.) podem comprometer seriamente as estações posteriores e os prazos da construção.

O estaleiro Flensburger desenvolveu um modelo de montagem de blocos com o objetivo de analisar variações no plano de produção. O modelo serviu de suporte ao planejamento das operações diárias do chão de fábrica. Questões como os custos de soldagem e a melhor alocação de trabalhadores, considerando diferentes qualificações puderam ser verificados assim como o compartilhamento de recursos de movimentação [50].

Os dados necessários para a simulação foram: a árvore de produtos (componentes e partes dos blocos organizados hierarquicamente), descrição dos blocos (data de entrega, geometria, peso), dados do planejamento, necessidade de mão de obra e o estado do sistema. O estudo utilizou a ferramenta STS como biblioteca pré-definida, auxiliando a simulação de eventos discretos e fornecendo visualização tridimensional. A tela do modelo é apresentada na figura 55.



Figura 55: Simulação da Montagem de blocos (STS) [50].

A simulação demandou uma análise aprofundada dos processos. Inicialmente foi desenvolvido um modelo estático para a análise geral de todos os processos que ocorrem nas estações de montagem. Posteriormente os tipos de montagem foram estudados, assim como as estratégias. Organizou-se uma estrutura agrupando blocos, processos e seqüências semelhantes de montagem, e a utilização das tecnologias de soldagem por blocos.

Os blocos foram divididos em: fechados, abertos, e curvos. Após a definição do produto, os parâmetros para cálculo do tempo foram levantados. As informações foram obtidas pelo departamento de planejamento e pela experiência dos operadores. As políticas de montagens foram definidas, como a prioridade de fabricação dos blocos atrasados [50].

Alguns sistemas desenvolvidos academicamente forneceram suporte à simulação do processo. Um desses programas foi criado para controlar os processos realizados paralelamente. Outro sistema auxiliou a definição e visualização de estratégias de montagem buscando a padronização dos processos. Um terceiro programa auxiliou a determinação das áreas de montagem. Esse sistema considerou os espaços ocupados por recursos de movimentação (guindastes, pontes rolantes, etc.) e as áreas disponíveis para o processo.

As estratégias de montagem (geradas pelo sistema desenvolvido) foram inseridas no modelo. O banco de dados do estaleiro foi útil para o fornecimento de informações do planejamento das atividades (montagem por bloco) com as datas previstas de entrega e os locais da construção.

A disponibilidade das áreas e de trabalhadores, além do estado da produção (situação inicial) foi obtida pelo programa ERP, sincronizando o modelo de simulação

com o sistema real. Para a validação do modelo, os resultados da simulação foram comparados com os dados reais de produção. Após a validação, alguns parâmetros foram variados para a verificação dos impactos. A utilização de recursos e os gargalos também foram identificados [50].

No estaleiro Flensburguer, a estação de montagem de blocos mostrou três dias de atraso na metade do ano de 2005. A gerência utilizou horas extras dos trabalhadores e turnos aos sábados, contudo o atraso não foi eliminado. O estaleiro optou por desenvolver um modelo de simulação para investigar as causas do atraso [47].

O modelo foi alimentado com as seqüências, durações e alocação das áreas. Após a execução da simulação foi percebido que a estrutura que suportava os blocos curvos para soldagem (chamada usualmente de pin jig) era o gargalo.

O estaleiro utilizou a modelagem para verificar alterações no planejamento da produção e para analisar a alocação de montagem em áreas pouco ocupadas, para minimizar o atraso. Posteriormente, o mesmo modelo foi utilizado como ferramenta de planejamento e avaliação de impactos de mudanças na carteira de projeto (contendo navios de tipos diferentes).

O modelo de montagem de blocos foi, em um momento posterior, integrado com o modelo geral do estaleiro. Foram estabelecidos todos os parâmetros que descrevem os recursos e processos. Os dados de produto se referiram aos atributos, as informações geométricas (dimensões), aos métodos de construção, as seqüências, e as descrições de montagem.

Cada peça do navio, incluindo materiais de pré-acabamento, foi modelada. Foram inseridas a identificação e código dos materiais, as dimensões, o peso e a qualidade dos materiais. Essas informações foram anexadas aos atributos das peças.

O Laboratório de Simulação de Processos da Construção Naval (LABSEN) desenvolveu uma ferramenta de análise do impacto de diferentes classificações de blocos, e especialização de oficinas. Esse impacto foi medido no volume de produção, e na produtividade de um estaleiro hipotético, segundo a estratégia de edificação adotada. Após a classificação de produtos (agrupamentos), foram estabelecidas diferentes quantidades de recursos [64].

O trabalho foi estruturado em etapas como o delineamento geral do problema e obtenção de dados de entrada para o modelo. A modelagem tridimensional de produtos e recursos foi realizada utilizando-se o programa DELMIA. A organização da estrutura

de produtos, processos e recursos utilizou o programa Process Engineer, e a Simulação de Eventos Discretos foi realizada pelo simulador QUEST.

Na primeira fase do estudo, o laboratório ainda não havia modelado as estruturas curvas e por esse motivo, considerou apenas o corpo paralelo da embarcação. Informações sobre os comprimentos de solda, posições e tipos de soldagem, além de movimentações foram levantadas para o cálculo dos tempos.

Foram determinados quatro tipos de classificação de blocos (como mostra a figura 68). Cada classe avaliada foi dividida em três outras classes. A primeira classe (ou agrupamento) dividiu os blocos pelo critério de complexidade de montagem. Os grupos, nesse caso, foram: blocos abertos, fechados e complexos.

A segunda classe dividiu os blocos pelo comprimento de solda total na posição horizontal (em metros). O primeiro grupo foi definido para blocos contendo comprimentos maiores (70 a 141,8 metros), o segundo para blocos com comprimentos medianos (35,3 a 64,5 metros) e o terceiro para blocos com comprimentos de solda mais baixos (26,6 a 8,4 metros).

A terceira classe dividiu os blocos pelo peso de aço total (em toneladas). Os conjuntos dessa classe foram definidos como: blocos mais pesados (38,3 a 58,7), blocos um pouco mais leves (33,6 a 38,2) e blocos leves (32,5 a 15,8). A última classe correspondeu à divisão pelo critério de quantidade e tipos de componentes do bloco.

Pelo critério de quantidade (e tipos) de componentes, no primeiro grupo ficaram os blocos contendo três ou quatro painéis e seis submontagens. No segundo grupo ficaram os blocos com dois ou três painéis e três submontagens, e no terceiro ficaram os blocos contendo apenas um painel independente do número de submontagens.



Figura 56: Atributos definidos para a classificação de blocos [64].

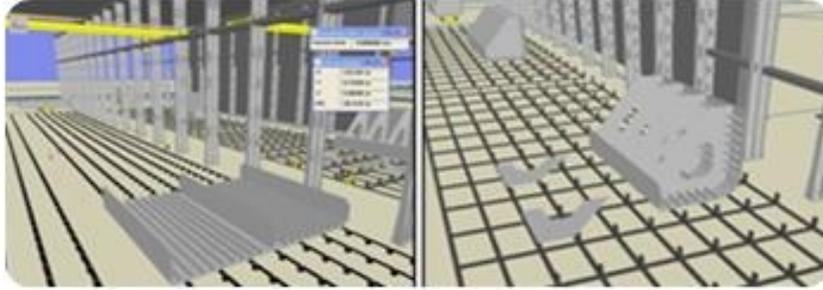


Figura 57: Simulação da montagem de blocos (QUEST) [64].

Os modelos contendo um tipo específico de agrupamento foram montados com uma fonte, três tipos de estação ou oficinas de montagem, locais de armazenagem de blocos prontos, uma máquina filtro (para solicitar os blocos na ordem certa de pré-edificação), e um dissipador dos blocos. A fonte realiza a leitura de uma tabela com as peças (componentes dos blocos) e com suas respectivas rotas.

A lógica que oriente as rotas (associada à fonte) foi desenvolvida para impedir que peças de um mesmo bloco fossem distribuídas aleatoriamente pelas estações, impedindo a finalização das montagens. A máquina filtro foi criada para solicitar apenas blocos segundo a seqüência necessária à estratégia de edificação.

Os blocos montados antes da requisição permaneceriam no estoque (área de armazenagem) até que fossem solicitados. O acúmulo de blocos ou o aumento dos níveis de estoque mostraram a adequação dos agrupamentos (tipos de especialização das oficinas) frente às seqüências estabelecidas. O dissipador foi criado apenas para retirar as peças do sistema.

As oficinas de montagem (segundo o agrupamento avaliado) foram estudadas quanto à utilização e produtividade. Em seguida, foram testados diferentes números de oficinas considerando o volume de produção, a ocupação dos recursos e as taxas de atendimento das estações posteriores.

3.2.13. Aplicação da Simulação na Fabricação de módulos de tubulação

Okumoto e Hiyoku [65] afirmam que a instalação de tubulações nos blocos é uma tarefa que normalmente depende da habilidade e experiência do trabalhador e é guiada por desenhos bidimensionais. A análise do local de trabalho mostrou que até os trabalhadores mais experientes utilizavam o desenho para a montagem de módulos de tubulações.

O trabalhador além de visualizar o desenho, verifica se todas as peças necessárias estão disponíveis. Após a instalação, é realizada uma comparação com o desenho e a estrutura montada. O estudo do processo foi realizado a partir da filmagem do local de trabalho e da atuação de um trabalhador experiente, do estaleiro japonês IHI Marine United, Inc.

Os resultados da observação mostraram que apenas 15 % do tempo total era gasto com a interpretação do desenho, e confirmação da seqüência de montagem. Todavia, a freqüência com que o trabalhador se dirigia para o desenho enquanto estava realizando a montagem montando era alta.

A complexidade do processo se dá por razões como a formação e experiência necessárias ao entendimento do desenho (e planejamento das atividades), e pelo fato de que o procedimento operacional (baseado na experiência) nem sempre é ótimo. Muitos erros de projeto são descobertos apenas no momento da produção e um trabalhador inexperiente sozinho não conseguiria realizar a tarefa.

Considerando que a falta de experiência gera erros e re-trabalho foi desenvolvido um modelo de simulação para amenizar esse tipo de problema. Os resultados do modelo foram exibidos em um computador conectado em rede sem fio no pátio do estaleiro. O visor do computador mostrou a árvore de componentes estruturais para montagem e uma visão panorâmica do módulo de simulação.

O estudo promoveu uma redução de 15% para 11% do tempo dedicado à interpretação de desenhos (para trabalhadores inexperientes), e de 35% para 19% do tempo gasto com a movimentação do local de montagem ao local onde o desenho era fixado. Para a aplicação do método, as peças necessárias deveriam estar próximas ao local de montagem e ordenadas.

3.2.14. Perfil do processo: Pré-edificação e Edificação de blocos

A área de pré-edificação é destinada à montagem de grandes blocos ou anéis. O equipamento de transferência do estaleiro normalmente limita o peso que os grandes blocos e anéis possuem. Para que a pré-edificação de um navio atenda um prazo estipulado é necessário que a produção de blocos e o processamento de aço estejam operando em ritmo adequado.

Os grandes blocos são construídos segundo uma ordem pré-definida pelo departamento de projeto. Cada grande bloco possui uma quantidade específica de blocos e um tempo final de processo diferente por esse motivo [67].

A edificação corresponde ao último estágio da construção de embarcações. No início da maioria dos projetos de embarcações, os setores de planejamento do estaleiro definem as programações de atividades baseadas no processo de edificação. A estratégia de edificação interfere nas seqüências de montagem, e dimensionamento de estruturas (peso).

O processo de edificação é considerado crítico, pois, normalmente, o ciclo de produção no berço de construção determina a capacidade de produção do estaleiro. A atividade de soldagem de grandes blocos pode ser executada diretamente na carreira ou dique, ou na área de pré-edificação onde estruturas gigantescas podem ser movimentadas por pórticos ou empurradas por outros sistemas (macacos hidráulicos, por exemplo).

Os principais métodos de edificação podem ser divididos em: construção em camadas, em anéis, em pirâmide, ou em pontos múltiplos. O método por camadas edifica primeiramente os blocos do fundo, e em seguida os blocos de costado. A terceira camada é formada por blocos de convés e segue formando as camadas restantes do navio. Na edificação em anéis, o navio é construído em seções de fundo, costado e convés [67].

A edificação em pirâmide é aplicada de forma semelhante à edificação em camadas, depois se assemelha à edificação por anéis. Após certo tempo de construção o método apresenta o formato piramidal. No método de edificação simultânea, partes ou pontos diferentes da embarcação podem ser edificados ao mesmo tempo. A aprovação das soldas e os ajustes necessários tornam essa fase crítica à construção do casco. As estratégias citadas podem ser vistas na figura 58.

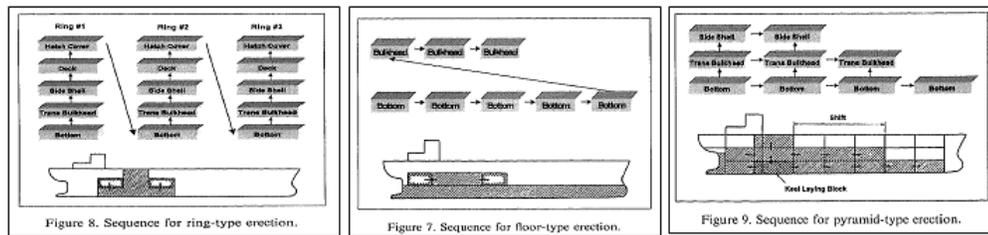


Figura 58: Estratégias de Edificação: Anel, Camada e Pirâmide [67].

3.2.15 Aplicação da Simulação na Pré-edificação e Edificação de blocos

A falta de espaço é um problema para alguns estaleiros e a simulação pode auxiliar o melhor aproveitamento das áreas. Os estaleiros alemães Flensburger, Meyer Werft e o Aker Ostsee desenvolveram modelos de simulação para otimizar os tempos de uso de seus diques e oficinas [47].

Kim, H. *et. al.* [67] apresentou em modelo de simulação do processo de edificação que permitiu a visualização de seqüências de atividades, e os impactos de diferentes estratégias. A chegada de blocos foi representada por uma distribuição exponencial, e o sistema (terminativo) foi replicado dez vezes. Os percursos do pórtico e as velocidades dos sistemas de movimentação foram ajustados de acordo com o método empregado de edificação.

O Laboratório de Simulação de Processos da Construção (LABSEN) desenvolveu um modelo para avaliar diferentes estratégias de construção, sob aspectos como o tempo de produção, a produtividade global e a taxa de ocupação das estações de trabalho (figuras 59, 60 e 61). A modelagem buscou a identificação dos gargalos, e dos impactos gerados por mudanças no fluxo de materiais [64].

Parâmetros dos sistemas de movimentação, como: velocidades e a quantidades de soldadores (equipes) foram variados, com o intuito de facilitar a investigação das melhores configurações para o sistema. Foram considerados blocos prontos e disponíveis no estoque para serem edificados. Os tempos de soldagem foram calculados a partir dos comprimentos de solda.

Como parte do delineamento geral do problema, selecionou-se um tipo de embarcação, e definiu-se o mapeamento e classificação de todos os elementos estruturais. A embarcação selecionada foi do tipo Suezmax e todos os elementos do corpo paralelo, proa e popa foram levantados.

Os modelos demonstram o potencial da ferramenta de simulação, tanto em relação à visualização do produto, como em relação à capacidade de geração de informações e realização de análises. Os dados referentes aos produtos, processos e recursos foram inseridos em um programa de gestão de processos facilitando a análise de tempos de ciclo para que fossem utilizados pelo simulador QUEST.

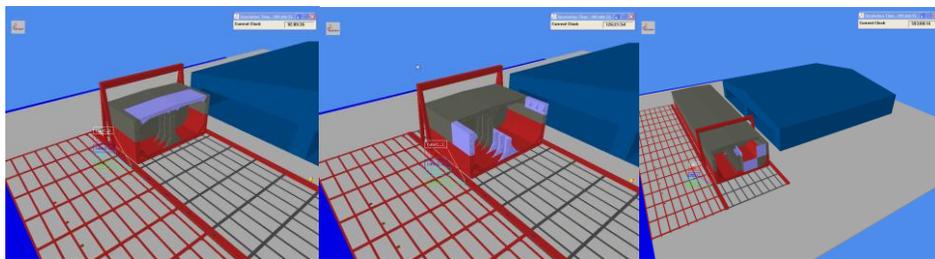


Figura 59: Simulação da Estratégia de Edificação por Anel (QUEST) [64].

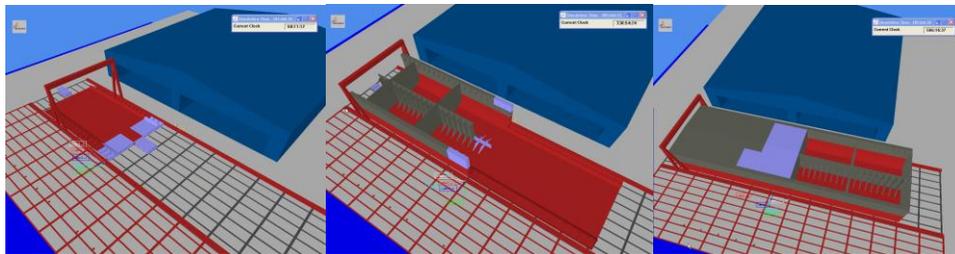


Figura 60: Simulação da Estratégia de Edificação por Camada (QUEST) [64].

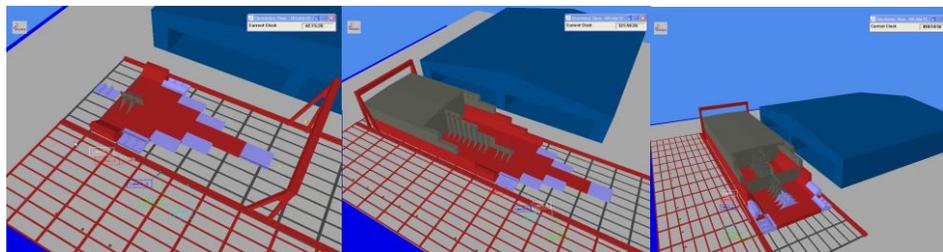


Figura 61: Simulação da Estratégia de Edificação por Pirâmide (QUEST) [64].

4 Estudo de caso

4.1. Introdução

Nesse capítulo são apresentados três estudos de caso com o intuito de exemplificar a utilização da simulação como ferramenta de apoio a gestão de estaleiros. Foram selecionados os processos de armazenagem de aço, fabricação de painéis planos e montagem e pré-edificação de blocos.

Os modelos podem ser utilizados por estaleiros em fase de planejamento e por estaleiros em fase de funcionamento. No primeiro caso, os dados de entrada do modelo como o arranjo físico, e tipos de equipamentos utilizados no sistema em estudo, podem ser estimados a partir de sistemas semelhantes. Já no segundo caso, esses dados podem ser obtidos diretamente da produção permitindo a análise do sistema em operação.

Os resultados obtidos com a execução dos modelos indicam o desempenho do sistema simulado. Caso o sistema já exista podem ser testadas alternativas para seu aprimoramento. Em caso contrário, a simulação auxilia a definição do sistema mais adequado as estratégias do estaleiro, e beneficia o estudo das questões relacionadas ao desenvolvimento do sistema projetado, como recursos necessários, espaço físico, etc.

O simulador escolhido para desenvolver os modelos foi o QUEST. A escolha se baseou no potencial de visualização tridimensional do programa que facilita a comparação entre o comportamento do sistema modelado e do sistema real. Outra vantagem que pode ser destacada são as ferramentas do simulador que auxiliam o rastreamento dos eventos, a depuração de erros, e criação das entidades (peças, máquinas, etc.) de forma intuitiva.

As fases de desenvolvimento dos modelos são apresentadas, como a elaboração de versões simplificadas, e versões com mais detalhes. A obtenção dos dados de entrada para a simulação dos cenários foi realizada a partir de informações de fabricantes de equipamentos e visitas técnicas a estaleiros. Após as considerações sobre os resultados dos experimentos são levantadas as sugestões para trabalhos futuros.

4.2. Modelo de Simulação do Pátio de aço

4.2.1. Introdução

O presente estudo mostra como a Simulação de Eventos Discretos pode ajudar estaleiros em fase de planejamento ou em fase de operação. No primeiro caso, os estaleiros que precisam adquirir equipamentos podem utilizar o modelo para o teste de recursos de movimentação com capacidades distintas, por exemplo. Para esses estaleiros, o modelo mostra o comportamento do processo de armazenagem, de acordo com diferentes arranjos físicos e áreas de estocagem.

No caso em que o estaleiro já está operando, o modelo fornece indicadores de desempenho do sistema. Esses indicadores se referem aos níveis médios de estoque, o tempo de permanência de chapas, o percentual de paradas na produção por falta de material, entre outros. Os estaleiros com esse perfil podem testar regras operacionais e políticas de suprimento de chapas (tamanhos e freqüências de pedidos) melhorando a gestão do pátio de aço.

Em sistemas de estocagem existentes, o modelo de simulação favorece a investigação de alternativas para o aprimoramento das atividades e processos. Os custos e tempos de movimentação podem ser reduzidos e o atendimento da produção pode ser melhorado. Os níveis de estoque de segurança podem ser avaliados considerando os riscos e incertezas de fornecimento, evitando prejuízos pela falta de material.

O modelo desenvolvido pode atender as diferentes necessidades de cada tipo de estaleiro. A diferença entre as utilizações se refere aos dados de entrada do modelo, ou seja, as informações que permitem a modelagem. Para estaleiros em fase de planejamento, esses dados podem ser obtidos de sistemas semelhantes, ou podem ser estimados com o auxílio de especialistas.

Para os estaleiros em funcionamento, as informações podem ser obtidas diretamente das estações e áreas de trabalho, a partir do estudo dos tempos e atividades, ou por bases em dados históricos. A representação das operações promove maior entendimento e transparência da produção e evidencia os gargalos e restrições do sistema. A otimização do pátio em operação se dá pela variação de dados de entrada, de forma estruturada por analistas e gestores.

Os principais dados de entrada são, a saber, a regra de estocagem (prioridades de posicionamento, colocação e retirada de chapas), o arranjo físico (áreas disponíveis, capacidade das pilhas), as características do suprimento do pátio (tamanho dos lotes e frequência de chegadas), e as informações dos recursos (sistemas de movimentação e tratamento). Os resultados do modelo mostram se o pátio atende a produção de forma adequada ou se está ocasionando atrasos e paradas na mesma.

Os cenários foram estabelecidos com o intuito de exemplificar o uso do modelo na definição das velocidades dos recursos de movimentação, facilitando a escolha dos melhores equipamentos. Outra questão estudada se refere às regras de estocagem, como a localização de chapas de forma a reduzir os tempos de alimentação da estação de tratamento.

Finalmente são definidos cenários com diferentes estratégias de suprimento de chapas. São apresentados os indicadores que facilitam decisões sobre o tamanho do estoque de segurança e os momentos ideais para a realização de pedidos, considerando riscos de atrasos no fornecimento externo.

A lógica do modelo realiza verificações relacionadas apenas à quantidade de chapas no pátio (em cada pista ou pilha). Devido a esse fato, o modelo inicialmente simulou a estocagem de chapas padronizadas. Todavia, caso o modelo considerasse chapas diferentes seria necessário apenas a inclusão de outras verificações nas lógicas internas dos elementos controladores. Nesse caso, poderiam ser adicionadas verificações voltadas para critérios ou restrições como a possibilidade de compartilhamento de chapas diferentes em uma mesma pilha, ou a organização de acordo com a obra, com armador, com o tipo de aço, entre outros.

4.2.2. Desenvolvimento do modelo

A simulação avaliou uma configuração básica, definida inicialmente, para que o funcionamento do modelo fosse assegurado quanto à representação do sistema. Em seguida, foi realizada a análise de sensibilidade evidenciando os fatores mais impactantes na produtividade. Nesse sentido, todos os recursos tiveram seus parâmetros alterados e as estatísticas da simulação foram analisadas. Além dos parâmetros dos recursos, foram alteradas algumas regras operacionais.

Após a análise de sensibilidade, a questão da estratégia de suprimento do Pátio foi estudada mostrando os níveis de estoque, a ocorrência e duração de paradas na produção por falta de material, a utilização dos recursos, e das áreas de estocagem, assim como, a produtividade alcançada segundo a política de fornecimento de chapas, e de organização das mesmas.

As informações necessárias à modelagem se referem: a área de estocagem (quantidade de pistas, dimensões, locais de empilhamento (pilhas) e capacidade das pilhas), aos recursos (velocidades, capacidade e dimensões dos sistemas de movimentação), as regras de operação (prioridades de carregamento e descarregamento de chapas), aos dados sobre os cenários (parâmetros que serão variados, tempo de simulação e turno de trabalho), dados sobre o suprimento de chapas (frequência e tamanho de lotes), e características das chapas (peso, tipo de aço, etc.).

Foram definidas três pistas de armazenagem com a capacidade de aproximadamente dois navios do tipo Suezmax (capacidade arbitrada para atender a produção do estaleiro modelado). O peso médio das chapas é de cinco toneladas de aço e as chapas foram consideradas iguais uma vez que a diferenciação das mesmas não foi necessária para a realização das análises propostas.

O processo de carregamento representou a chegada de chapas (por uma balsa), a movimentação das chapas até o início das pistas (por carros hidráulicos), e a entrada de chapas na pista para o seu empilhamento (por pontes rolantes). As pontes rolantes (uma para cada pista) ficaram encarregadas de transportar as chapas empilhadas para a esteira da linha de tratamento, no processo de descarregamento do Pátio.

O piso ou pavimentação do Pátio foi dimensionado para suportar 20 toneladas por m² (600 toneladas/pilhas). Para cada pista foram determinadas 20 áreas de empilhamento. A figura 62 mostra o fluxo de materiais representado pelo modelo.



Figura 62: Fluxo de materiais do modelo do Pátio de aço.

Foram dimensionadas três pistas com 120 x 40 metros (cada). Um carro hidráulico com capacidade de transporte de 210 toneladas leva uma quantidade definida de chapas do ponto de descarga da balsa até o início das pistas de armazenagem. A figura 63 mostra o carro hidráulico real e o modelado em 3D pelo programa *DELMIA* e, posteriormente importado para o simulador *QUEST*.

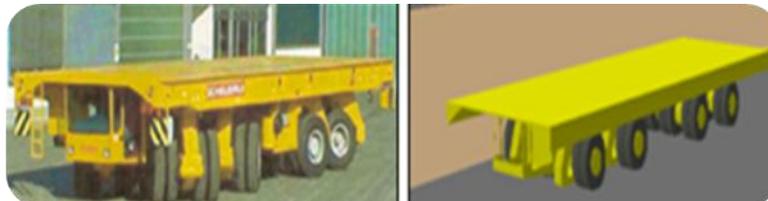


Figura 63: Carro hidráulico real e modelado em 3D (DELMIA).

Inicialmente, foi desenvolvido um protótipo reduzido contendo: uma fonte de chapas, três pistas de armazenagem (cada uma contendo cinco locais de empilhamento), três pontes rolantes (uma por pista), três esteiras rolantes (conectadas entre si) e a estação de tratamento. O protótipo facilitou a verificação do funcionamento lógico do modelo. As figuras abaixo mostram a tela do simulador com a primeira e segunda versão do modelo, respectivamente.

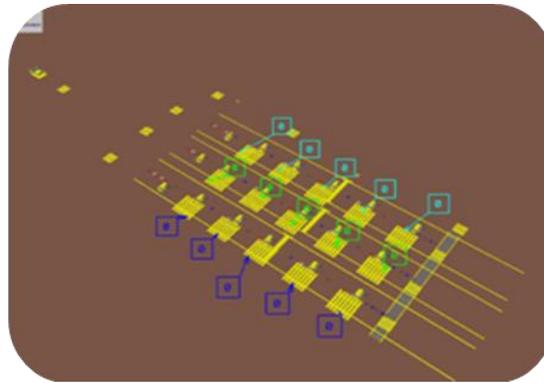


Figura 64: Primeira versão do modelo (com contadores dinâmicos nas pilhas).



Figura 65: Segunda versão do modelo (com representação mais detalhada).

O modelo considerou suficiente o uso de apenas uma das pontes rolantes para atender a produção. O carregamento do pátio pode ocorrer em qualquer período do dia, independente dos turnos de produção e utilizando todas as pontes rolantes, caso haja necessidade. O suprimento do pátio, de acordo com a capacidade da ponte rolante, permite a movimentação de lotes de até cinco chapas, mas a retirada de chapas deve ser feita para uma chapa por vez.

A numeração das pilhas cresce no sentido contrário a esteira. A regra operacional arbitrada prioriza a retirada de chapas, para a linha de tratamento, das pistas e pilhas mais vazias, até o término das peças. Já o suprimento de chapas no pátio prioriza as pistas e as pilhas mais cheias, e envia chapas até que as pilhas e pistas atinjam a capacidade máxima.

4.2.3. Criação de lógicas

No início da simulação uma rotina computacional é executada para mapear todas as pilhas e suas quantidades (Matriz índice da pilha, quantidade). Em seguida a rotina ordena as pilhas por prioridade (de carga e descarga), considerando a capacidade disponível (mais cheia ou mais vazia) e a proximidade das pilhas e das pistas quanto à estação de tratamento de aço (Matriz índice da pilha, prioridade).

Para a determinação das atividades de cada pista (carga ou descarga) foram criados controladores, que a partir das regras operacionais, definem a disponibilidade de cada pista. Quando todas as pistas estão vazias, o controlador do descarregamento espera certo tempo para que o Pátio seja carregado, e verifica novamente a quantidade de chapas para voltar a retirá-las. Quando todas as pistas estão lotadas o controlador escolhe a pista mais próxima da esteira.

O controlador do carregamento possui lógica similar, contudo, escolhe pistas e pilhas mais cheias e mais distantes da esteira (em caso de empate ou no caso do pátio estar lotado ou vazio). Esse controlador identifica ainda as pistas com pontes rolantes indisponíveis (paradas para manutenção) e direciona o lote de chapas através do carro hidráulico que se movimenta preferencialmente com a capacidade máxima de carga.

O controlador do descarregamento possui prioridade na escolha da pista, mas caso a pista já tenha iniciado a retirada de chapas do carro hidráulico o controlador espera até o término do processo. Situações adversas surgiram a partir da execução do modelo e tiveram que ser consideradas nas lógicas desenvolvidas.

No caso de duas pistas estarem lotadas, por exemplo, e a terceira pista estar descarregando, o controlador (do descarregamento) passa a descarregar uma das pistas lotadas ao invés da mais vazia. No processo de carregamento, a regra também é alterada quando ocorre a situação onde duas pistas estão vazias e uma está sendo descarregada. Nesse caso, são carregadas as duas pistas vazias, ao invés da pista mais cheia (única com peças).

Outra questão encontrada foi a de que os lotes de chapas que são armazenadas no pátio devem ser calculados segundo a capacidade da pilha escolhida para recebê-los. Assim a mesma ponte rolante quando está realizando o processo de carregamento pode transportar até cinco chapas, mas quando está realizando o descarregamento só pode transportar uma chapa.

Foi estabelecido um artifício para agrupar o lote calculado de chapas e transportá-lo como se fosse uma chapa. O cálculo é realizado pela rotina associada ao controlador do carregamento. Em cada pilha, dentro das pistas, foram posicionados elementos que desmembram os lotes recebidos para que cada chapa possa ser contabilizada novamente.

Caso a pista necessite de uma quantidade de chapas menor que a contida no carro hidráulico, ou caso as chapas não consigam entrar nas pistas devido a problemas na ponte, o carro transporta as chapas sobressalentes e as leva para um local específico, para que sejam redirecionadas. O local ou elemento de armazenagem provisória possui prioridade de envio das chapas com relação às peças que entraram no sistema em um momento posterior.

Foram desenvolvidas lógicas para a geração automática das conexões entre os elementos (pontes rolantes e pilhas de chapas), e para a geração do estoque (distribuído por pistas e pilhas) para representar a situação inicial do Pátio, definida pelo usuário no início da execução do modelo. Nas rotinas desenvolvidas foi necessário estabelecer procedimentos de atualização das matrizes com as quantidades e prioridades das pilhas de acordo com o término do processo de carga e de descarga.

4.2.4. Definição dos cenários

Os cenários apresentados exemplificam situações que podem ser estudadas com a simulação. O primeiro cenário corresponde à representação das características de um estaleiro brasileiro, para que fossem verificadas as taxas de atendimento da produção. A simulação desse cenário mostra como o modelo pode auxiliar o controle das operações, indicando a capacidade real de um sistema em funcionamento e suas limitações.

O segundo e terceiro cenário procuram mostrar os impactos de diferentes configurações para os recursos. O modelo permite a visualização dos gargalos, facilitando a definição dos parâmetros ideais para esses e outros recursos, segundo as restrições dos equipamentos, e os ritmos balanceados para atender a demanda desejada.

O quarto e o quinto cenário apresentam diferentes arranjos físicos do pátio, que correspondem à priorização de locais específicos para armazenar as chapas que serão retiradas do pátio para o tratamento. Nesse sentido foram testadas as operações onde apenas as chapas mais próximas da esteira de tratamento são retiradas e em outra simulação apenas as chapas mais distantes são priorizadas.

Os dois últimos cenários representam estratégias de suprimento do pátio segundo diferentes frequências e tamanhos de lotes de chapas (fornecimento externo). Estaleiros em operação podem fazer uso do modelo para verificar os níveis de estoque e as ocorrências e durações de parada na produção por falta de aço conforme a planejamento acordado de entrega das chapas.

A simulação realizada nos últimos cenários mostra indicadores como à ocupação das pistas e locais de empilhamento de chapas, o que favorecem o estudo da melhor alocação das atividades. Dessa forma, as áreas definidas para a armazenagem do aço com baixa utilização podem ganhar outras atividades produtivas, como a montagem de blocos, por exemplo. O aproveitamento do espaço físico e dos recursos de movimentação pode ser aprimorado com o teste de alternativas pelo modelo.

4.2.5. Análise dos resultados e Considerações sobre o modelo

O cenário 1 representou o sistema com estoque inicial de 1200 toneladas de aço, turno de produção de 8 horas e 22 dias trabalhados em 1 mês. A capacidade máxima das pilhas é de 114 chapas e cada uma das três pistas possui 20 áreas de empilhamento. A velocidade de tratamento (e da esteira) é de 120 m/h e as velocidades das pontes rolantes são 720 m/h (sem carga) e 420 m/h (com carga).

O tempo simulado foi de um ano e a distribuição do estoque inicial é mostrada no gráfico 1. Foi arbitrada uma concentração maior de chapas na terceira pista, sendo esta a mais distante da estação de tratamento. A partir dessa configuração pode ser verificada uma taxa média de recuperação de 7,5 chapas tratadas/hora. Considerando um navio do tipo Suezmax com 5370 chapas, o modelo mostra que sob essas características o sistema processaria essa quantidade de chapas em 4,06 meses.

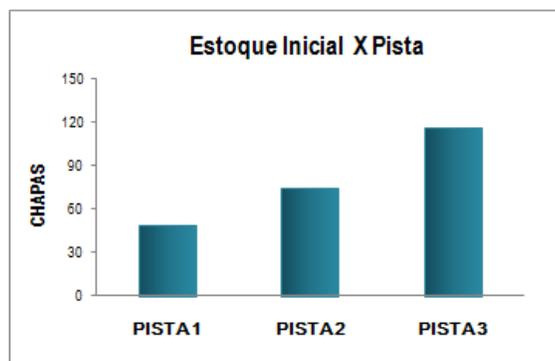


Gráfico 1: Distribuição do estoque inicial de chapas por pista.

Foram verificadas as taxas médias de recuperação das chapas (chapas/hora) de acordo com diferentes velocidades da esteira de tratamento (60, 120, 180, 240 e 300 m/h). O aumento das velocidades da esteira correspondeu ao aumento das taxas de recuperação até certo ponto, pois a partir de 180 m/h o aumento da taxa passou a ser desprezível.

Esse fato mostra que a partir de certa velocidade o gargalo deixou de ser a esteira e passou a ser as pontes rolantes que não conseguiam mais acompanhar o ritmo do tratamento. No modelo pôde ser notado um distanciamento maior das chapas na esteira, conforme as velocidades foram alteradas, mostrando que o tempo entre a

colocação de uma chapa e outra pela ponte não era rápido o suficiente para que não houvesse grandes espaços entre chapas.

Nesse cenário a maior taxa de recuperação alcançada foi de 9,4 chapas/ hora, com a velocidade máxima da esteira de 300 m/h. O tempo de processamento de um navio Suezmax é de 3,27 meses. O terceiro cenário foi simulado mantendo a velocidade de 300 m/h e variando-se as velocidades das pontes rolantes até o limite de 1720 e 1420 m/h.

Como na situação anterior o gargalo era a ponte rolante ao serem aumentadas as velocidades desses recursos o sistema melhorou a desempenho chegando a apresentar como taxa média de recuperação de até 19,34 chapas/ hora. O referencial do tempo de processamento de um navio Suezmax reduziu-se para 1,58 meses.

Os gráficos a seguir mostram as variações dos parâmetros dos recursos em cada cenário e o desempenho proporcional do sistema e o tempo de processamento de um Suezmax para cada cenário.

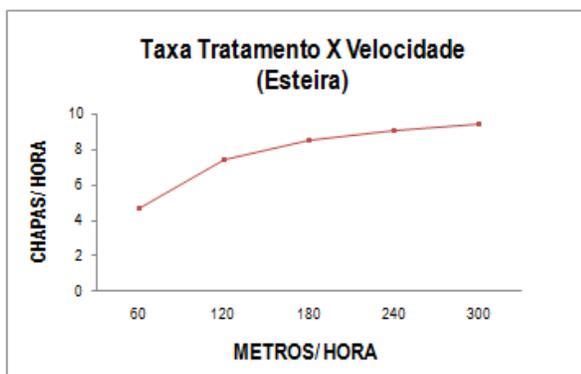


Gráfico 2: Desempenho (chapas tratadas/hora) X Velocidades da esteira (m/h).

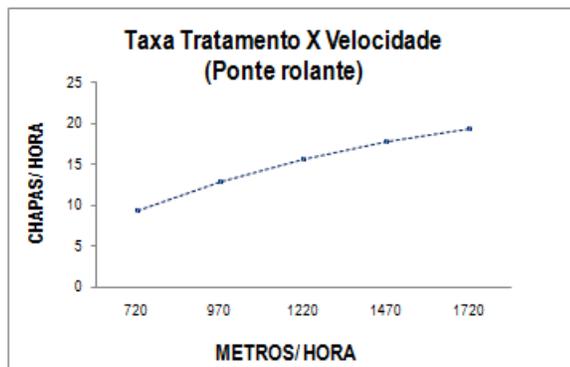


Gráfico 3: Taxa de tratamento de chapas X Velocidades pontes rolantes (m/h).

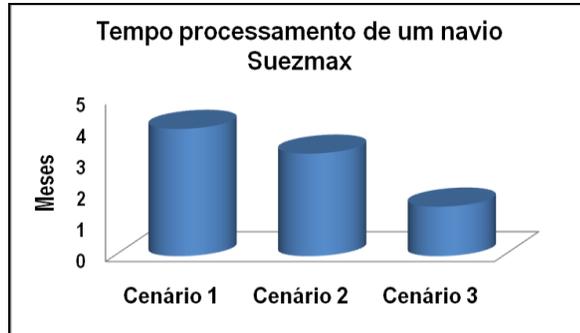


Gráfico 4: Tempo de processamento de um Suezmax (meses) X Cenários.

O quarto cenário mostrou a taxa média de recuperação das chapas no pior caso, onde as chapas são retiradas sempre de locais mais distantes da esteira, utilizando, contudo os parâmetros do primeiro cenário como velocidades dos recursos. O quinto cenário apresentou as taxas médias de recuperação de acordo com a situação onde são retiradas preferencialmente as chapas de áreas mais próximas da linha de tratamento.

A taxa do quarto cenário foi de 3,44 chapas/ hora, correspondendo a 9,46 meses para processar o aço de um Suezmax. O quinto cenário apresentou a taxa de 8,06 chapas/ hora e 3,78 meses de processamento relativos ao navio de referência, como mostra o gráfico 5.

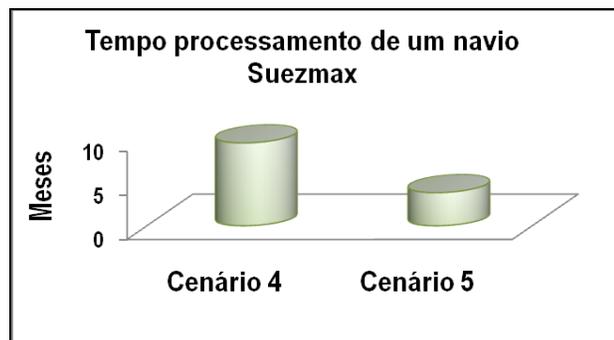


Gráfico 5: Tempo de processamento de um Suezmax (meses) X Cenários.

Os últimos cenários foram representados pelos parâmetros do cenário 1 (velocidades dos recursos, turnos, tempo de simulação, etc.). Esses cenários se diferenciam pela frequência e tamanho de lotes de fornecimento de aço. As frequências de chegada de chapas foram representadas por uma distribuição triangular com valor mínimo 10% abaixo da moda e valor máximo 30% da moda.

O cenário 6 simulou a chegada de lotes com frequência menor (486, 540 e 648 horas) contendo 900 chapas (4500 toneladas de aço). Já o cenário 7 apresentou a frequência de suprimento maior (972, 1080 e 1296 horas) e o tamanho dos lotes de 1800 chapas. As ocupações das pilhas de cada pista indicam que dependendo do comportamento da chegada de chapas, áreas são mais ou menos utilizadas.

O tamanho médio das pilhas nesses cenários foi relativamente baixo mostrando que a rotatividade do aço foi alta, ou seja, o tempo de permanência das chapas foi baixo. Contudo, as estatísticas relativas às paradas da produção por falta de material (ocorrências e durações) evidenciam os riscos da alta rotatividade do material sem um estoque de segurança adequado. Os dois cenários utilizaram o mesmo estoque inicial de referência, o que acarretou em comportamentos distintos de paradas na produção.

No cenário com frequência e tamanho de lote de suprimento menor, a pista 1, mais próxima da esteira de tratamento, apresentou 12 áreas (pilhas) vazias na maior parte do tempo simulado e seis áreas com ocupação menor que 10%. A maior utilização foi de 25% em uma das áreas. Com relação ao tamanho das pilhas (chapas contidas na pilha) foi atingido apenas 20,17% da capacidade máxima de empilhamento.

No cenário com frequência e tamanho de lote de suprimento maior, a pista apresentou cinco áreas (pilhas) vazias na maior parte do tempo e cinco áreas com ocupação menor que 10%. A maior utilização apresentada foi de 32% em uma das áreas e o tamanho máximo de pilha atingiu 28,94% da capacidade máxima de empilhamento. Os gráficos a seguir comparam as taxas de ocupação da pista 1 para os dois cenários e os tamanhos médios das pilhas.

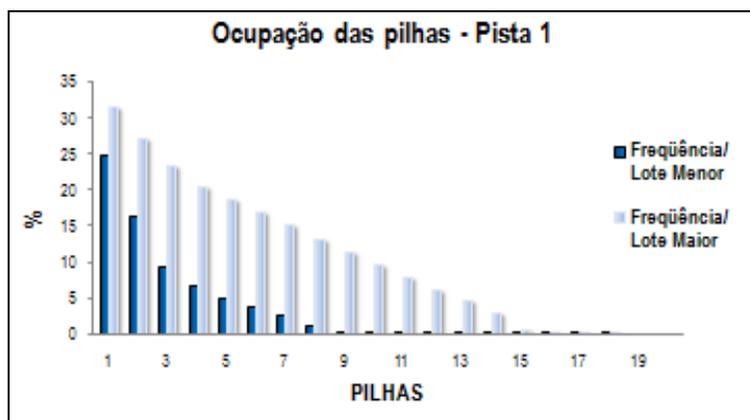


Gráfico 6: Taxas de ocupação das pilhas da Pista 1 - Cenário 6 e 7.

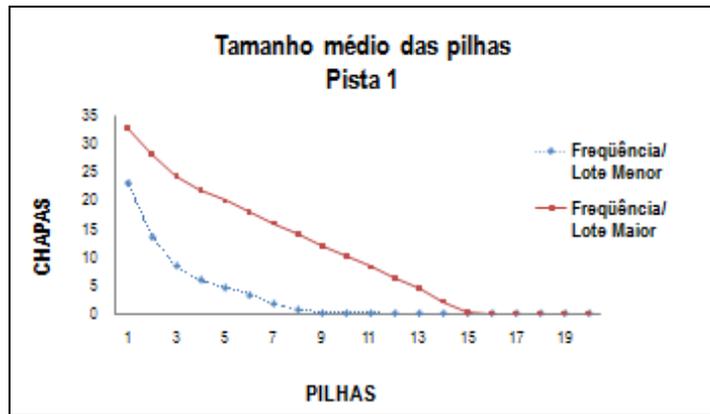


Gráfico 7: Tamanho médio das pilhas da Pista 1 - Cenário 6 e 7.

A pista 2, nos dois cenários não apresentou nenhuma das áreas de empilhamento vazias. Contudo, no primeiro cenário, com frequência e tamanho de lote de suprimento menor, foram verificadas 14 áreas com ocupação menor que 10%, sendo seis áreas a mais que o segundo cenário (com frequência e tamanho de lotes maiores).

A maior utilização do primeiro cenário foi de 52% em uma das áreas e o tamanho de pilhas atingiu 46,49 % da capacidade máxima. Já para o segundo cenário a utilização máxima foi de 36 % e a pilha que conteve o maior número de chapas armazenou 32,45% da capacidade. Os gráficos 8 e 9 mostram as comparações comentadas.

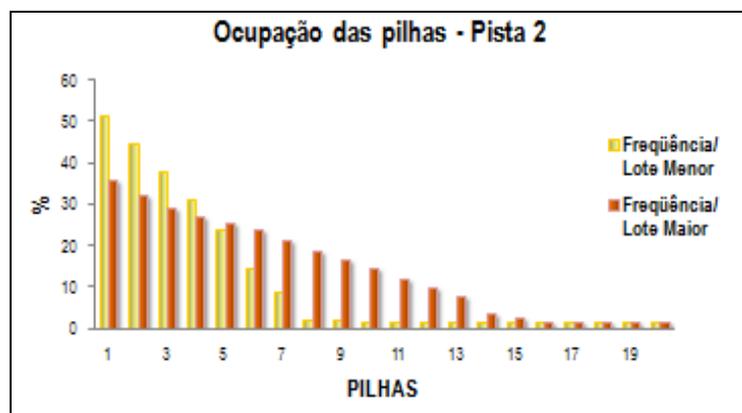


Gráfico 8: Taxas de ocupação das pilhas da Pista 2 - Cenário 6 e 7.

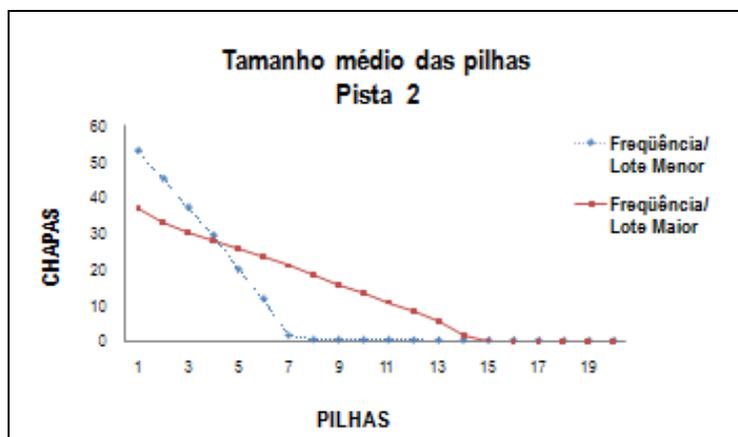


Gráfico 9: Tamanho médio das pilhas da Pista 2 - Cenário 6 e 7.

Na pista 3, os dois cenários se mostraram semelhantes com 12 áreas com ocupação menor que 10% do tempo. E a maior utilização foi de 13% de uma das áreas. O cenário com menor frequência e lote de suprimento apresentou uma das áreas vazias na maior parte do tempo. Os dois cenários utilizaram 13,15 % da capacidade máxima de empilhamento em uma das pilhas. Os gráficos 10 e 11 mostram as estatísticas da pista 3 para os dois cenários em questão.

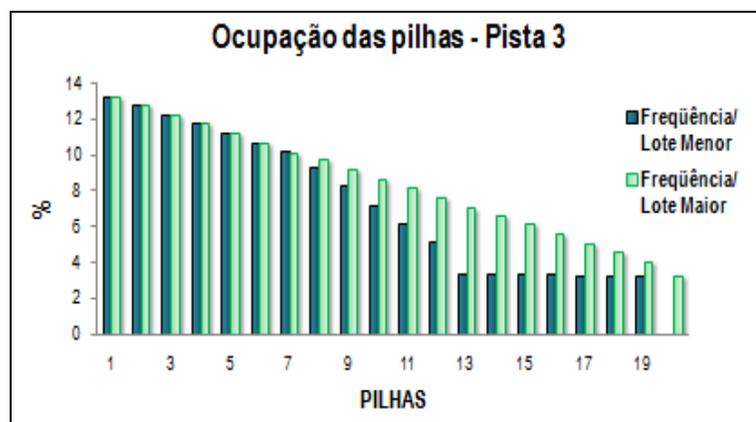


Gráfico 10: Taxas de ocupação das pilhas da Pista 3 - Cenário 6 e 7.

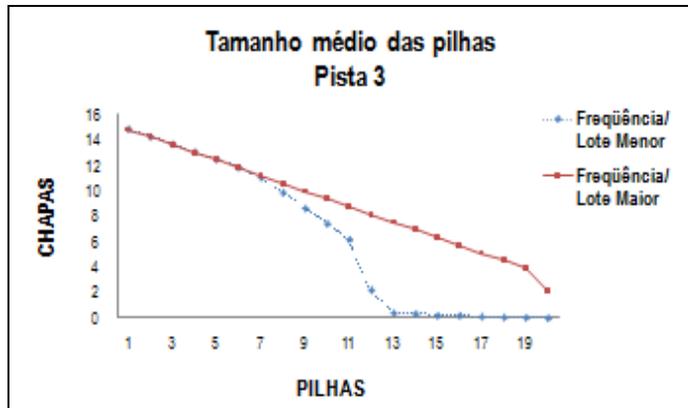


Gráfico 11: Tamanho médio das pilhas da Pista 3 - Cenário 6 e 7.

O gráfico 12 compara as paradas da produção por falta de material pelo número de ocorrências e pelas durações em dias. As frequências e tamanhos de lotes menores mostraram maior número de paradas (13) com durações menores (até 10 dias). No cenário com frequências e tamanhos de lotes maiores ocorreu um número menor de paradas (7), mas com durações maiores (até 20 dias).

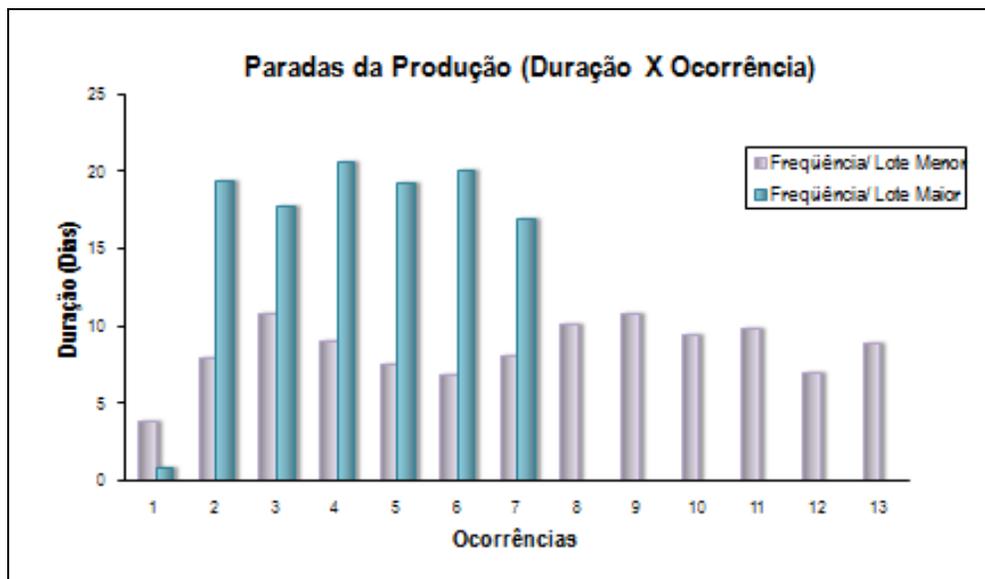


Gráfico 12: Ocorrência e Duração (dias) de paradas da produção X Cenários.

Nos cenários 6 e 7 pode ser notado que além das taxas de ocupação das áreas e dos riscos de paradas, as taxas de utilização dos recursos também sofrem alteração conforme a política de compra do aço. O gráfico 12 indica que a ponte da pista 1 obteve utilização de aproximadamente 28 % menor no cenário com frequência e lote menor

(40,10 %) do que no outro cenário (68,29 %). A ponte da pista 2 mostrou utilizações mais altas para os dois cenários (67,07 % e 71,36 %), e a pista 3 foi pouco utilizada (20,03 % e 28,63 %).

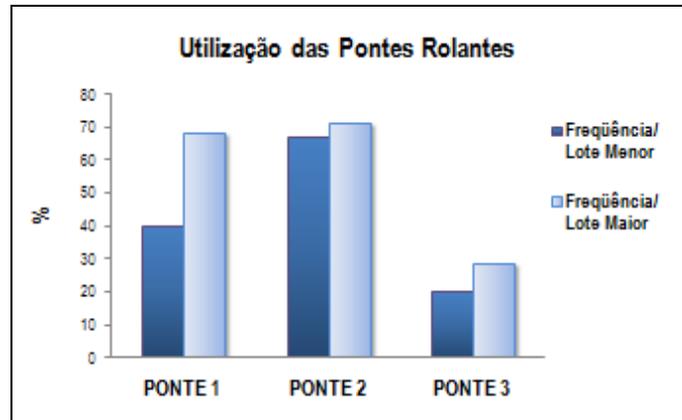


Gráfico 13: Utilização das Pontes Rolantes (%) - Cenários 6 e 7.

Os cenários apresentados evidenciam certas aplicações da Simulação de Eventos Discretos. Os dados de entrada dos modelos podem ser facilmente substituídos para a representação de um sistema ou estaleiro específico. A modelagem das regras operacionais e edição de lógicas computacionais foram as etapas mais crítica do estudo devido a complexidade de desdobramentos que são visualizados apenas após a execução do modelo.

O modelo desenvolvido pode auxiliar o controle das operações, indicando a capacidade real de um sistema em funcionamento e suas limitações. Os primeiros cenários mostram que a simulação pode ser aplicada aos estaleiros que ainda estão em processo de especificação ou aquisição dos sistemas de movimentação e tratamento. Estaleiros em funcionamento podem avaliar a possibilidade de alterar certos parâmetros dos recursos para que o sistema melhore o desempenho.

Os cenários que representam a análise do posicionamento do aço permitem que o estaleiro avalie diferentes alternativas e regras operacionais que promovam o menor tempo de recuperação ou tratamento das chapas. Com o modelo é possível verificar as atividades e planejamento necessário a manutenção das políticas operacionais. Por exemplo, caso o estaleiro opte por retirar as chapas preferencialmente de um determinado local, pode ser estudada a forma de alimentar esse local para que não falem chapas.

4.3. Modelo de Simulação da Linha de Fabricação de Painéis Planos

4.3.1. Introdução

O estudo de caso da linha de painéis apresenta o desenvolvimento de uma ferramenta genérica de controle da fabricação de painéis. A generalidade ocorre devido ao fato de ter sido desenvolvida uma lógica que pode representar diferentes tipos de produtos, processos e recursos. A simulação de uma linha em particular ou de painéis específicos, por exemplo, demanda apenas a alteração dos arquivos externos (em formato de planilha ou arquivo texto), que devem ser lidos pela lógica no início da simulação.

A vantagem de um modelo de linha de painéis detalhado ao invés do modelo do tipo “caixa-preta” está no estudo e no aperfeiçoamento das operações realizadas em todas as etapas de fabricação. A simulação de linhas que ainda não existem ou que já estão em funcionamento pode ser uma ferramenta-chave para a aquisição de diferencial competitivo dos estaleiros.

O modelo desenvolvido atende estaleiros que pretendem instalar **novas linhas**, modernizar linhas existentes, ou acoplar a fabricação de painéis (em linha) com outros processos, como o processamento de aço ou montagem de blocos. A utilização da técnica se dá através do teste de diversas alternativas evidenciando o comportamento da produção, antes que os investimentos em maquinário, por exemplo, sejam realizados.

A simulação, nesses casos, permite a avaliação de propostas de fornecedores de equipamentos, estudo de possíveis arranjos da linha, definição dos estoques intermediários (chapas e perfis), localização dos estoques de produtos acabados (painéis), verificação da capacidade da linha e do conteúdo de trabalho para diferentes embarcações, entre outros.

Caso o modelo utilize dados de uma **linha em funcionamento** são fornecidos indicadores de desempenho, como a utilização das estações e os tempos de produção. Alternativas de aprimoramento do sistema podem ser testadas, como diferentes métodos de fabricação ou sequência de operações. Atividades e movimentações desnecessárias podem ser identificadas e as seqüências dos painéis podem ser verificadas para que os tempos de preparação dos equipamentos (conhecido como “*set-up*”) sejam reduzidos, promovendo aumento da produção.

Os arquivos externos são acessados pela lógica executada no início da simulação. Esses arquivos se referem aos dados dos blocos contendo os tipos e quantidades de painéis planos, a ordem de produção dos blocos (um arquivo para cada estratégia montagem de painéis), os tipos de painéis e as características de cada painel (um arquivo para cada tipo de painel).

O diferencial das lógicas desenvolvidas é relativo à leitura inicial de todas as tabelas e armazenagem das informações necessárias ao cálculo dos tempos de processo, reduzindo o tempo de processamento computacional. A busca dos dados foi aperfeiçoada com o uso de vetores na organização dos dados.

Os cenários simularam a fabricação de painéis diferenciados pela quantidade de chapas e perfis. Foram considerados seis tipos de painéis, vinte e dois tipos de blocos e quatro seqüências de fabricação de painéis.

Apesar das quantidades de produtos definidas nos cenários, a lógica desenvolvida está apta a reconhecer até 100 tipos diferentes de painéis (contendo 10 tipos de chapas e 20 tipos de perfis) e até 100 tipos de blocos (contendo até 10 tipos de painéis cada).

Os painéis produzidos, ao final da linha, se encontram com chapas e reforçadores primários. Todavia, o modelo está preparado para representar a inclusão de outros elementos como reforçadores secundários e a formação de blocos planos ao final da linha.

Os cenários propostos abordaram a utilização de diferentes seqüências de produção, mostrando a quantidade de painéis produzida nos períodos simulados, e as taxas de ocupação das estações da linha.

O modelo simulou a fabricação de painéis planos de um navio do tipo Suezmax. As seqüências de produção foram criadas para atender estratégias de edificação por Anel, Camada e Pirâmide. Foi analisada ainda a produção especializada de painéis semelhantes (estratégia por Grupo).

4.3.2. Desenvolvimento do modelo

Um navio do tipo Suezmax foi selecionado, e seu corpo paralelo foi dividido em 15 seções. Cada seção foi dividida em 25 blocos (seções com anteparas) e 21 blocos (seções sem anteparas). Após a divisão dos blocos, os painéis planos foram identificados e organizados em seis grupos, considerando as respectivas quantidades de chapas e perfis. A figura 66 mostra o casco com três seções em destaque, e a figura 67 mostra vista de uma das seções.

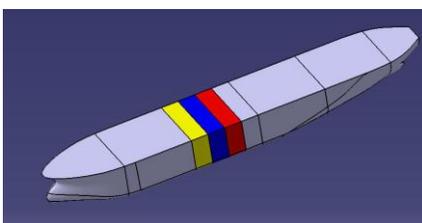


Figura 66: Embarcação de referência para o estudo da Linha de Painéis Planos.

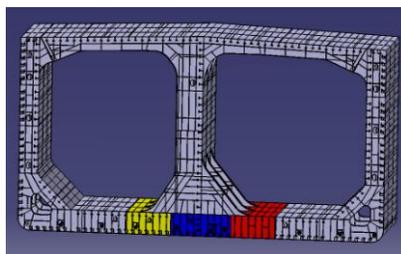


Figura 67: Seção do corpo paralelo da embarcação de referência para o estudo.

O método de montagem dos painéis foi baseado em uma proposta de linha de um fornecedor que considera a preparação, ponteamto, soldagem e marcação das chapas. Em seguida, de acordo com a proposta, os reforçadores (perfis fabricados) são ponteados e soldados antes que entrem os reforçadores secundários.

Na proposta da linha foram obtidas as características dos equipamentos que compõem as estações (velocidades, dimensões, etc.) e essas informações foram utilizadas para a definição das funções de tempo das estações. A tabela 9 mostra os principais processos e as funções de tempo consideradas. Os produtos e recursos (figuras 68,69 e 70) foram modelados pelo programa DELMIA e importados para o modelo desenvolvido pelo simulador QUEST.

Tabela 7: Funções de tempos dos principais processos da Linha de Painéis.

<i>ESTAÇÃO</i>	<i>PROCESSO</i>	<i>FUNÇÃO DE TEMPO</i>
1	Ponteamto de chapas	cordão de solda/ (1,8 m/min)
2	Soldagem de chapas	6 min/ cordão de solda
2	Marcação de chapas	cordão de solda/ (3,9 m/min)
3	Ponteamto de perfis	cordão de solda/ (1,5 m/min)
4	Soldagem	cordão de solda/ (0,6 m/min)

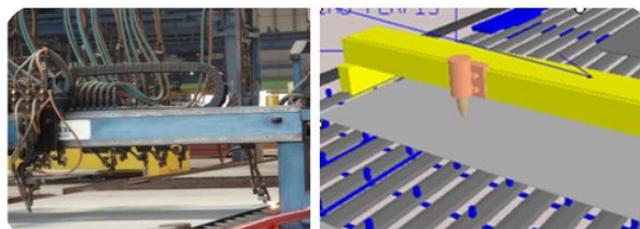


Figura 68: Modelagem da primeira estação de soldagem (Estudo de Caso II).

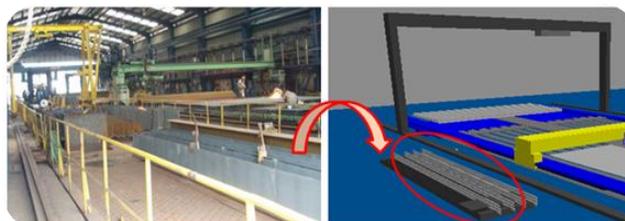


Figura 69: Armazenagem de perfis laterais a linha (Estudo de Caso II).



Figura 70: Modelagem da quarta estação de soldagem (Estudo de Caso II).

A linha foi representada por quatro estações que possuem processos principais como ponteamto e soldagem, e processos secundários como preparação dos equipamentos, acabamento e inspeção. A entrada de chapas e perfis foi realizada por conexões diretas, uma vez que as taxas de alimentação de peças consideraram os tempos de movimentação.

A **primeira estação** representa as atividades de recebimento, preparação, ponteamto e limpeza das chapas. As chapas são recebidas por conexão direta com um *pallet* posicionado no início da linha. O processo de ponteamto utiliza a solda do tipo MIG (*Metal Inert Gas*) e para cada cordão de solda (bainha) são aplicados dois passos de solda manual.

Essa estação representa as atividades de colocação dos separadores que determinam o espaçamento necessário à soldagem de topo e dos elementos fixadores (ímãs e barras de extensão), que as mantêm unidas e estáticas durante o ponteamto. O tempo de colocação da cerâmica na posição contrária aos chanfros, para realizar o ponteamto unilateral também foi considerado.

Na **segunda estação** são representadas as atividades de preparação do equipamento automático de solda, soldagem das chapas e marcação dos locais onde os reforçadores serão soldados. O preenchimento do cordão de solda é realizado por passes de solda do tipo Arco Submerso.

A linha simulada possui o equipamento de solda (carrinho) acoplado a um sistema de movimentação (semelhante a um pórtico). Após a soldagem é realizada a limpeza do cordão de solda e inspeção. Em seguida, é realizada a marcação com as posições onde serão soldados os reforçadores (primários e secundários).

Cortes ou aparos de arestas das chapas podem ser realizados nessa estação, para que o painel esteja adequado a montagem posterior dos blocos. Atividades de inspeção são realizadas com equipamentos de ultra-som, e podem ser aplicadas nas camadas de tintas protetoras dos cordões de solda.

Na **terceira estação** são inseridos e ponteados os reforçadores primários. Esses elementos são armazenados próximo à linha em suportes que os mantêm na posição adequada para sua retirada por equipamentos de movimentação. Os equipamentos que retiram os reforços utilizam ímãs para posicioná-los nas linhas onde serão ponteados.

A **quarta estação** representa a preparação do equipamento de solda, o processo de soldagem por filete duplo (soldagem simultânea dos dois lados dos reforçadores), limpeza e inspeção do cordão de solda. Além das quatro estações, foram criadas fontes de chapas e perfis. A taxa de fornecimento dessas fontes foi calculada para atender a necessidade das estações da linha. A figura 71 apresenta o fluxo de materiais, destacando a nomenclatura das estações e o resumo de suas atividades.

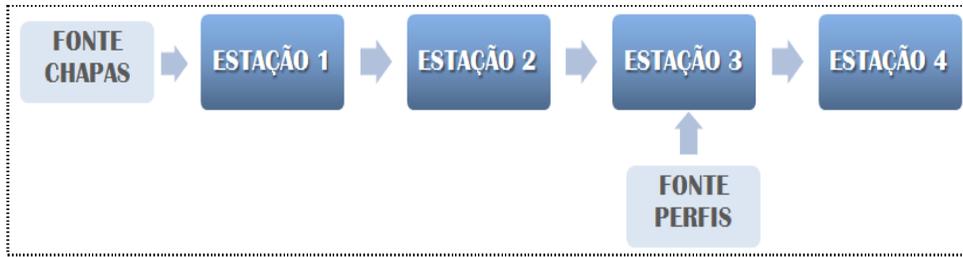


Figura 71: Fluxo de materiais nas estações da Linha de Painéis Planos.

A visualização do modelo representou os equipamentos e produtos, modelados em escala real. A representação tridimensional permite a análise dos espaços físicos ocupados, e acompanhamento da produção de forma intuitiva, uma vez que os tipos de painéis e estações podem ser rapidamente reconhecidos

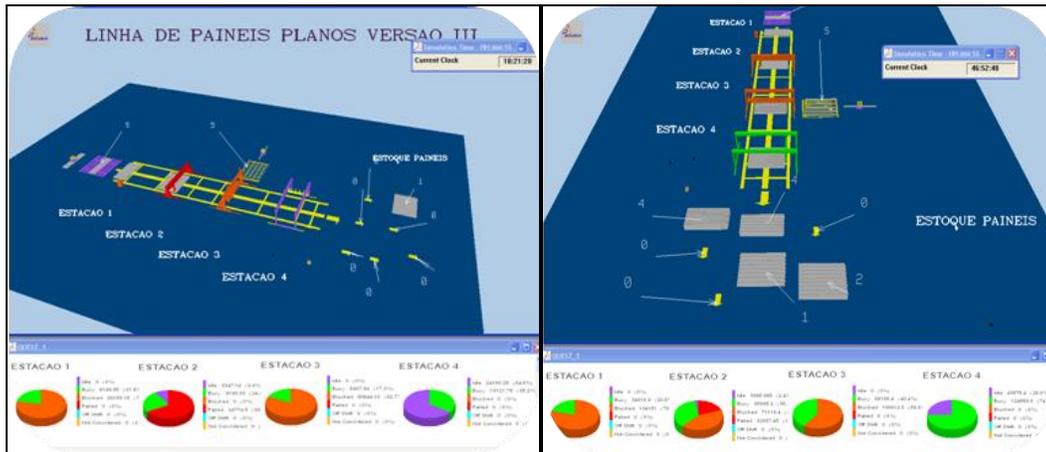


Figura 72: Modelo da Linha de Painéis Planos (QUEST).

4.3.3. Criação de lógicas

A lógica executada no início da simulação acessa os arquivos contendo os tipos de painéis, os dados de cada painel, os dados dos blocos e as sequências de blocos a serem edificados. A partir dessa sequência é gerado automaticamente um arquivo com a ordem de fabricação dos painéis (para atender a estratégia de edificação).

Os dados foram organizados em forma de vetores, utilizando os índices de cada painel e de cada bloco como referência para a busca de informações. Os vetores foram definidos através de variáveis denominadas *arrays*. A figura 73 mostra um exemplo de arquivo contendo os dados do painel do tipo A. No arquivo são informados o nome do painel, a identificação, dimensões, quantidade de reforçadores e de chapas, e posição dos reforçadores.

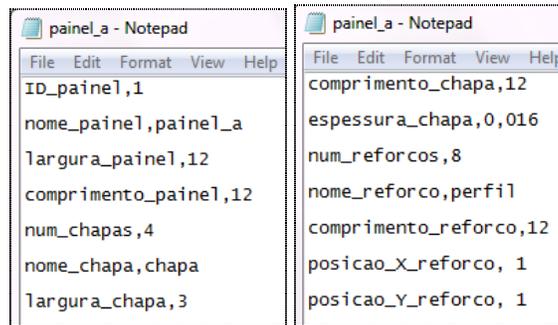


Figura 73: Arquivos com as informações de um tipo de painel.

A figura 74 mostra o arquivo com os dados dos blocos. O bloco do tipo 1 possui ao lado do nome a quantidade de painéis que o compõe, e nas linhas abaixo os painéis são apresentados com o índice representado ao lado do nome do painel (exemplo, painel_a 1, ou painel do tipo A com índice 1). A figura 75 mostra o arquivo com a ordem dos blocos segundo a estratégia por anel e (ao lado) são apresentados os tipos de painéis produzidos pela linha.



Figura 74: Arquivo com os dados dos componentes dos blocos (painéis planos).

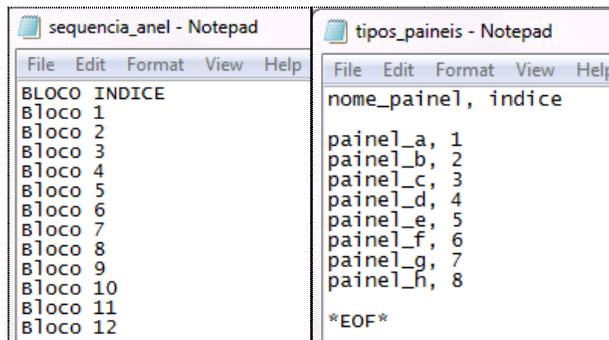


Figura 75: Arquivos com a seqüência de pré-edificação e os tipos de painéis.

Procedimentos foram criados para representar as estações da linha, que possuem necessidades de peças e tempos de processamento diferentes. A lógica de cada estação deve: Solicitar a peça da estação anterior; Calcular o tempo de cada atividade; Aplicar a distribuição estocástica arbitrada; Identificar se o painel a ser produzido será igual ao anteriormente feito; e Liberar a peça para a próxima estação quando essa estiver livre.

4.3.4. Definição dos cenários

Os cenários exemplificam a análise da fabricação de painéis planos de um tipo de embarcação, de acordo com diferentes sequências de produção. Inicialmente foram estabelecidas as ordens de blocos necessárias a cada sequência de edificação, e em seguida foram identificadas as demandas por painéis. O modelo simulou o período de seis meses a partir de 200 experimentos.

As sequências de painéis simuladas atendem as estratégias de edificação de blocos por anel, camada e por pirâmide. Foi avaliada ainda a fabricação de painéis priorizando a produção de grupos semelhantes. As sequências foram comparadas em termos de taxas de utilização das estações da linha e da quantidade de e painéis produzidos em um turnos de 8 e 16 horas de trabalho.

Foi estabelecida uma regra que acrescenta um percentual de tempo, no caso do painel recebido pela estação ser diferente do painel anteriormente processado. O tempo adicional é baseado em uma distribuição triangular (-5, +10%) e é aplicado as operações de preparação dos equipamentos. A verificação da regra foi realizada com ferramentas de rastreamento de eventos e de peças do próprio simulador.

As incertezas representadas nos processos seguiram uma distribuição triangular (-10/+20%), e as falhas foram definidas com ocorrência Exponencial (360 horas) e duração Beta (0,027, 0,04). A figura 76 mostra o comportamento das curvas que correspondem às falhas nas estações de trabalho. As falhas no fornecimento de chapas e perfis também foram representadas, sendo que com distribuições exponenciais para a ocorrência (720 horas) e duração Beta (0,04285, 0,08215), como mostra a figura 77.

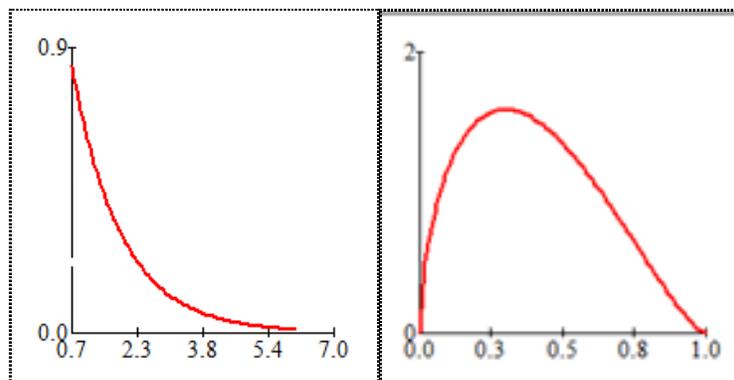


Figura 76: Ocorrência (Exponencial) e duração (Beta) das falhas nos processos.

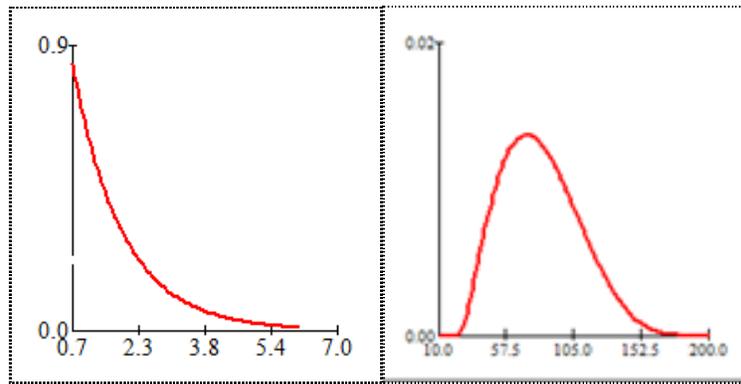


Figura 77: Ocorrência (Exponencial) e duração (Beta) das falhas no fornecimento.

4.3.5. Análise dos resultados e Considerações sobre o modelo

A produção média dos painéis foi comparada com as estatísticas de um estaleiro para a calibragem do modelo. A simulação dos cenários mostrou que o aumento do turno de 8 para 16 horas não aumentou proporcionalmente a produção de alguns painéis em algumas estratégias. As figuras 78, 79, 80,81 e 82 mostram a produção média de painéis de cada tipo (A, B, C, D, E e F) para cada sequência considerada (estratégia por Pirâmide, Grupo, Anel e Camada) e a tabela 10 apresenta os valores obtidos.

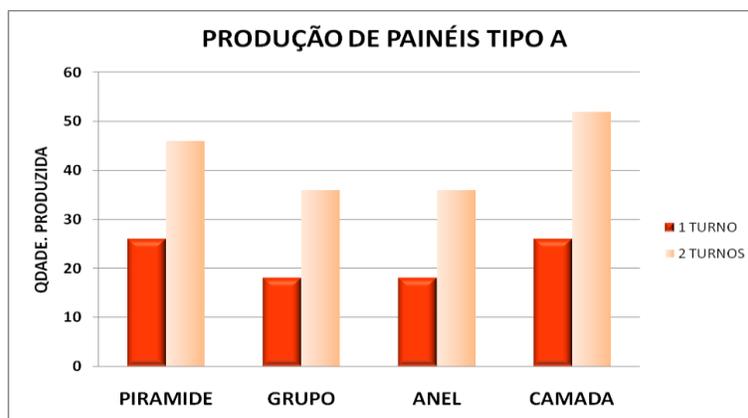


Figura 78: Produção média de painéis do tipo A segundo diferentes estratégias.

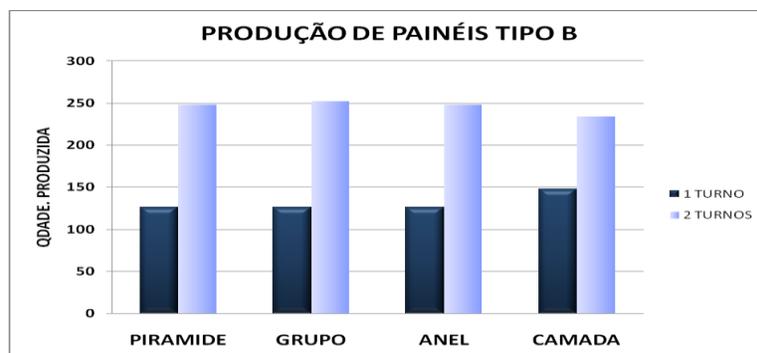


Figura 79: Produção média de painéis do tipo B segundo diferentes estratégias.

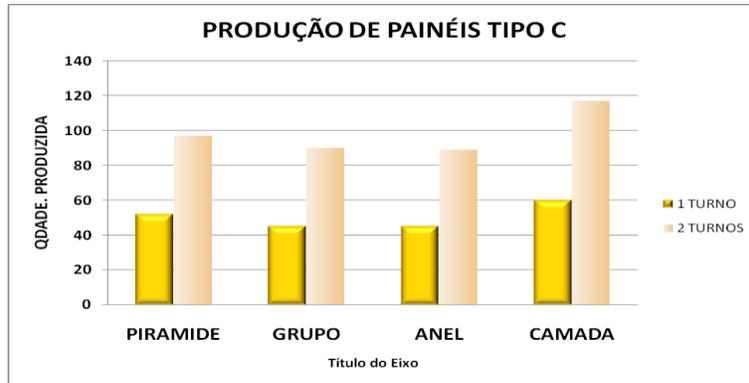


Figura 80: Produção média de painéis do tipo C segundo diferentes estratégias.

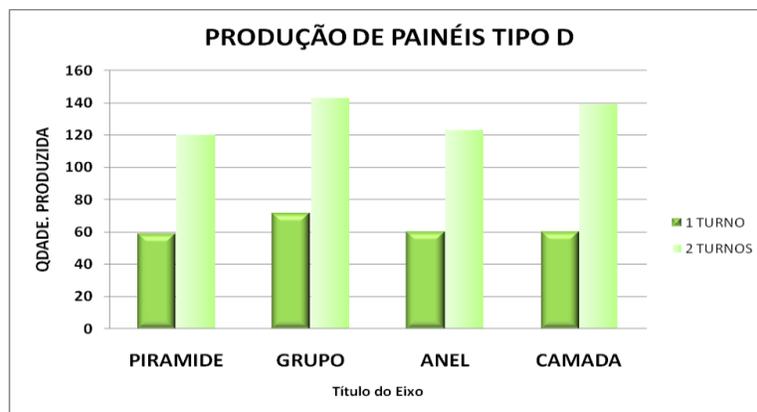


Figura 81: Produção média de painéis do tipo D segundo diferentes estratégias.

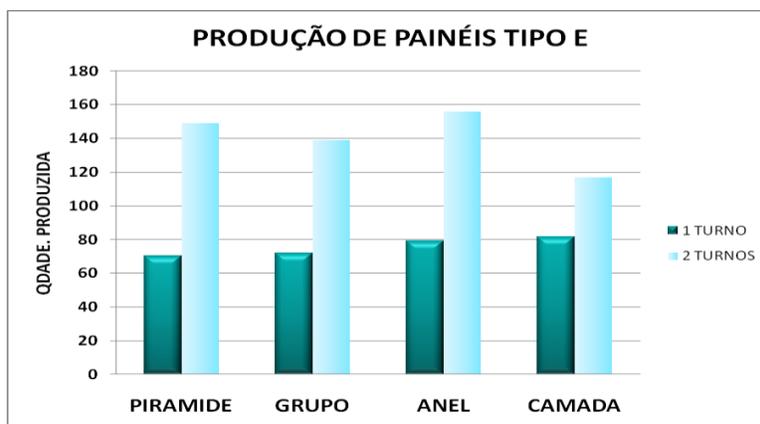


Figura 82: Produção média de painéis do tipo E segundo diferentes estratégias.

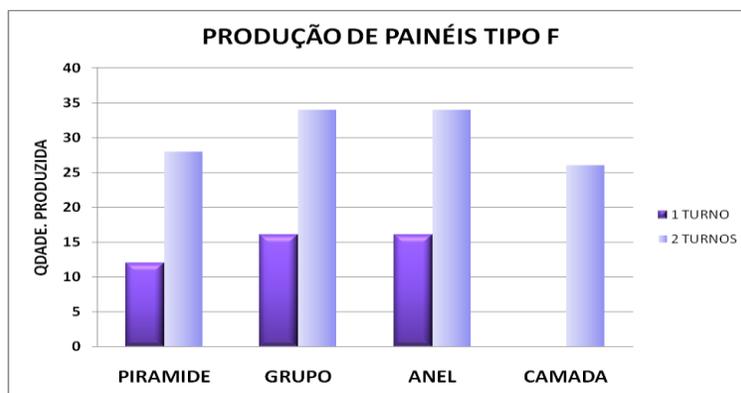


Figura 83: Produção média de painéis do tipo F segundo diferentes estratégias.

Tabela 10: Produção média de painéis para cada sequência simulada.

PIRÂMIDE				GRUPO			
<i>Painel</i>	1 Turno	2 Turnos	<i>Diferença</i>	<i>Painel</i>	1 Turno	2 Turnos	<i>Diferença</i>
A	26	46	20	A	18	36	18
B	126	248	122	B	126	252	126
C	52	97	45	C	45	90	45
D	59	120,1	61,1	D	71,3	143	71,7
E	70,3	149	78,7	E	72	138,9	66,9
F	12	28	16	F	16	34	18
<i>Chapas</i>	840,6	1660,5	819,9	<i>Chapas</i>	867,2	1697,8	830,6
<i>Peris</i>	2315	4597	2282	<i>Peris</i>	2356,2	4699,7	2343,5

CAMADA				ANEL			
<i>Painel</i>	1 Turno	2 Turnos	<i>Diferença</i>	<i>Painel</i>	1 Turno	2 Turnos	<i>Diferença</i>
A	26	52	26	A	18	36	18
B	148	234	86	B	126	247,9	121,9
C	60	117	57	C	44,9	89	44,1
D	60	139,3	79,3	D	60	123	63
E	81,6	117	35,4	E	79,3	155,8	76,5
F	0	26	26	F	16	34	18
<i>Chapas</i>	866,3	1672,5	806,2	<i>Chapas</i>	844,6	1661,3	816,7
<i>Peris</i>	2374,5	4648,7	2274,2	<i>Peris</i>	2316,2	4612,8	2296,6

O aumento do turno de produção de 8 para 16 horas duplicou a quantidade produzida de painéis do tipo A (estratégias por Grupo, Anel e Camada), de painéis do tipo B (estratégia por Grupo), de painéis do tipo C (estratégias por Grupo) e de painéis do tipo D (estratégia por Grupo). Contudo, o aumento foi proporcionalmente menor para estratégia por Pirâmide (produção dos painéis do tipo A, B, e C), para a estratégia por Anel (para os painéis do tipo B, C, e E), e para a estratégia por Camada (para o painel do tipo C).

Quando foi considerado um turno de 8 horas algumas estratégias apresentaram a mesma quantidade média produzida de painéis. As estratégias de fabricação por Grupo e por Anel foram semelhantes para a produção dos painéis do tipo A (26 painéis), C (45 painéis) e F (16 painéis).

A tabela 11 apresenta as utilizações médias das estações da linha, considerando a produção de painéis para atender uma estratégia específica, ou seja, uma determinada demanda de blocos. Essa tabela mostra que a primeira estação, para todas as estratégias, apresentou taxas de utilização baixas, ao contrário da quarta estação que mostrou ser o gargalo.

Tabela 11: Funções de tempos dos principais processos da Linha de Painéis.

<i>Estação</i>	<i>UTILIZAÇÃO (%)</i>			
	<i>PIRÂMIDE</i>	<i>GRUPO</i>	<i>ANEL</i>	<i>CAMADA</i>
1	20,98	21,19	20,97	21,18
2	42,19	37,45	41,59	42,02
3	46,6	46,75	46,67	47
4	94,91	95,16	95	95,63

Os cenários mostram que dependendo do tipo de painel ou do tipo de sequência de produção, as quantidades produzidas podem apresentar variações. Com base nesses dados, o estaleiro pode investigar formas de aprimorar a produção, reduzindo os tempos de fabricação e conseqüentemente, a alimentação dos processos posteriores à linha de painéis.

A vantagem do modelo de simulação da linha de painéis está associada ao fornecimento de informações sobre os impactos de diferentes seqüências de produção, e sobre os indicadores de desempenho do sistema. A verificação de diferentes estratégias de suprimento da linha, e da logística dos painéis (como locais de estocagem, fluxo, etc.), pode contribuir para a redução de custos e eliminação de atividades desnecessárias.

O método de montagem dos painéis, baseado em uma proposta de linha de um fornecedor, por considerar a soldagem dos reforçadores secundários após a soldagem dos reforçadores primários pode gerar deformações. Todavia, os estaleiros que aplicam essa técnica associam-na com atividades de desempenho, como a colocação de blocos de concreto em posições específicas.

4.4. Modelo de Simulação da Montagem e Pré-edificação de blocos

4.4.1. Introdução

O modelo desenvolvido auxilia estaleiros em funcionamento, e estaleiros que pretendem ampliar as áreas de produção ou instalar oficinas. No primeiro caso, a simulação serve como ferramenta adicional às práticas de controle da produção, e melhoria contínua dos processos. A capacidade real do sistema é verificada, auxiliando a validação de cronogramas com custos e prazos de entrega de navios.

No segundo caso, o modelo beneficia as decisões sobre o arranjo físico das áreas, considerando os espaços físicos ocupados por produtos (blocos ou anéis), e por recursos de movimentação (guindastes, pórticos, etc.). Os equipamentos e sistemas de transporte podem ser testados no modelo, além do compartilhamento desses recursos em diferentes processos.

O cenário simulado teve o objetivo de apresentar a simulação como ferramenta de validação da programação agregada da produção de um estaleiro em funcionamento. Nesse sentido, foram modelados os processos e produtos com o mesmo nível de detalhamento do plano de produção estudado.

A lógica desenvolvida realiza procedimentos de consulta de arquivos externos contendo os dados dos blocos, as seqüências de anéis a serem produzidos e as necessidades de cada tipo de anel. Algumas simplificações foram realizadas na modelagem, em função dos cenários estudarem uma situação específica.

Dessa forma, foram considerados blocos padronizados pesando 40,1 toneladas de aço. Para a montagem dos blocos foram fornecidos lotes de aço, que representam um conjunto de elementos que compõem os blocos. Os anéis foram diferenciados pela quantidade de blocos e pelo seu posicionamento na embarcação. A embarcação foi dividida em seções (anéis), e em seguida, essas seções foram ordenadas estabelecendo-se as prioridades de montagem.

4.4.2. Desenvolvimento do modelo

No estudo foi definida a montagem de blocos e de anéis (pré-edificação) de uma embarcação do tipo Suezmax com 270 metros comprimento total, 260 metros entre perpendiculares, 45,5 metros de boca e 24 metros de pontal. A figura a seguir mostra o navio modelado pelo programa DELMIA, e a tabela 11 apresenta a divisão de anéis e blocos. Nessa tabela são informadas as quantidades de blocos de cada anel, o peso médio dos blocos e dos anéis.

Os dados de entrada do modelo se referem às áreas do estaleiro disponíveis; a situação inicial do sistema (estoques, recursos inativos, etc.); os dados dos produtos (dimensões, peso, etc.), dos recursos (velocidades, dimensões, etc.), e dos processos (funções de tempo); as frequências de chegadas de material (entrada dos lotes de aço nas estações de montagem, por exemplo); as ordens de produção e o fluxo de materiais. Posteriormente esses dados podem ser alterados ou substituídos para a realização de análises comparativas.

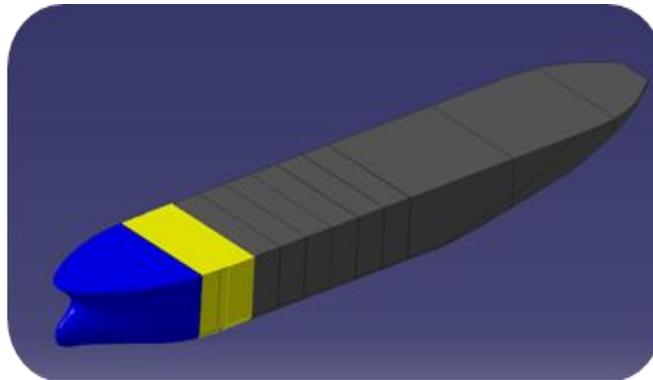


Figura 84: Embarcação modelada em 3D (DELMIA).

Tabela 12: Dados da embarcação simulada.

DADOS SOBRE OS ANÉIS DO NAVIO ESTUDADO			
DIVISÃO		Peso médio [ton]	Peso total [ton]
Anéis	Quantidade de blocos		
1	60	45,0	2700
Avulso (popa)	4	20,0	80
2	94	38,3	3600
3	80	43,8	3500
4	88	39,8	3500
5	62	43,6	2700
6	78	44,2	2450
Avulso (proa)	4	12,5	50
TOTAL CASCO	470	41,7	19580
Superestrutura	18	15,0	270
TOTAL AÇO	488	40,7	19850

Os tempos de movimentação e pintura dos blocos foram adicionados nas funções de tempo do processo de montagem. Essas funções incluíram operações como o acabamento avançado, e inspeções. Além da fonte de lotes de aço, foi criada uma fonte de anéis de super-estrutura, devido ao fato desses anéis serem montados em uma área específica e diferente das áreas de montagem dos outros anéis.

Os blocos foram dimensionados em 144 m²; considerando uma área para estoque das submontagens e circulação. Os espaços disponíveis para a montagem foram dimensionados em 230 m². As entidades contidas no modelo são: Fonte de lotes de aço; Estações de Montagem; Áreas de Pré-edificação; Fonte de anéis de super-estruturas; Área de edificação; e Sink (elemento que elimina peças no sistema). A figura abaixo apresenta o fluxograma das entidades do modelo.

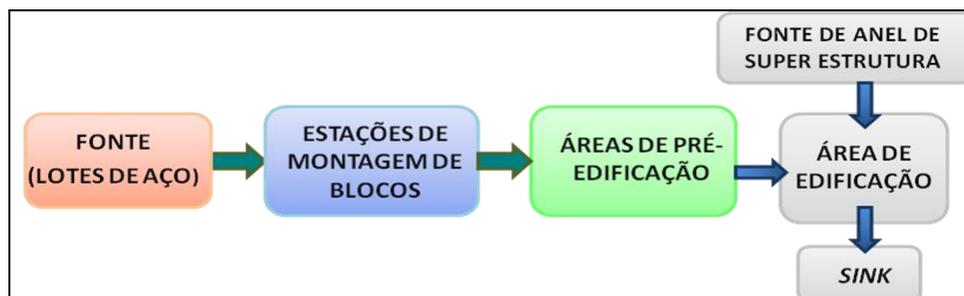


Figura 85: Fluxograma de materiais (Modelo de Montagem e Pré-edificação).

A primeira fonte envia os lotes de aço por conexões diretas para as estações de montagem de blocos. Após serem montados, os blocos são enviados para as áreas de pré-edificação, onde são soldados formando estruturas classificadas como anéis. A produção pode ser considerada “empurrada”, ou seja, as peças são produzidas e enviadas mesmo que não haja solicitação das estações de trabalho posteriores.

A área de edificação foi representada no modelo com o intuito de facilitar a visualização da ordem dos anéis montados, entretanto, os tempos de edificação não foram considerados por não fazer parte do planejamento estudado. A segunda fonte produz anéis de super-estrutura a partir da solicitação de um controlador que indica o momento em que as interfaces entre os seis anéis já estariam soldadas.

A primeira versão do modelo foi criada com o intuito de testar a lógica desenvolvida para ler e gerar arquivos externos (figura 86). Na segunda versão foram representadas as dimensões das áreas de montagem e de pré-edificação. Nessa versão foi utilizado um artifício (através da edição da lógica dos elementos) que diferencia por cores, os blocos posicionados dos blocos que já foram soldados nos anéis



Figura 86: Primeira versão do modelo Montagem, Pré-edificação (QUEST).

A figura 87 apresenta a tela do simulador com a segunda versão do modelo. O simulador disponibiliza em uma mesma tela, diversas vistas que podem ser configuradas dependendo da necessidade do usuário em verificar um determinado processo.

A indicação na figura com o número 1 corresponde aos gráficos dinâmicos de utilização das áreas de montagem dos anéis. Foram definidas seis áreas de pré-ediificação e os gráficos mudam de cor segundo o estado da área (verde para estado ocupado, por exemplo). A segunda indicação (2) mostra a vista geral do modelo.

Na terceira indicação (3) são apresentadas as áreas de pré-ediificação (retângulo laranja), que estão numeradas e possuem contadores que mostram a quantidade de blocos que foram recebidas por cada área. A figura X mostra que na terceira área de pré-ediificação foram recebidos 34 blocos. Na quarta indicação (4) é destacada a vista das estações de montagem (retângulo verde-claro), que recebem lotes de aço (verde-escuro) e após certo tempo os transforma em blocos (cubos brancos).

Na figura 88, o primeiro quadro mostra o processo de pré-ediificação do terceiro anel, o qual já recebeu 65 blocos, já no segundo quadro, o anel aparece montado (cubo azul). No terceiro quadro, o anel foi direcionado para a área de edificação, e o anel 4 já está sendo montado. No quarto quadro a embarcação aparece completa com todos os anéis, inclusive o de super-estrutura.

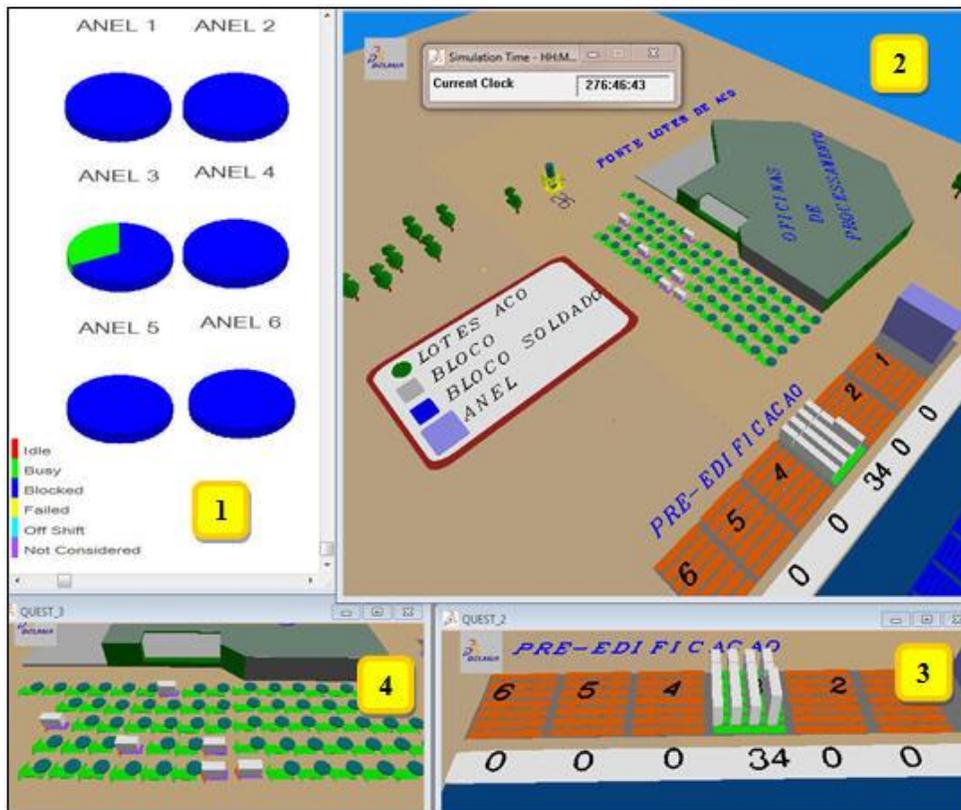


Figura 87: Segunda versão do modelo Montagem, Pré-ediificação (QUEST).

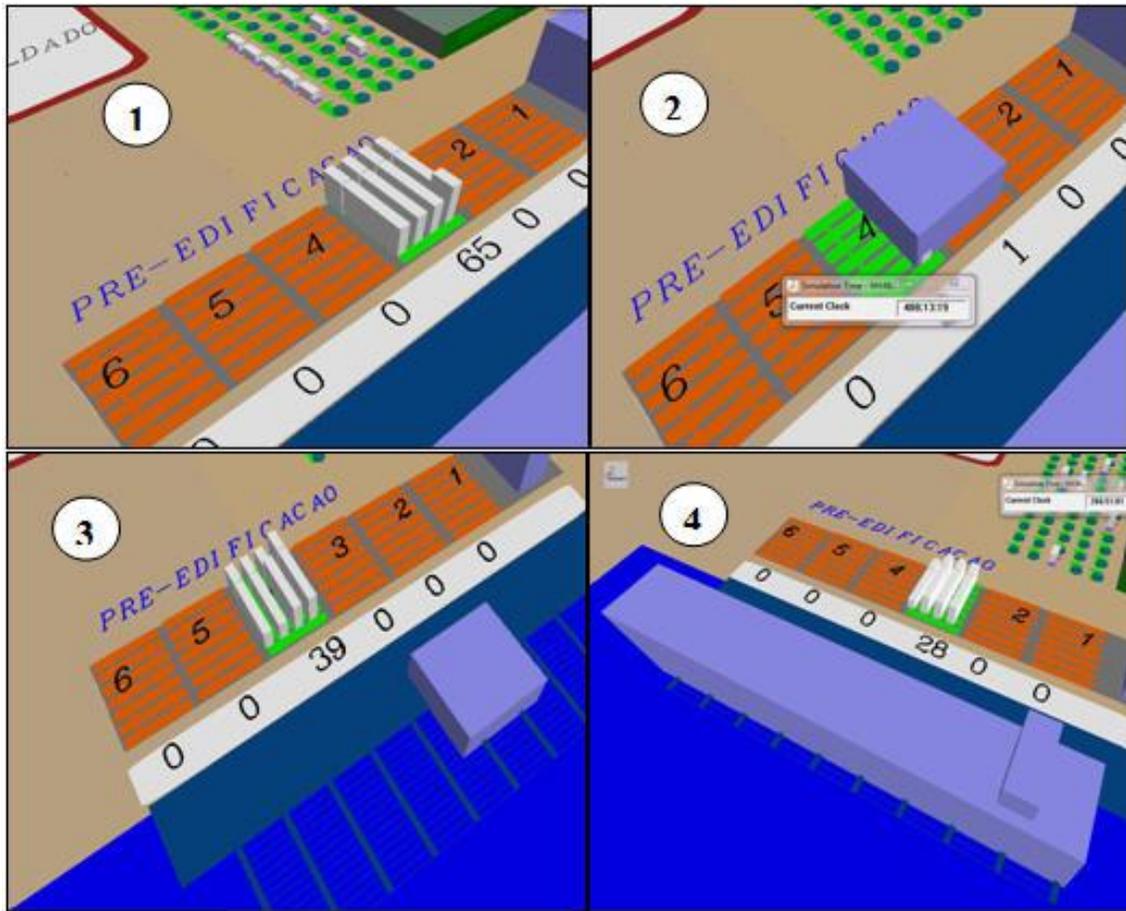


Figura 88: Imagens da Pré-edificação de blocos e construção do casco (QUEST).

4.4.3. Criação de lógicas

Foi desenvolvida uma lógica na linguagem SCL para direcionar os blocos na quantidade certa para as áreas de pré-edificação, priorizando a seqüência de anéis definida. Devido as restrições dos sistemas de movimentação do estaleiro simulado foi definida a produção (e movimentação) de um anel por vez.

A construção das embarcações obedeceu a ordem dos anéis, que foi associada a sua numeração (o anel com o índice ou posicionamento 3 possui prioridade 1 ou é o primeiro da lista de montagem, por exemplo). Para que o último anel do primeiro navio obtivesse prioridade de recebimento de blocos, entre o primeiro anel do segundo navio, foi estabelecido um procedimento que alterna dinamicamente a conexão das estações de montagem com as áreas de pré-edificação de acordo com o índice do navio produzido.

As lógicas das estações de montagem de blocos foram editadas para permitir a geração de arquivos externos no formato desejado facilitando a análise dos resultados. Foram geradas tabelas com os tempos de montagem de blocos de cada navio e o número de blocos montados por mês.

A leitura de dados como: características dos blocos e anéis, seqüência de pré-edificação, funções de tempo dos processos, entre outros foi realizada pela lógica. A figura 89 mostra a tela do simulador, onde foram inseridas informações acessadas durante a simulação.

Na figura pode ser visto as variáveis “processo” com índices ou números ao lado mostrando a ordem de montagem do anel e entre aspas se encontra a indicação do posicionamento do anel ou seção do navio. No caso o anel 1 e 6 são de proa e popa. Na segunda divisão do arquivo podem ser vistas as variáveis “blockn” que correspondem às quantidades de blocos de cada anel.

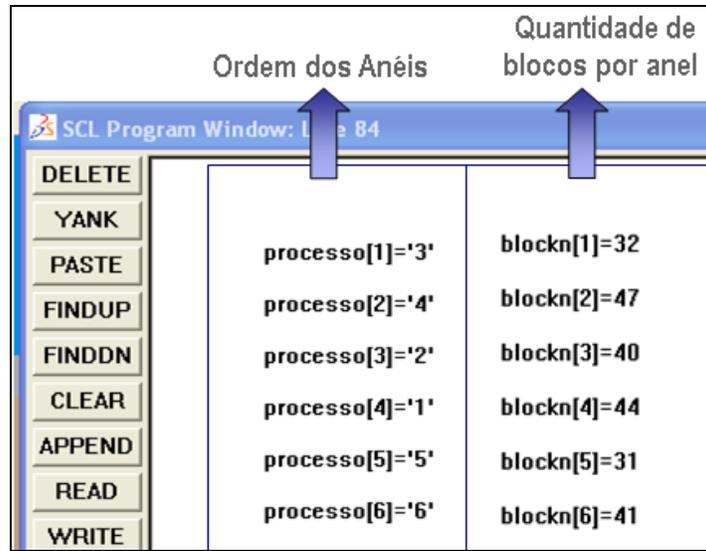


Figura 89: Tela do simulador com lógica de acesso a dados.

4.4.4. Definição dos cenários

Foi simulada a produção de uma série de quatro navios petroleiros. Primeiramente, foi desenvolvido e calibrado um modelo com o intuito de reproduzir a programação geral proposta pelo estaleiro, utilizando os mesmos parâmetros determinísticos estimados.

Em seguida, alternativas foram testadas para a redução das durações dos processos e conseqüentemente da entrega dos navios. Nesse sentido, foi encontrada uma configuração para o sistema, que respeitando as restrições do estaleiro, promoveu ganhos de tempo.

A seqüência de pré-edificação de anéis foi definida como: anel 3, anel 4, anel 2, anel 1, anel 5, anel 6, respectivamente. De acordo com o cronograma do estaleiro simulado, o processamento do aço ou montagem dos blocos de um Suezmax demora em média 6,5 meses (tempo total).

No sistema real os blocos são construídos em galpões e transferidos por pórticos ou guindastes para a área de pintura e posteriormente para a área de pré-edificação. Os tempos referentes à movimentação no modelo foram embutidos nos tempos finais dos processos. A duração do processo de montagem de um bloco inclui além do tempo de soldagem, o tempo de preparação, inspeção, pintura e acabamento avançado.

A taxa da fonte de lotes de aço processado ficou definida como 2,43 horas/ lote ($1/(470 \text{ blocos} / (6,5 \text{ meses} * 176 \text{ horas}))$). Os tempos de montagem de cada bloco foram estimados com média de 176 horas. A pré-edificação de cada bloco foi calculada a partir da média de blocos pré-edificados (78,3 blocos/ mês) e definida como 2,25 horas/ bloco.

A tabela a seguir mostra o cronograma de pré-edificação utilizado como referência do estudo. Nessa tabela são apresentados os meses estudados (primeira coluna), e nas colunas seguintes são indicados os anéis que foram montados em determinado mês, e as quantidades de blocos pré-edificados. Na última coluna é informado o somatório das linhas, que corresponde ao total de blocos pré-edificados em cada mês.

Tabela 13: Cronograma de pré-edificação mensal de blocos.

SISTEMA PRÉ-EDIFICAÇÃO E EDIFICAÇÃO DOS ANÉIS													
ANÉIS	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	
PESO (TON)	2.700	3.600	3.500	3500	2700	3450	BLOCOS / MÊS						TOTAL
Nº BLOCOS	64	94	80	88	62	82							
mês 8			Nav. 1						40			40	
mês 9			Nav. 1	Nav. 1					40	35		75	
mês 10		Nav. 1	TC	Nav. 1				22		53		75	
mês 11	Nav. 1	Nav. 1		TC			25	60				85	
mês 12	Nav. 1	TC			Nav. 1		39	12			25	76	
mês 13	TC				Nav. 1	Nav. 1					37	35	72
mês 14			Nav. 2		TC	Nav. 1			40			47	87
mês 15			Nav. 2	Nav. 2		TC			40	35		75	
mês 16		Nav. 2	TC	Nav. 2				34		53		87	
mês 17	Nav. 2	Nav. 2		TC			25	60				85	
mês 18	Nav. 2	TC			Nav. 2		39				25	64	
mês 19	TC				Nav. 2	Nav. 2					37	35	72
mês 20			Nav. 3		TC	Nav. 2			30			47	77
mês 21			Nav. 3	Nav. 3		TC			40	35		75	
mês 22		Nav. 3	TC	Nav. 3				22	10	53		85	
mês 23	Nav. 3	Nav. 3		TC			25	60				85	
mês 24	Nav. 3	TC			Nav. 3		39	12			25	76	
mês 25	TC				Nav. 3	Nav. 3					37	35	72
mês 26			Nav. 4		TC	Nav. 3			30			47	77
mês 27			Nav. 4	Nav. 4		TC			40	35		75	
mês 28		Nav. 4	TC	Nav. 4				22	10	53		85	
mês 29	Nav. 4	Nav. 4		TC			25	60				85	
mês 30	Nav. 4	TC			Nav. 4		39	12			25	76	
mês 31	TC				Nav. 4	Nav. 4					37	35	72
mês 32					TC	Nav. 4						47	47
mês 33						TC							0

Incertezas relativas ao fornecimento de aço processado e transferência dos anéis foram inseridas. Os riscos de imprevistos relacionados a essas questões foram representados por uma distribuição do tipo Beta (figura 90). Essa distribuição teve como parâmetros valor mínimo igual a zero, valor máximo de um mês, e valor médio de cinco dias. O gráfico da ocorrência das falhas (de fornecimento de matéria prima e quebra de equipamentos) apresentou o formato da curva da distribuição exponencial (figura 91), com valor médio de uma parada por mês.

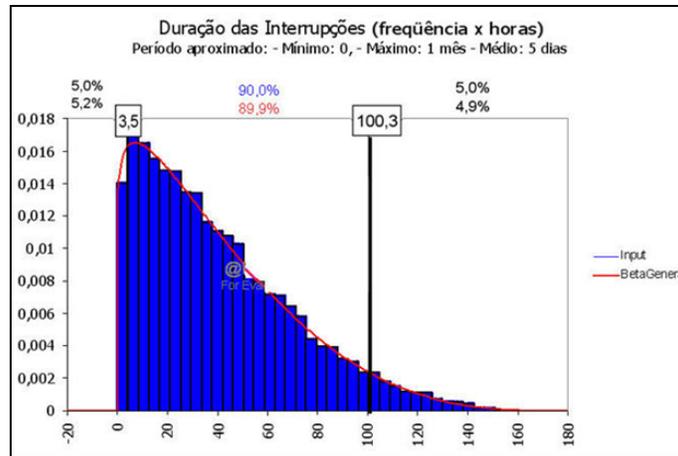


Figura 90: Duração das Falhas no sistema (Frequência X Horas).

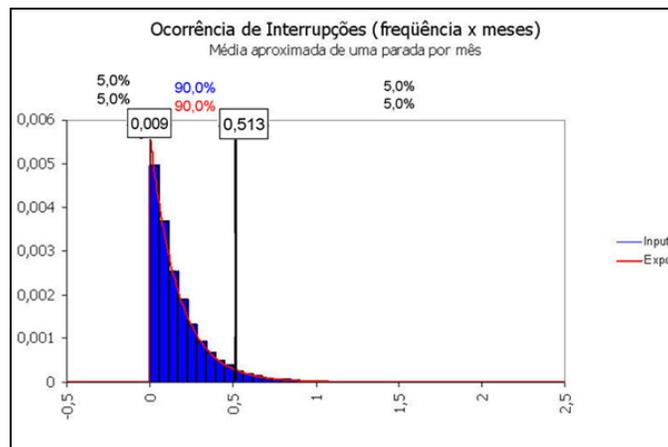


Figura 91: Ocorrência de falhas no sistema (Frequência X Meses).

Os tempos dos processos também apresentaram distribuição estocástica. A montagem de blocos foi representada por uma distribuição do tipo Beta com valor mínimo de 0,9 meses, valor médio de 1,10 meses, e valor máximo de 1,48 meses (figura 92). A pré-edificação de blocos apresentou a distribuição Beta com valor mínimo de 2,2 horas, valor médio de 2,68 horas e valor máximo de 3,67 horas, tempo correspondente ao processo realizado para cada blocos, (figura 93).

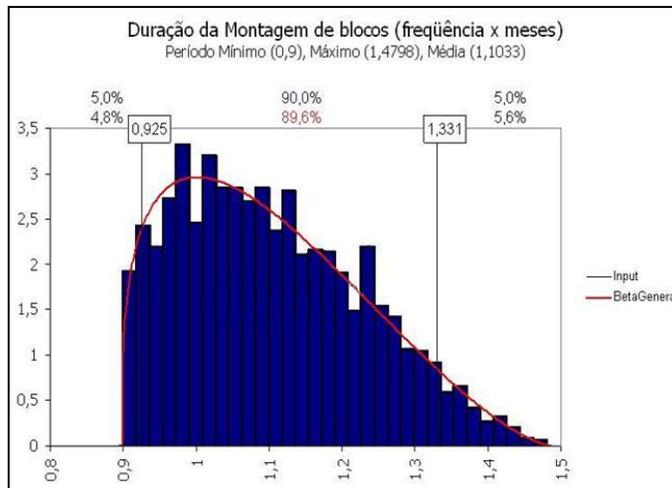


Figura 92: Duração da Montagem de blocos (frequência X meses).

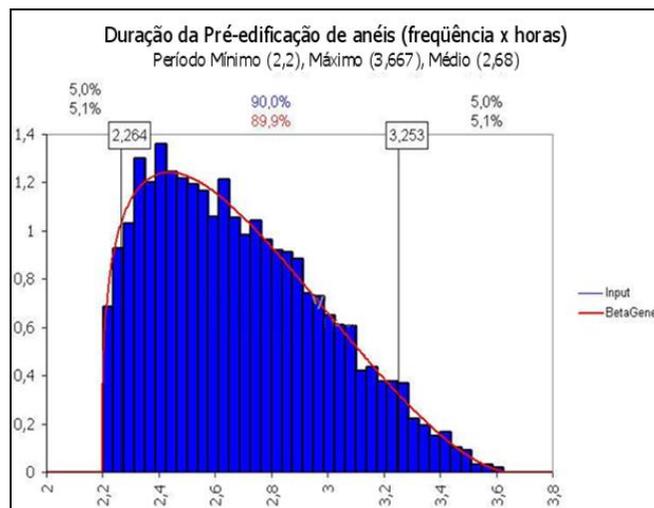


Figura 93: Duração da pré-edificação de anéis (frequência X horas).

4.4.5. Análise dos resultados e Considerações sobre o modelo

O primeiro objetivo da modelo foi a representação do sistema seguindo as informações contidas no cronograma de pré-edificação e nas estimativas de tempo médio (em meses) das montagens de blocos e do processamento do aço. Segundo essas informações, o estaleiro possui 72 áreas de montagem de blocos e eventualmente pode fazer uso de outras áreas.

Outra questão apresentada pelo cronograma foi a montagem de apenas 40 blocos no primeiro mês. Possivelmente esse fato se deve a falta de material (aço processado) devido a atrasos de fornecimento externo ou quebras de equipamentos de movimentação que impediram a utilização de todas as áreas de montagem.

A simulação considerou a utilização das áreas disponíveis. Após a simulação pode ser notado que o uso das 72 estações promoveu um aumento do tempo como pode ser visto na tabela 14. Nessa tabela são apresentadas as quantidades de blocos montados mensalmente conforme o cronograma do estaleiro (parte superior da tabela) e os dados obtidos pela simulação (parte inferior da tabela).

A tabela 15 mostra a quantidade de blocos montada mensalmente. As colunas da tabela correspondem aos meses e as linhas correspondem aos navios da série. As linhas posicionadas acima da tabela representam os dados do estaleiro, e as linhas abaixo representam os dados obtidos com a simulação.

Nas linhas referentes à montagem do estaleiro pode ser notado que para todos os navios foram utilizados cinco meses completos (quadrado verde) e dois períodos de 15 dias (quadrado laranja). Já os dados da simulação mostram o uso de seis meses completos (quadrado azul) e um período de 15 dias (quadrado laranja).

Tabela 16: Cronograma de montagem de blocos (Estaleiro X Modelo com 83 estações)



A figura 94 mostra a tela do simulador com janelas dinâmicas, onde são escritas as estatísticas de cada cenário. Os dados escritos na tela principal durante a simulação são o número de blocos pré-edificados por mês e por anel, os tempos de início e término da montagem e da pré-edificação de blocos de cada navio, entre outros.

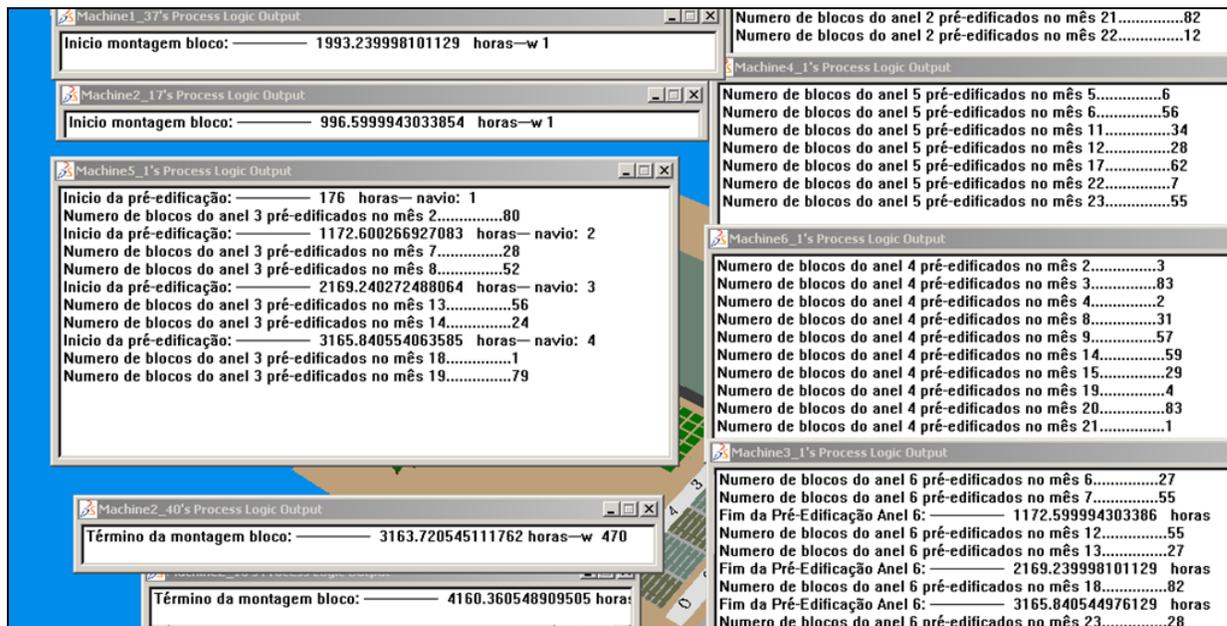


Figura 94: Tela do simulador com estatísticas dinâmicas.

Além da quantidade de estações de montagem foram alteradas as taxas de pré-edificação e de fornecimento dos lotes de aço no intuito de balancear o sistema. As taxas originais foram estimadas em 2,44 horas/ lote de aço (no modelo com 72 estações de montagem). No modelo com 78 e com 83 estações de montagem essa taxa foi recalculada e testada na simulação, para 2,25 e 2,12 horas/ lote de aço, respectivamente.

A simulação da construção da série de petroleiros apresentou um total de 27,63 meses quando simulada deterministicamente. Quando foram inseridos os fatores estocásticos a média de tempo para a mesma atividade foi de 31,68 meses, apresentando uma diferença de 14,66 %. A figura 95 mostra a distribuição do tempo total (em meses) de construção, nos modelos com as distribuições estocásticas.

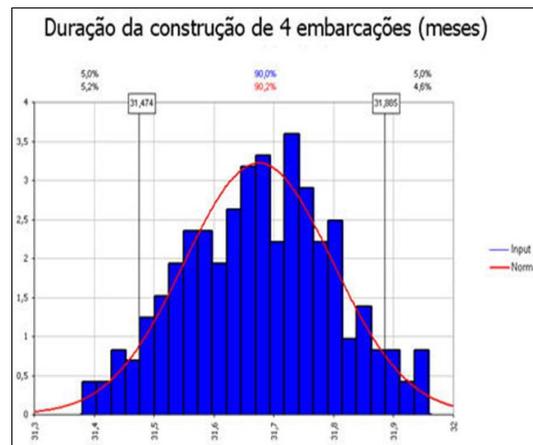


Figura 95: Duração da pré-edificação de anéis (frequência X horas).

Em todos os cenários as taxas de utilização das estações de montagem foram altas mostrando ser a entidade com maior relevância nos resultados da simulação. As áreas de pré-edificação apresentaram taxas de utilização mais baixas. Vale lembrar que o sistema considera restrições de movimentação dos anéis o que limita a capacidade de pré-edificação.

5 Conclusões e Sugestões para trabalhos futuros

A técnica de Simulação de Eventos Discretos apresenta disseminação incipiente na Indústria Naval. Entretanto, diversas questões específicas ao setor podem ser estudadas com essa abordagem. Estaleiros e universidades, atualmente, já estabelecem iniciativas de pesquisa e trabalhos conjuntos, fato que gradativamente contribui para a divulgação do método e incentiva novos usuários.

A Simulação de Processos Industriais oferece suporte à gestão dos estaleiros, no sentido de facilitar o entendimento dos processos e atividades. Essa compreensão permite que sejam identificados os pontos críticos e limitações do sistema real ou ainda, que sejam testadas alternativas para o aprimoramento contínuo. Agregar os benefícios da simulação às ferramentas de gestão permite que o processo de tomada de decisões seja mais efetivo e eficiente.

O planejamento estratégico, apoiado pela simulação, possibilita a análise do ambiente em que o estaleiro está inserido e as conseqüências que as alterações nesse ambiente possam ocasionar na estratégia. Os ajustes no planejamento operacional, devido às mudanças na estratégia de médio e longo prazo também podem ser estudados com a Simulação de Eventos Discretos.

Os processos construtivos navais são considerados complexos e na grande parte dos estaleiros corresponde a atividades manuais, apesar da crescente tendência de automatização. Os produtos possuem uma grande variabilidade, fato que dificulta o controle da produção.

Em mercados cada vez mais competitivos a simulação pode ser uma alternativa importante para a gestão dos estaleiros brasileiros. No setor naval, o uso da simulação como acelerador do processo de aprendizagem e é pouco abordado na literatura técnica, contudo, o tema apresenta grande potencial de desenvolvimento conhecendo-se as dificuldades com a capacitação de mão de obra especializada.

A dissertação buscou abordar os conceitos teóricos da técnica e as aplicações em processos e tipos específicos de estaleiros. É notório que a simulação oferece benefícios para estaleiros em fase de planejamento, e em fase de operação. Os modelos permitem que os gestores investiguem oportunidades de crescimento e desenvolvimento organizacional.

Os estudos de caso exemplificam a utilização de modelos para atender determinados objetivos, de acordo com as características dos processos e dos estaleiros envolvidos. Os modelos foram desenvolvidos com a preocupação de atender diferentes situações e cenários a partir do acesso a arquivos externos.

No estudo do Pátio de aço, a proposta para trabalhos futuros volta-se para a diferenciação de pilhas de chapas segundo “n” variáveis (obra, armador, dimensões, espessura, tipo de aço, etc.), o que permitiria o estudo das restrições de armazenagem na definição do arranjo físico.

No modelo de Linha de Fabricação de Painéis Planos podem ser simulados outros métodos de fabricação, que provoquem menor ocorrência de deformações nos painéis. Outros equipamentos podem ser testados, assim como a eliminação ou adição de operações realizadas por cada estação.

O modelo de simulação da Montagem e Pré-edificação pode ser analisado contendo a diferenciação de blocos, o que permitiria o estudo mais detalhado dos espaços ocupados por esses elementos e das atividades necessárias a movimentação dos mesmos. A inclusão dos sistemas de transporte de peças e produtos pode favorecer a análise das interferências e do compartilhamento desses recursos.

A simulação de processos críticos como a montagem e pré-edificação pode auxiliar o planejamento de processos simultâneos relativos a construções de embarcações diferentes, caso as informações dos produtos sejam inseridas no modelo.

A integração de modelos existentes é uma questão que merece ser analisada, pois facilita a análise global produção, e as atividades de balanceamento dos ritmos produtivos. O simulador QUEST, escolhido para o desenvolvimento dos estudos de caso, possui ferramentas que automatizam o processo de integração de modelos, todavia, ainda são necessários testes para se definir a melhor forma de integrá-los.

Referências Bibliográficas

[1] SHANNON, E. R. *Introduction to simulation*. Proceedings of Winter Simulation Conference, 1992.

[2] BANKS, J. *Introduction to Simulation*. In: Proceedings of the Simulation Conference, pp. 7-13, 1999.

[3] SHANNON, R. E. *Introduction to the art and science of simulation*. In: Proceedings of the Winter simulation conference, pp. 7–14, 1998.

[4] KIBIRA, D.; C. MCLEAN. *Virtual reality simulation of mechanical assembly production line*. Proceedings of Winter Simulation Conference, 2002.

[5] BARNARD, C. J.; VAN HAAFTEN, D. H. *Simulation Model for Shipment of Waste to the Waste Isolation Pilot Plant*. In: Proceedings of the Winter Simulation Conference, pp. 1101-1106. 2000.

[6] STANDRIDGE, C. R.; HELTNE, D. R. *An MSE-Based Simulation Capability for Strategic and Tactical Logistics*. In: Proceedings of the Winter Simulation Conference, pp. 1107-1113, 2000.

[7] PARSONS, D. J.; SIPRELLE, A. J. *A Supply Chain Case Study of a Food Manufacturing*. In: Proceedings of the Winter Simulation Conference, pp. 1090-1094, 2000.

[8] HUGAN, J.C. *Using Simulation to Evaluate Site Traffic at an Automobile Truck Plant*. In: Proceedings of the Winter Simulation Conference, pp. 1013-1016, 2001.

[9] FRANZESE, O.; JOSHI, S. *Traffic Simulation Application to Plan Real-Time Distribution Routes*. In: Proceedings of the Winter Simulation Conference, pp. 1214-1218, 2002.

[10] XU, J. et al. *Dynamic Freight Traffic Simulation Providing Real-Time Information*. In: Proceedings of the Winter Simulation Conference, pp. 1711-1719, 2003.

[11] GIACAMAN, G. J. et al. *Simulation of the Material Transporting and Loading Process in Pedro de Valdivia Mine*. In: Proceedings of the Winter Simulation Conference, pp.1349-1355, 2002.

[12] JOUSTRA, P.E.; VAN DIJK, N.M. *Simulation of Check-In at Airports*. In: Proceedings of the Winter Simulation Conference, pp.1023-1028, 2001.

[13] BOESEL, J.; BODOH., D. *Simulating Airspace Redesign for Arrivals to Detroit-Wayne County Airport (DTW)*. In: Proceedings of the Winter Simulation Conference, pp.1318-1325, 2004.

[14] BAZARGAN, M. et al. *A Simulation to Investigate Runway Capacity Using TAAM*. In: Proceedings of the Winter Simulation Conference, pp. 1235-1243, 2002.

[15] KIRAN, A. S. et al. *Simulation Modeling and Analysis of New International Terminal*. In: Proceedings of the Winter Simulation Conference, pp.1168-1172, 2000.

[16] MERRICK, J. R. W. et al. *Modeling Risk in the Dynamic Environment of Maritime Transportation*. In: Proceedings of the Winter Simulation Conference, pp.1090-1098, 2001.

[17] VAN ASPEREN, E. et al. *Modeling Ship Arrivals in Ports*. In: Proceedings of the Winter Simulation Conference, pp. 1737-1744, 2003.

[18] BAXI POTTERTON. Endereço BBS:
[http://www.appliedplm.com/pdfs/quest_factory_simulation - baxi_potterton.pdf](http://www.appliedplm.com/pdfs/quest_factory_simulation_-_baxi_potterton.pdf), login:
new. Acesso em: 22 de junho de 2009 às 19:00 hs.

[19] KUO, S. S. et al. *Modeling Continuous Flow with Discrete-Event Simulation*. In: Proceedings of the Winter Simulation Conference, pp. 1099-1103, 2001.

[20] DASSAULT SYSTEMS. Endereço BBS: <http://www.3ds.com/> login: new. Acesso em: 03 de abril de 2009 às 7:30 hs.

[21] CARSON, J. S. *Introduction to simulation: Introduction to modeling and simulation*. In: Proceedings of the Winter Simulation Conference, pp. 7–13, 2003.

[22] CHWIF, L.; MEDINA, A.C. *Modelagem e simulação de eventos discretos: teoria e aplicações*. 1. ed. São Paulo: Ed. dos Autores, 2006.

[23] FUJIMOTO, R. *Parallel discrete event simulation*. Communications of the ACM, Vol. 33, pp.30– 53, 2003.

[24] FUJIMOTO, R.M. *Parallel and distributed simulation*. In: Proceedings of the Winter Simulation Conference, pp. 122–131, 1995.

[25] PERUMALLA, K. S. *Parallel and Distributed Simulation: Traditional Techniques and Recent Advances*. In: Proceedings of the Winter Simulation Conference, 2006.

[26] BANKS, J.; CARSON, J. S.; NELSON, B. L. *Discrete-event System Simulation*. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 2 ed., 1996.

[27] WILLIAM, E. J.; LEVASSEUR, G. A. 1. *A Tutorial on Statistical Analyses in Applied Manufacturing Simulation*. In: Proceedings of the Simulators International XV, pp. 41–47, 1998.

[28] BANKS, J. *Simulation in the future*. In: Proceedings of the Winter Simulation Conference, pp. 1568–1576, 2000.

[29] BALCI, O. *Verification, Validation, and Certification of Modeling and Simulation Applications*. In: Winter Simulation Conference, pp. 150-158, 2003.

[30] ROBINSON S. *Discrete-Event Simulation: From the Pioneers to the Present, What Next?* Journal of the Operational Research Society, 2005.

[31] NANCE, R. E. *A History of Discrete Event Simulation Programming Languages*. In: Proceedings of the Second ACM SIGPLAN History of Programming Languages Conference, pp. 149-175, 1993.

[32] BANKS, J. *Software for Simulation*. In: Proceedings of the Winter Simulation Conference, pp. 31-38, 1996.

[33] NIKOUKARAN, J. *et al.* *A Hierarchical Framework for Evaluating Simulation Software*. In: Journal of Simulation Practice and Theory (SIMPRA), pp. 219-232, 1999.

[34] OR/MS Today, *Simulation Software Survey*, Lionheart Publishing Inc. Outubro de 2009.

[35] ROCKWELL SOFTWARE INC. Endereço BBS: <http://www.arenasimulation.com>, login: new. Acesso em: 15 de agosto de 2009 às 20:00 hs.

[36] PRADO, D. *Usando o Arena em Simulação*. 2. ed. Belo Horizonte: INDG, 2004.

[37] PROMODEL CORPORATION. Endereço BBS: <http://www.promodel.com/>, login: new. Acesso em: 20 de agosto de 2009 às 07:25 hs.

[38] MANUAL PROMODEL 7. - *User's Guide*. ProModel Corporation. USA, 2006.

[39] SIEMENS PRODUCT LYFECYCLE MANAGEMENT SOFTWARE INC. Endereço BBS: http://www.plm.automation.siemens.com/en_us/products/tecnomatix/, login: new. Acesso em: 20 de agosto de 2009 às 7:30 hs.

[40] HEINICKE, M. U; HICKMAN A. *Eliminate Bottlenecks with Integrated Analysis Tools in eM-Plant*. Proceedings of the Winter Simulation Conference, 2000.

[41] BAIR, F. *et., al.* *Modelling, Simulation and Optimization of a Shipbuilding Workshop*. COMPIT -Conference on Computer Applications and Information, Technology in the Maritime Industries, Hamburg, 2005.

[42] MEDEIROS D. M. *et. al.* *Simulation Based Design for a Shipyard Manufacturing Process*. Proceedings of the Winter Simulation Conference, 2000.

[43] FLEXSIM SOFTWARE PRODUCTS, INC. Endereço BBS: <http://www.flexsim.com/>, login: new. Acesso em: 30 de novembro de 2009 às 17:45 hs.

[44] DELMIA CORPORATION. Endereço BBS C:\deneb\quest\docs\quest_HOME\HOMEPAGE.html, login: new. Acesso em: 20 de novembro de 2008 às 18:45 hs.

[45] KRAUSE, M. *et. al.* *Discrete Event Simulation: An Efficient Tool to Assist Shipyard Investment and Production Planning*, Journal of Ship Production, vol. 20, no. 3, 2004.

[46] SHIN, J. G. *et. al.* *A Modeling and Simulation of Production Process in Subassembly Lines at a Shipyard*. Journal of Ship Production, vol. 20, no. 2, 2004.

[47] KASEMAKER, J. A. J.; NIENHUIS. *Simulation of a Maritime Pre-Fabrication Process*. Conference on Computer Applications and Information, Technology in the Maritime Industries, Hamburg, 2006.

[48] WILLIAMS, D. *et. al.* *Discrete for a Proposed shipyard steel Processing Facility*. Proceedings of the Winter Simulation Conference, 2001.

[49] SHIN J.G. *et. al.* *Object-Oriented Development of an Integrated System for Manufacturing Information of Roll Bending Process*, In: Journal of Ship Production, vol. 18, no. 23, 2002.

[50] STEINHAEUER, D.; KONIG M. *Simulation Aided Production Planning in Block Assembly*, COMPIT -Conference on Computer Applications and Information, Technology in the Maritime Industries, 2006.

[51] SIMCOMAR. Endereço BBS: <http://www.simcomar.com/> login: new. Acesso em: 03 de abril de 2009 às 7:45 hs.

[51] FLENSBURGUER SCHIFFBAU GESELLSCHAFT MBH CO. KG. Endereço BBS: <http://www.fsg-ship.de/> login: new. Acesso em: 03 de abril de 2009 às 7:45 hs.

[52] MEYER WERFT. Endereço BBS: <http://www.meyerwerft.com/> login: new. Acesso em: 03 de abril de 2009 às 7:45 hs.

[53] PIRES Jr., F.C.M. *An assessment of the Brazilian shipbuilding industry competitive potential*. Journal of Ship Production, 15 (2); 114-125, 1999.

[54] GEIPOT. *Governmental policy and merchant marine competitiveness*. Report from Brazilian Ministry of Transport. (In Portuguese), 1999.

[55] ESTALEIRO ATLANTICO SUL. Endereço BBS: www.estaleiroatlanticosul.com.br/ login: new. Acesso em: 05 de outubro de 2009 às 7:45 hs.

[56] ESTALEIRO MAUÁ. Endereço BBS: <http://www.estaleiromaua.ind.br/> login: new. Acesso em: 05 de outubro de 2009 às 12:45 hs.

[57] SAMSUNG HEAVY INDUSTRY. Endereço BBS: http://www.shi.samsung.co.kr/Eng/etc/p_cyber.aspx/ login: new. Acesso em: 06 de outubro de 2009 às 12:20 hs.

[58] TAGGART, R. *Ship Design and Construction*, SNAME, 1980.

[59] WHEELABRATORGROUP. Endereço BBS: http://www.wheelabratorgroup.com/uploads/documents/Shipyards_ENG_lowRes_A4.pdf login: new. Acesso em: 06 de outubro de 2009 às 12:50 hs.

[60] PARK C. *et., al. Steel stock management on the stockyard operations in shipbuilding: a case of Hyundai heavy Industries*. Production Planning & Control, Volume 17, Issue 1 January 2006.

- [61] TTS GROUP LTDA. Endereço BBS:
http://www.ttsgroup.com/PageFiles/769/TTS_HS_Panel_Line_A4.pdf?epslanguage=en
login: new. Acesso em: 06 de outubro de 2009 às 18:50 hs.
- [62] GREENWOOD A. G.; HILL T. W. *Simulation Optimization Decision Support System For Ship Panel Shop Operations*. Proceedings of the Winter Simulation Conference, 2005.
- [63] LAMB, T. *Group Technology in Shipbuilding*. Journal of Ship Production, 1988.
- [64] SOUZA, C. M. *et. al. et.,.* 22º Congresso, Sociedade Brasileira de Engenharia Naval, Rio de Janeiro, 2008.
- [65] OKUMOTO Y.; HIYOKU K. *Digital Manufacturing of Pipe Unit Assembly*. Journal of Ship Production, Vol.21, No.3, 141-145, 2005.
- [66] STORCH, R. L. *et. al. Ship Production*. Centreville, Maryland: Cornell Maritime Press, 1995.
- [67] KIM, H., LEE, J.K.; JANG, D.S. *Applying digital manufacturing technology to ship production and maritime environment*. Integ. Manuf. Syst., 2002.
- [68] ESAB LTDA. Endereço BBS: <http://www.esab.com.br/> login: new. Acesso em: 06 de outubro de 2009 às 19:10 hs.
- [69] KEL LTDA. Endereço BBS: <http://www.kel.com.br/index.php?pg2=empresa/> login: new. Acesso em: 06 de outubro de 2009 às 20:15 hs.
- [70] SCHEUERLE INC. Endereço BBS: <http://www.scheuerle.com/> login: new. Acesso em: 06 de outubro de 2009 às 21:15 hs.