

PLANEJAMENTO E PROGRAMAÇÃO AVANÇADA EM ESTALEIROS DE CONSTRUÇÃO NAVAL

S. E. G. de Melo

Departamento de Engenharia Mecânica
Universidade Federal de Pernambuco, Brasil
segmelo@gmail.com

R. Y. Qassim

Programa de Engenharia Oceânica/COPPE
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil
qassim@peno.coppe.ufrj.br

RESUMO - A Competitividade na construção naval depende, entre outros aspectos, da adoção de tecnologia da informação na gestão de suas operações. Apesar de modelos de ERP (Enterprise Resource Planning) e softwares comerciais estarem sendo largamente utilizados em estaleiros, não existem muitos trabalhos relatando modelos APS (Advanced Planning and Scheduling) e softwares específicos para o ambiente de construção naval. Neste trabalho, foi desenvolvido um modelo com base em programação matemática para a integração entre o planejamento de processos e a programação da produção da produção de submontagens na construção naval. O desempenho computacional do modelo foi avaliado, empregando dois exemplos práticos, demonstrando uma vantagem distinta em comparação com a abordagem pelo qual processo de planejamento e programação da produção é executado em sequência. O modelo apresentado neste trabalho tem por objetivo interagir com sistemas ERP, que estejam sendo usados como apoio de decisão em estaleiros.

1 Introdução

Na Construção Naval, existe uma variedade extensa e complexa de produtos que podem ser fabricados, tais como: petroleiros, plataformas de petróleo, embarcações de apoio, barcaças e embarcações de recreio.

Em geral, a fabricação destes sistemas flutuantes consiste de duas grandes operações: A construção da estrutura flutuante e a montagem de equipamentos (motores, compressores) acessórios.

Os processos fundamentais subjacentes à produção de navio incluem a fabricação e montagem de componentes. A produção do navio possui as características de trabalhos em oficinas, linhas de produção e de projetos. A construção naval é um dos principais tipos de construção recorrente (Schmitt e Faaland, 2001).

Por sua complexidade, O planejamento e a programação da produção na construção naval, são melhor visualizados e gerenciados como uma hierarquia de vários níveis, que começa no nível superior de gerenciamento onde as datas de entrega e caminhos críticos do projeto global da construção naval são especificados e determinados, e termina no nível da oficina onde limitações de recursos, particularmente laborais e espaciais, devem ser tomadas em conta, com vista aos prazos de um grande número de subconjuntos, módulos (assemblies) e blocos. Alguma destas características foram abordados nos trabalhos de (Jinsong, Xiaofeng e Ye, 2009), (Prasad et al, 2003), (Roh e Lee, 2010), (Bay et al, 2010), (Lee et al, 1997), (Finke et al, 2007), (Wen et al, 2010) e (Cho et al, 1999).

Com a intensificação da concorrência no negócio de construção naval em todo o mundo, tornou-se necessário introduzir melhorias em duas frentes interdependentes: tecnologia e operações de gerenciamento de processos. Dos principais exemplos da primeira são robôs de solda, enquanto a fabricação integrada ao processo de planejamento e programação da produção fornece um importante caso deste último.

Um projeto de construção naval típico compreende várias funções interdependentes (gerenciamento de operações, relacionamento com o cliente,

gerenciamento da cadeia de fornecimento e marketing), cada uma delas consiste em centenas de atividades inter-relacionadas.

Para manipular e usar adequadamente a quantidade enorme de dados associados, a informática hoje em dia é empregada extensivamente em estaleiros; (Kim et al, 2002) e (Aoyama e Nomoto, 1997).

Especificamente, modelos de ERP (enterprise resource planning) para construção naval têm sido desenvolvidos (Sharma e Sha, 2005a) e (Sharma e Sha, 2005b); no entanto, não existe trabalho que aborde o desenvolvimento de um modelo de planejamento e programação avançado (APS) projetado especificamente para a construção naval, como é o caso com outras indústrias. Uma revisão do estado da arte da APS pode ser encontrada na referência (Hvolby e Steger-Jensen, 2010).

Este trabalho pretende apresentar um passo nesse sentido; ou seja, desenvolver um modelo APS, que é computacionalmente implementado como um software de apoio à decisão em gerenciamento de operações de construção naval.

Em vista do fato de que a fabricação de blocos é o cerne da construção naval, o mesmo serve como foco do modelo APS que será apresentado.

O trabalho está organizado da seguinte forma. Após a seção Introdução, é desenvolvido um modelo matemático para processo integrado de planejamento e produção da programação (PIPP) de montagens e submontagens de construção naval, na seção 2. Na seção 3, é feita uma descrição da aplicação computacional do modelo integrado e sua interface com um software de ERP comercial (Enterprise Resource Planning) que pode ser empregado em estaleiros no Brasil. Conclusões são feitas na seção 4.

2 Modelo Matemático PIPP

A fabricação de submontagens, em geral, e a de navios em particular, consiste de duas tarefas principais: O planejamento do processo de fabricação e a programação da produção.

O objetivo da tarefa de planejamento do processo de montagem é a determinação da sequência de operações individuais que são efetuados com a matéria-prima, principalmente aço, para produzir a montagem final, de forma a satisfazer as especificações do projeto de engenharia.

Normalmente, para uma determinada submontagem (assembly) existe uma multiplicidade de planos de processo. A seleção é normalmente feita através da otimização restrita; (Wang et al, 2009).

O objetivo da tarefa de programação da produção de fabricação e montagem é a determinação da alocação de recursos ideais para operações durante um horizonte de tempo planejado, com vistas a minimizar uma função, como custo e o tempo total de fabricação (makespan).

Como com o processo de planejamento, a programação da produção é realizada em um quadro de otimização restrita; (Chung et al, 2010).

O planejamento do processo de fabricação e montagem e a programação da produção, podem na prática serem feitas de forma sequencial ou simultânea. O processo sequencial consiste em duas etapas: O plano de processo é otimizado numa primeira etapa, e o plano de processo ideal assim determinado, é em seguida empregado como entrada na segunda etapa, a fim de otimizar a programação da produção. No processo simultâneo, ambos, plano de processo e programação da produção são otimizados juntos em uma única etapa. De um ponto de vista matemático, a abordagem simultânea é superior, pois inclui no seu espaço de solução do problema de otimização como um subespaço, o espaço de solução do problema de otimização sequencial.

Por outro lado, o problema de otimização simultânea contém mais restrições do que o problema de otimização sequencial, sendo mais difícil de resolver, (Li et al, 2010).

Nas seções a seguir, serão apresentados um modelo de otimização para cada um dos dois problemas; ou seja, sequencial e simultâneo, para o processo de planejamento e programação da produção de fabricação e montagem aplicáveis ao caso de submontagens de construção naval.

Em cada par de modelos, uma atividade de submontagem é considerada como um projeto que consiste em um conjunto de atividades que possuem relações de precedência e que consomem recursos, como trabalho, materiais e área espacial. Além disso, cada projeto, tem uma data de entrega associada. Em ambos os modelos de otimização sequenciais e simultâneos, é desejado minimizar o prazo de conclusão total (makespan).

Uma comparação dos resultados obtidos a partir dos modelos é efetuado através de dois exemplos numéricos de fabricação de uma submontagem de construção naval. Uma lista das notações usadas, pode ser encontrada no apêndice 1.

2.1 Modelo de Otimização Sequencial

O modelo sequencial de planejamento do processo e programação da produção é apresentado a seguir.

$$\text{Minimize } \sum_{\tau=1}^T \tau M_{b,\tau} \quad (1)$$

Sujeito à:

$$\sum_{b=1}^B (H_{e,b} * Y_{b,t}) \leq K_{e,t}, \forall e \in E; \forall t \in T \quad (2)$$

$$\text{IF } (M_{b,t} = 1) \text{ THEN } \left(\sum_{\tau=t-TP_b}^t Y_{b,\tau} = TP_b \right), \quad \forall b \in B; \forall t \in T \quad (3)$$

$$\sum_{b=1}^B (I_b * M_{b,t}) + \sum_{b=1}^B \sum_{f=1}^F S_f * G_{b,f} \leq L, \forall t \in T \quad (4)$$

$$\sum_{t=1}^T t * M_{b,t} \leq DD_b, \quad \forall b \in B \quad (5)$$

$$\text{IF } (M_{b,t} = 1) \text{ THEN } (t * M_{b,t} \geq TP_b), \quad \forall b \in B, \forall t \in T \quad (6)$$

$$\sum_{\tau=LST_b}^{LFT_b} M_{b,\tau} = 1, \quad \forall b \in B \quad (7)$$

$$\sum_{\tau=1}^T \tau * M_{b,t} \geq EFT_b, \quad \forall b \in B \quad (8)$$

$$M_{b,t}, Y_{b,t} \in \{0,1\}, \forall b \in B, \quad \forall t \in T \quad (9)$$

A função objetivo (1) minimiza o tempo total de fabricação de todas as submontagens. A restrição (2) verifica se haverá recursos para a fabricação de cada submontagem em cada período de tempo. A restrição (3) garante que se uma submontagem termina num determinado instante de tempo t , a fabricação é iniciada com a duração do tempo de processo do plano de processo utilizado. A restrição (4) verifica se haverá área na oficina, para as peças e para a cada submontagem durante sua fabricação. A restrição (5) garante que a fabricação acontecerá respeitando os prazos limites para cada submontagem. A restrição (6) garante que a fabricação respeitará o tempo de processo. A restrição (7) garante que uma submontagem será finalizada. A restrição (8) assegura que a finalização da fabricação não ocorra num tempo menor que o EFT (earliest finish time) desta submontagem. A restrição (9) garante a binariedade das variáveis.

2.2 Modelo de Otimização Simultânea

O modelo simultâneo de planejamento do processo e programação da produção é apresentado a seguir.

$$\text{Minimise } \sum_{b=1}^B \sum_{d=1}^D \sum_{\substack{t \\ \tau=EFT_b \\ \tau=LFT_b}} \tau * J_{b,d} * M_{b,d,\tau} \quad (10)$$

Sujeito a

$$\sum_{d=1}^D \sum_{b=1}^B (H_{e,b} * J_{b,d} * Y_{b,d,t}) \leq K_{e,t}, \quad \forall e \in E, \quad \forall t \in T \quad (11)$$

$$IF (M_{b,d,t} = 1) THEN Y_{b,d,\tau} = 1 \mid (t - TP_{b,d}) \leq \tau \leq t, ELSE Y_{b,d,\tau} = 0, \\ \forall b \in B, \forall d \in D, \forall t \in T \quad (12)$$

$$\sum_{b=1}^B (I_b * J_{b,d} * M_{b,d,t}) + \sum_{b=1}^B \sum_{f=1}^F S_f G_{bf} \leq L, \quad \forall d \in D, \forall t \in T \quad (13)$$

$$\sum_{\tau=1}^T t * J_{b,d} * M_{b,d,\tau} \leq DD_b, \quad \forall d \in D, \forall b \in B \quad (14)$$

$$IF (M_{b,d,t} = 1) THEN (t * J_{b,d} * M_{b,d,t} \geq TP_{b,d}), \forall b \in B, \forall d \in D, \forall t \in T \quad (15)$$

$$\sum_{d=1}^D \sum_{\tau=LST_b}^{LFT_b} M_{b,d,\tau} = 1, \quad \forall b \in B \quad (16)$$

$$\sum_{d=1}^D \sum_{\tau=1}^T t * J_{b,d} * M_{b,d,\tau} \geq EFT_b, \quad \forall b \in B \quad (17)$$

$$M_{b,d,t}, Y_{b,d,t} \in \{0,1\}, \quad \forall b \in B, \forall d \in D, \forall t \in T \quad (18)$$

A função objetivo (10) e as restrições (11)-(18), significam o mesmo que na função objetivo (1) e as restrições (2)-(8), respectivamente, do modelo sequencial. A única diferença é que neste caso, ao contrário do anterior, existe uma multiplicidade de planos de processo para uma submontagem, ao passo que no caso anterior, o plano de processo é definido a priori para cada submontagem. Na verdade, se no modelo simultâneo, o plano de processo for definido a priori, este se reduz no modelo sequencial. Os tempos de horas de início e término das submontagens são calculados, conforme mostrado no apêndice 2.

3 Implementação Computacional PIPP

O modelo matemático PIPP, apresentado na seção anterior, foi implementado computacionalmente empregando o software de otimização comercial LINGO (linguagem, 2008). Dois exemplos práticos de submontagens em ambientes de produção são formulados e resolvidos, a fim de comparar as abordagens sequencial e simultânea para o planejamento de processo e programação da produção de submontagens como as apresentadas.

3.1 Primeiro Exemplo: Submontagens idênticas

No primeiro exemplo, três submontagens idênticas são consideradas, cada uma das quais consistindo de uma chapa plana, três reforçadores e duas hastilhas, como mostrado no figura1.

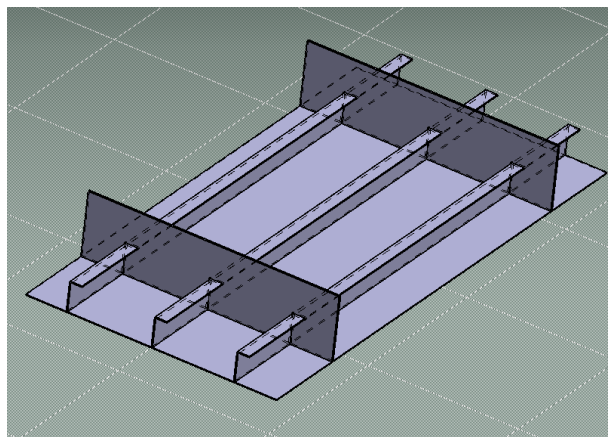


Figura 1. Submontagem: Primeiro Exemplo.

| Atividade | Descrição | Recursos | Tempo |
|--------------|--------------------------------|--|----------------|
| 1 | Posicionar Chapa | Montador =2, Ponte Rolante = 1 | 15 min |
| 2 | Posicionar e pontear reforço 1 | Montador = 2, Ponte Rolante =1, Soldador = 1 | 15 min |
| 3 | Posicionar e pontear reforço 2 | Montador = 2, Ponte Rolante =1, Soldador = 1 | 15 min |
| 4 | Posicionar e pontear reforço 3 | Montador = 2, Ponte Rolante =1, Soldador = 1 | 15 min |
| 5 | Soldar reforços | Montador = 2, Ponte Rolante =1, Soldador = 2 | 250 min |
| 6 | Empurrar e pontear hastilha | Montador = 2, Ponte Rolante =1, Soldador = 1 | 20 min |
| 7 | Empurrar e pontear hastilha | Montador = 2, Ponte Rolante =1, Soldador = 1 | 20 min |
| 8 | Soldar Hastilhas | Soldador = 2 | 130 min |
| Total | - | - | 480 min |

Tabela 1: Atividades do Plano de Processo 1.

Três tipos de recursos são necessários para a produção desta submontagem:

- Montadores e equipamentos
- Soldadores e seus equipamentos de soldagem.
- Ponte Rolante semi automática com um operador

Cada submontagem pode ser produzida de acordo com um dos três planos de processo, cujas atividades, com suas descrições correspondentes, quantidades de recursos e tempos de processo, encontram-se resumidas nas tabelas 1 a 3.

| Atividade | Descrição | Recursos | Tempo |
|------------------|-----------------------------------|--|----------------|
| 1 | Posicionar chapa | Montador = 2, Ponte Rolante =1, Soldador = 1 | 15 min |
| 2 | Pos. e pontear hastilha 1 na base | Montador = 2, Ponte Rolante =1, Soldador = 1 | 30 min |
| 3 | Pos. e pontear hastilha 2 na base | Montador = 2, Ponte Rolante =1, Soldador = 1 | 30 min |
| 4 | Empurrar e pontear reforço 1 | Montador = 2, Ponte Rolante =1, Soldador = 1 | 20 min |
| 5 | Empurrar e pontear reforço 2 | Montador = 2, Ponte Rolante =1, Soldador = 1 | 20 min |
| 6 | Empurrar e pontear reforço 3 | Montador = 2, Ponte Rolante =1, Soldador = 1 | 20 min |
| 7 | Soldar reforços e hastilhas | Soldador = 2 | 430 min |
| Totais | - | - | 565 min |

Tabela 2: Atividades do Plano de Processo 2.

Considerando que a quantidade de recursos é limitada ao processamento de no máximo duas submontagens em cada horizonte de tempo de planejamento, sete cenários são considerados, cada qual caracteriza-se por três datas de vencimento, um para cada submontagem.

Cada cenário foi analisado utilizando o modelo sequencial e o modelo simultâneo como apresentados na seção anterior.

Em cada cenário o modelo sequencial foi aplicado utilizando-se os três planos de processos possíveis, um de cada vez, enquanto que no modelo simultâneo todos os três planos são analisados em conjunto.

Isto significa que na aplicação do modelo sequencial os resultados são de um plano de processo específico, onde o modelo fornece o prazo adequado em

função das restrições. Já na aplicação do modelo simultâneo os resultados são o da escolha do melhor plano de processo obtido pelo modelo, considerando todas as informações simultaneamente.

| Atividade | Descrição | Recursos | Tempo |
|------------------|---|--|----------------|
| 1 | Pos. e pontear hast. 1 de "pontacabeça" | Montador = 2, Ponte Rolante =1, Soldador = 1 | 30 min |
| 2 | Pos. e pontear hast. 2 de "pontacabeça" | Montador = 2, Ponte Rolante =1, Soldador = 1 | 30 min |
| 3 | Emp. e soldar reforço 1 nas hast. | Montador = 2, Ponte Rolante =1, Soldador = 2 | 10 min |
| 4 | Emp. e soldar reforço 2 nas hast. | Montador = 2, Ponte Rolante =1, Soldador = 2 | 10 min |
| 5 | Emp. e soldar reforço 3 nas hast. | Montador = 2, Ponte Rolante =1, Soldador = 2 | 10 min |
| 6 | Virar a grelha, pos. na chapa e pontear | Montador = 4, Ponte Rolante =1, Soldador = 2 | 20 min |
| 7 | Soldar reforços e hastilhas | Montador = 2, Ponte Rolante =1, Soldador = 1 | 300 min |
| Totais | - | - | 410 min |

Tabela 3: Atividades do Plano de Processo 3

Os resultados numéricos obtidos pela solução dos modelos são resumidos na tabela 4, onde é empregada a seguinte notação:

DDS_i – Prazos máximos de finalização das submontagens *i*; *i*=1,2,3

Inf – Solução não viável

MSEQ_j – Prazo de finalização (makespan), obtidos com o modelo sequencial usando os planos de processo *j*; *j*=1,2,3

MSIM – Prazos de finalização (makespan), obtido pelo modelo simultâneo.

| DDS ₁ | DDS ₂ | DDS ₃ | MSEQ ₁ | MSEQ ₂ | MSEQ ₃ | MSIM |
|------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------|
| 8 | 16 | 24 | 17 | Inf | Inf | 13 |
| 9 | 17 | 25 | 18 | 17 | Inf | 14 |
| 10 | 18 | 26 | 19 | 18 | 17 | 15 |
| 11 | 19 | 27 | 20 | 19 | 18 | 16 |
| 12 | 20 | 28 | 21 | 20 | 19 | 17 |
| 13 | 21 | 29 | 22 | 21 | 20 | 18 |
| 14 | 22 | 30 | 23 | 22 | 21 | 19 |

Tabela 4: Makespan mínimo: Primeiro Exemplo.

Da tabela 4, pode ser visto que o modelo simultâneo fornece um valor de makespan mais baixo do que os valores correspondentes que são obtidos a partir dos modelos sequenciais; Além disso, em algumas situações, não existe uma solução viável de modelo sequencial, enquanto uma solução viável é obtida para o modelo simultâneo.

Isto demonstra claramente a vantagem prática da adoção de uma abordagem integrada ao processo de planejamento e programação da produção.

3.2 Segundo Exemplo: Submontagens diferentes

No segundo exemplo, são considerados um conjunto de oito submontagens. Estas submontagens são assim caracterizadas:

- Duas submontagens idênticas, denotados por S_1 e S_2 , como visto na figura 2;
- Quatro submontagens idênticas, denotados por S_3 a S_6 , como mostrados na figura 3;
- Uma submontagem denotada por S_7 , como mostrado na figura 4;
- Uma submontagem, denotada por S_8 , como mostrada na figura 5.

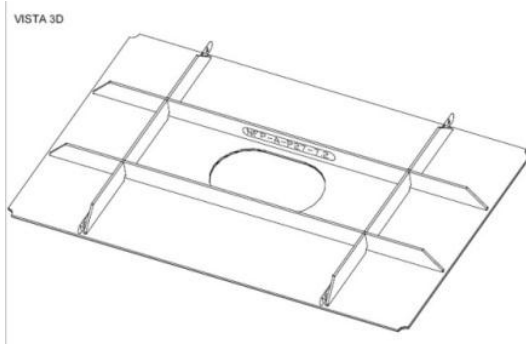


Figura 2: Submontagens S_1 e S_2 .

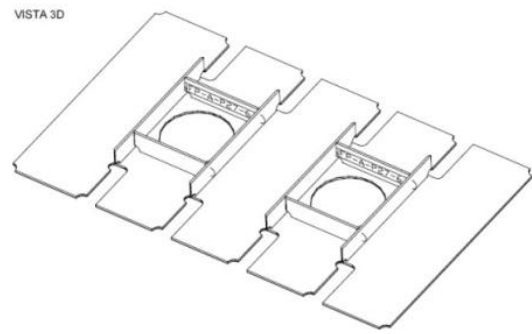


Figura 3: Submontagens S_3 - S_6 .

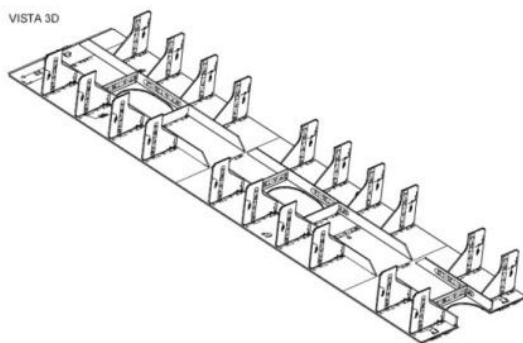


Figura 4: Submontagem S_7 .

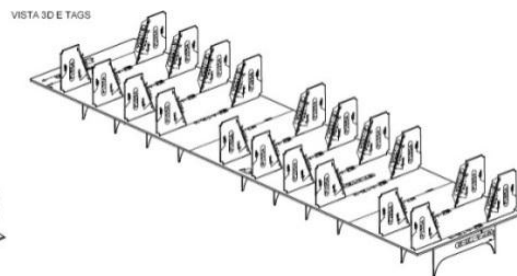


Figura 5: Submontagem S_8 .

Cinco recursos são necessários para a produção deste conjunto de submontagens:

- Equipamento de soldagem por eletrodo revestido;
- Equipamento de soldagem por gravidade;
- Equipamento de soldagem MIG;
- Soldadores que podem operar todos os três tipos de equipamentos;
- Montadores, que podem executar todas as tarefas necessárias.

Cada submontagem pode ser produzida empregando três planos de processo, cada um dos quais consome recursos em diferentes quantidades e tipos e possui diferentes tempos de processamento para as diferentes submontagens, como mostrado nas tabelas 5 e 6, respectivamente, onde é usada a seguinte notação:

PP_i – Plano de Processo i; i=1,2,3

R_j – Quantidade de Recursos j; j=1,2,3,4,5

S_k – Submontagens k; k=1,2,3,4,5,6,7,8

| | PP ₁ | PP ₂ | PP ₃ |
|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| R ₁ | 1 | 0 | 0 |
| R ₂ | 0 | 1 | 0 |
| R ₃ | 0 | 0 | 1 |
| R ₄ | 1 | 1 | 1 |
| R ₅ | 1 | 1 | 1 |

Tabela 5. Necessidade de Recursos dos Planos de Processo do Segundo Exemplo.

| | PP ₁ | PP ₂ | PP ₃ |
|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| S ₁ | 4 | 2 | 1 |
| S ₂ | 4 | 2 | 1 |
| S ₃ | 3 | 2 | 1 |
| S ₄ | 3 | 2 | 1 |
| S ₅ | 3 | 2 | 1 |
| S ₇ | 6 | 5 | 3 |
| S ₈ | 8 | 6 | 4 |

Tabela 6. Duração dos Planos de Processo do Segundo Exemplo.

Vinte cenários são considerados, cada cenário sendo definido por um prazo, que tem o mesmo valor para cada submontagem. Para cada cenário, três casos sequenciais, correspondentes a um plano de processo e o caso simultâneo são avaliados.

Os resultados numéricos são mostrados nas tabelas de 7 a 10. Como no primeiro exemplo, resultados mostrados nas tabelas demonstram que, para todos os cenários, os resultados simultâneos apresentam valores mais baixos de makespan do que qualquer um dos casos sequenciais correspondentes.

| DD | Caso Sequencial - Plano de Processo 1 | | | |
|----|---------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | A1 (PP1 {TP=4}) | A3 (PP1 {TP=3}) | A7 (PP1 {TP=6}) | A8 (PP1 {TP=8}) |
| 5 | 5 | 4 | Inf | Inf |
| 6 | 5 | 4 | Inf | Inf |
| 7 | 5 | 4 | 7 | Inf |
| 8 | 5 | 4 | 7 | Inf |
| 9 | 5 | 5 | 7 | 9 |
| 10 | 6 | 6 | 7 | 9 |
| 11 | 7 | 7 | 7 | 9 |
| 12 | 8 | 8 | 7 | 9 |
| 13 | 9 | 9 | 7 | 9 |
| 14 | 10 | 10 | 8 | 9 |
| 15 | 11 | 11 | 9 | 9 |
| 16 | 12 | 12 | 10 | 9 |
| 17 | 13 | 13 | 11 | 10 |
| 18 | 14 | 14 | 12 | 11 |
| 19 | 15 | 15 | 13 | 12 |
| 20 | 16 | 16 | 14 | 13 |
| 21 | 17 | 17 | 15 | 14 |
| 22 | 18 | 18 | 16 | 15 |
| 23 | 19 | 19 | 17 | 16 |
| 24 | 20 | 20 | 18 | 17 |

Tabela 7. Makespan Mínimo: Segundo Exemplo – Modelo Sequencial - Plano de Processo 1.

| DD | Caso Sequencial - Plano de Processo 2 | | | |
|----|---------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | A1 (PP2 {TP=2}) | A3 (PP2 {TP=2}) | A7 (PP2 {TP=5}) | A8 (PP2 {TP=6}) |
| 5 | 3 | 3 | Inf | Inf |
| 6 | 4 | 4 | Inf | Inf |
| 7 | 5 | 5 | 6 | Inf |
| 8 | 6 | 6 | 6 | 7 |
| 9 | 7 | 7 | 6 | 7 |
| 10 | 8 | 8 | 6 | 7 |
| 11 | 9 | 9 | 6 | 7 |
| 12 | 10 | 10 | 7 | 7 |
| 13 | 11 | 1 | 8 | 7 |
| 14 | 12 | 12 | 9 | 8 |
| 15 | 13 | 13 | 10 | 9 |
| 16 | 14 | 14 | 11 | 10 |
| 17 | 15 | 15 | 12 | 11 |
| 18 | 16 | 16 | 13 | 12 |
| 19 | 17 | 17 | 14 | 13 |
| 20 | 18 | 18 | 15 | 14 |
| 21 | 19 | 19 | 16 | 15 |
| 22 | 20 | 20 | 17 | 16 |
| 23 | 21 | 21 | 18 | 17 |
| 24 | 22 | 22 | 19 | 18 |

Tabela 8. Makespan Mínimo: Segundo Exemplo – Modelo Sequencial - Plano de Processo 2.

| DD | Caso Sequencial - Plano de Processo 3 | | | |
|----|---------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | A1 (PP3 {TP=2}) | A3 (PP3 {TP=2}) | A7 (PP3 {TP=5}) | A8 (PP3 {TP=6}) |
| 5 | 4 | 4 | 4 | 5 |
| 6 | 5 | 5 | 4 | 5 |
| 7 | 6 | 6 | 4 | 5 |
| 8 | 7 | 7 | 5 | 5 |
| 9 | 8 | 8 | 6 | 5 |
| 10 | 9 | 9 | 7 | 6 |
| 11 | 10 | 10 | 8 | 7 |
| 12 | 11 | 11 | 9 | 8 |
| 13 | 12 | 12 | 10 | 9 |
| 14 | 13 | 13 | 11 | 10 |
| 15 | 14 | 14 | 12 | 11 |
| 16 | 15 | 15 | 13 | 12 |
| 17 | 16 | 16 | 14 | 13 |
| 18 | 17 | 17 | 15 | 14 |
| 19 | 18 | 18 | 16 | 15 |
| 20 | 19 | 19 | 17 | 16 |
| 21 | 20 | 20 | 18 | 17 |
| 22 | 21 | 21 | 19 | 18 |
| 23 | 22 | 22 | 20 | 19 |
| 24 | 23 | 23 | 21 | 20 |

Tabela 9. Makespan Mínimo: Segundo Exemplo – Modelo Sequencial - Plano de Processo 3.

| DD | Caso Simultâneo – Planos de Processo | | | |
|----|--------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | A1 (TP={4,2,1}) | A3 (TP={3,2,1}) | A7 (TP={6,5,3}) | A8 (TP={8,6,4}) |
| 5 | 2 | 2 | 4 | 5 |
| 6 | 2 | 2 | 4 | 5 |
| 7 | 2 | 2 | 4 | 5 |
| 8 | 3 | 3 | 4 | 5 |
| 9 | 4 | 4 | 4 | 5 |
| 10 | 5 | 5 | 4 | 5 |
| 11 | 6 | 6 | 5 | 5 |
| 12 | 7 | 7 | 6 | 5 |
| 13 | 8 | 8 | 7 | 6 |
| 14 | 9 | 9 | 8 | 7 |
| 15 | 10 | 10 | 9 | 8 |
| 16 | 11 | 11 | 10 | 9 |
| 17 | 12 | 12 | 11 | 10 |
| 18 | 13 | 13 | 12 | 11 |
| 19 | 14 | 14 | 13 | 12 |
| 20 | 15 | 15 | 14 | 13 |
| 21 | 16 | 16 | 15 | 14 |
| 22 | 17 | 17 | 16 | 15 |
| 23 | 18 | 18 | 17 | 16 |
| 24 | 19 | 19 | 18 | 17 |

Tabela 10. Makespan Mínimo: Segundo Exemplo – Modelo Simultâneo.

Neste exemplo, devido a variedade de geometrias de submontagens e planos de processo distintos, não é possível montar uma tabela de resumo como o a tabela 4, necessitando a comparação, caso à caso, entre os resultados das tabelas 7 a 10.

3.3 Módulo de Software APS

O modelo para o processo simultâneo de planejamento e programação da produção foi empregado como o núcleo de um módulo de software APS para uso como um sistema de suporte de decisão em fabricação e montagem na construção naval. Este módulo foi interfaceado com um software ERP, chamado MXM Manager, que é utilizado em 14 estaleiros no Brasil.

4 Conclusões

Como previsto, o trabalho aqui apresentado alcançou seu objetivo principal, ou seja, o desenvolvimento de um modelo APS para submontagens de construção naval, onde o planejamento de processos e a programação da produção são integrados, para uso como uma ferramenta de suporte a decisão.

Este modelo foi computacionalmente implementado como um módulo de software, que foi interfaceado a um software ERP existente, que é utilizado em alguns estaleiros no Brasil.

Uma extensão deste trabalho é o desenvolvimento de modelos APS para outras áreas funcionais de construção naval, como gerenciamento da Cadeia de abastecimento, acabamentos e programação de guindastes.

5 Referências

- Aoyama, K., Nomoto, T.,** 1997. Information models and functions for CIM in shipbuilding. *Journal of Marine Science and Technology*, 2, 148-162.
- Bay, M., Crama, Y., Langer, Y., Rigo, P.,** 2010. Space and time allocation in a shipyard assembly hall. *Annals of operations Research*, 179, 57-76.

- Cho, K.-K., Sun, J.-G., Oh, J.-S.**, 1999. An automated welding operation planning system for block assembly in shipbuilding. *International Journal of Production Economics*, 60-61, 203-209.
- Chung, S.H., Lau, H.C.W., Choy, K.L., Ho, G.T.S., Tse, Y.K.**, 2010. Application of genetic approach for advanced planning in multi-factory environment. *International Journal of Production Economics*, 127, 300-308.
- Finke, D.A., Ligetti, C.B., Traband, M.T., Roy, A.**, 2007. Shipyard space allocation and scheduling. *Journal of Ship Production*, 23, 197-201.
- Hvolby, H.-H., Steger-Jensen, K.**, 2010. Technical and industrial issues of advanced planning and scheduling (APS) systems. *Computers in Industry*, Volume 61 Issue 9, 845-851.
- Jinsong, B., Xiaofeng, H., and Ye, J.**, 2009. A genetic algorithm for minimizing makespan of block erection in shipbuilding. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 20, 500-512.
- Kim, H., Lee, J.-K., Park, J.-H., Park, B.-J., Jang, D.-S.**, 2002. Applying digital manufacturing technology to ship production and the maritime environment. *Integrated Manufacturing Systems*, 13, 295-305.
- Lee, J.K., Lee, K.J., Park, H.K., Hong, J.S., Lee, J.S.**, 1997. Developing scheduling systems for Daewoo Shipbuilding: DAS project. *European Journal of Operational Research*, 97, 380-395.
- Li, X., Shao, X., Gao, L., Qian, W.**, 2010. Na effective hybrid algorithm for integrated process planning and scheduling. *International Journal of Production Economics*, 126, 289-298.
- LINGO User Manual**, 2008. Lindo Systems Incorporated, Illinois, USA.
- Prasad, V.R., Graul, M., Benjamin, P., Cahill, P., Mayer, R.**, 2003. Resource-constrained shop-level scheduling in a shipyard. *Journal of Ship Production*, 19, 65-75.
- Roh, M.-II, Lee, K.-Y.**, 2010. Optimal scheduling of block lifting in consideration of the minimization of traveling distance while unloaded and wire and shackle replacement of a gantry crane. *Journal of Materials Science and Technology*, 15, 190-200.
- Schmitt, T., Faaland**, 2001. Scheduling recurrent construction. *Naval Research Logistics*, 51, 1102-1128.

- Sharma, R. , Sha, O.P.**, 2005a. An ERP model for medium scale shipyard-I: production planning. *Journal of the Institution of Engineers (India)*, 85, 1-13.
- Sharma, R., Sha, O.P.**, 2005b. An ERP model for medium scale shipyard II: Nucleus driven marketing management. *Journal of the Institution of Engineers (India)*, 85, 24-31.
- Wang, L., Keshavazhresh, S., Feng, H.-Y., Buchal, R.O.**, 2009. Assembly process planning in collaborative manufacturing: a review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 41, 132-144.
- Wen, C., Eksioğlu, S.D., Greenwood, A., Zhang, S.**, 2010. Crane scheduling in a shipbuilding environment. *International Journal of Production Economics*, 125, 40-50.

APENDICE 1. NOTAÇÕES

- b – Índice para as submontagens; $b=1, \dots, B$
- d – Índice para os planos de processo; $d=1, \dots, D$
- e – Índice para os recursos; $e=1, \dots, E$
- f – Índice para as peças; $f=1, \dots, F$
- t – Índice para o período de tempo; $t=1, \dots, T$
- DD_b – Prazo para a submontagem b
- EFT_b – Mais adiantado prazo final de montagem da submontagem b
- EST_b – Mais adiantado prazo de inicial de montagem da submontagem b
- $G_{b,f}$ – Quantidade de peças necessárias para cada submontagem b
- $H_{e,d}$ – Quantidade de recursos e necessários para um plano de processo d (H_e no caso sequencial)
- I_b – Área necessária para a submontagem b
- $J_{b,d}$ – parâmetro binário = {1 se a submontagem b pode ser produzida pelo plano de processo d , 0 no demais casos}
- $K_{c,t}$ – quantidade de recursos c disponíveis por período de tempo t
- L - Área total da oficina.
- LFT_b – Mais retardado prazo final de montagem da submontagem b
- LST_b – Mais retardado prazo de inicial de montagem da submontagem b

$M_{b,d,t}$ – variável binária = {1 se a submontagem b é terminada empregando o plano de processo d no período de tempo t , 0 nos demais casos} ($M_{b,t}$ no casos sequencial)

S_f – Área requerida pela armazenagem de peças f durante a submontagem

T – Horizonte de tempo planejado

$TP_{b,d}$ – Tempo do plano de processo da submontagem b empregando o plano de processo d ($TP_{b,t}$ no caso sequencial)

$Y_{b,d,t}$ – variável binária = { 1 se a submontagem b está sendo processada usando o plano de processo d no período de tempo t , 0 nos demais casos}

APENDICE 2: TEMPOS DE INÍCIO E FINAL DE SUBMONTAGEM.

$EST_b = \{ 0 \text{ if } b=0, \max(EST_b + TP_b) \text{ othewrwise} \} , \forall b \in B ,$

$LST_b = \{ T - TP_b \text{ if } b = B, \min (LST_b - TP_b) \text{ otherwise} \} , \forall b \in B .$