

Simulação de uma célula de manufatura de uma empresa de material de defesa para análise de desempenho e avaliação de alternativas

Renaldo Gonzaga de Almeida Filho (UNIFEI) renaldof@hotmail.com

José Arnaldo Barra Montevechi (UNIFEI) montevechi@unifei.edu.br

André Luiz Medeiros (UNIFEI) ecolimp.andre@terra.com.br

Resumo

O presente trabalho ilustra o emprego da simulação de eventos discretos como uma ferramenta de apoio na tomada de decisão. Uma célula de uma linha de fabricação é modelada e é verificada a sua capacidade de atendimento da demanda em função da utilização de turnos extras e da distribuição da mão de obra disponível. Um cenário alternativo é avaliado sob as mesmas condições e os resultados são comparados para verificar qual a melhor alternativa.

Palavras-chave: Simulação; Avaliação de desempenho; Célula de manufatura.

1. Introdução

O projeto apresentado neste artigo refere-se a um estudo de simulação para o departamento de produção de uma empresa brasileira de material de defesa. Seus produtos são empregados por cidadãos civis, polícias militares e civis e forças armadas, e destinam-se tanto para o mercado nacional quanto para exportação. O objeto de estudo foi uma célula de centros de usinagem de comando numérico computadorizado (CNC) da linha de fabricação de um dos componentes do seu principal produto de exportação. Esta célula foi selecionada, pois estudos anteriores indicavam que ela era a maior restrição ao aumento de produção deste produto. O problema a ser estudado é como melhorar de desempenho desta célula.

O objetivo desse estudo foi aumentar em 25% a produção de uma célula de manufatura através da identificação das restrições de produção do grupo e das operações a serem executadas em turnos adicionais, estabelecendo a necessidade e a distribuição dos recursos humanos. Um segundo objetivo foi avaliar uma proposta de modificação do processo para a melhoria de desempenho elaborada pelo departamento de engenharia do processo.

A metodologia empregada foi a experimentação utilizando uma ferramenta de simulação de eventos discretos. Este artigo é composto por duas partes. Inicialmente, são apresentados conceitos, definições e classificações das simulações, suas vantagens e abordagens para o desenvolvimento de um projeto de simulação. Na segunda parte, é apresentada uma aplicação em uma empresa de manufatura.

2. A simulação de eventos discretos

Simular significa imitar o funcionamento de um sistema por meio de outro sistema. No âmbito da Engenharia de Produção, a simulação foca problemas operacionais, de manuseio de materiais, de serviços e de tomada de decisão. Harrel *et al.* (2000) definem a simulação como *um meio de reproduzir o comportamento de sistemas dinâmicos. O modelo usado é um modelo computacional.* Simulação, nesse contexto, pode ser definida como a imitação de um

sistema dinâmico usando um modelo computacional com o objetivo de avaliar o desempenho do sistema.

Para Pereira (2000), a simulação *é a representação de um sistema real através de um modelo utilizando o computador, trazendo vantagens como a de se poder visualizar o sistema, implementar mudanças e responder a questões do tipo: "o que aconteceria se" (what-if), reduzindo gastos desnecessários e tempo.*

3. Por que simular?

O desenvolvimento de sistemas dinâmicos complexos tem levado a necessidade de se avaliar antecipadamente o seu comportamento em face de mudanças e, no caso de sistemas em desenvolvimento, o seu funcionamento. Contudo, esses sistemas são complexos demais para serem modelados de forma analítica e a obtenção de soluções tornam-se inviáveis seja por causa do custo seja por causa da complexidade matemática.

Carrie (1988) afirma que *a simulação de eventos discretos é adequada quando mudanças discretas predominam no sistema sendo modelado.* Segundo O’Kane (2000), os sistemas de manufatura modernos consistem de muitas operações discretas que ocorrem aleatória e não-linearmente, dessa forma, a modelagem por simulação na forma da simulação de eventos discretos torna-se um dos mais populares e eficientes meios de análise desses sistemas.

Através da simulação pode-se prever o comportamento de sistemas ou o efeito da mudança de um parâmetro em seu regime de funcionamento. A simulação permite modelar também a interdependência e a aleatoriedade dos sistemas. Segundo Harrel *et al.* (2000), *a simulação fornece um meio para validar se as melhores decisões estão sendo tomadas e evita as caras técnicas de tentativa e erro que são demoradas e de natureza interrompedoras.*

Para Harrel *et al.* (2000), *o poder da simulação reside no fato que ela fornece um método de análise que não é somente formal e preditivo, mas capaz de avaliar com precisão o desempenho até dos sistemas mais complexos.* Carrie (1988, p. 398), por outro lado, afirma que *o fato dos resultados obtidos serem probabilísticos e da existência de alguma incerteza na sua precisão tornam a simulação mais apropriada para comparar alternativas que para fornecer previsões de desempenho precisas.* Apesar das divergências entre os autores, a importância da simulação pode ser verificada pelas seguintes vantagens:

- Permite avaliar o funcionamento dos sistemas antecipadamente reduzindo custos;
- Permite verificar efeitos de mudanças e avaliar cenários distintos auxiliando na tomada de decisão;
- Os custos de simulação de um sistema em desenvolvimento são inferiores aos custos de alterar um sistema implantado;
- A interface gráfica permite a visualização do modelo facilitando a compreensão e identificação de falhas.

4. Elementos de um sistema

Sob o enfoque da simulação, um sistema consiste de entidades, atividades, recursos e controles (HARREL *et al.*, 2000). Esses elementos são melhores definidos a seguir:

Entidades: são os itens processados através do sistema tais como produtos, clientes e documentos (HARREL *et al.*, 2000);

Atividades: são as tarefas realizadas no sistema que estão direta ou indiretamente envolvidas no processamento das entidades (CARRIE, 1988; HARREL *et al.*, 2000);

Recursos: são os meios pelos quais as atividades são realizadas. Eles fornecem as instalações de apóio, equipamentos e pessoal para condução das atividades (HARREL *et al.*, 2000);

Controles: ditam como, quando e onde as atividades são realizadas. Eles impõem à ordem no sistema. No mais alto nível, os controles consistem de programação, planos e políticas. No mais baixo nível, os controles fornecem as informações e a lógica de decisão do como o sistema deve operar. Exemplos: planos de produção, programação da produção, priorização de tarefas, programas de controle e folhas de instruções (HARREL *et al.*, 2000).

5. As etapas de um projeto de simulação

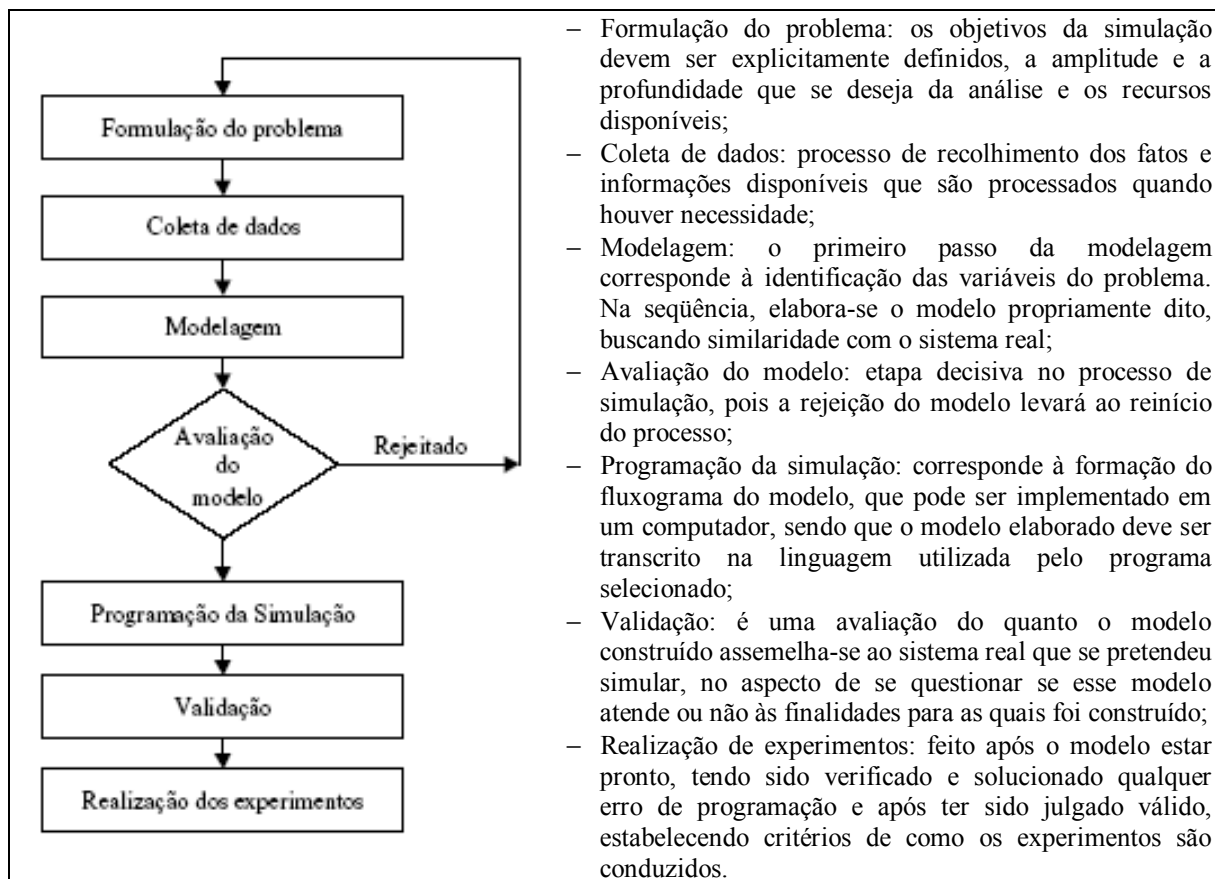
Para O’Kane *et al.* (2000), *a decisão de usar simulação para estudos de sistemas de manufatura requer que uma abordagem estruturada do estudo da simulação seja continuamente seguida, tal que os projetistas possam identificar no modelo elementos de projeto que são críticos para o sucesso.* Segundo este mesmo autor, *é importante estar consciente das dificuldades que necessitam ser superadas na tentativa de fornecer soluções para situações do mundo real antes que se inicie a aplicação das técnicas de simulação para sistemas de manufatura.* Estas dificuldades abrangem tarefas tais como a definição do problema e dos objetivos até a construção do modelo, validação e análise dos dados.

Andrade (1989) propõe que um trabalho de simulação seja desenvolvido de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 1. Harrel *et al.* (2000) recomendam que, para um projeto de simulação ser bem sucedido, sejam seguidos os passos apresentados na Figura 2. Diferentemente de Andrade (1989), Harrel *et al.* (2000) consideram esse processo iterativo onde as atividades são refinadas e algumas vezes redefinidas a cada iteração. Contudo, os processos propostos por ambos os autores são similares nas suas essências. Carrie (1988) apresenta um processo de modelagem de seis etapas similar à Harrel *et al.* (2000) distinguindo-se apenas a ordem em que ocorrem a construção do modelo e a coleta de dados. Para Carrie (1988), a construção do modelo ocorre antes da coleta de dados enquanto Harrel *et al.* (2000) consideram o oposto. A aplicação apresentada a seguir seguiu as etapas preconizadas na Figura 2.

6. Aplicação

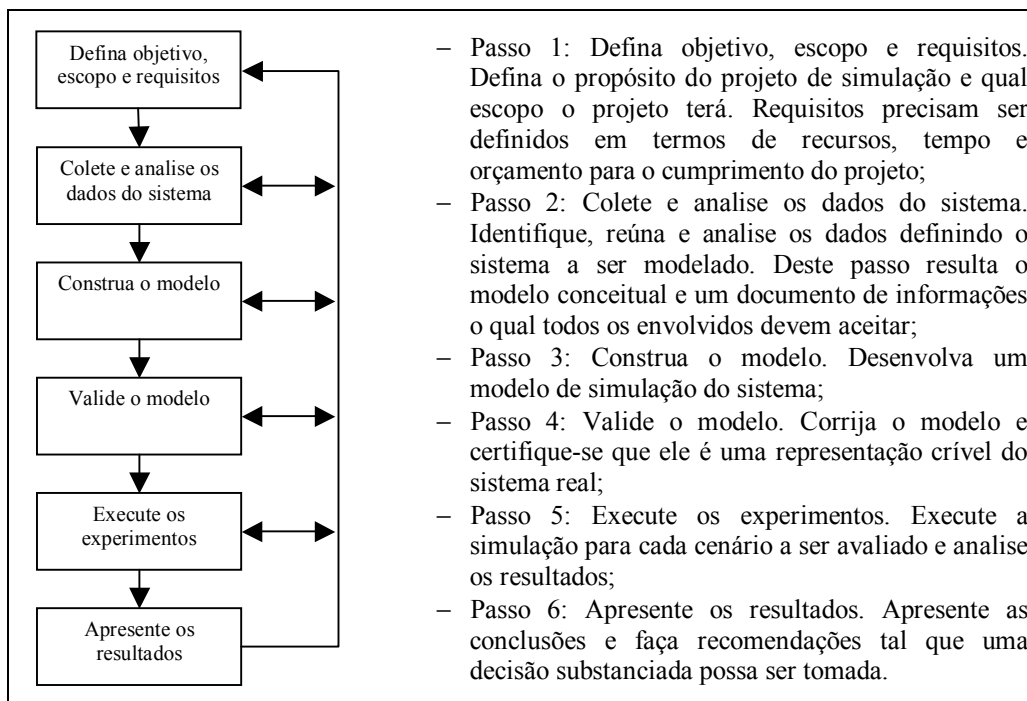
A aplicação a seguir foi realizada numa filial de uma empresa nacional de material de defesa. Os produtos desta filial são empregados por civis, polícias militares e civis e forças armadas e destinam-se tanto para o mercado nacional quanto para exportação. Atualmente, a demanda não é plenamente atendida. O fator limitante é a capacidade insuficiente de produção da peça 35. A empresa estudava alternativas para aumentar a produção da época em 25% utilizando os equipamentos já disponíveis e contratação de mão de obra adicional de forma a atender a demanda reprimida.

Esta é uma aplicação perfeitamente adequada para modelagem computacional, pois sendo esta linha de fabricação um sistema de manufatura já há, segundo O’Kane (2000), *um número de áreas de preocupação que são conhecidas ou suspeitas de serem problemáticas no processo. O que não se conhece é como mudanças em uma área qualquer ou em todas afetam a produção global. Sendo, este tipo de problema difícil de ser estudado analiticamente com um modelo matemático.*



Fontes: Adaptado de Andrade (1989), Moreira (2001) e Leal (2003).

Figura 1 - Fluxograma e análise do processo de simulação



Fonte: Adaptado de Harrel *et al.* (2000).

Figura 2 – Natureza iterativa da simulação

A linha da peça 35 é composta por seis células de manufatura, chamados na empresa de grupos. Estudos preliminares indicavam o grupo 1 apresentava a menor capacidade produtiva da linha sendo, então, o fator restritivo ao aumento da produção da linha. Por esse motivo o objeto de estudo foi limitado ao grupo 1 da linha de fabricação da peça 35.

7. Desenvolvimento do projeto de simulação

7.1. Definição do objetivo, escopo e resultados desejados

O objetivo do estudo foi propor um plano para aumentar a produção em 25% utilizando os equipamentos existentes e a contratação de mão de obra adicional. Um segundo objetivo foi avaliar uma proposta de modificação do processo para a melhoria de desempenho elaborada pelo departamento de engenharia do processo.

O período simulado corresponde a um mês de produção. Os resultados apresentados são: a produção de peças no período, a formação de filas, a quantidade de peças em processo, o lead-time médio e a taxa de ocupação dos equipamentos. Com base nestes resultados, deseja-se:

1. Identificar as restrições de produção do grupo;
2. Identificar as operações a serem executadas em turnos adicionais;
3. Estabelecer a melhor distribuição de recursos humanos entre os turnos;

O escopo do estudo foi limitado ao grupo 1 da linha da peça 35 da pistola, e considerou os seguintes tipos de peças: 35A, 35DK, 35CX, 35CB, 35DH, 35CV, 35CS e 35DN. Neste estudo modelou os operadores de produção, mas o efetivo responsável pela preparação das máquinas e os tempos de preparação não foram considerados, pois as trocas de operação são rápidas devido à semelhança entre os modelos. Nesse grupo o refugo é reduzido e, por isso, não foi considerado.

7.2. Coleta e análise dos dados

O grupo 1 é composto por oito centros de usinagem CNC e uma furadeira para furação profunda. Cada máquina executa uma operação específica e todas são automáticas. Para cada máquina há um operador dedicado para a execução da operação montada. O operador é responsável pela colocação e retirada das peças, pelo controle da operação, iniciando o ciclo de usinagem e interrompendo-o se necessário e pela inspeção das peças. Uma característica deste grupo é que muitas operações possuem ciclos longos e processam várias peças simultaneamente, devido a isso, os operadores ficam ociosos parte do tempo do ciclo. A Tabela 1 resume os dados coletados.

Entidades	9 máquinas
Recursos	14 funcionários distribuídos entre os dois turnos
Atividades	37 atividades
Controles	Horários de expediente Seqüência de operações das peças Programação

Tabela 1 – Resumo dos elementos do sistema

Na Tabela 2, tem-se um resumo das 37 atividades identificadas. Na Tabela 3, tem-se o mapa de processo parcial da célula onde estão indicadas as atividades e a suas respectivas durações para um dos modelos produzidos.

Número de operações	9
Número de transportes	19
Número de esperas	9
Total	37

Tabela 2 – Resumo do processo

Tempo (min)	○	⇨	□	⊖	▽	Descrição da Etapa																		
		X				50 peças são movimentadas da entrada para fila da op. 50																		
				X		Aguardando movimentação para execução da op. 50																		
0,10		X				8 peças são movimentadas da fila da op. 50 para RP11709																		
20,03	X					8 peças são usinadas na RP11709																		
0,10		X				8 peças são movimentadas da RP11709 para fila da op. 52																		
				X		Aguardando movimentação para execução da op. 52																		
						<table border="1"> <thead> <tr> <th>Símbolo</th> <th>Significado</th> <th>Descrição</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>○</td> <td>Operação</td> <td>Alguma coisa está sendo feita no momento.</td> </tr> <tr> <td>⇨</td> <td>Transporte</td> <td>Há um movimento de um local para outro.</td> </tr> <tr> <td>□</td> <td>Inspeção</td> <td>Observação para verificar qualidade e precisão.</td> </tr> <tr> <td>⊖</td> <td>Atraso</td> <td>Espera antes de iniciar o próximo passo de um processo.</td> </tr> <tr> <td>▽</td> <td>Armazenagem</td> <td>Há armazenagem de produtos acabados ou armazenagem de estoque em processo</td> </tr> </tbody> </table>	Símbolo	Significado	Descrição	○	Operação	Alguma coisa está sendo feita no momento.	⇨	Transporte	Há um movimento de um local para outro.	□	Inspeção	Observação para verificar qualidade e precisão.	⊖	Atraso	Espera antes de iniciar o próximo passo de um processo.	▽	Armazenagem	Há armazenagem de produtos acabados ou armazenagem de estoque em processo
Símbolo	Significado	Descrição																						
○	Operação	Alguma coisa está sendo feita no momento.																						
⇨	Transporte	Há um movimento de um local para outro.																						
□	Inspeção	Observação para verificar qualidade e precisão.																						
⊖	Atraso	Espera antes de iniciar o próximo passo de um processo.																						
▽	Armazenagem	Há armazenagem de produtos acabados ou armazenagem de estoque em processo																						

Tabela 3 - Mapa do processo parcial

7.3. Construção do modelo de simulação

Nesta aplicação foi utilizado o programa ProModel, produzido pela ProModel Corporation. O ProModel é um programa de simulação por eventos discretos para aplicação em processo de manufatura e manuseio de materiais.

A construção do modelo computacional foi desenvolvida em etapas crescentes de detalhamento e complexidade. A Figura 3 apresenta o modelo representando a situação em estudo, composto por nove máquinas organizadas conforme leiaute verificado na empresa. Neste modelo, os operadores permanecem vinculados a cada equipamento durante toda a execução das atividades.

Contudo, os equipamentos reais são automáticos e operador intervém apenas na retirada e colocação das peças nos equipamentos e no seu acionamento, sendo assim, a vinculação do operador durante o período de execução da atividade induz a uma taxa de utilização do operador superior a realmente ocorrida. E, de fato, enquanto a atividade está sendo realizada, o operador está realizando outras atividades como movimentação das peças, inspeção e afins.

Mensalmente, é estabelecida a programação da peça 35. Na Tabela 4, encontra-se uma programação típica para produção de 4000 unidades. Para simplificar o modelo computacional, os modelos similares foram agrupados, os modelos com a letra I no final utilizam aço inoxidável, os outros utilizam aço carbono.

8. Validação do modelo

A validação do modelo foi realizada por dois meios: através da comparação dos resultados obtidos com dados históricos e pelo acompanhamento e avaliação de um conhecedor da célula real.

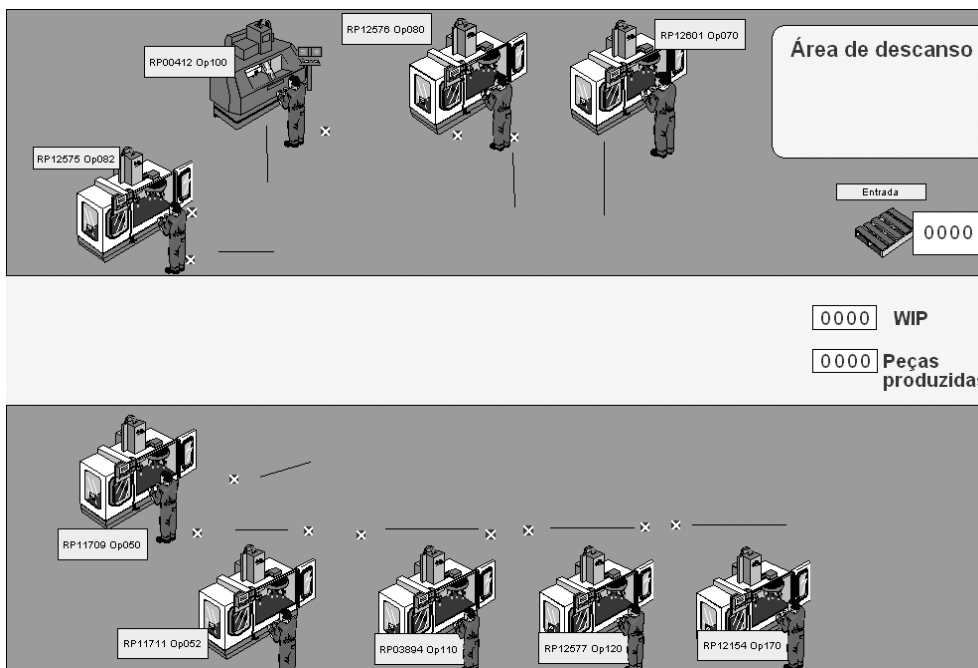


Figura 3 - Modelo representando a situação original do Grupo 1

Grupo	Modelo	Quantidade
Tipo 1	35A, 35DH e 35DK	2400
Tipo 1-I	35A-I, 35DH-I e 35DK-I	600
Tipo 2	35DN, 35CV e 35CX	700
Tipo 3	35CB e 35CS	200
Tipo 3-I	35CB-I e 35CS-I	100

Tabela 4 – Programação da Peça 35

9. Realização dos experimentos

Os experimentos foram realizados considerando-se duas alternativas para o roteamento e quatro alternativas de horário de trabalho representando um experimento fatorial completo 2x4 com oito observações. Os dois cenários de roteamento são descritos abaixo:

Situação inicial – este cenário modela a situação da linha de produção, considerando os tempos, as seqüências de operações e a mão de obra existente à época.

Desmembramento de operações – neste cenário modela-se uma proposta do departamento de engenharia para a redução dos tempos de processos das operações através da reformulação das operações. Nesta proposta, duas máquinas CNC são adicionadas ao grupo 1 para a realização de atividades originalmente executadas em outras operações, estas máquinas seriam deslocadas de outras áreas da empresa.

As quatro alternativas de horário de trabalho consideradas são: um turno, dois turnos em todas as operações, dois turnos com o segundo turno apenas nas operações críticas e dois turnos mais horas extras. Para esta última alternativa, considera-se o segundo turno apenas nas operações críticas e o primeiro turno fazendo mais 6 horas de expediente nos fins de semanas.

10. Estudos preliminares

Para a identificação das operações críticas e dos gargalos, foram executadas simulações com as duas alternativas de roteamento funcionando em um turno. Os resultados apresentados a seguir foram utilizados para estabelecer a composição do efetivo do 2º turno para as terceira e quarta alternativa de horário de trabalho.

10.1. Cenário 1 – Situação Inicial

No Gráfico 1, observam-se as filas das operações. As operações 070 e 080 apresentam as maiores quantidades de peças esperando nas filas, indicando que essas operações são críticas e devem funcionar em turnos adicionais. A operação 082, apesar de ser o gargalo do grupo, não apresenta uma quantidade significativa de peças em espera, pois apresenta tempo de processamento muito próximo da sua operação predecessora, a operação 080.

No Gráfico 2, pode-se observar que a operação 082 é bem utilizada havendo sempre peças para serem trabalhadas. Outra informação observada no gráfico é a baixa utilização das máquinas nas operações 052, 100 e 170. Isto significa que as operações predecessoras não fornecem peças em quantidade suficiente para o funcionamento regular dessas operações.

Com essas informações pôde-se estabelecer a composição do efetivo de operadores para a situação do 2º turno parcial conforme segue: 050, 070, 080, 082 e 120.

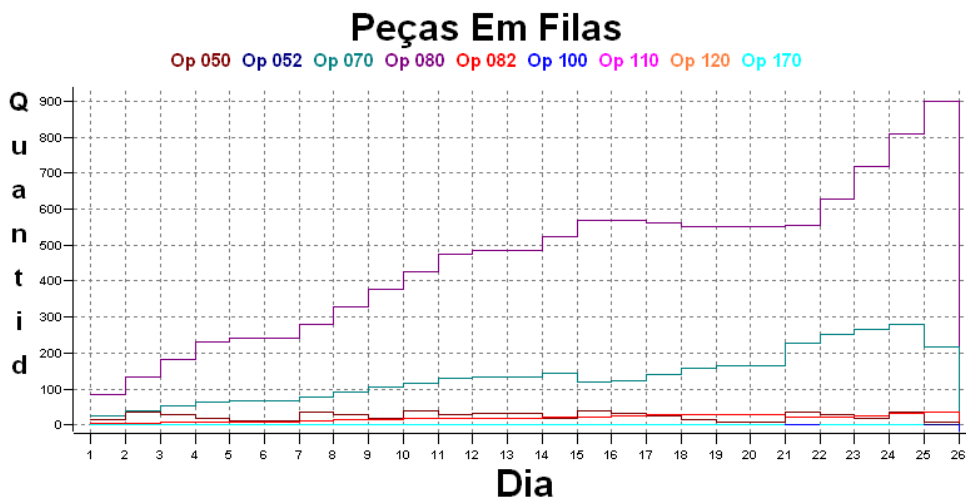


Gráfico 1 - Peças em filas para cada operação do modelo da situação inicial

10.2. Cenário 2 – Desmembramento de Operações

No Gráfico 3, observam-se as filas das operações. As operações 070 e 080 apresentam as maiores quantidades de peças esperando nas filas, indicando que essas operações são críticas e devem funcionar em turnos adicionais. A operação 120, apesar de ser o gargalo do grupo, não apresenta uma quantidade significativa de peças em espera, pois apresenta tempo de processamento muito próximo da operação 080.

No Gráfico 4, pode-se observar que a operação 120, o gargalo do grupo, não é bem utilizada, pois deveria haver sempre peças para serem trabalhadas. Outra informação observada no gráfico é a melhor utilização das máquinas havendo certo nivelamento entre as operações. Dessa forma, as operações predecessoras das operações críticas devem ser executadas em conjunto com as críticas.

Com essas informações pôde-se estabelecer a composição do efetivo de operadores para a situação do 2º turno parcial conforme segue: 050, 051, 052, 070, 080, 082, 084, 100, 110 e 120.

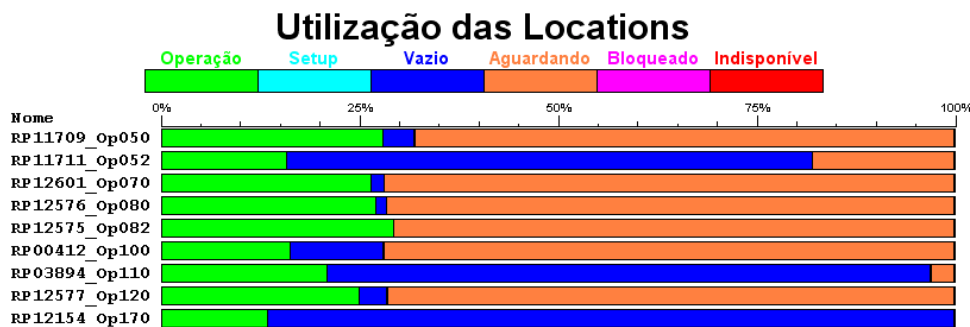


Gráfico 2 - Utilização das máquinas para cada operação do modelo da situação inicial

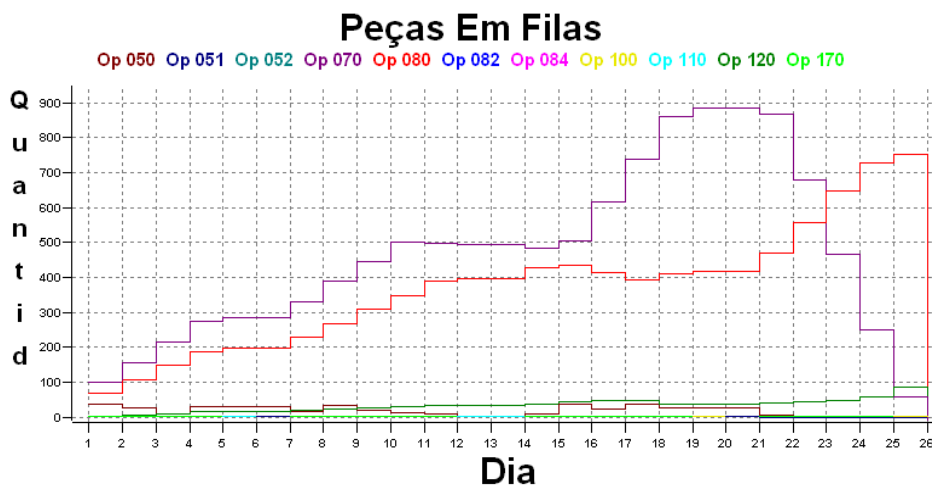


Gráfico 3 - Peças em filas para cada operação do modelo de desmembramento de operações

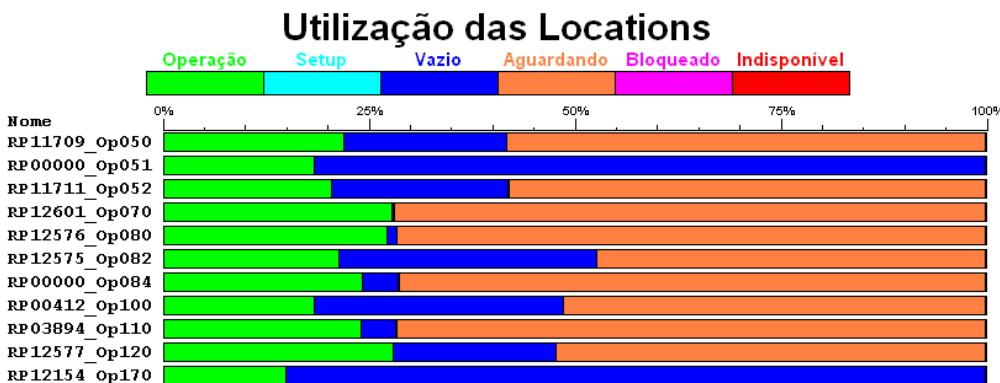


Gráfico 4 - Utilização das máquinas para cada operação do modelo de desmembramento de operações

11. Resultados

11.1. Cenário 1 – Situação Inicial

No Gráfico 5, têm-se os resultados da produção diária para as quatro situações de horário de trabalho. Observa-se que se trabalhando todas as operações em dois turnos (2º turno completo), a produção diária é próxima a 300 peças por dia. Percebe-se, contudo a redução na produtividade causada pela peça 35 de aço inoxidável para pouco mais de 200 peças por dia. O mesmo efeito é visível nas outras três alternativas de horários.

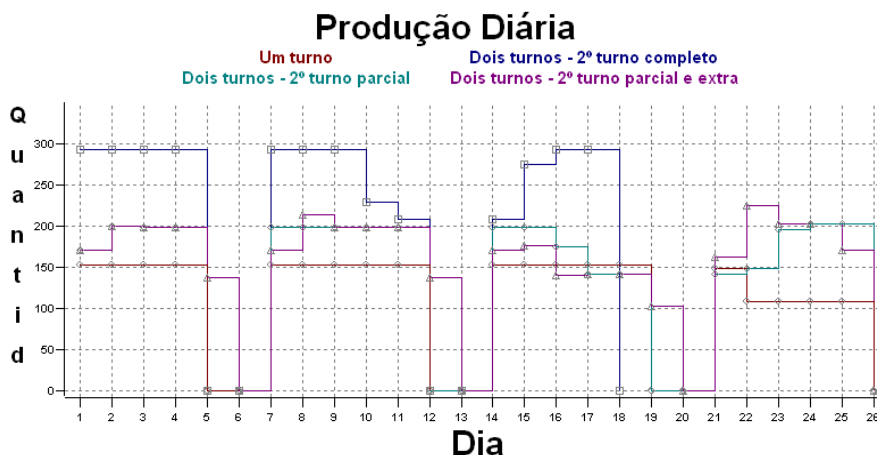


Gráfico 5 – Produção diária do modelo da situação inicial para as quatro alternativas de horários

A Tabela 5 resume as informações de produção, peças em processo e *lead-time* médio para as quatro situações deste modelo. A grande quantidade de peças em fila, como observado no Gráfico 1, causam o acúmulo de peças em processo visto no Gráfico 6 tendo como consequência o *lead-time* médio elevado observado na tabela.

	Situação 1	Situação 2	Situação 3	Situação 4
Peças produzidas	1744	4000	3626	4000
Peças em processo	1356	0	374	0
Lead-time médio	9918,54	5215,26	11263,11	11008,17

Tabela 5 – Resumo dos resultados para o modelo da situação inicial

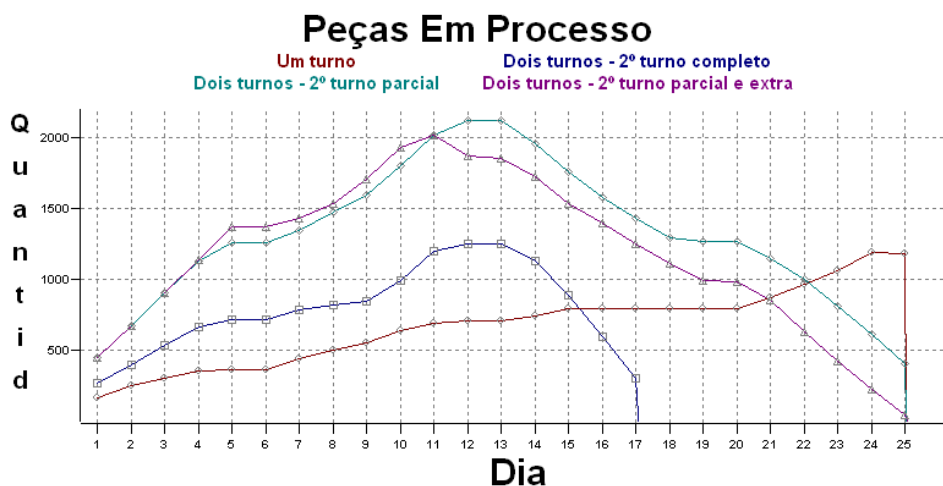


Gráfico 6 – Peças em processo do modelo da situação inicial para as quatro alternativas de horários

A situação 2 atendeu a demanda de 4000 peças em 18 dias o que permite a fabricação entre 1000 e 1500 armazéns adicionais nos 5 dias úteis remanescentes. A situação 4, dois turnos com o 2º turno parcial e hora extra também atende a demanda de 4000 peças, mas deixa pouco tempo disponível para a solução de eventuais problemas na produção. A situação 3 deixa de atender a demanda por 374 peças, considerando o seu nível médio de produção de 200 peças por dia seriam necessários mais dois dias para atender a programação.

11.2. Cenário 2 – Desmembramento

No Gráfico 7, têm-se os resultados da produção diária para as quatro situações. Neste cenário, observa-se que se utilizando dois turnos em todas as operações a produção diária é próxima a 350 peças por dia e, da mesma forma que no cenário 1, há uma redução na produtividade causada pela peça 35 de aço inoxidável para pouco mais de 250 peças por dia. O mesmo efeito é visível nas outras três alternativas de horários.

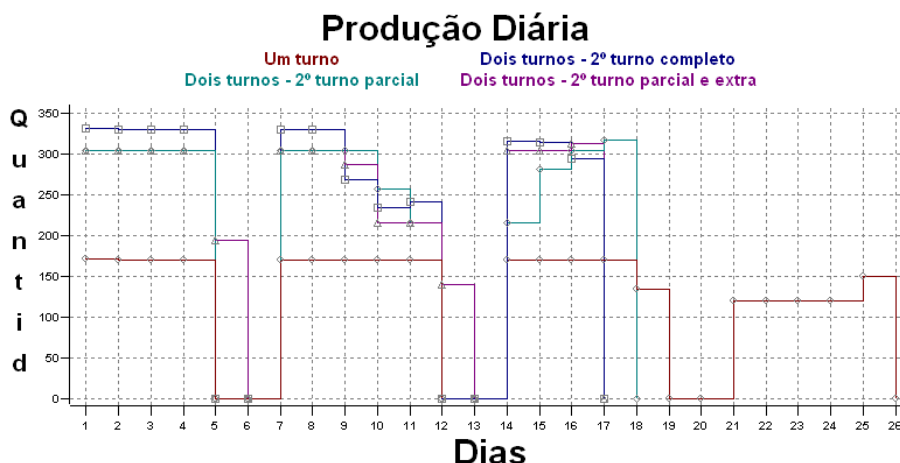


Gráfico 7 – Produção diária do modelo de desmembramento de operações para as quatro alternativas de horários

	Situação 1	Situação 2	Situação 3	Situação 4
Peças produzidas	3114	4000	4000	4000
Peças em processo	886	0	0	0
Lead-time médio	7871,53	5062,69	6459,36	5556,05

Tabela 6 – Resumo dos resultados para o modelo de desmembramento de operações

A Tabela 6 resume as informações de produção, peças em processo e *lead-time* médio para as quatro situações do cenário 2. A situação 2 atendeu a demanda de 4000 peças em 17 dias o que permite a fabricação entre 1500 e 2100 armazéns adicionais nos 6 dias úteis remanescentes. As situações 3 e 4 atendem a demanda de 4000 peças em 18 dias, sendo a produtividade similar em ambos os casos, a principal diferença é o *lead-time* médio. No Gráfico 8, pode-se observar a redução das peças em processo em comparação com cenário 1. Esta redução é influenciada pelo *lead-time* menor.

12. Conclusões

O regime de trabalho do grupo 1 praticado na empresa é o modelado pela situação 4 (dois turnos mais horas extras) onde se observa a dificuldade no atendimento da programação preestabelecida. Com a simulação, verificou-se que se aumentando o número de operadores do segundo turno (situação 2) cumpre-se a programação mensal em um prazo menor e que seria possível produzir 5000 unidades por mês com o acréscimo de quatro operadores, mas sem a necessidade de novas máquinas.

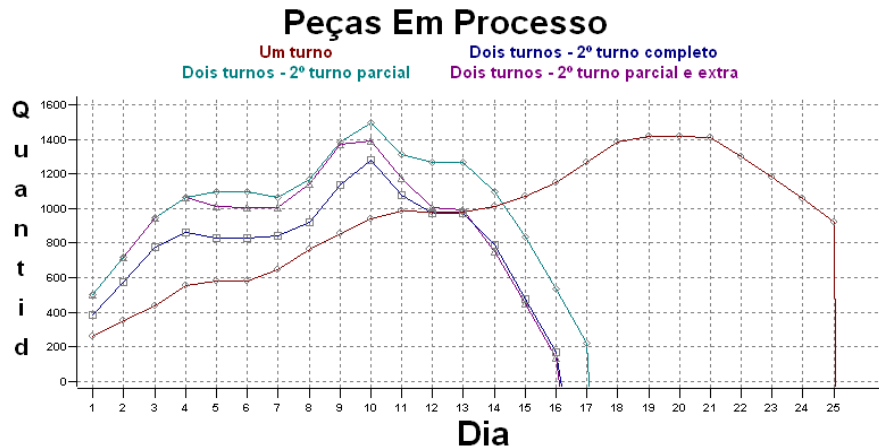


Gráfico 8 – Peças em processo do modelo de desmembramento de operações para as quatro alternativas de horários

Um estudo de viabilidade econômica faz-se necessário para determinar a melhor opção para o atendimento da demanda de 5000 peças por mês, pois se comparando os resultados obtidos nos cenários 1 e 2 para a situação de segundo turno em todas as operações observa-se que no cenário 2 a demanda foi atendida um dia a menos que no cenário 1. Contudo, o cenário 2 utiliza duas máquinas a mais que o cenário 1 e que, na situação do segundo turno completo, há a necessidade de mais dois operadores para cada turno.

Algumas oportunidades de melhorias desse estudo são levantar mais tempos de ciclo para fazer um modelo estocástico, refinar os dados coletados separando-os em tempo de máquina, tempo de homem e tempo de homem-máquina e inserir a etapa de inspeção das operações.

Apesar das observações acima, o estudo mostrou-se válido, pois mostrou o potencial da simulação como uma ferramenta de apoio à decisão e permitiu um maior conhecimento do funcionamento e organização do grupo bem como das principais dificuldades para o aumento da produtividade.

13. Referências Bibliográficas

- ANDRADE, E. L. *Introdução à Pesquisa Operacional*. Livros Técnicos e Científicos, 1989. p.156-171.
- CARRIE, A. *Simulation of Manufacturing Systems*, 1ª ed. New York: John Wiley and Sons, 1988. 418 p.
- HARREL, C.; GHOSH, B.K.; BOWDEN, R. *Simulation Using Promodel*. 3ª ed. Boston: McGraw-Hill, 2000.
- JONHSON, L. A.; MONTGOMERY, D. C. *Operations research in production planning, scheduling, and inventory control*. New York: John Wiley & Sons, 1974. 525 p.
- LAW, A. M.; KELTON, W. D. *Simulation modeling and analysis*. Boston: McGraw-Hill, 1982.
- LEAL, F. *Um diagnóstico do processo de atendimento a clientes em uma agência bancária através de mapeamento do processo e simulação computacional*. Itajubá. 223p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Itajubá, 2003.
- MOREIRA, C. M. *Estratégias de reposição de estoques em supermercados: avaliação por meio de simulação*. Florianópolis. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.
- O'KANE, J. F.; SPENCELEY, J. R.; TAYLOR, R. Simulation as an essential tool for advanced manufacturing technology problems. *Journal of Materials Processing Technology* v.107, 2000. p.412-424.
- PEREIRA, I. C. *Proposta de sistematização da simulação para fabricação em lotes*. Itajubá. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Itajubá, 2000.