

MODELO DE SIMULAÇÃO COM OTIMIZAÇÃO PARA ANÁLISE DO PRAZO DE ENTREGA EM UM PROCESSO JOB SHOP

Jose Elias de Oliveira¹

João Jose de Assis Rangel²

Dalessandro Soares Vianna³

RESUMO: O artigo apresenta uma análise de um processo *Job Shop* utilizando um modelo de simulação a eventos discretos combinado com um algoritmo de otimização. Foram construídos modelos de simulação e otimização de um sistema hipotético com características típicas de processos com diversidades de produtos e lotes reduzidos, em um leiaute funcional. Os Cenários para simulação foram elaborados com o intuito de demonstrar diferentes situações em que o sistema pode estar sujeito sob uma situação normal de regime de trabalho. Como resultado pôde-se visualizar o passo a passo da posição das peças no processo produtivo na busca, principalmente, por definir o melhor prazo de entrega das respectivas peças.

Palavras-chave: Simulação. Otimização. *Job Shop*.

1 INTRODUÇÃO

O objetivo deste trabalho é apresentar uma análise de um processo *Job Shop* utilizando um modelo de simulação a eventos discretos combinado com um algoritmo de otimização. Os processos *Job Shop* caracterizam-se por trabalharem sob encomenda, com diversidades de produtos e lotes reduzidos. Consiste em um conjunto de trabalhos (*jobs*) a serem processados em um grupo de máquinas. Cada *job* é composto de operações que devem ser processadas orientadas por um roteiro. Para cada operação a ser executada é definida uma máquina com tempo previsto de processamento. Normalmente o objetivo é de minimizar o tempo total de produção (BROWN, 1995). Este método visa introduzir peças na produção sem causar atrasos em outras. Contudo, a pretensão é que se possam definir melhor os prazos de entrega das peças a serem fornecidas a um cliente. A simulação computacional e os algoritmos de

¹ MSc, Departamento de Ensino, CEFET (Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais), Nova Suíça - Belo Horizonte - Minas Gerais, Brasil. E-mail: joseeo@leopoldina.cefetmg.br.

² DSc, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Candido Mendes - Campos (UCAM - Campos), Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, Brasil. E-mail: joao@ucam-campos.br.

³ DSc, Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Fluminense (UFF - PURO), Rio das Ostras - Rio de Janeiro, Brasil. E-mail: dalessandro@ucam-campos.br.

otimização se mostram técnicas eficazes neste contexto, em busca de minimizar o *lead time* e maximizar o fluxo de produção (CHEN, 2007).

Segundo Banks et al. (2005), simulação computacional é a representação de um sistema real através de um modelo utilizando o computador, com a vantagem de poder visualizar o sistema e implementar mudanças minimizando gastos e tempo. A utilização conjunta da simulação e de métodos de otimização é relativamente recente, sendo mais difundida com a vinculação por parte dos fornecedores, de pacotes de simulação de softwares de otimização. Na última década, conforme demonstrados nos trabalhos de Fu (2002), Chen et al. (2010); Hao e Shen (2008) e outros, foram desenvolvidos softwares com capacidade de integrar essas duas áreas, simulação e otimização.

As próximas seções estão organizadas da seguinte forma. A seção 2 a seguir apresenta a descrição do leiaute funcional para processo *Job Shop*. Já a seção 3 apresenta a integração de modelos de otimização e simulação e a seção 4 apresenta a descrição física do sistema simulado. Nas seções 5 e 6 são apresentados os modelos de otimização e simulação, respectivamente. Na seção 7 são apresentados os experimentos e análise dos resultados e, por último, na seção 8 as conclusões do artigo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este item apresenta os tipos de leiaute normalmente utilizados em sistemas de produção e descreve o esquema de funcionamento do modelo de simulação combinado com o modelo de otimização utilizado neste trabalho.

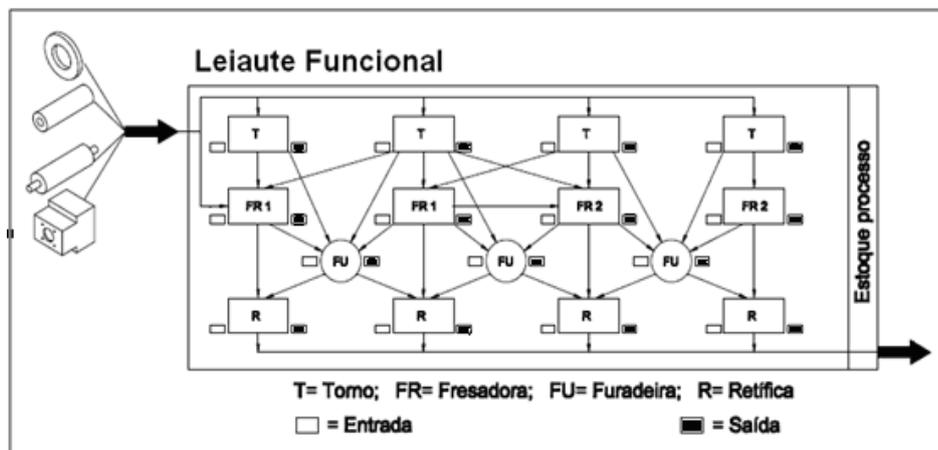
2.1 Leiaute Funcional para Processo *Job Shop*

Um projeto detalhado de leiaute tem como objetivo a localização física de todas as instalações, equipamentos, máquinas e pessoal, além do espaço a ser alocado para cada centro de trabalho e as respectivas tarefas que serão executadas. Em sistema de produção são conhecidos quatro tipos distintos de leiaute (NARDINE, 1999):

- Leiaute funcional ou por processo (*job shop*),
- Leiaute em linha ou por produto (*flow shop*),
- Leiaute de posição fixa (*project shop*),
- Leiaute celular.

No caso específico de processos *Job Shop*, o leiaute recomendado e que atende melhor ao sistema é o Leiaute Funcional, descrito na Figura 1.

Figura 1 – Exemplo de leiaute funcional



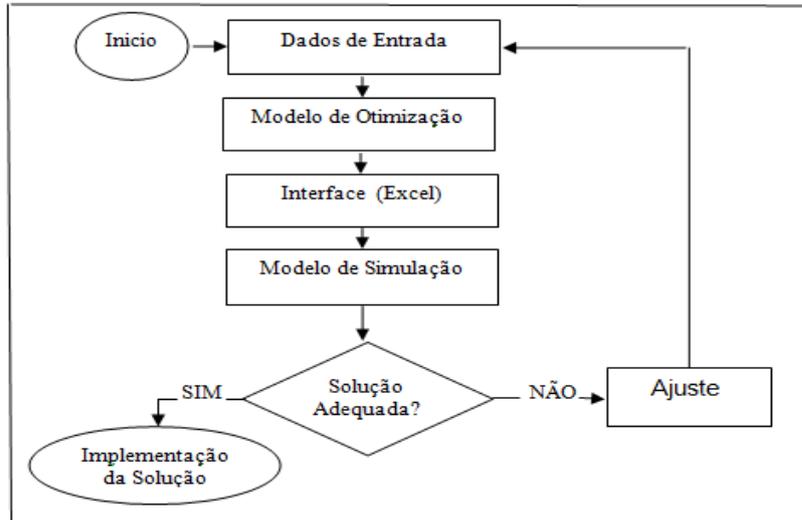
O Leiaute funcional, também chamado de *leiaute de processo* ou de *job shop* consiste em um tipo de arranjo físico no qual todos os equipamentos ou funções similares são posicionados numa mesma área para facilitar o fluxo. No exemplo da Figura 1, todos os Tornos, Fresadoras, Furadeiras e Retíficas estão em uma mesma área. Então, uma peça que está sendo executada se desloca, conforme descrito na sequência estabelecida de operações (roteiro) de área em área, onde as máquinas especificadas para cada operação estão localizadas. Esse arranjo físico proporciona ao sistema produtivo uma flexibilidade para adaptar-se a vários produtos. Também, como ocorre na maioria dos casos, requerendo máquinas de custos menores.

2.2 Integração dos Modelos de Otimização e Simulação

A Figura 2 descreve o esquema de funcionamento do modelo de simulação combinado com o modelo de otimização utilizado neste trabalho. O início do processo ocorre a partir da alimentação dos dados de entrada do sistema para o modelo de otimização. Um arquivo em planilha Excel foi construído para fazer a interface entre os modelos de simulação e otimização. O objetivo é alcançado quando se consegue introduzir as peças na produção sem causar atrasos em outras, definindo melhor os prazos de entrega. Os resultados são gerados após executar a simulação. Uma vez construídos os Modelos de Simulação e Otimização, a alteração dos mesmos só acontecerá caso haja modificação no leiaute. Com o auxílio da simulação, possibilitando observar, passo a passo, o caminho das peças pelas máquinas,

permita melhor operacionalização na solução de problemas que possam ocorrer (PEREIRA, 2000).

Figura 2 – Fluxograma do método simulação/otimização usando interface de integração em Excel



Os passos para o funcionamento da simulação e otimização são os seguintes:

1º passo – Informar o momento (tempo) e o tipo da máquina em que a peça pode ser iniciada. Essas informações são registradas nos “Dados de Entrada”.

2º passo – O Modelo de Otimização recebe esses dados e otimiza o melhor fluxo das peças nas máquinas objetivando uma melhora no *Lead Time*.

3º passo – O Modelo de Otimização, fornece dados otimizados ao arquivo da planilha Excel.

4º passo – O Modelo de Simulação lê o arquivo Excel, executa a simulação, gera resultados que são analisados pelo operador do sistema.

5º passo – Verifica se o resultado atende ao objetivo (Prazo de Entrega). Caso o resultado não seja satisfatório fazem-se ajustes nos registros de “Dados de Entrada” em busca de melhor solução.

6º passo – Repete-se o 2º, 3º, 4º e 5º passos. Os resultados são comparados com os anteriores.

7º passo – Repete-se o 6º até que os resultados fornecidos pelo Modelo de Simulação sejam próximos do satisfatório.

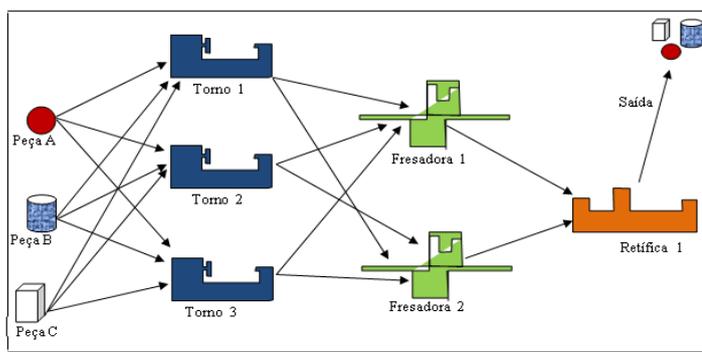
Vale notar que a solução adequada é aquela que melhor atender aos prazos de entrega das peças que foram ou serão tratados com o cliente. Ou ainda, os valores registrados nos

“Dados de Entrada” podem ser modificados e inseridos pelo operador, otimizados e simulados pelos respectivos modelos, em busca de prazos de entrega que atendam ao interesse do cliente.

3 DESCRIÇÃO FÍSICA DO SISTEMA SIMULADO

Para este caso específico foi considerada a fabricação de três tipos diferentes de peças hipotéticas, que receberam a denominação de Peça “A”, Peça “B” e Peça “C”. O sistema destinado a esse trabalho foi configurado em um leiaute da seguinte forma: Torno 1, Torno 2 e Torno 3; Fresadora 1 e Fresadora 2; Retífica 1, conforme representado na Figura 3.

Figura 3 – Sistema para fabricação das peças



A usinagem das peças para as respectivas montagens de uma suposta carcaça obedeceu a um roteiro que indica em quais máquinas as peças poderão ser trabalhadas. Também, informa a sequência a ser seguida, ou seja, qual é o próximo trabalho e em que máquina deve ser feito. Seguindo o registro do roteiro encontra-se a informação do tempo, em minutos, destinado a usinagem de cada peça. A informação quanto ao início da usinagem de cada tipo de peça em cada máquina especificada fica registrado na tabela de “Dados de Entrada”. O sistema simulado busca mostrar a situação real da manufatura em processo *job shop*. Portanto, não se pode iniciar um tipo de peça, a qualquer momento, em uma máquina. Esta máquina, nesse momento, pode estar ocupada com outro tipo de peça. Vale ressaltar que cada conjunto de Tornos e Fresadoras possuem capacidades iguais de trabalho.

Reverendo os processos que estão em trâmite pela produção tem-se a informação dos tempos de ocupação das máquinas. Dessa forma é possível informar ao Modelo de Otimização o momento (minutos) em que a máquina está disponível para executar as novas operações especificadas. De posse dessas informações é feito o escalonamento otimizado do processo.

4 MODELO DE OTIMIZAÇÃO

O modelo de otimização foi elaborado de forma que as tarefas fossem escalonadas nas máquinas utilizando uma versão modificada do melhor algoritmo, AG+RC+ILS, desenvolvido na dissertação de Igor Sinder Franco (2010), cujo título é “Algoritmos híbridos para a resolução do problema de *job shop* flexível”. Nela foram desenvolvidos diferentes algoritmos para o problema de *job shop* flexível que combinavam diferentes estratégias: Algoritmos Genéticos; Reconexão por Caminhos; GRASP; e ILS.

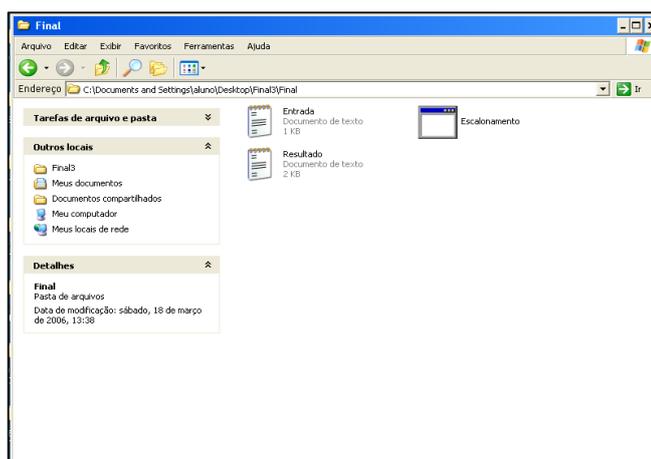
No problema de *job shop* flexível existem um conjunto de N *jobs* que devem ser processados por um conjunto M máquinas. Cada operação a ser realizada é representada por uma tarefa e o conjunto específico de operações que são processadas de acordo com uma ordem de precedência preestabelecida é chamado de “*Job*”. Existe um subconjunto de máquinas que podem executar cada tarefa e o número de tarefas por *job* pode ser distinto (SILVA, 2005).

O algoritmo AG+RC+ILS, proposto por Igor S. Franco em sua dissertação foi modificado no intuito de permitir que:

- As máquinas já pudessem começar com alguma carga de trabalho;
- As tarefas pudessem ser processadas em bloco.

Como se pode observar na Figura 4, o modelo apresenta na tela um ícone de “Entrada”, de “Escalonamento” e de “Resultado” para facilitar a operação do sistema.

Figura 4 – Tela de início da execução do Modelo de Otimização



A Figura 5 mostra uma tela onde estão os dados que o modelo de otimização utiliza para fazer o escalonamento. O “Número de tipos de peças” está registrado o valor 3. São as

peças A, B e C. A “Quantidade de cada tipo de peça” estão registrados os valores 10, 10 e 10. São os três lotes de peças com 10 peças cada um. O “Número de Tarefas por peça” está registrado o valor 3. São três tarefas diferentes executadas em cada peça – a primeira tarefa no Torno, a segunda tarefa na Fresa e a terceira tarefa na Retífica. O “Numero de Tarefas” está registrado o valor 9. São três tipos de peças multiplicadas por três tarefas.

O “Numero de Tipos de Máquinas” está registrado o valor 3. São três tipos de máquinas diferentes - Torno, Fresa e Retífica. A “Quantidade total de máquinas” está registrada com o valor 6. São 3 Tornos, 2 Fresas e 1 Retífica. A “Quantidade de Máquinas de cada tipo” está registrada com os valores 3 2 1. São os três Tornos, 2 Fresas e 1 Retífica. O “Tempo Tarefa por tipo de máquina” estão registrados os valores 30 40 25 na primeira linha, 65 80 20 na segunda linha e na terceira linha 85 75 15. São os valores correspondentes aos tempos de execução da usinagem de cada tipo de peça, em cada máquina.

A primeira coluna representa a peça “A” com seus respectivos tempos de usinagem, sendo: 30 minutos do Torno, 40 minutos da Fresa e 25 minutos da Retífica. A segunda coluna representa a peça “B” com seus respectivos tempos de usinagem, sendo: 65 minutos do Torno, 80 minutos da Fresa e 20 minutos da Retífica. A terceira coluna representa a peça “C” com seus respectivos tempos de usinagem, sendo: 85 minutos do Torno, 75 minutos da Fresa e 15 minutos da Retífica.

Figura 5 – Dados de entrada fornecidos ao Modelo de Otimização referente ao “Cenário 1”



```
//Numero de tipos de pecas
3
//Quantidade de cada tipo de peça
10 10 10
//Numero de Tarefas por peça
3
//Numero de Tarefas
9
//Numero de Tipos de Máquinas
3
//Quantidade total de máquinas
6
//Quantidade de Máquinas de cada tipo
3 2 1
//Tempo Tarefa por tipo maquina
30 40 25
65 80 20
85 75 15
//Tempo de ocupação de cada máquina
0 40 0 30 0 50
```

O “Tempo de ocupação de cada máquina” estão registrados os valores 0 40 0 30 0 50. São os valores correspondentes ao momento, em minutos, em que as máquinas estão

disponíveis para iniciarem o trabalho de usinagem. O primeiro tempo, o tempo 0, informa que o Torno1 está disponível. O segundo tempo, o tempo 40, informa que o Torno2 só estará disponível a partir de 40 minutos do tempo zero. O terceiro tempo, o tempo 0, informa que o Torno3 está disponível. O quarto tempo, o tempo 30, informa que o Fresal só estará disponível a partir de 30 minutos do tempo zero.

O quinto tempo, o tempo 0, informa que o Fresa2 está disponível e o sexto tempo, o tempo 50, informa que o Retifical só estará disponível a partir de 50 minutos do tempo zero. Esse modelo foi executado de forma que os valores registrados na “Quantidade de cada tipo de peça” pudessem ser alterados pelo operador. Dessa forma, os lotes de cada um dos três tipos de peças podem ser modificados. Também os “Tempo de ocupação de cada máquina” podem ser alterados pelo operador. Os demais itens não podem ser alterados.

A Figura 6 apresenta o “resultado” do escalonamento após salvar os dados e executar o comando “Escalonamento”.

Figura 6 – Tela exibindo o Resultado do escalonamento

Peça	Máquina	Início
Peça B	Torno 1	0
Peça B	Fresa 2	65
Peça A	Torno 3	0
Peça C	Torno 2	40
Peça A	Fresa 1	30
Peça C	Fresa 1	430
Peça A	Retif 1	70
Peça B	Retif 1	455
Peça C	Retif 1	885

Tempo A: 455
Tempo B: 885
Tempo C: 1195
Tempo total: 1195

Torno 1: |BBBBBBBBBB|BBBBBBBBBB|BBBBBBBBBB|BBBBBBBBBB|BBBBBBBBBB|BBBBBBBBBB|BBBBB

Torno 2: |CCCCCCCCCCCC|CCCCCCCCCCCC|CCCCCCCCCCCC|CCCCCCCCCCCC|CCCCCCCCCCCC|CCCCC

Torno 3: |AAAA|AAAA|AAAA|AAAA|AAAA|AAAA|AAAA|AAAA|AAAA|AAAA|AAAA

Fresa 1: |AAAAAA|AAAAAA|AAAAAA|AAAAAA|AAAAAA|AAAAAA|AAAAAA|AAAAAA|AAAAAA|AAAAA

Fresa 2: |BBBBBBBBBBBBBB|BBBBBBBBBBBBBB|BBBBBBBBBBBBBB|BBBBBBBBBBBBBB|BBBBBB

Neste momento, aloca a peça B no Torno1, no início 0 (Tempo zero), para iniciar sua primeira usinagem; peça B na Fresa 2, após 65 minutos do tempo zero, para sua segunda usinagem; peça A no Torno 3, no início 0 (Tempo zero), para iniciar sua primeira usinagem; peça C, no Torno 2, após 40 minutos do tempo zero, para sua primeira usinagem; peça A na Fresa1, após 30 minutos do tempo zero, para sua segunda usinagem; peça C na Fresa 1, após 430 minutos do tempo zero, para sua segunda usinagem; peça A na Retífica 1, após 70 minutos do tempo zero, para sua terceira e última usinagem; peça B na Retífica 1, após 455

minutos do tempo zero, para sua terceira e última usinagem e a peça C na Retífica 1, após 885 minutos do tempo zero, para sua terceira e última usinagem.

5 MODELO DE SIMULAÇÃO

O modelo de simulação computacional foi desenvolvido seguindo a metodologia proposta por FREITAS FILHO (2008). Na sequência, os passos são: formulação e análise do problema; planejamento do projeto; formulação do modelo conceitual; coleta de macro informações e dados; tradução do modelo; verificação e validação; projeto experimental das melhores soluções; documentação e apresentação dos resultados. Este modelo foi traduzido para o software Arena[®]12 para realização das simulações computacionais (KELTON, 2007). O modelo conceitual do objeto desse estudo é baseado na técnica IDEF-SIM, (LEAL 2008) e se encontra no Apêndice I e II.

O sistema opera da seguinte forma: O primeiro posto, por onde as peças passam é a recepção do material que chega na entrada do modelo. Cada tipo de peça chega em lotes de 10 unidades (E1, peça “A”; E2, peça “B” e E3 peça “C”). Após a chegada dos lotes, eles são transportados para um local próximo aos recursos R1 (Torno 1), R2 (Torno 2) e R3 (Torno 3) atendendo as funções F7 (controlar entrada peça A no Torno), F8 (controlar entrada peça “B” no Torno) e F9 (controlar entrada peça C no Torno). Em seguida os controles C1 (fornecimento peça A para um dos três Tornos), C2 (fornecimento peça B para um dos três Tornos) e C3 (fornecimento peça C para um dos três Tornos) decidem a qual recurso enviar as peças, R1 (Torno 1), R2 (Torno 2) ou R3 (Torno 3).

Obedecendo às decisões tomadas pelo Modelo de Otimização as peças seguem pelas funções F1 (processo de torneamento no torno1. Peça “A”, 30min.; Peça “B”, 65min. e Peça “C”, 85min.), F2 (processo de torneamento no torno 2. Peça “A”, 30min.; Peça “B”, 65min. e Peça “C”, 85min.) e F3 (processo de torneamento no torno 3. Peça “A”, 30min.; Peça “B”, 65min. e Peça “C”, 85min.). Seguindo o fluxo, o processo obedece às funções F10 (controlar entrada peça A na Fresadora), F11 (controlar entrada peça B na Fresadora) e F12 (controlar entrada peça C na Fresadora).

Os próximos passos são os controles C4 (fornecimento peça “A” para uma das duas Fresadoras), C5 (fornecimento peça “B” para uma das duas Fresadoras) e C6 (fornecimento peça “C” para uma das duas Fresadoras) decidem a qual recurso enviar as peças, R4 (Fresadora1) ou R5 (Fresadora 2).

Mais uma vez, após decisão do Modelo de Otimização, as peças seguem pelas funções F4 (processo de fresamento na Fresadora 1. Peça “A”, 40min.; Peça “B”, 80min. e Peça “C”, 75min.) e F5 (processo de Fresamento na fresadora 2. Peça “A”, 40min.; Peça “B”, 80min. e Peça “C”, 75 min.). Faltando passar pelo processo de retífica, as funções F13 (controlar o fornecimento de peça “A” para Retífica), F14 (controlar o fornecimento de peça “B” para Retífica) e F15 (controlar o fornecimento de peça “C” para Retífica) são ativadas. O recurso R6 (Retífica1) executa a função F6 (processo de retificação na Retífica1. Peça “A”, 25min.; Peça “B”, 20min. e Peça “C”, 75 min.). Após todo o processo descrito, as peças são enviadas para o setor de Despacho onde saem para serem entregues aos clientes externos, ou em caso de fornecimento de Bombas completas, a clientes internos.

6 EXPERIMENTOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A Tabela 1 apresenta a descrição dos Cenários elaborados para os experimentos de simulação. Os Cenários 1, 2 e 3 foram criados com o intuito de demonstrar diferentes situações em que o sistema poderá estar sujeito sob uma situação normal de regime de trabalho. O tempo zero significa que no momento em que o lote de peça é liberado para ser executado, a máquina está pronta para iniciar o serviço imediatamente.

Tabela 1 – Cenários de ocupação das máquinas no tempo zero

Cenários	Momento (em min.) da disponibilidade do início do processo de fabricação em cada máquina					
	Torno			Fresadora		Retífica
	1	2	3	1	2	1
1	0	40	0	30	0	50
2	150	0	50	0	150	0
3	60	0	0	40	30	90

No Cenário 1 as máquinas Torno 2, Fresadora 1 e Retífica 1 estarão ocupadas com outras peças. O Torno 2 só estará disponível para uso em um dos lotes de peça propostos após 40 minutos. A Fresadora 1 só estará disponível para uso em um dos lotes de peça propostos após 30 minutos. A Retífica 1 só estará disponível para uso em um dos lotes de peça propostos após 50 minutos. As demais máquinas estarão disponíveis no tempo zero.

No Cenário 2, o Torno 1 só estará disponível após 150 minutos do tempo zero e a Fresadora 2 após 150 minutos. As demais máquinas estarão liberadas no tempo zero.

No Cenário 3, o Torno 1, só estará disponível, após 60 minutos do tempo zero. A Fresadora 1 e 2 só estarão disponíveis, consecutivamente, após 40 e 30 minutos. A Retífica 1 após 90 minutos.

Após otimizar o fluxo das peças pelos postos de trabalho, considerando as que já estão passando pelo processo, fica registrado o tempo de início de disponibilidade de cada máquina. Na Tabela 2 encontram-se os “tempos de processos” que são fornecidos ao modelo de otimização.

Tabela 2 – Dados de Entrada fornecidos ao Modelo de Otimização

Peça	Tempo de processo(min.)		
	Torno	Fresadora	Retífica
A	30	40	25
B	65	80	20
C	85	75	15

Como se pode observar, as Peças “A”, “B” e “C”, terão sua primeira operação de usinagem no Torno, podendo ser 1, 2 ou 3, com tempo previsto de 30 minutos para peça “A”, 65 minutos para peça “B” e 85 minutos para peça “C”. A segunda operação de usinagem, será na Fresadora 1 ou 2, com tempo previsto de 40 minutos para Peça “A”, 80 minutos para peça “B” e 75 minutos para peça “C”. A terceira operação de usinagem, será na Retífica 1, com tempo previsto de 25 minutos para peça “A”, 20 minutos para peça “B” e 15 minutos para peça “C”.

A Tabela 3 mostra os resultados após a otimização do escalonamento do fluxo conforme o Cenário 1 da Tabela 6.

Tabela 3 – Resultados otimizados conforme Cenário 1

Peças	Início (momento em min.)					
	Torno			Fresadora		Retífica
	1	2	3	1	2	1
A			0	30		70
B	0				65	455
C		40		430		885

A peça “A” teve determinado o seu primeiro processo de fabricação no Torno 3. Como o lote é de 10 peças, o tempo gasto para cada peça é de 30 minutos, assim, esse torno só será liberado após 300 minutos. Porém, tão logo a primeira peça ficou pronta, a Fresadora iniciou processo de fabricação, ou seja, após 30 minutos devido a sua disponibilidade. Então a Fresadora 1 estará liberada após 430 minutos do tempo zero. Apesar da Retífica 1 estar disponível após 50 minutos, a Peça “A” teve seu início do processo de fabricação após 70

minutos porque é o momento em que a Fresadora1 libera a primeira peça. “A” Retífrica1 permanece 10 minutos ociosa aguardando a chegada da peça.

Para a Peça “B” o início do processo de fabricação iniciou no Torno 1 no tempo zero, somente sendo liberado após 650 minutos. A Fresadora 2 como estava livre no tempo zero, iniciou seu processo de fabricação no tempo 65 minutos, que é o momento em que o torno 1 libera a primeira peça. Logo em seguida, no momento 455 minutos, após a Retífrica1 liberar as Peças “A”, inicia-se a Peça “B”. Observa-se que a Retífrica1 ficou ociosa 135 minutos em tempos alternados, aguardando as Peças “A” ficarem prontas na Fresadora1.

A Peça “C” teve seu primeiro processo de fabricação no Torno 2 no momento 40 minutos. Momento esse, que o torno2 passou a estar liberado. Em seguida, como a Fresadora1 foi liberada antes da Fresadora 2, a Peça “C” foi alocada na Fresadora 2 no momento 430 minutos. Na sequência a Peça “C” teve seu início na Retífrica1 aos 885 minutos.

Observa-se que a Retífrica1 ficou ociosa 230 minutos em tempos alternados, aguardando as Peças B ficarem prontas na Fresadora 2. A Tabela 4, pela mesma forma da Tabela 3, apresenta os tempos de início de fabricação de cada lote de peças conforme Cenário 2.

Tabela 4 – Resultados otimizados conforme Cenário 2

Peças	Início (momento em min.)					
	Torno			Fresadora		Retífrica
	1	2	3	1	2	1
A		0		30		70
B	150				215	455
C			50	430		1035

A Peça “A” teve seu primeiro processo de fabricação no Torno2, no início de tempo zero, passando para a Fresadora1 no início de tempo 30 minutos e pela Retífrica1 no momento 70 minutos. A Peça “B” teve seu primeiro processo de fabricação no Torno1, no início de tempo 150 minutos, passando para a Fresadora2 no início de tempo 215 minutos e pela Retífrica1 no momento 455 minutos. A Peça “C” iniciou-se no Torno3, no início de tempo 50 minutos, passou para a Fresadora1 no momento 430 minutos e em seguida para a Retífrica1 no momento 1035 minutos. Da mesma forma, a Tabela 5, após toda descrição das anteriores apresenta-se o resultado do escalonamento otimizado do fluxo das peças e máquinas conforme Cenário 3.

Tabela 5 – Resultados otimizados conforme Cenário 3

Peças	Início (momento em min.)					
	Torno			Fresadora		Retífrica
	1	2	3	1	2	1

	Início (momento em min.)					
A		0			30	90
B	60			125		455
C			0		430	945

Vale notar que as peças uma vez iniciadas na máquina, vão para o processo até que termine todo o lote. As peças são diferentes e apesar de não ter sido computado o tempo de preparação de máquina foi considerada uma preparação para cada lote.

Para os testes de simulação consideraram-se os três cenários. Os valores de cada Cenário são informados à interface em Excel, conforme Tabela 6. O Modelo de Simulação faz a leitura e simula fornecendo informações necessárias quanto ao comportamento das peças ao passar pelo sistema.

Tabela 6 – Cenário 1 na interface para simulação

Interface para Montagem de Carcaças Cenário 1			
Peças	Torno	Início (min)	Processo (min)
A	3	0	30
B	1	0	65
C	2	40	85
Peças	Fresa	Início (min)	Processo (min)
A	1	30	40
B	2	65	80
C	1	430	75
Peças	Retífica	Início (min)	Processo (min)
A	1	70	25
B	1	455	20
C	1	885	15

Nessa tabela, a coluna Peças representa os três tipos diferentes de peças que serão fabricadas, sendo Peças “A”, “B” e “C”. A coluna das máquinas que são o Torno, a Fresa e a Retífica está o número da máquina que o modelo de otimização alocou correspondente a cada tipo de peça. Na coluna Início (min) está registrado o tempo, em minutos, de início do processo de fabricação, referente à máquina alocada e o tipo de peça. Representa o início do tempo em que a máquina está liberada para executar uma operação. A coluna Processo (min) apresenta o tempo, em minutos, de execução da peça em referência na máquina alocada. Portanto, conforme o Cenário 1, o lote referente a Peça “A”, composto por 10 unidades, tem o início do processo de fabricação no Torno3, no tempo zero, levando um tempo de 30 minutos para executar cada peça. Após terminar a primeira peça, passa para a Fresadora1, que só pode iniciar o processo de fabricação, dessa peça, após o tempo de 30 minutos. O processo de fabricação, para cada peça, leva o tempo de 40 minutos. Finalmente inicia o processo de

fabricação na Retífica1, no tempo 70 minutos, apesar da retífica estar liberada no tempo 50 minutos, levando 25 minutos para processar cada peça.

O lote referente à Peça “B”, composto por 10 unidades, tem o início do processo de fabricação no Torno1, no tempo zero, levando um tempo de 65 minutos para executar cada peça. Após terminar a primeira peça, passa para a Fresadora2, que só pode iniciar o processo de fabricação, dessa peça, após o tempo de 65 minutos. O processo de fabricação, para cada peça, leva o tempo de 80 minutos. Finalmente inicia o processo de fabricação na Retífica1, no tempo 455 minutos, levando 20 minutos para usinar cada peça.

O lote referente à Peça “C”, composto por 10 unidades, tem o início do processo de fabricação no Torno2, no tempo 40 minutos, levando um tempo de 85 minutos para executar cada peça. Após terminar a primeira peça, passa para a Fresadora1, que só pode iniciar o processo de fabricação, dessa peça, após o tempo de 430 minutos. O processo de fabricação, para cada peça, leva o tempo de 75 minutos. Finalmente inicia o processo de fabricação na Retífica1, no tempo 885 minutos, levando 15 minutos para usinar cada peça.

Na Tabela 7, referente ao Cenário 2, não é diferente, segue o mesmo procedimento da Tabela 6. A Peça A inicia o processo de fabricação no Torno 2, no tempo zero, levando 30 minutos por peça. A seguir passa para Fresa1, no tempo 30 minutos, levando 40 minutos por peça. Por fim, vai para Retífica1, no tempo 70 minutos, levando 25 minutos por peça. A Peça B inicia o processo de fabricação no Torno 1, no tempo 150 minutos, levando 65 minutos por peça. A seguir passa para Fresa2, no tempo 215 minutos, levando 80 minutos por peça. Por fim, vai para Retífica1, no tempo 455 minutos, levando 20 minutos por peça.

Tabela 7 – Cenário 2 na interface para simulação

Interface para Montagem de Carcaças Cenário 2			
Peças	Torno	Início (min)	Processo (min)
A	2	0	30
B	1	150	65
C	3	50	85
Peças	Fresa	Início (min)	Processo (min)
A	1	30	40
B	2	215	80
C	1	430	75
Peças	Retífica	Início (min)	Processo (min)
A	1	70	25
B	1	455	20
C	1	1035	15

A Peça C inicia o processo de fabricação no Torno 3, no tempo 50 minutos, levando 85 minutos por peça. A seguir passa para Fresa1, no tempo 430 minutos, levando 75 minutos por peça. Por fim, vai para Retífica 1, no tempo 1035 minutos, levando 15 minutos por peça.

Na Tabela 8, referente ao Cenário 3 a Peça A inicia o processo de fabricação no Torno 2, no tempo zero, levando 30 minutos por peça. A seguir passa para Fresa 2, no tempo 30 minutos, levando 40 minutos por peça. Por fim, vai para Retífica 1, no tempo 90 minutos, levando 25 minutos por peça. A Peça B inicia o processo de fabricação no Torno 1, no tempo 60 minutos, levando 65 minutos por peça. A seguir passa para Fresa 1, no tempo 125 minutos, levando 80 minutos por peça. Por fim, vai para Retífica1, no tempo 455 minutos, levando 20 minutos por peça. A Peça C inicia o processo de fabricação no Torno 3, no tempo zero, levando 85 minutos por peça. A seguir passa para Fresa 2, no tempo 430 minutos, levando 75 minutos por peça. Por fim, vai para Retífica 1, no tempo 945 minutos, levando 15 minutos por peça.

Tabela 8 – Cenário 3 na interface para simulação

Interface para Montagem de Carcaças Cenário 3			
Peças	Torno	Início (min)	Processo (min)
A	2	0	30
B	1	60	65
C	3	0	85
Peças	Fresa	Início (min)	Processo (min)
A	2	30	40
B	1	125	80
C	2	430	75
Peças	Retífica	Início (min)	Processo (min)
A	1	90	25
B	1	455	20
C	1	945	15

Os dados da interface, gerados pelo Modelo de Otimização, são lidos pelo Modelo de Simulação fornecendo resultados que estão registrados na Tabela 9. Conhecendo os resultados é possível fornecer o prazo de entrega de cada tipo de peça, ao cliente.

Tabela 9 – Resultado do final do processo

Cenário	Peça	Prazo de Entrega (minutos)
1	A	795,27
	B	1248,57
	C	1229,08
	A	542,40

Cenário	Peça	Prazo de Entrega (minutos)
2	B	1080,62
	C	1206,88
3	A	489,88
	B	986,24
	C	1269,85

Considerando que a empresa tem um jornada de trabalho de 40 horas semanais, analisando o resultado da simulação na Tabela 9, pode-se definir os prazos de entrega de cada tipo de peça. No Cenário 1 a Peça “A” estará pronta para entrega ou montagem após 13,25 horas de trabalho ou 1 dia inteiro, mais 5 horas e 15 minutos do outro dia. A Peça “B” estará pronta para entrega ou montagem após 20,80 horas de trabalho ou 2 dias inteiro, mais 4 horas e 48 minutos do outro dia. A Peça “C” estará pronta para entrega ou montagem após 20,48 horas de trabalho ou 2 dias inteiro, mais 4 horas e 29 minutos do outro dia.

No Cenário 2 a Peça “A” estará pronta para entrega ou montagem após 9,04 horas de trabalho ou 1 dia inteiro, mais 1 hora e 3 minutos do outro dia. A Peça “B” estará pronta para entrega ou montagem após 18,01 horas de trabalho ou 2 dias inteiro, mais 2 horas do outro dia. A Peça “C” estará pronta para entrega ou montagem após 20,11 horas de trabalho ou 2 dias inteiro, mais 4 horas e 7 minutos do outro dia.

No Cenário 3 a Peça “A” estará pronta para entrega ou montagem após 8,16 horas de trabalho ou 1 dia inteiro, mais 10 minutos do outro dia. A Peça “B” estará pronta para entrega ou montagem após 16,44 horas de trabalho ou 2 dias inteiro, mais 26 minutos do outro dia. A Peça “C” estará pronta para entrega ou montagem após 21,16 horas de trabalho ou 2 dias inteiro, mais 5 horas e 10 minutos do outro dia.

Para a selecionar o melhor Cenário deve-se considerar duas possíveis situações. As peças “A”, “B” e “C” serão entregues ao cliente em lotes separados ou serão entregues juntas montadas uma a outra. Caso seja a primeira situação, o melhor é o Cenário 3 porque a Peça “A” poderá ser entregue no tempo 8,16 horas a partir do início da fabricação, enquanto no Cenário 2 será no tempo 9,04 horas e tempo maior ainda é o cenário 1 com 13,25 horas. A Peça “B” poderá ser entregue no tempo 16,44 horas a partir do início da fabricação enquanto no Cenário 2 será no tempo 18,01 horas e tempo maior ainda é o Cenário 1 com de 20,80 horas. Somente a Peça “C”, que nesse caso, será entregue no tempo maior que os outros 2 Cenários, 21,16 horas a partir do início da fabricação, enquanto no Cenário 2 será no tempo 20,11 horas e o cenário 1 com de 20,48 horas.

Para a segunda situação, o Cenário 2 será melhor, pois como as peças serão montadas uma a outra, deve-se aguardar até que a última fique pronta para se iniciar a montagem.

8 CONCLUSÕES

A análise proposta neste trabalho apresentou-se como sendo de simples utilização, atendendo aos objetivos inicialmente estabelecidos. O modelo desenvolvido para a otimização foi construído aplicando algoritmo AG+RC+ILS, com o objetivo de encontrar o melhor fluxo, pelas diversas máquinas, por onde os lotes de peças deveriam passar.

Portanto, otimizando o fluxo, pode-se prever os resultados. Entretanto, somente com o modelo de otimização, informando em que momento as peças entrarão na máquina e em qual delas, não se chega a um resultado que possa ser analisado. Em vista disso, também foi usado um modelo de simulação, auxiliando e mostrando, com maiores detalhes, o funcionamento completo do sistema.

A simulação combinada à otimização mostrou-se complementares e podem auxiliar em projetos de processos de manufatura, principalmente em processo *Job Shop*, apresentando um resultado satisfatório. A utilização de uma planilha em arquivo Excel para interface dos dados dos modelos de otimização e simulação mostrou-se viável e de fácil utilização.

O resultado do Cenário 1 é o real que no momento (no tempo zero) se encontra no sistema produtivo. Como o resultado não foi satisfatório, verificou-se a possibilidade de alteração no sistema e montou-se o Cenário 2. Também o Cenário 2 não atendeu as expectativas e montou-se um Cenário 3. Poderia montar quantos Cenários fossem necessários. O ideal é que se construam vários Cenários possíveis e após análise faça à escolha daquele que melhor atender a necessidade.

A análise do resultado se deu sob duas condições: a primeira seria entregar as peças lote por lote. Nesse caso, o Cenário 3 foi o ideal pois as peças do lote A e do lote B ficariam prontas para serem entregues antes que as do Cenário 1 e 2. Somente as peças do lote C ficariam prontas, para serem entregues, após as do Cenário 1 e 2. A segunda condição seria montar as peças uma com a outra, o qual o Cenário 2 seria o melhor, pois as peças do lote C, apesar de ter o maior tempo, ainda é menor que as demais.

Os resultados obtidos reforçam a importância e os possíveis benefícios da utilização da simulação computacional a eventos discretos combinada com otimização combinatória e sinaliza a necessidade realização de novas investigações neste campo. Especificamente, em

relação à aplicação em processos *Job Shop*, destaca-se a necessidade de se explorar a utilização de diferentes leiautes de sistemas de produção.

SIMULATION OPTIMIZATION MODEL FOR DELIVERY DEADLINE JOB SHOP PROCESS ANALYSIS

ABSTRACT: This paper presents an analysis of a Job Shop process, using a model of discrete event simulation combined with an optimization algorithm. Models of simulation and optimization were built of a hypothetical system with typical characteristics of processes with diversity of products and batches reduced in a functional layout. The scenarios for simulation were elaborated with the aim of showing different situations in which the system may be subjected under a normal situation of work regime. As a result, we could see the step by step of the position of the parts in the production process, seeking, mainly, to define the best deadline of the respective parts.

Keywords: Simulation. Optimization. Job Shop.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo suporte financeiro para esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

BANKS, J.; CARSON, J.S.; NELSON, B.L.; NICOL, D.M. **Discrete-event system simulation**. 2ª Edição. New Jersey: Prentice Hall, 2005.

BROWN, D. E.; SCHERER, W. T. **Intelligent scheduling systems**. Kluwer, 1995, 276 p.

CHEN, Y., CHEW, E.P., LEE, L.H., TENG, S. Multi-objective Simulation-based Evolutionary Algorithm for an Aircraft Spare Parts Allocation Problem. **European Journal of Operational Research**. N. 189, pp. 476-491, 2007.

CHEN, C.H., FU, M.C., HE, D., LEE, L.H. Simulation Optimization Using the Cross-Entropy Method with Optimal Computing Budget allocation. **ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation**. Vol. 20, n. 1. Wasserkrug, S., New York - USA, 2010.

FRANCO, I.S. **Algoritmos híbridos para a resolução do problema de job shop flexível**. Dissertação de Mestrado depositada na biblioteca da Universidade Candido Mendes (UCAM-Campos), 157p, 2010.

FREITAS FILHO, P.J. **Introdução à modelagem e simulação de sistemas**. 2. ed. São Paulo, SP: Editora Visual, 2008, 372 p.

FU, M. C. Optimization for Simulation: Theory vs. Practice. *Journal on Computing*, v. 14, n. 3, 2002.

HAO, Q.; SHEN, W. Implementing a hybrid simulation model for a Kanban-based material handling system. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 24, p. 635-646, 2008.

KELTON, W.D.; SADOWSKI, R.P.; STURROCK, D.T. **Simulation with Arena**. Forth Edition, New York: McGraw- Hill, 2007.

LEAL, F.; ALMEIDA, D.A. E MONTEVECHI, J.A.B. Uma Proposta de Técnica de Modelagem Conceitual para a Simulação através de Elementos do IDEF. Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional – **Anais...**, XL-SBPO, João Pessoa – PB, 1-12, 2008.

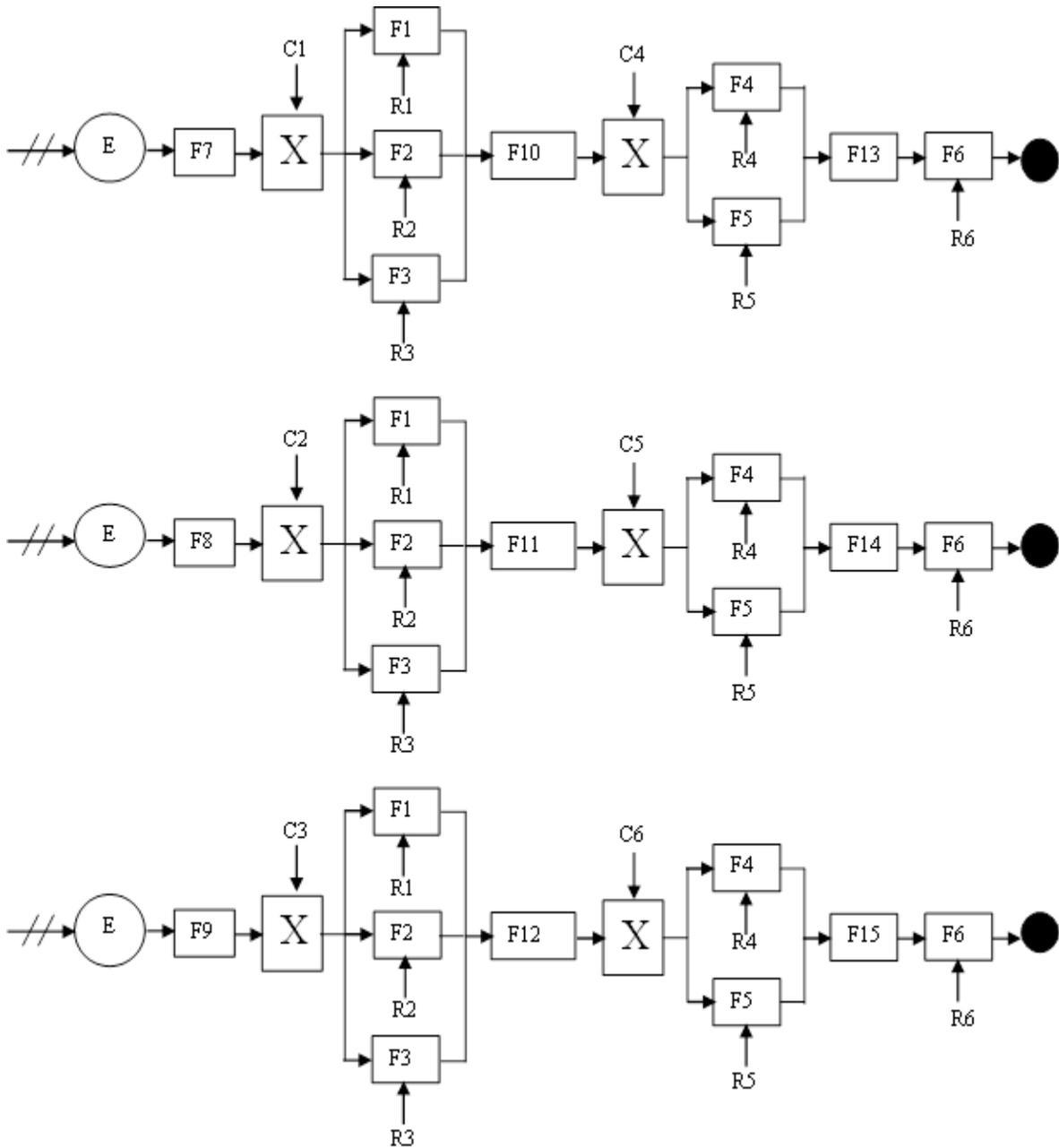
NARDINE, J.J. **Tecnologias e Sistemas de Gestão da Produção e da Qualidade**: um estudo na indústria metal mecânica. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas. Campinas, São Paulo, 1999.

PEREIRA, I. C. **Proposta de sistematização da simulação para fabricação em lotes**. Dissertação mestrado em engenharia de produção. UNIFEI, Itajubá, MG, 2000.

SILVA, W.A. **Otimização de parâmetros da gestão baseada em atividades aplicada em uma célula de manufatura**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2005.

APÊNDICE I

Modelo conceitual do sistema simulado (Linguagem Conceitual: IDEF-SIM).



APÊNDICE II

Tabela com a descrição dos elementos do modelo conceitual

	DESCRIÇÃO	PÂRAMETRO
E1	Entidade: peça A	Chega da peça A (Lote de 10 peças)
E2	Entidade: peça B	Chega da peça B (Lote de 10 peças)
E3	Entidade: peça C	Chega da peça C (Lote de 10 peças)
F1	Função: Processo de torneamento (torno 1)	Tempo do processo em min.: Peça A:30; PeçaB:65; Peça C:85; Capacidade 1 peça por vez do mesmo lote

	DESCRIÇÃO	PÂRAMETRO
F2	Função: Processo de torneamento (torno 2)	Tempo do processo em min.: Peça A:30; PeçaB:65; Peça C:85; Capacidade 1 peça por vez do mesmo lote
F3	Função: Processo de torneamento (torno 3)	Tempo do processo em min.: Peça A:30; PeçaB:65; Peça C:85; Capacidade 1 peça por vez do mesmo lote
F4	Função: Fresamento (fresadora 1)	Tempo do processo em min.: Peça A:40; PeçaB:80; Peça C:75; Capacidade 1 peça por vez do mesmo lote
F5	Função: Fresamento (fresadora 2)	Tempo do processo em min.: Peça A:40; PeçaB:80; Peça C:75; Capacidade 1 peça por vez do mesmo lote
F6	Função: Retificação (retífica 1)	Tempo do processo em min.: Peça A:25; PeçaB:20; Peça C:15; Capacidade 1 peça por vez do mesmo lote
F7	Função: controla início do processo da peça A no Torno 1, Torno 2 ou Torno 3	Início do processo da Peça A no Torno 1, Torno 2 ou Torno 3
F8	Função: controla início do processo da peça B no Torno 1, Torno 2 ou Torno 3	Início do processo da Peça B no Torno 1, Torno 2 ou Torno 3
F9	Função: controla início do processo da peça C no Torno 1, Torno 2 ou Torno 3	Início do processo da Peça C no Torno 1, Torno 2 ou Torno 3
F10	Função: controla início do processo da peça A na Fresadora 1 ou Fresadora 2	Início do processo da Peça A na Fresadora 1 ou Fresadora 2.
F11	Função: controla início do processo da peça B na Fresadora 1 ou Fresadora 2	Início do processo da Peça B na Fresadora 1 ou Fresadora 2.
F12	Função: controla início do processo da peça C na Fresadora 1 ou Fresadora 2	Início do processo da Peça C na Fresadora 1 ou Fresadora 2.
F13	Função: controla início do processo da peça A na Retífica	Início do processo da Peça A na Retífica 1.
F14	Função: controla início do processo da peça B na Retífica	Início do processo da Peça A na Retífica 1.
F15	Função: controla início do processo da peça C na Retífica	Início do processo da Peça A na Retífica 1.
C1	Controle: Fornecimento de peças A para um dos três Tornos	Decide e envia para Torno1, para Torno 2 ou para Torno 3
C2	Controle: Fornecimento de peças B para um dos três Tornos	Decide e envia para Torno1, para Torno 2 ou para Torno 3
C3	Controle: Fornecimento de peças C para um dos três Tornos	Decide e envia para Torno1, para Torno 2 ou para Torno 3
C4	Controle: Fornecimento de peças A para uma das duas Fresadoras	Decide e envia para Fresadora 1 ou para Fresadora 2
C5	Controle: Fornecimento de peças B para uma das duas Fresadoras	Decide e envia para Fresadora 1 ou para Fresadora 2
C6	Controle: Fornecimento de peças C para uma das duas Fresadoras	Decide e envia para Fresadora 1 ou para Fresadora 2
R1	Recurso: Torno 1	Quantidade de 1 equipamento
R2	Recurso: Torno 2	Quantidade de 1 equipamento
R3	Recurso: Torno 3	Quantidade de 1 equipamento
R4	Recurso: Fresadora 1	Quantidade de 1 equipamento
R5	Recurso: Fresadora 2	Quantidade de 1 equipamento
R6	Recurso: Retífica 1	Quantidade de 1 equipamento

Originais recebidos em: 04/01/2013

Aceito para publicação em: 10/01/2015