

5 A questão tecnológica: uma modelagem de simulação

“A transformação do simulador numa ferramenta de gestão de curto prazo impôs uma extensa série de transformações no modelo de dados do simulador visando enriquecer e flexibilizar as representações até então adotadas. Tratou-se aqui de uma tarefa bastante delicada porque uma solução de compromisso teve que ser achada entre a necessária flexibilização das representações e o requisito de alta velocidade de processamento com baixo custo. De fato, para a utilização regular do simulador no processo de tomada de decisão, a rapidez de resposta é um aspecto imprescindível. Porém, quão mais rica e sofisticada a representação do processo, pior tende a ser o desempenho do algoritmo”(Costa, 1996, p. 261).

Com essas palavras introdutórias, Costa (1996), em sua tese de doutorado, apresentou os desenvolvimentos mais significativos realizados até então no modelo de simulação em uso naquela época. Hoje, quase nove anos depois, pode-se dizer que, apesar da evolução tecnológica dos computadores, ainda há de se achar soluções de compromisso quando se trata do nível de detalhe do modelo.

Isso vale não só em função da rapidez de resposta tão importante para a utilização do simulador, mas também por conta do nível de detalhe que interessa ser controlado. Ou seja, quanto mais detalhada a representação do processo, mais trabalho terá o usuário em manter a base de dados do simulador atualizada. Por esse motivo, somente o que for relevante para a ação gerencial deve ser considerado na representação do processo produtivo.

Nesse contexto, vários tópicos foram identificados relativos a representação não só do processo produtivo como do processo decisório. O presente capítulo tem como objetivo apresentar as questões que se mostraram necessárias num modelo de simulação para que ele seja de fato útil.

5.1.Representação do processo produtivo

A programação da produção, baseada na lógica da capacidade finita, se encarrega de alocar e sequenciar tarefas nos recursos produtivos ao longo de um horizonte de planejamento, respeitando as restrições inerentes ao processo de fabricação dos produtos. Em outras palavras, essa programação se encarrega de “simular” o processo produtivo, definindo uma agenda para cada recurso.

Nesse sentido, foram identificados como cruciais para a modelagem de simulação alguns desenvolvimentos relativos à representação do processo produtivo. As quatro primeiras questões apresentadas estão ligadas à representação da demanda e as sete seguintes se referem à modelagem da capacidade produtiva e da representação da flexibilidade no processamento.

5.1.1. O reconhecimento das origens das demandas

O termo demanda define não só o que deve ser produzido como em que quantidades. Este “o que“, quando se fala em programação de curto prazo, define o item de produção em determinado estágio do processo produtivo.

Nem sempre as demandas são originárias de um plano de produção ou de uma carteira de pedidos de clientes. É possível que a demanda seja gerada para preencher um estoque de segurança, para complementar um lote de produção, para atender um pedido ainda não formalizado pelo cliente ou para antecipar a produção de algum item a ser entregue no mês seguinte, por exemplo.

Diferentemente das primeiras, que são de âmbito corporativo, essas demandas “extras” são dados de entrada fornecidos localmente pelo programador da produção. Nesse sentido, é desejável que o modelo esteja preparado para acomodá-las, propiciando ao programador da produção flexibilidade na hora de definir o que deve ser processado no chão-de-fábrica no curto prazo.

A implementação do conceito de origem da demanda foi essencial para viabilizar o uso do simulador no dia-a-dia, sobretudo em situações industriais com ativos caros, tempos de preparação altos e onde o processo de abastecimento de matéria-prima também era considerado complexo. Num setor de estamperia, por exemplo, algumas máquinas eram abastecidas com diferentes tipos de bobinas de aço, pesadas e difíceis de serem transportadas. As máquinas produziam chapas a partir das bobinas, que deveriam ser totalmente consumidas até o fim, havendo ou não uma demanda por essas chapas.

5.1.2.O conceito de lote de produção

Por uma questão de ganho de escala, é comum, na produção repetitiva, a fabricação de peças em lotes de produção. Ou seja, existe um parâmetro numérico que define o quanto deve ser produzido de determinada peça num determinado recurso produtivo de uma só vez. Trata-se de um valor mínimo a se produzir antes de se fazer algum tipo de preparação na máquina para a entrada de outra peça.

O lote de produção é em geral um parâmetro definido pelo chão-de-fábrica, em função da experiência acumulada na fabricação dos produtos. Muitas vezes não se trata de um valor explícito, armazenado em algum banco de dados ou escrito em algum documento. Pode ser, em muitas situações, considerado um dado de natureza tácita conhecido pelos programadores da produção e pessoas diretamente ligadas a execução das atividades produtivas. Com a implantação do simulador na empresa, esse dado passa a ser levantado e questionado. A simulação abre espaço para o programador testar diferentes cenários, alterando esse parâmetro.

No modelo de dados, o lote de produção é um atributo da operação do item, caracterizada pelas elipses na “árvore de materiais” da figura 13. Em termos de modelo de simulação, esse atributo é utilizado para agrupar as demandas em quantidades exatamente iguais ou superiores ao lote.

5.1.3.A rastreabilidade na geração das demandas

No algoritmo de simulação, o procedimento “geração de demandas” calcula o quanto deve ser fabricado de cada operação (elipse na “árvore de materiais”). Isso é feito consultando-se, em geral, o seguinte: (i) o plano de produção, (ii) os saldos de estoques, (iii) as estruturas dos produtos e (iv) os roteiros de produção de cada item.

Nesse processo, cada operação vai acumulando quantidades a fazer à medida que os vários planos de produção vão sendo “explodidos” sobre a estrutura da árvore de materiais (veja figura 13).

Dá-se o nome de demanda agregada à entidade relativa a uma dada operação da árvore. Na demanda agregada, está acumulada toda a quantidade a processar de determinada operação. Por sua vez, a demanda específica é a parcela da demanda agregada que atende a um determinado registro do plano de produção (Veja o exemplo da figura a seguir).

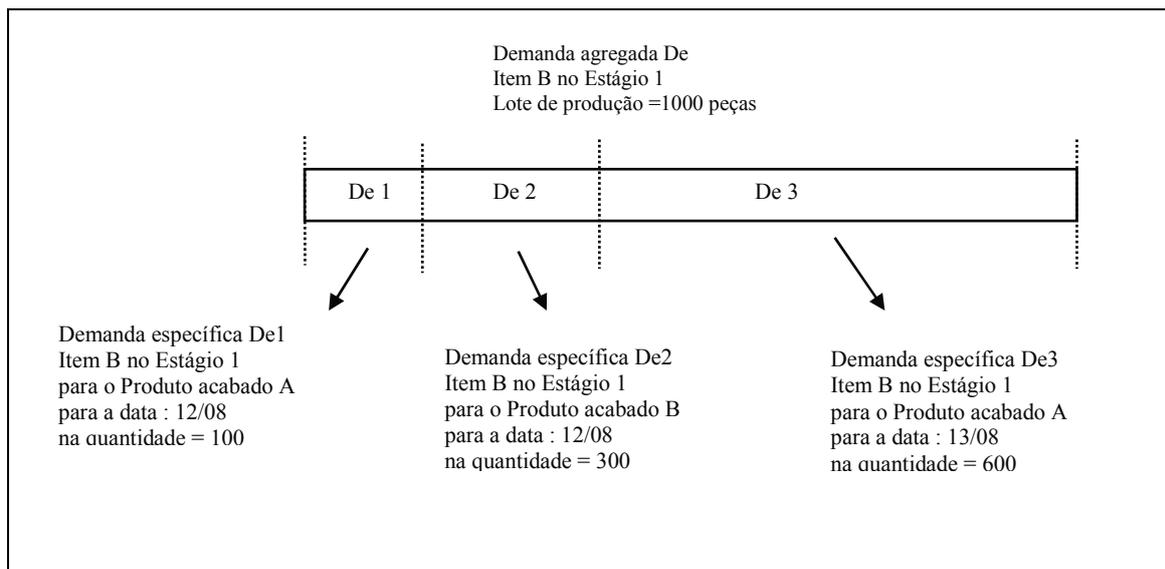


Figura 19: Demanda agregada e suas demandas específicas

A demanda agregada (De) na figura acima é a entidade que reúne as várias demandas específicas (De1, De2 e De3) decorrentes de registros distintos do plano de produção.

Identificar as várias parcelas de uma demanda agregada, quebrando-a em específicas, reconhecendo seu plano de origem é o que se chama neste contexto de permitir a rastreabilidade das tarefas simuladas. É como se as várias tarefas fossem “carimbadas” com uma identidade própria, informando sua data de entrega e a que produto acabado pertencem.

Em muitos ambientes industriais, esta rastreabilidade não é praticada no processo produtivo. Ou seja, ao percorrer o chão-de-fábrica, as peças não têm uma etiqueta ou alguma identidade explicitando a qual registro do plano de produção pertence (leia-se para qual produto acabado, a ser entregue em determinada data).

Por outro lado, mesmo que pareça um princípio exagerado ou “falso”, a rastreabilidade inserida dentro da simulação ganha importância no processo de tomada de decisão porque permite ao usuário acessar as tarefas de forma mais detalhada. Com este grau de detalhe, é possível, por exemplo, priorizar determinada entrega num dado estágio do processo produtivo.

5.1.4.O tratamento de estoques

Diferentemente da produção de bens fora-de-série, na produção repetitiva, o controle de estoques é uma prática comum. Nesse sentido, foi identificada a necessidade de enriquecer o modelo de simulação, acomodando convenientemente a noção de estoques. Os saldos de estoques são dados importantes para descrever o estado atual do chão-de-fábrica.

Em geral, nos sistemas corporativos das grandes empresas, está embutida uma função voltada para o controle de estoques de itens, representados na árvore de materiais (vide figura 13) pelos retângulos. O estoque em processo, relativo às operações produtivas (elipses na árvore), nem sempre está disponível nesses sistemas e, em muitos casos, fica a cargo do setor produtivo controla-lo localmente.

No modelo de simulação proposto, tanto os estoques de itens acabados como os estoques em processo estão representados e são transferidos para as operações produtivas. Esses estoques são consumidos ou “carimbados” na explosão de demandas, possibilitando o posterior rastreamento das tarefas simuladas. Como o processo de explosão percorre os planos em ordem cronológica, a tendência é que os estoques sejam utilizados para atender as entregas mais iminentes.

Na simulação, o saldo de estoques é “anotado” em cada demanda específica ao longo do horizonte de planejamento. Esse saldo vai sendo atualizado em tempo de simulação de acordo com os eventos que forem sendo processados. Identificou-se, portanto, a necessidade de se criar no modelo um evento de *Atualização de Estoques* que é projetado ao longo do carregamento em máquina de uma demanda específica. Esse evento deverá atualizar o estoque após processo dessa demanda.

Analisando agora a base da “árvore de materiais”, um outro tipo de estoque, possivelmente controlado, é o de itens comprados. Esses não são “carimbados” de

antemão na geração de demandas. O processo de consumo desse tipo de estoque dentro da simulação está vinculado a prioridade de cada demanda específica na disputa por ser carregada em máquina em tempo de simulação. Ou seja, a demanda que for prioritária tem prioridade também na disputa pela matéria-prima.

Nesse caso, onde há controle de material, propõe-se que a simulação da chegada desses itens comprados seja de acordo com algum plano pré-estabelecido com os fornecedores da empresa. Na simulação, um evento *Chegada de Materiais* deverá acrescentar uma dada quantidade de peças, no estoque de um item comprado, numa data planejada, de acordo com esse plano.

Em algumas situações, no entanto, o material não é um fator restritivo para a programação e seu controle é muitas vezes relaxado. Nesses casos, ou a empresa já adquiriu esse material através de um planejamento feito mensalmente, por exemplo, (ou para um horizonte de tempo mais extenso que o planejamento do dia-a-dia) ou o material é facilmente adquirido. Sendo assim, o modelo de simulação assume que as demandas na base da árvore dispõem do material necessário para iniciarem seus processamentos logo no início do horizonte de planejamento.

5.1.5.A representação da capacidade produtiva

A programação baseada na lógica da capacidade finita tem esta denominação justamente pelo fato de que a capacidade produtiva é uma das restrições a serem respeitadas no ato da programação. O princípio é o de que tudo o que for relevante e apenas isso seja considerado para descrever essa capacidade.

Em geral, quando se fala em capacidade produtiva pensa-se nos recursos de produção, como as máquinas, os operadores e as ferramentas. Pode-se pensar também no próprio tempo disponível (tipos de horários, planos de manutenção preventiva e de feriados, possibilidade de se fazer hora-extra) para o processamento como um desses recursos. Em alguns trabalhos encontrados na literatura, a própria matéria-prima é considerada um recurso produtivo.

Segundo Costa (1996), a visão dos recursos de produção varia de acordo com a função de planejamento e controle que está sendo considerada. Nesse sentido, quando se trata dos encarregados de fábrica, cada máquina e operador são considerados individualmente. Nesse caso, foi criada uma das entidades básicas do modelo de simulação, o recurso de produção.

Na definição das etapas do processo de fabricação, uma prática comum é a de considerar grupos de máquinas intercambiáveis capazes de realizar uma determinada operação do processo. Este conjunto de recursos idênticos ou intercambiáveis é denominado unidade produtiva, conceito desenvolvido por Costa (1996) e que será detalhado na seção seguinte.

Na visão do chefe de determinado setor da fábrica, a entidade área de responsabilidade é o conjunto de recursos de produção supervisionados por ele. Esta entidade foi criada para apresentar de forma agregada o desempenho dos recursos de determinada área segundo os programas de produção gerados.

Quando existe a necessidade de se considerar a capacidade dos operadores em utilizarem simultaneamente mais de uma máquina, o que se chama da capacidade de multiprocessamento, uma entidade denominada grupos para compartilhamento pode ser utilizada. Ou seja, conjuntos de máquinas que podem ser operadas simultaneamente pela mesma pessoa são representados por esta entidade. Em geral tais conjuntos são criados considerando questões como a proximidade dos recursos, a habilidade dos operadores e a complexidade das operações a serem realizadas.

Através deste modelo, o simulador permite ao programador da produção analisar o desempenho de um só recurso de produção, definir um roteiro de produção aproveitando o agrupador unidade produtiva e informar ao simulador a capacidade de multiprocessamento de um operador através do agrupador grupos para compartilhamento.

5.1.6.As restrições de capacidade

Na versão *Jobbing II*, cada operação poderia ter seu processamento simulado considerando até dois tipos de restrição de capacidade finita, o recurso principal e o recurso conexo, segundo Costa (1996). Os recursos poderiam representar máquinas, ferramentas, operadores, dentre outras restrições.

Em função dos novos contextos estudados e dos avanços tecnológicos, essa representação da capacidade passou ser feita de maneira mais detalhada, onde um maior número de restrições pôde ser reconhecido, sem que o tempo de simulação aumentasse excessivamente.

Para ilustrar essa nova representação do modelo, são apresentados os seguintes conceitos:

Operação	É uma das etapas de processamento de um item. Em geral é identificada pelo código do item e o estágio de processamento.
Alternativa	É um conjunto formado por requisitos para execução de uma dada operação num dado tempo ou taxa de produção.
Requisito	É uma das restrições de capacidade, ou seja, é um recurso de produção que pode ser uma máquina, um operador, uma ferramenta ou alguma outra entidade.

Figura 20: Conceitos utilizados na descrição do processo (operação, alternativa e requisito)

O quadro abaixo apresenta um exemplo da modelagem da capacidade produtiva, utilizando esses três conceitos. Supondo-se que para processar uma determinada peça A, no seu primeiro estágio, seja necessário que o Torno X ou o Torno Y estejam disponíveis. E ainda, é necessário que ao menos um dos operadores da equipe de torneiros (Bruno ou Denis) e a ferramenta H estejam disponíveis. Nessa situação, é possível identificar quatro diferentes alternativas de processamento para fabricar a peça A no primeiro estágio.

Operação	Alternativa	Requisitos
Peça A, estágio 1	Alternativa 1	Torno X + Bruno + Ferramenta H
Peça A, estágio 1	Alternativa 2	Torno X + Denis + Ferramenta H
Peça A, estágio 1	Alternativa 3	Torno Y + Bruno + Ferramenta H
Peça A, estágio 1	Alternativa 4	Torno Y + Denis + Ferramenta H

Figura 21 : Exemplo : operação, alternativas e requisitos

Associada à noção de *requisito*, desenvolveu-se o conceito de *grupo funcional* que reúne os recursos intercambiáveis ligados ao processamento de determinada operação. Nesse sentido, para recursos do tipo máquina existe um grupo funcional denominado *unidade produtiva*, já utilizado nas versões dos sistemas *Jobbing I e II*. Analogamente, para os recursos do tipo operador, foi criado o grupo funcional *habilidade*.

A criação dos *grupos funcionais* permite que os programadores da produção informem as *alternativas* de processamento de forma simplificada, reduzindo um esforço excessivo no cadastro e na manutenção de dados. No exemplo apresentado, através da criação de dois *grupos funcionais*, o programador pode informar as alternativas da referida operação através de um único cadastro. Ou seja, essa única alternativa informada abaixo será desdobrada automaticamente nas quatro alternativas listadas no exemplo anterior pelo simulador.

Grupo funcional	Tipo de recurso	Recursos associados ao grupo funcional
Unidade produtiva : Tornos de pequeno porte	Máquina	Torno X e Torno Y
Habilidade : Operadores habilitados para cortar	Operador	Denis e Bruno

Figura 22: Exemplo: Grupo funcional

Operação	Alternativa	Requisitos
Peça A, estágio 1	Alternativa 5	Tornos de pequeno porte + Operadores habilitados para cortar + Ferramenta H

Figura 23: Exemplo: operação, alternativas e requisitos

5.1.7.A capacidade no grau de detalhe relevante

No modelo proposto, consideram-se os recursos: as máquinas, os operadores e as ferramentas. Existem situações, no entanto, onde a simplificação é necessária e nem todos os tipos de recursos devem ser reconhecidos. Abaixo seguem exemplos dessas situações:

- Quando as ferramentas forem abundantes ou facilmente adquiridas, não há o porquê em controlá-las no modelo.
- Quando a mão-de-obra não representar uma restrição para o processo, não há o porquê em representar os operadores no modelo.
- Quando um grupo de máquinas funcionar como uma linha de produção, onde os itens “entram” numa extremidade e “saem” na outra, esse grupo pode ser representado como uma única máquina, com a taxa de produção sendo estimada pela seção mais lenta, por exemplo.

Nos casos em que houver algum tipo de restrição de mão-de-obra, o detalhamento desse tipo de recurso pode se dar ainda em diferentes níveis. Existem situações em que os *operadores* são reconhecidos individualmente, com número de registro, horário de trabalho e folga e calendário de férias. Cada *operador* é associado às *habilidades* que possui.

No modelo mais detalhado, os *operadores* ou suas *habilidades* são associados às *alternativas* de processamento referentes a uma *operação*. Sendo assim é possível saber, em tempo de simulação, se determinado *operador* está apto e disponível ou não para processar uma *operação*.

Em outras situações, ao invés de representar cada indivíduo, a noção de *equipe* pode ser utilizada. Essa entidade é criada e associada aos recursos do tipo “máquina”. Através desse procedimento é possível informar o número de pessoas disponíveis em cada turno. Dessa forma, durante a simulação, as operações, que exigirem o uso de operadores, “consultam” as equipes associadas às máquinas onde serão processadas e reservam, naquele instante, o número de pessoas necessário.

5.1.8. Diferentes formas de processamento das máquinas

Em geral as máquinas são consideradas os recursos principais necessários para o processamento de uma tarefa no decorrer da simulação. Um aspecto importante na modelagem da capacidade produtiva é traduzir a forma de processamento das máquinas em expressões matemáticas que possibilitem o cálculo de tempos (durações) e de instantes de tempo relevantes para a simulação.

Nesse sentido, o modelo de simulação foi enriquecido, reconhecendo diferentes formas de cálculo de tempos de processamento. Com a incorporação de aspectos mais ligados a produção repetitiva, esses tempos passaram a ser calculados com base nos tempos de ciclo das operações. À medida que foram nascendo novos projetos em empresas, ainda de produção repetitiva, mas com processos industriais diversos, percebeu-se que o modelo simplesmente baseado em tempos de ciclos não representaria bem a realidade da empresa. Por essa razão outras formas de cálculos foram propostas.

Dos casos vivenciados nas empresas que serviram de base para esse trabalho, encontrou-se pelo menos três tipos diferentes de máquinas no que tange a sua forma de cálculo de tempos de processamento. Abaixo estão descritos esses tipos:

a) Máquinas com tempo de processamento proporcional às quantidades processadas (baseado no tempo de ciclo)

Existem os recursos cujos tempos de ciclo e os tempos de processamento são praticamente iguais para uma única peça. O tempo de ciclo é definido como o inverso da taxa de produção, ou seja, este tempo indica de quanto em quanto tempo sai uma peça pronta da máquina. Os tempos de processamento, por sua vez, representam a duração da operação de uma peça na máquina. Neste tipo de recurso, o cálculo do tempo de processamento de um determinado lote de peças é feito multiplicando a quantidade de peças no lote pelo tempo de ciclo de uma peça. Exemplos destes tipos de recursos são as injetoras plásticas, bancos hidráulicos, prensas, bancadas de revisão e montagem.

Resumindo,

$$\text{Tempo de processamento} = \text{Tempo de ciclo} \times \text{quantidade de peças}$$

b) Máquinas com tempos de processamento baseado num percurso a percorrer

Existem aqueles recursos que representam para a peça um longo percurso a seguir. Neste caso os tempos de ciclo são inferiores ao tempo de processamento para uma dada peça. Um exemplo deste tipo de recurso é a cabine de pintura, que possui uma espécie de trilho, onde são acoplados ganchos para se pendurar peças a serem pintadas. Essas peças percorrem esse trilho, numa velocidade constante, e neste caminho sofrem operações como um tratamento químico, a pintura propriamente dita e uma secagem até chegarem ao descarregamento.

A fórmula que segue exemplifica o cálculo do tempo de processamento para uma dada quantidade de peças em uma máquina como essa. A primeira parcela dá conta do primeiro gancho carregado. A segunda parcela se refere aos demais ganchos que a seguem.

$$\text{Tempo de processamento} = [\text{TotalGanchos} \times (\text{TempoCiclo})] + [(\text{GanchosCarregados} - 1) \times (\text{TempoCiclo})]$$

Onde:

- TotalGanchos: é o número total de ganchos que cabem nesse trilho (ocupando o percurso todo)
- GanchosCarregados: é o número de ganchos carregados com as peças que se deseja processar. Para calcular esse parâmetro é preciso saber a relação de “peças/gancho”, ou seja, $\text{GanchosCarregados} = \text{quantidade de peças a produzir} / (\text{número de peças/ganchos})$.
- TempoCiclo, também conhecido como TACT: representa de quanto em quanto tempo sai um gancho na etapa de descarregamento.

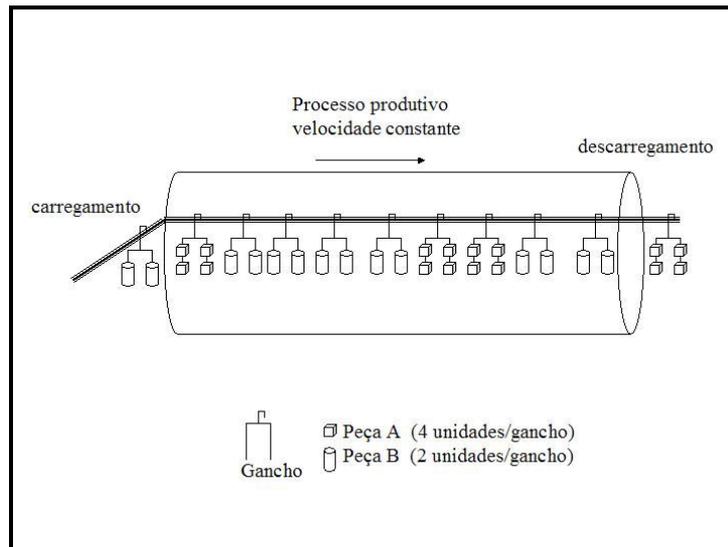


Figura 24: Representação de uma cabine de pintura com dois tipos de peças em processamento.

c) Máquinas com tempos de processamento fixos

Por fim, um outro tipo de recurso encontrado é aquele que funciona como um forno fechado, onde as peças são nele colocadas num dado instante e só depois de um tempo fixo estas peças são retiradas simultaneamente. O número de peças alocadas não pode infringir a capacidade do forno. Por outro lado, pode ser que nem toda esta capacidade seja ocupada. O tempo, no entanto, é fixo, independentemente da quantidade.

$$\text{Tempo de processamento} = \text{Tempo da "fornada"}$$

5.1.9. Representação da preparação de recursos ("setups")

A etapa de preparação de máquina (ou "setup") ganhou importância no modelo de simulação, quando houve a mudança de contexto de aplicação dessa tecnologia, na passagem da produção sob encomenda para a produção repetitiva. Nas versões *Jobbing I* e *II*, o tempo de preparação não era um parâmetro reconhecido explicitamente. Como se tratava da produção sob medida, onde cada

operação exigia uma preparação, esse tempo era somado ao tempo de processamento.

Na produção repetitiva, por sua vez, a informação do tempo de preparação mostrou-se crucial para que os programas simulados fossem aderentes à realidade do chão-de-fábrica. Esse dado não é apenas utilizado para simular a etapa de preparação de máquina, como é um dos parâmetros consultados numa das regras de fila mais adotadas pelos programadores da produção.

Os tempos de preparação, em geral, podem ser classificados de duas formas: independentes ou dependentes da seqüência de produção gerada. Os independentes são considerados toda vez que houver a troca de um item para um outro, diferente, num determinado recurso de produção. O tempo de preparação é sempre o mesmo para aquele recurso.

Por outro lado, de acordo com os projetos desenvolvidos, os tempos de preparação mais informados nos simuladores são aqueles dependentes da seqüência. Ou seja, são os tempos que variam em função do item que acaba de sair do recurso e do item que entra no recurso. Essa informação nem sempre está disponível no chão-de-fábrica e quase sempre o cadastro de tempos de preparação é construído e melhorado à medida que o programador vai utilizando a ferramenta de simulação.

No caso dos tempos dependentes, o cadastro de “item que entra” e “item que sai” para cada recurso de produção pode crescer imensamente. Nesse caso foi utilizado o conceito de escopo, que agrupa itens e operações e, até mesmo, recursos. Nessa situação, o esforço de cadastro é minimizado.

A título de exemplo, o quadro abaixo apresenta um cadastro de tempos de preparação utilizado pelo setor de inserção automática de componentes em placas de circuitos impressos, num fabricante de painéis de automóveis:

Ordem	Escopo que sai	Código que sai	Escopo que entra	Código que entra	Escopo local	Código local	Tempo de preparação (minutos)
01	Placa	4015	Placa	5409	Máquina	Linha 01	30
02	Família*	Honda	Família	Astra	Área**	Inserção automática	240
03	Todos	*	Família	Toyota	Máquina	Linha 02	150

Figura 25 : Cadastro de tempos de preparação

*Família é um agrupador ou classificador de produtos acabados

** Área é um agrupador ou classificador de recursos do tipo máquina

(01) O primeiro registro indica que, na máquina “Linha 01”, quando houver a troca da placa “4015” para a placa “5409”, o tempo de preparação a ser considerado é de 30 minutos.

(02) O segundo registro indica que, em qualquer máquina pertencente à área de “inserção automática”, quando houver a troca de alguma placa relativa a algum produto acabado da família Honda para uma placa relativa a um produto acabado da família Astra, o tempo de preparação a ser considerado é de 240 minutos.

(03) O terceiro registro indica que, na máquina “Linha 02”, quando houver a troca de qualquer placa (que não pertença a algum produto acabado da família Toyota) para qualquer placa relativa a algum produto acabado da família Toyota, o tempo de preparação a ser considerado é de 150 minutos.

A informação escrita na coluna *ordem* é utilizada pelo simulador para identificar qual o tempo de preparação a utilizar quando houver dados conflitantes informados nessa tabela. Por exemplo, caso a placa “4015” pertença à família Honda e a placa “5409” pertença à família Astra e a Linha 01 pertença à área de “inserção automática”, esse conflito já se configura. Qual deve ser o tempo de preparação considerado? 30 ou 240 minutos? Pela lógica implementada atualmente na simulação, prevalece o valor do registro com campo ordem mais baixo. Ou seja, nesse caso prevalece o tempo de 30 minutos.

5.1.10. Representação de peças conjugadas

A noção de *peças conjugadas* foi criada para representar a situação de duas ou mais peças distintas que são processadas simultaneamente por um mesmo recurso produtivo. Esse conceito mostrou-se útil, sobretudo, em processos, como a injeção plástica, a fundição e a estamparia, onde uma determinada ferramenta ou molde é acoplado a uma máquina que ou injeta, ou funde ou estampa peças diferentes ao mesmo tempo.

Nessa situação, as operações ou peças são agrupadas em conjuntos que obrigam seu processamento simultâneo. Esse é o caso, por exemplo, das peças conjugadas da injeção plástica, onde o molde possui múltiplas cavidades que são preenchidas com o material plástico a cada processamento, dando origem a mais de uma peça.

A título de exemplo, o quadro abaixo ilustra essa modelagem de peças conjugadas:

Conjuntos	Peças que compõem o conjunto	Processo produtivo
Suporte de pedal de apoio	Suporte direito do pedal de apoio Suporte esquerdo do pedal de apoio	Estamparia
Rabetas de motocicletas	Rabeta direita Rabeta esquerda Rabeta central	Injeção plástica

Figura 26 : Exemplo de peças conjugadas (processamento obrigatório simultâneo)

Em processos como esses, associado à noção de *peças conjugadas* está o conceito de *multiplicidade*, que representa o quanto de uma mesma peça é processado simultaneamente por conta da ferramenta ou molde utilizado. Ou seja, suponha um molde com dupla cavidade para processar uma peça X e uma terceira cavidade para processar uma peça Y. Sendo assim, a cada tempo de ciclo, o recurso processa duas peças X e uma peça Y. A *multiplicidade*, por sua vez, é um atributo da relação da ferramenta com a peça e é utilizada na simulação para calcular a quantidade processada da peça a cada carregamento em máquina.

Por outro lado, em processos de tratamento térmico com fornos fechados (onde as peças são colocadas num dado instante e só depois de um tempo fixo estas peças são retiradas simultaneamente) a noção de *peças conjugadas* também foi adotada. Nesse caso, peças distintas, que sofriam exatamente o mesmo processo, compunham um conjunto para maximizar a utilização desses fornos, cujos processos são caros e os tempos de processamento elevados. Nota-se que nessa situação, as operações ou peças são agrupadas por motivações econômicas e não tecnológicas. Nesse caso, essa noção de conjunto traduz uma flexibilidade do processo produtivo.

A título de exemplo, o quadro abaixo ilustra um modelo desenvolvido para representar essa flexibilidade do processo de tratamento térmico do setor de fundição de uma fábrica de motocicletas.

Conjuntos	Peças que podem compor o conjunto	Peças/ fornada	Recurso
Cabeçotes de motores	Cabeçotes KGA	100	Forno 01
	Cabeçotes KBB	150	
	Cabeçotes KRM	100	
	Cabeçotes KBW	200	
Cabeçotes e cilindros GCE	Cabeçotes GCE	500	Forno 02
	Cilindros GCE	250	

Figura 27 : Exemplo de peças conjugadas (para maximizar utilização dos recursos)

Um dado que foi levantado para implementar o modelo foi a *relação de peças por fornada*, já que cada uma possui uma determinada dimensão física. Ou seja, segundo o exemplo acima, 100 cabeçotes KGA preenchem o forno 01 e 150 cabeçotes KBB preenchem o forno 01. É possível que os cabeçotes KGA ocupem mais espaço que os KBB.

Suponha uma situação onde só haja necessidade de 50 cabeçotes KGA. Nesse caso sobrar um espaço vazio equivalente a 50% do forno que poderá ser ocupado com, por exemplo, 75 cabeçotes KBB, que preenchem esse vazio. Ou seja, a relação de peças por fornada é utilizada para calcular percentuais de espaços preenchidos e, dessa forma, os conjuntos desse tipo podem ser formados em tempo de simulação.

5.1.11. Parâmetros reguladores de fluxos

A modelagem do processo produtivo foi enriquecida e ganhou flexibilidade quando alguns novos parâmetros foram incorporados ao modelo de simulação, sobretudo aqueles ligados ao fluxo de materiais ao longo do processo. Esses parâmetros são dados informados pelos usuários programadores e são utilizados para ajustar os programas de produção, tornando-os mais aderentes à realidade do chão-de-fábrica. Nessa seção foram selecionados aqueles mais utilizados pelas empresas estudadas.

Um dos primeiros parâmetros incorporados foi o “split”, que pode ser traduzido como a “divisão de lotes” para o processamento simultâneo de uma mesma operação em mais de um recurso. Suponha uma situação onde uma operação tenha três máquinas alternativas para o seu processamento e que o “split” informado seja igual a um, por exemplo. Nesse caso apenas uma das máquinas poderá processar esta operação num dado instante. Se o “split” for dois, então duas máquinas poderão, e assim por diante.

Outra noção associada à representação dos fluxos está o conceito de lote de transferência. Esse parâmetro representa a quantidade mínima a ser transferida de um estágio para o seu seguinte. Em geral esse lote se refere a quantas peças cabem nos carrinhos transportadores utilizados no chão-de-fábrica. Quando este parâmetro é menor do que o lote de produção, acontece a sobreposição de operações consecutivas (o “overlapping”). Em geral o lote de transferência é menor que o lote de produção.

Na versão *Jobbing*, já havia sido criado o conceito de tempo de transporte, tempo reservado após uma operação para a movimentação de materiais de um estágio para o seu seguinte. Esse tempo é calculado em função do horário de trabalho informado para os recursos da fábrica. Ou seja, é um tempo que depende da “presença” dos recursos. Por outro lado, existem situações onde é necessário reservar um intervalo de tempo para que uma peça simplesmente seque ou seja

resfriada. Esse é o tempo de repouso que é um tempo corrido, que não segue o calendário de funcionamento das máquinas.

Por fim, um dos parâmetros, cuja implementação é relativamente sofisticada no algoritmo de simulação, é o tempo de preempção (“preemption”). Esse parâmetro representa o intervalo de tempo máximo que uma máquina ficaria parada à espera da chegada de algum material para ser processado. Em geral, esse tempo está associado à idéia de cumprimento de um lote de produção. Suponha, por exemplo, que a metade de um lote já foi processada no segundo estágio e que o restante está sofrendo ainda o estágio anterior. Nesse caso, um procedimento “inteligente” estima o tempo que levará para esse restante chegar ao estágio seguinte. Se esse tempo estimado for menor ou igual ao o tempo de preempção, então a máquina ficará reservada. Caso contrário, a máquina será “liberada” para ser ocupada por algum outro item que chegar mais cedo.

5.2.Representação do processo decisório

O processo decisório, no contexto estudado, é o conjunto de ações ou decisões gerenciais realizadas no chão-de-fábrica para a construção de um programa de produção (definição de uma “agenda” para cada recurso produtivo). Na transformação da tecnologia de simulação numa ferramenta de gestão de curto prazo, não basta que apenas o processo produtivo seja modelado. É preciso reconhecer também as nuances desse processo decisório.

A evolução do sistema *Jobbing* para o *Jobbing II* foi principalmente marcada pela incorporação da representação desse processo decisório ao modelo de simulação. Sendo assim, ações gerenciais como a determinação de uso de horas-extras ou de subcontratações, a priorização de pedidos, a antecipação de materiais, dentre várias outras, foram incorporadas no modelo naquela época.

Por conta das novas oportunidades de uso, algumas melhorias foram feitas na modelagem do processo decisório no sentido de tornar o sistema cada vez mais aberto para a interferência do usuário na construção do programa da produção. Os principais desenvolvimentos realizados estão apresentados a seguir.

5.2.1.Escopos de abrangência e datas nas decisões gerenciais

A modelagem do processo decisório deve considerar a abrangência das ações ou decisões gerenciais assumidas. A abrangência representa o escopo de atuação dessa ação. Tomando como exemplo a decisão de priorizar atividades, o programador da produção pode atribuir uma prioridade para uma determinada família de produtos ou para uma operação de uma peça, relativa a uma determinada entrega de um produto que pertença a essa família. É como se o programador trabalhasse com várias lentes de aumento, interferindo no processo em níveis mais agregados e níveis bem específicos.

O peso de cada decisão está diretamente ligado a um campo ordenador no cadastro das decisões (semelhante ao campo ordem, apresentado na seção

“*Representação da preparação de recursos*”). Diferentes níveis de abrangência de ação já haviam sido desenvolvidos nas versões *Jobbing*, mas cada nível já tinha pré-estabelecido um peso.

O quadro abaixo ilustra um exemplo fictício de escopo de abrangência da decisão de prioridades utilizada numa fábrica de motocicletas:

Escopo	Descrição do escopo	Exemplo
Projetos	São agrupadores de modelos	GCE
Modelos	São agrupadores de produtos acabados	GCE 50W5
Produtos	São os produtos acabados, as motocicletas.	GCE 50W5 RZA (Motocicleta modelo GCE 50W5, prata metálico)
Itens	São itens componentes dos produtos acabados	Tubo do escapamento
Operações	São as operações produtivas dos itens componentes dos produtos acabados	Operação de corte desse tubo na estamparia
Produto/Entrega	Refere-se a um determinado produto acabado que pertence a uma determinada entrega	O lote de entrega da GCE 50W5 RZA no dia 11/12/04
Itens/Entrega	Refere-se a um determinado item que pertence a um determinado produto acabado que pertence a uma determinada entrega	O tubo do escapamento da GCE 50W5 RZA a ser entregue no dia 11/12/04
Operação/Entrega	Refere-se a uma determinada operação de um determinado item que pertence a um determinado produto acabado que pertence a uma determinada entrega	A operação de corte do tubo do escapamento da GCE 50W5 RZA a ser entregue no dia 11/12/04

Figura 28 : Abrangência na tomada de decisões gerenciais

É nesse processo de tomada de decisão que a rastreabilidade, apresentada na seção 5.1.3, tem se mostrado útil. Como as tarefas, apresentadas nos programas de produção simulados, são “carimbadas” com o produto acabado a que pertencem e uma data de entrega, é possível interferir em cada uma, de forma precisa, através dos escopos de abrangência das decisões gerenciais.

Além da abrangência que se refere ao escopo de atuação da decisão gerencial, existe também o período de validade da decisão. Ou seja, é possível definir, dentro do horizonte de planejamento, uma data de início e de fim para uma determinada decisão gerencial. Nesse sentido, é possível estabelecer, por exemplo, que a decisão de se trabalhar em horas-extras só deva ser considerada em determinados dias desse horizonte.

Os exemplos dados acima se referem à decisão de prioridades e de horas-extras, mas ressalta-se que essa abrangência foi modelada para as outras decisões gerenciais, que serão apresentadas na seção seguinte.

5.2.2. Tipos de decisões

As decisões gerenciais ou regras de uso traduzem a forma em que o programador pretende usar a capacidade produtiva para fabricar as demandas. As regras se referem a questões como a priorização das atividades, a expansão ou retração dos recursos ao longo do tempo, a divisão de lotes, as regras de fila, dentre outras estratégias de uso da capacidade.

Com efeito, as decisões gerenciais afetam a programação das atividades em três sentidos: na definição do *quanto fazer*, do *onde fazer* e do *quando fazer*. Quando o programador altera os tamanhos dos lotes de produção, ele afeta o *quanto fazer*. Quando o programador subcontrata um determinado serviço, essa decisão afeta o *onde fazer*. Por fim, quando o programador define prioridades para um determinado produto, ele altera a ordem de execução das atividades e interfere no *quando fazer*, por exemplo.

O quadro abaixo, extraído de Carvalho e Costa (2004), apresenta as principais alternativas de ação gerencial disponibilizadas nesse modelo.

Tipo de decisão	Decisão gerencial	Objetivos
Ações relativas a priorização de pedidos	Priorizar pedidos	Favorecer a entrega de um pedido prioritário
	Estabelecer regras de fila para os centros de trabalho	Melhorar a performance global do sistema
Ações relativas ao uso da capacidade	Adotar jornadas de trabalho diferenciadas, trabalhar em mais de um turno, trabalhar em hora-extra, trabalhar em feriados	Expandir a capacidade dos recursos gargalos e críticos
	Subcontratar terceiros	Reduzir a carga dos recursos críticos e gargalo
Ações relativas ao uso da flexibilidade de processamento	Utilizar máquinas substitutas não preferenciais	Aproveitar a capacidade ociosa e reduzir a carga dos recursos críticos e gargalo, reduzir o tempo de atravessamento.
Ações relativas ao fluxo de produção	Reduzir lotes de transferência de um estágio para o outro no processo de fabricação	Diminuir o tempo de atravessamento de um lote de um produto.
	Aumentar os lotes de produção	Aumentar a utilização dos recursos produtivos.
	Apressar o transporte entre as operações de um caminho crítico	Reduzir atrasos
Ações relativas a disponibilidade de materiais	Negociar prazos com fornecedores	Reduzir tempos de fornecimento de itens identificados como críticos

Figura 29 : Alternativas de ação gerencial

5.2.3. Critérios de seqüenciamento: uma combinação de regras

No algoritmo de simulação está embutida uma lógica inteligente que procura responder basicamente duas perguntas: (1) Quando um recurso de produção vaga, qual a tarefa que deve ser nele iniciada, dentre várias concorrentes? (2) Quando uma demanda possui uma gama de alternativas de recursos para processá-la, qual o recurso que deve ser escolhido?

Por trás dessas perguntas, existem parâmetros utilizados para desempatar demandas concorrentes, que disputam um mesmo recurso e recursos concorrentes, que disputam uma mesma demanda. Esses parâmetros, definidos pelo usuário programador, são regras de bom senso utilizadas no dia-a-dia do chão-de-fábrica.

Na modelagem do algoritmo de simulação, sobretudo no desenvolvimento da lógica de escolha da tarefa seguinte ou do melhor recurso a utilizar, não houve

preocupação em desenvolver e programar métodos sofisticados para a busca de uma solução ótima. Por conta da própria dimensão e dinamicidade do problema estudado, optou-se por uma estrutura aberta, onde o usuário pudesse interferir na construção da solução, usando seu conhecimento tácito, adquirido com a experiência, e informações que dificilmente poderiam ser incorporadas à base de dados do simulador.

Nesse sentido, na prática, foram identificados e modelados critérios de escolha, para cada contexto de aplicação, que passaram a representar componentes de uma regra combinada. O peso de cada critério também passou a ser definido pelo usuário programador.

Dentre os critérios, estão aqueles de natureza mais explícita como os baseados em tempos ou taxas de produção. Por outro lado, existem os critérios mais tácitos, como a classificação subjetiva das alternativas de máquina de uma operação de um item (vide critério “classe” no quadro abaixo).

A título de exemplo, o quadro abaixo enumera alguns dos critérios mais utilizados nas “escolhas” realizadas pelo simulador no que tange o desempate de tarefas concorrentes:

Critério	Descrição
Plano manual	Prioriza as tarefas segundo a seqüência estabelecida num plano manual, definido pelo programador.
Prioridade	Prioriza as tarefas segundo o valor de prioridade atribuído na decisão gerencial de prioridades.
Formação de lote	Prioriza as tarefas de mesmo tipo, necessárias para compor um lote de produção.
Data de entrega	Prioriza as tarefas com data de entrega mais cedo
Menor tempo de preparação	Prioriza a tarefa que demande menor tempo de preparação no recurso escolhido
Menor tempo de processamento	Prioriza a tarefa que representa o menor tempo de processamento
Formação de lote de cor	Prioriza as tarefas relativas a itens de mesma cor, necessárias para compor um lote de cores.
Regra de fila	Prioriza as tarefas de acordo com a regra de fila informada na decisão gerencial. Pode ser (PEPS, primeira que entra, primeira que sai; MTP, menor tempo de processamento; MDE, menor data de entrega; dentre outras heurísticas)

Figura 30: Critérios de seqüenciamento para o desempate de demandas

A escolha feita entre recursos candidatos para processar uma mesma demanda também se baseia em uma combinação de critérios, conforme exemplo abaixo.

Critério	Descrição
Classe	Critério subjetivo, onde o usuário classifica as várias alternativas de processamento como ótima, boa, regular ou último-recurso. O simulador prioriza as melhores alternativas, só seguindo para as classes inferiores quando as superiores estiverem todas indisponíveis.
Menor tempo de processamento	Como cada recurso pode processar a demanda numa taxa de produção específica, o simulador, segundo esse critério, prioriza o que representar o menor tempo de processamento.
Menor tempo de preparação	Segundo esse critério, a escolha se dá em função do menor tempo de preparação encontrado. Para tanto, é preciso, muitas vezes, identificar esse tempo na troca da última demanda processada pelo recurso candidato para a demanda a ser carregada. O recurso, que já estivesse processando uma demanda igual ou semelhante a essa, ganha.

Figura 31: Critérios de seqüenciamento para a escolha entre recursos

5.2.4.O Congelamento (Plano Manual)

Na realização do ciclo do planejamento, à medida que novos cenários são criados, novos programas de produção são gerados. É bem provável, no entanto, que, nesse processo, o usuário programador da produção queira “congelar” parte desses programas. Isso pode se dar para garantir a continuidade de um programa anterior já firmado, caracterizando assim uma situação de regime no chão-de-fábrica. Dessa forma, a simulação já inicia com uma parte do programa “congelado”.

O congelamento tem se mostrado um procedimento útil também no processo de implantação. Nessa situação, o usuário, ainda pouco experiente na construção de cenários alternativos, prefere firmar o plano que desenvolveu manualmente. Através do uso desse procedimento, o simulador consegue gerar o plano desejado automaticamente.

O congelamento também é conhecido como “plano manual” pelo fato de representar uma seqüência de produção, definida manualmente pelo usuário. Ou seja, o usuário especifica para cada máquina quais operações devem ser processadas e em que quantidades e ordem. O preenchimento desse “plano manual” também pode ser feito automaticamente. Nesse caso um programa gerado anteriormente pode ser copiado e inserido nesse plano. No algoritmo de simulação, o congelamento ou plano manual funcionam como se fosse uma regra de fila, onde as operações já estão ordenadas para cada máquina.

5.3. Síntese e conclusões do capítulo

A “Gestão de Estratégica de Curto Prazo” propõe o uso regular da simulação computacional como uma “ponte” entre a definição da estratégia e a tomada de decisão do dia-a-dia. Nesse sentido, a rapidez de resposta desse instrumento é um aspecto crucial para que essa abordagem gerencial seja posta em prática. Quanto mais detalhada for a representação do processo produtivo, maior esse tempo de resposta. Por esse motivo, é preciso muitas vezes chegar a soluções de compromisso, simplificando o modelo utilizado na simulação, ressaltando apenas o que for relevante.

Dentro desse espírito, baseado em projetos realizados em indústrias de diferentes segmentos, foram discutidos nesse capítulo os aspectos tecnológicos identificados como cruciais e determinantes para o desenvolvimento e utilização da simulação computacional para gestão da produção em massa “customizada”. Para tanto, o texto foi dividido em duas partes, uma ressaltando aspectos da modelagem do processo produtivo e a outra do processo decisório.

Em relação à modelagem do processo produtivo, grande parte das idéias propostas se deve à mudança de contexto, da produção sob encomenda para a produção repetitiva. O reconhecimento de diferentes origens de demandas, a implementação da “rastreadibilidade”, o conceito de lote de produção e a lógica de tratamento de estoques não só acomodaram aspectos do novo contexto de aplicação, como flexibilizam o modelo no que tange a representação da demanda.

Por sua vez, a representação da capacidade produtiva também foi enriquecida já que o modelo de simulação passou a reconhecer um maior número de restrições inerentes ao processo produtivo. Foi enfatizado no texto que o modelo deve ser usado para representar o que for relevante e apenas isso.

Uma outra questão, ligada ao processo produtivo, foi a modelagem utilizada no cálculo de tempos de processamento de máquinas que funcionam de diferentes formas, do ponto de vista da simulação. O tratamento de peças conjugadas, a

representação da etapa de preparação dos recursos (*setups*) e a introdução de parâmetros utilizados para regular o fluxo de produção (*split*, lote de transferência, tempo de repouso e *preemption*) são propostas que flexibilizam o modelo, acomodam as especificidades da produção repetitiva e permitem que o programa gerado seja mais aderente à realidade do chão-de-fábrica.

Em relação à representação do processo decisório, o modelo que na versão *Jobbing*, já caminhava para uma arquitetura “aberta” no que toca a interferência do usuário na definição das regras de uso, evoluiu ainda mais nesse sentido. Novas possibilidades de ações gerenciais foram modeladas. Além disso, entende-se que o cadastro de grande parte dessas ações deva ser flexibilizado no sentido de que o usuário informe a decisão em diferentes níveis de detalhe e para intervalos de tempo distintos. Por fim, a decisão do congelamento (plano manual) de um programa de produção ou de parte dele mostrou-se uma evolução necessária no modelo para permitir a representação do processo produtivo em regime.

Todas as propostas mencionadas neste capítulo estão hoje implementadas nos simuladores *See The Future* (STF).