



A APLICAÇÃO DE SIMULAÇÃO- OTIMIZAÇÃO PARA DEFINIÇÃO DO MIX ÓTIMO DE PRODUÇÃO DE UMA INDÚSTRIA METAL-MECÂNICA

Guilherme Luiz Cassel (UNISINOS)

glcassel@terra.com.br

Guilherme Luís Roeh Vaccaro (UNISINOS)

guilhermev@unisinos.br

Este trabalho apresenta uma aplicação de simulação-otimização com o objetivo de analisar a viabilidade do mix de produção mensal planejado para uma indústria metal-mecânica. Para a realização deste artigo foram coletados dados referentes aos tempos e recursos de produção da empresa, onde este trabalho determinou dois resultados: através da aplicação de Programação Matemática (PM) foi determinado o mix ótimo de produção e através da aplicação de Simulação Computacional (SC) utilizando os dados de produção após uma análise estatística, sendo então efetuada uma simulação para verificar se o mix ideal é possível de ser produzido. A partir dos resultados obtidos juntamente com as restrições indicadas podem ser tomadas decisões e definidas ações para garantir o atingimento dos resultados desejados. Além disto, o uso em conjunto das duas ferramentas permite a montagem de diversos cenários para analisar melhor a situação, respondendo a questões como “How to?” (Como ou O Quê? - Otimização) e “What, if?” (E Se... - Simulação). As principais vantagens que este trabalho demonstra são a possibilidade de descobrir com antecedência qual o resultado ideal e se este é possível de ser realizado, com a vantagem de não necessitar produzir uma única peça para saber o resultado estimado antecipadamente, abrindo caminho para uma grande gama de aplicações destas técnicas em ambientes industriais.

Palavras-chaves: Simulação, Otimização, Pesquisa Operacional, Produção

1. Introdução

Este trabalho apresenta uma aplicação de simulação-otimização com o objetivo de analisar a viabilidade do mix de produção mensal planejado para uma indústria metal-mecânica. Por meio da utilização de duas técnicas de Pesquisa Operacional simultaneamente (a saber: Programação Matemática e Simulação Computacional), o trabalho busca conjugar as potencialidades de cada uma delas de modo a responder a questões em nível tático / operacional, no contexto da gerência das operações da empresa:

- O que produzir: qual a seleção ótima de itens e quantidades a serem produzidas de modo a atender às necessidades da estratégia de vendas da empresa;
- Quão viável é o mix ótimo: considerada a variabilidade existente no sistema produtivo, quais serão os pontos de atenção ou dificuldades em atender à seleção definida no item anterior.

A empresa em questão é do ramo metal-mecânico e produz itens de alto valor agregado, tendo sua produção comandada contra-pedidos, ou seja, somente produz após o cliente realizar o pedido. Como o tipo de produto possui características bem distintas entre seus itens e o mix de produção não é estável ao longo do ano, é freqüente a existência de diferentes cenários para a programação da produção. Como exemplo, a variação do tamanho das peças e do tamanho dos lotes pode produzir decisões bastante diferenciadas quanto à gestão das operações. Relativamente aos volumes, pedidos podem representar desde uma até centenas de unidades.

Considerado que o problema sob análise é a programação do mix de produção para o atendimento do plano de vendas da empresa, este deve levar em conta a alocação dos recursos necessários e a indicação de quais são as restrições e folgas de capacidade do sistema produtivo, para que os programadores de produção possam antecipar ações necessárias para atender ao plano de vendas. Além disso, os programadores necessitam informar ao Departamento de Vendas e Alta Gerência algumas informações tais como:

- a) Se não for possível atender ao plano informado, quais as restrições que impedem seu atendimento?
- b) Se for possível atender ao plano, haverá ociosidades em recursos da fábrica, possibilitando então a antecipação de pedidos? Nesse caso, quais as áreas ociosas, para as quais podem ser antecipados os pedidos ou então reduzir recursos nestas áreas, alocando-os em outros setores que são mais prioritários?
- c) Quais são os cenários para o atendimento do plano de vendas, incluindo fatores como horas trabalhadas, número de horas-extras, número de horas de serviço contratadas de terceiros, prazos mais prováveis de entrega, e outros?

Um dos fatores relevantes que este trabalho objetiva identificar é o valor gerado pela antecipação da informação, pois uma vez identificado um provável problema futuro pode-se agir de maneira pró-ativa para resolvê-lo, garantindo o atendimento ao plano de produção de uma maneira mais efetiva e aumentando o potencial de geração de valor da empresa.

2. Fundamentação Teórica

Simulação e Otimização são pilares da Pesquisa Operacional cuja aplicação permite a dar suporte à decisão em ambientes produtivos (PIDD, 1998). Tipicamente, aplicações de Simulação permitem responder a questões do tipo “what if” (e se...), levando em consideração elementos da complexidade dos sistemas produtivos, tais como a variabilidade da ocorrência de eventos e complexidades associadas a decisões próprias de sistemas dinâmicos. Aplicações de Otimização são tradicionalmente focadas em responder a questões do tipo “how to” (como ou o quê), visando maximizar a resposta de um vetor de indicadores de interesse. A conjugação desses dois tipos de aplicação deu origem a uma subárea de pesquisa e aplicação denominada “simulação-otimização”, a qual passou a receber maior atenção nas últimas duas décadas (AZADIVAR, 1999; BOWDEN & HALL, 1998).

Uma tendência observada nos últimos anos é a inclusão de ferramentas de otimização em simuladores. Nessas iniciativas, observa-se a inclusão de algoritmos aproximativos ou meta-heurísticas (tais como algoritmos genéticos, busca tabu etc.), bem como o acoplamento de ferramentas de simulação com ferramentas de otimização (BOWDEN & HALL, 1998). Apesar de diversos trabalhos científicos serem publicados no sentido da automatização do acoplamento entre modelos de simulação e de otimização (BOWDEN & HALL, 1998, MIRGHANI *et al.*, 2005, BUSH *et al.*, 2003), a conjugação de modelos de simulação e de otimização também pode ser realizada de forma manual, com base em modelos construídos em aplicações distintas e com benefícios relevantes para sua justificação. Em particular, a construção de modelos independentes de otimização e de simulação permite que a equipe de modelistas avalie quais os níveis de detalhe necessários para a adequada avaliação do comportamento do sistema produtivo em relação às decisões e objetivos do estudo (BUSH *et al.*, 2003).

Tipicamente, a conjugação de resultados de simulação e otimização segue o fluxo apresentado na Figura 1. Inicia-se com um modelo de otimização visando estimar a solução ótima segundo os critérios estabelecidos para o problema. A solução deste modelo serve como input para a condição operacional do modelo de simulação, que tem por objetivo avaliar a sensibilidade da solução ótima às variabilidades associadas ao sistema modelado. Com base na análise de cenários do modelo de simulação dois resultados podem surgir: o resultado é considerado robusto e gera uma solução a ser implementada; ou o resultado não é considerado robusto e necessita de adaptação. Esta deverá acontecer através da imposição / relaxamento de regras sobre os modelos gerados, de modo a refletir de forma mais adequada às características do sistema sob estudo.

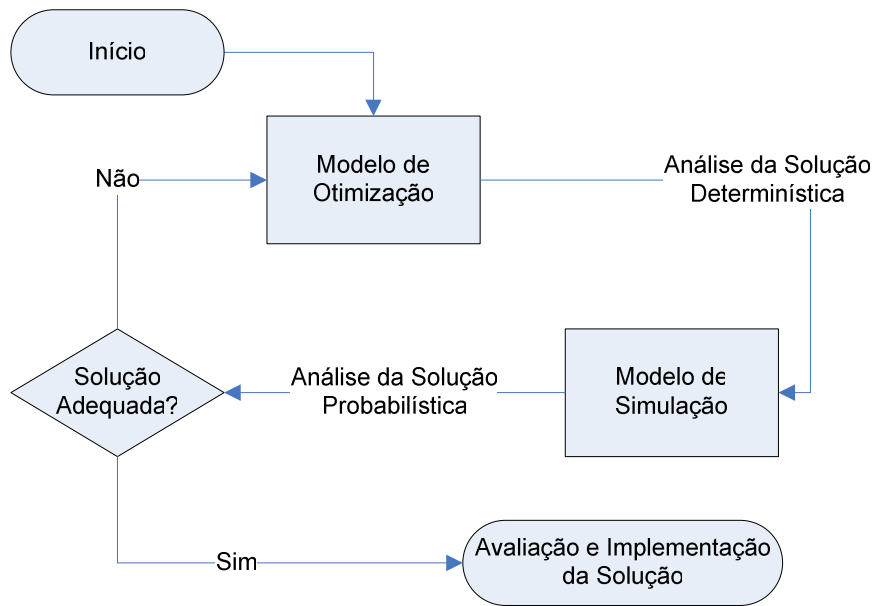


Figura 1 – Fluxo de Simulação-Otimização.

Do ponto de vista do conhecimento gerado sobre o ambiente em estudo, o fluxo acima pode ser compreendido através da Figura 2, a seguir.

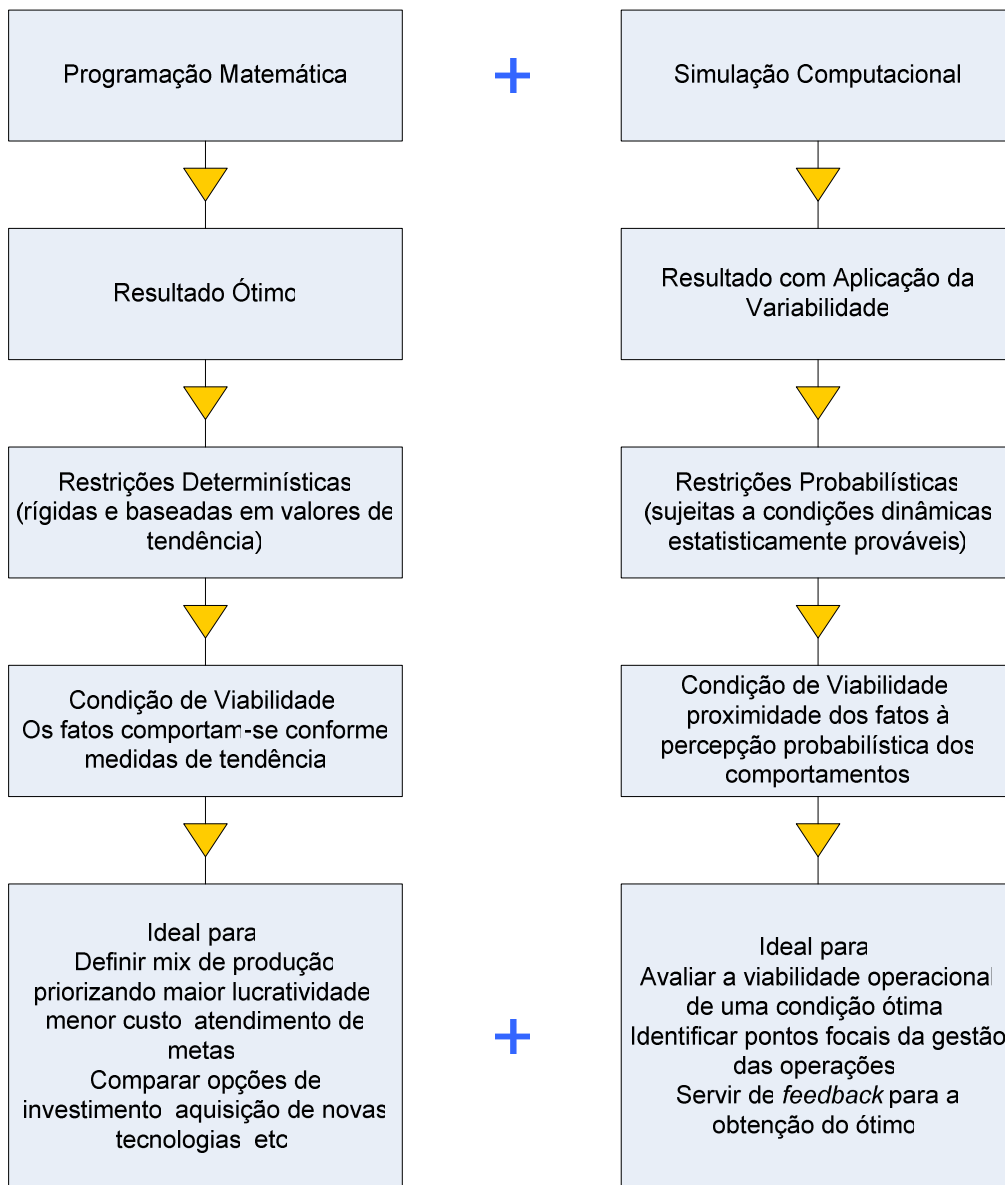


Figura 2 – Elementos de geração de conhecimento da Simulação-Otimização.

Esta breve revisão de elementos conceituais não tem por objetivo endereçar todos os elementos relativos à aplicação da simulação-otimização, mas apenas identificar relevantes para a sustentação do caso a ser apresentado na seção seguinte. O leitor interessado é encorajado a buscar maiores informações sobre o tema nas publicações sobre simulação e otimização ou nas referências deste artigo.

3. O Caso em Estudo

O caso a ser estudado é a programação de uma linha de produção composta de operações variadas, com características distintas entre si do ponto de vista do processo de fabricação. Os tempos de operação variam de acordo com o modelo da peça tanto em valor característico como em distribuição probabilística.

Em relação às peças que compõem o mix de produção, elas possuem seus respectivos tempos registrados nos roteiros de fabricação, tempo este que é determinado de acordo com as normas de cronoanálise da empresa. O tempo previsto é o elemento referencial utilizado para determinar a capacidade produtiva da planta, de modo a avaliar a viabilidade do plano de produção. Este procedimento é atualmente o utilizado pelo setor de Planejamento e Controle da Produção (PCP) da empresa.

A fabricação é restringida pelo número de ferramentas existentes no sistema produtivo. Como o custo do ferramental é elevado e o mix de produção é variado ao longo do ano, a empresa não possui base de conhecimento para estabelecer um número ideal de ferramentas. Até o momento da realização deste trabalho, a empresa optou por definir um número de ferramentas de acordo com o que estima vender em determinados períodos. Essa definição é realizada na fase de projeto do produto, e reavaliada de acordo com o volume da produção ao longo do tempo. Este tipo de decisão ocasiona, por vezes, a falta do ferramental necessário na quantidade adequada para atender aos pedidos em carteira, sendo esta compensada pela extensão dos turnos de produção através de horas-extras e da redução da margem de rentabilidade.

Quanto à gestão dos recursos envolvidos, o tamanho das peças exige espaço físico adequado, implicando restrições que excedem a simples duplicação de capacidade de recursos específicos. Outro elemento a considerar é o fator investimento, pois alguns recursos de fabricação possuem um preço muito alto que não justificaria o investimento em um período adequado.

O sistema de dados da empresa dispõe da informação em tempo real do tempo de processamento de cada lote de peças, que fica armazenado no banco de dados, para o controle das Ordens de Produção (OP's). Estes dados são úteis para a identificação dos tempos de produção de cada modelo da peça, possibilitando uma análise mais apurada da situação ideal de fabricação de cada lote de peças já produzido.

Para o caso proposto foi realizado um estudo-piloto conforme o interesse da empresa. O escopo foi limitado a uma parte do processo operacional, responsável por um dos produtos que teve seus níveis de demanda elevados nos últimos períodos, graças a um esforço de um trabalho de prospecção de novos mercados realizado pela empresa. Este processo é realizado através de uma rede composta de catorze (14) operações, com quantidades de recursos diferentes entre si, de acordo com as condições de produção. O produto selecionado para o estudo possui dois (2) modelos de peças, que serão tratados por Modelo 1 e Modelo 2. Esta decisão foi tomada em função de suprir o sistema de produção para o aumento de demanda previsto para o 2º semestre do ano de 2007. Após a validação do modelo piloto, o mesmo será estendido para outros produtos e processos da empresa.

Existem duas observações importantes a serem feitas:

- Os dois modelos de produto sob análise são novos na empresa. Assim, os operadores estão passando por um momento de aprendizado na fabricação desses modelos e os tempos em algumas ocasiões se apresentam maiores do que os de outros produtos correntes, devido à curva de aprendizado;
- A empresa está aumentando o quadro de funcionários no setor, dada a previsão de aumento de demanda no segundo semestre, e neste momento os operadores atuais estão ensinando aos novos a rotina de fabricação, ficando também os tempos um pouco diferentes das médias históricas.

As considerações em questão, no entanto, não diminuem a importância do estudo realizado, uma vez que o mesmo pode ser útil para a avaliação do impacto do cenário de transição.

3.1. Modelagem de Dados

Para o modelo de otimização foi utilizada a abordagem de Programação Matemática (PM), sendo utilizados os tempos padrões de cada operação contidos nos roteiros de fabricação, que são definidos de acordo com o padrão de cronoanálise da empresa. Além disto, a capacidade de cada recurso foi convertida em minutos e multiplicada pelo número de recursos disponíveis para converter todos os valores para a mesma unidade de medida. Como a fabricação deste produto em algumas operações requer a utilização de ferramental especial, a quantidade deste item também foi considerada no recurso, contemplando desta forma, uma condição real para a fabricação – o produto somente será produzido se houver ferramenta disponível.

O objetivo do modelo de PM é determinar um mix ótimo planejado, considerando as restrições estabelecidas pelo ambiente produtivo e as condições definidas pela empresa para planejamento da produção em função de demandas estimadas e rentabilidades dos itens.

Para o modelo de simulação computacional (SC), foram utilizados tempos de produção oriundos do sistema informatizado de controle de OPs da empresa. Estes dados foram agrupados e analisados estatisticamente para identificar modelos probabilísticos adequados para a representação dos tempos de operação. Para dar validade estatística aos modelos selecionados foram utilizados testes de ajuste de Anderson-Darling e Kolmogorov-Smirnov. As análises foram realizadas com auxílio do software Minitab 14 e do software RelySys. Para este modelo o tempo médio de produção dos recursos foi considerado estatisticamente semelhante ao utilizado para o modelo de PM, assim como o número de ferramentas disponíveis.

3.2. Modelo de Programação Matemática

Para a resolução deste tipo de problema foi utilizado o solver Lingo 10, da Lindo Systems, Inc. A modelagem gerada possui as seguintes características:

- Função-Objetivo:
Maximizar a rentabilidade em função do mix de peças a serem produzidas
- Classes de Restrições:
Disponibilidade de recursos
Disponibilidade de ferramentas
Interdependência entre operações

Um extrato da modelagem gerada é apresentado na Figura 3.

```
MAX M1 + M2
ST
M1 - 3 OP101 - 9 OP201 - 17 OP401 - 8 OP501 - 31 OP601 - 31 OP701 - 75 OP801 ...
M2 - 3 OP102 - 9 OP202 - 17 OP402 - 8 OP502 - 26 OP602 - 28 OP702 - 75 OP802 ...
M1 - M2 = 0
3 OP101 + 3 OP102 <= 10560
9 OP201 + 9 OP202 <= 10560
17 OP401 + 17 OP402 <= 10560
8 OP501 + 8 OP502 <= 10560
31 OP601 + 26 OP602 <= 10560
31 OP701 + 28 OP702 <= 10560
75 OP801 + 75 OP802 <= 84480
...
```

Figura 3 – Extrato do modelo de PM

partir deste resultado, se ainda houver excesso de demanda (pedidos de clientes), deve-se utilizar novamente a ferramenta de PM para gerar um novo mix para fabricação, e este mesmo mix deverá ser novamente avaliado pela ferramenta de Simulação Computacional para verificar se o mix ótimo determinado pela PM será possível de ser fabricado.

- *Falta de Capacidade para Fabricação*: neste caso a fábrica não terá capacidade para produzir o mix de produção indicado, portanto o mesmo deverá ser revisto e/ou as restrições deverão ser analisadas para verificar se há possibilidades de resolver este problema sem maiores contratempos. Podem ser excluídas ordens de fabricação para cumprir a totalidade do que fizer parte da nova programação, e/ou pode ser adicionada capacidade através da contratação de horas extras ou mão de obra terceirizada, e neste caso podem ser incluídas neste modelo de PM as restrições destinadas a esta ação, como por exemplo, custos adicionais relativos à isto. Após esta correção do mix, deve-se rodar novamente a ferramenta de SC de modo a certificar-se que o resultado inicial do mix de fabricação será obtido.

3.4. Ação Sobre Dados e Resultados

A aplicação dessas duas ferramentas permite maior confiança sobre a avaliação da viabilidade do mix de produção selecionado pela empresa. Elementos como o grau de refinamento do modelo em relação à realidade e a acuracidade dos dados utilizados para a alimentação dos modelos passam a ter importância cada vez maior, pois dados imprecisos gerarão modelos incapazes de suportar adequadamente as decisões em questão, com conseqüente perda de credibilidade perante o corpo gestor da empresa.

Após a descoberta dos problemas a serem enfrentados, de acordo com a antecipação da realização do estudo, podem ser definidas ações para atingir as metas com melhores resultados, como por exemplo lucro, custos, atendimento aos prazos, etc. Ao realizar os estudos, podem ser encontradas as seguintes situações:

- *Verifica-se na etapa de PM que o resultado é alcançado e este resultado é confirmado pela SC*: então a capacidade está maior do que a nossa demanda, o que pode incitar ações como ampliar mercados, ou reduzir capacidade, às vezes até mesmo com redução de despesas que se acreditavam necessárias e na realidade se constituem em desperdícios. O confronto deste tipo de resultado com a realidade da empresa pode indicar que os dados utilizados para definir o mix ideal estão superestimados, o que deve causar uma revisão nos tempos padrão, ou então, verificar se todas as etapas previstas no processo estão realmente sendo executadas. Caso haja problemas com os tempos, os mesmos devem ser revisados, e caso haja problema com a falta de cumprimento da seqüência operacional, a mesma deve ser investigada para que se tomem ações pertinentes ao problema;
- *Verifica-se na etapa de PM que o resultado é atingido e durante a etapa de SC o objetivo não é atingido*: neste caso a etapa de fabricação deve ser investigada a fim de descobrir se existe algum motivo da não realização do tempo previsto. Devem ser revistos os tempos e recursos descritos nos roteiros de fabricação, processos especiais (exigências especiais de alguns clientes), condições do processo previsto e real, falta de material e/ou atrasos na entrega e fabricação, quebra freqüente de equipamentos e outros motivos. Em alguns casos, é um fato comum algumas empresas mensurarem o grau de eficiência de suas fábricas e compensarem estes no tempo de processo, ou mensurarem estes como desperdícios. Colateralmente, uma ação para a redução da variabilidade do processo deve ser avaliada. Deve-se avaliar cuidadosamente o resultado apresentado pelas duas ferramentas, uma vez que a situação real de operação residirá em uma condição próxima

da aqui apresentada e o controle operacional da produção será necessário para que a viabilidade do mix seja efetivamente garantida;

- *Verifica-se que a demanda não é atendida na etapa de PM e este resultado é confirmado pela etapa de SC:* neste caso, o problema é estrutural, ou seja, realmente há falta de capacidade. Utilizando o recurso da PM podem ser simulados cenários com diferentes capacidades (e custos compatíveis), de modo a verificar qual o investimento a ser tomado trará o melhor resultado para o contexto da empresa. Como alguns investimentos não terão histórico para que seja usada a variabilidade para calcular o resultado final, podem ser pesquisados casos semelhantes para a utilização destes dados em SC para verificação da eficácia dos investimentos.

4. Conclusões

A primeira grande vantagem de se utilizar simulação e otimização de forma conjugada é a possibilidade de descobrir com antecedência, qual o melhor resultado para um determinado contexto e se este é realmente possível / robusto. Caso não for possível, a modelagem torna-se uma ferramenta útil para estimar resultados com base na análise de outros cenários, de acordo com as possibilidades de decisões existentes. Considerado em perspectiva, em casos em que já existem modelos criados, basta-se alterar as restrições e regras para adequar a análise à proposta que se deseja avaliar.

No contexto particular deste artigo, o problema de decisão consiste na determinação da viabilidade de um mix ótimo de produção. Após a resolução deste problema, a análise utilizando as duas ferramentas permitiu avaliar em que área devem ser tomadas ações para trazer o resultado desejado obtido no ambiente simulado para a realidade, facilitando a definição de prioridades e do planejamento a ser seguido para que as metas da empresa sejam atingidas.

A segunda grande vantagem observada não é nova no contexto da Pesquisa Operacional: para descobrir sobre a viabilidade ou não de uma solução (atender ao mix ótimo para a empresa), não é necessário fabricar uma unidade sequer. Com dados existentes (desde que fidedignos) e a correta modelagem em ferramentas matemáticas adequadas é possível realizar tal avaliação, ainda em tempo de planejamento e sem incorrer em custos de fabricação, aquisição de materiais, contratação de mão de obra. Caso o resultado não seja o desejado, novos cenários podem ser avaliados até que se tenham resultados suficientes para balizar uma decisão. Ao final dos estudos desses cenários, é necessário somente escolher o resultado mais adequado entre as simulações-otimizações realizadas, baseado nas premissas apresentadas em cada um dos casos.

Por fim, existe uma ampla gama de possibilidades utilizando estas duas técnicas em conjunto em ambientes empresariais. A aplicabilidade variará de acordo com o tipo de empresa e o tipo de resultado desejado pela empresa, podendo se tornar um diferencial estratégico no mercado em que esta se situa.

Referências

AZADIVAR, F. *Simulation Optimization Methodologies*. Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference, p.93-100, 1999.

BOWDEN, R. & HALL, J. *Simulation Optimization Research and Development*. Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference, p.1693-1698, 1998.

Mirghani, B. Y.; Tryby, M. E.; Baessler, D. A.; Karonis, N.; Ranjithan, R. S. & Mahinthakumar, K. G. *Development and Performance Analysis of a Simulation-Optimization Framework on TeraGrid Linux Clusters.* Proceedings of the 6th LCI International Conference on Linux, 2005.

BUSH, A.; BILES, W. E. & DePUY, G. W. *Iterative optimization and simulation of Barge traffic on an inland waterway.* Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference, p.1751-1756, 2003.

PIDD, M. *Modelagem Empresarial: Ferramentas para tomada de decisão.* Porto Alegre: Artes Médicas, 1998.