

Metodologia iterativa para melhorar a taxa de utilização dos recursos de um sistema produtivo

Chin Shih, sychin@sc.usp.br

Universidade de São Paulo (USP), Doutorado em Engenharia Mecânica
São Carlos, SP, Brasil

*Recebido: Novembro, 2006 / Aceito: Agosto, 2007

RESUMO

A administração dos recursos produtivos é uma atividade importante para adquirir vantagem competitiva, cuja função é integrar os equipamentos visando atender a demanda e ao menor preço final do produto. Este artigo apresenta um problema típico em administração de recursos produtivos em que disponibilizar capacidades extras de equipamentos gargalo geram superdimensionamento e portanto ociosidade. Entretanto esta atitude pode transferir o ponto gargalo para outros equipamentos. Um modelo de simulação discreta em Arena® 5.0 é construído e executado para monitorar a formação de gargalo, baseado nas informações das taxas de utilização. Em seguida, é apresentada neste artigo uma metodologia iterativa que melhore a taxa de utilização de todos os equipamentos, obtida a partir de uma modelagem matemática de balanceamento de elementos que percorrem o sistema produtivo. Esta metodologia pode ser facilmente implementada em uma linguagem de programação Pascal 7.0.

Palavras-Chave: Administração da capacidade dos recursos produtivos. Modelo de simulação discreta. Desempenho do sistema.

1. INTRODUÇÃO

A concorrência cada vez mais acirrada entre empresas está exigindo eficiência em seu sistema produtivo de modo a atender as expectativas do mercado. Segundo Ribeiro & Meguelati (2002), o aumento de produtividade no setor industrial tem sido objeto de preocupação para os responsáveis pela produção, em razão de um contexto industrial caracterizado por uma concorrência cada vez mais forte.

Para Benjaafar & Sheikhzadeh (1996), é importante que o sistema produtivo seja ágil em mudar tecnologicamente e também em trabalhar de acordo com os requisitos do mercado. E um desses requisitos é com relação ao custo de produção.

Existem diversas formas para tratar de redução dos custos de produção. Segundo Heragu (1997), cerca de 30% a 75% do custo de um produto pode ser atribuído a despesas com movimentação de materiais. Vila (2005) comenta um arranjo físico adequado pode minimizar a movimentação de materiais e pessoas no chão de fábrica e, dessa forma, diminuir custos tornando o sistema de manufatura mais produtivo e eficiente.

Entretanto como não existe uma solução definitiva para os problemas de arranjo/rearranjo, e portanto muitos arranjos ainda atuam de forma inadequada, a maioria dos sistemas produtivos opera sob ineficiência. Por ser um arranjo inadequado, uma consequência direta pode ser a geração de gargalos. Segundo Corrêa & Gianesi (1993), os gargalos definem o fluxo do sistema produtivo porque são o limitante de capacidade. Ou seja, toda produção passa a operar de acordo com o equipamento gargalo, já que ele é que dita o ritmo de produção. Isso significa que existem equipamentos de capacidade disponível maior que a capacidade utilizada trazendo ociosidade de equipamento e ociosidade representa baixa taxa de utilização e então aumento dos custos.

O impacto do gargalo pode ser reduzido aumentando-se o número de recursos gargalo, no entanto este aumento poderia transferir gargalos para outras etapas da produção. Isso significa que deve ser monitorado os pontos gargalo que se formam ao longo do tempo.

Segundo Mendes (1991), é possível identificar a formação do gargalo por meio da comparação da taxa de utilização dos recursos. Este pode ser obtido fazendo-se basicamente a divisão do número de peças produzidas pela sua capacidade total.

Geralmente este monitoramento não é ou dificilmente visualizado na prática (sistema real). Na realidade pode até ser visualizada a formação de gargalo, mas os Decisores têm dificuldades de quantificar a variação da taxa de utilização. Existem ferramentas com grande potencial a serem utilizadas pelos Decisores. O simples uso de teoria das filas pode fornecer informações necessárias e confiáveis sobre quantos equipamentos gargalos seriam necessários para o sistema produtivo, conhecendo-se o comportamento dos elementos de chegada ao sistema (tais como na forma de curva ou então na forma de média de distribuição de chegadas, etc.) e o comportamento do tempo de atendimento. Entretanto esta ferramenta se restringe a elementos discretos e não contínuos. Além disso, a teoria das filas também não oferece com praticidade os novos pontos gargalo o que seria inviável recalcular todas as vezes que novos equipamentos gargalo são inseridos no sistema produtivo.

Segundo Gordon (1969), a ferramenta bastante utilizada quando existe a necessidade de se compreender algum tipo de comportamento do sistema real consiste na construção de modelos. A modelagem significa abstrair em figuras o sistema real e ela é fundamentada em programação computacional, afinal muitas vezes trabalha sob condições *if* ou até mesmo *loops* para repetição de certas partes do modelo. Entretanto os modelos são representações estáticas do sistema e não dinâmicas, já que na prática o funcionamento das empresas varia ao longo do tempo. Por esta razão, é necessário e importante implementar os modelos nas ferramentas computacionais, chamadas de programas de simulação, capazes de dinamizar os elementos que fluem entre figuras do modelo. De acordo com Banks *et al.* (1984) e Law & Kelton (1991), a simulação computacional permite que sejam nela construídos e executados modelos visando compreender o sistema real.

Este artigo irá propôr uma metodologia heurística e consiste em incrementar iterativamente a capacidade unitária do recurso gargalo de tal forma a obter no final uma melhora na taxa de utilização de todos os equipamentos. É heurística devido às diferenças entre as capacidades dos recursos vendido em lojas, de turnos de trabalhos, entre outros fatores, o que indicam que de forma alguma eles irão operar a uma taxa de 100%. Para testar o funcionamento da metodologia, ela será aplicada numa empresa processadora de grãos de café, localizada na cidade de Fortaleza-Brasil. Outras empresas de manufatura também podem fazer o uso dela.

O artigo está dividido basicamente da seguinte forma: Primeiramente é apresentada a modelagem matemática de balanceamento de elementos entre pares de recursos produtivos. Em seguida descreve um procedimento iterativo capaz de melhorar as taxas de utilização, que é obtido em consequência da dedução do modelo matemático. Depois descreve a empresa, onde foi realizado o estudo de caso afim de testar a metodologia

proposta além de descrever o modelo de simulação. E por fim, este comenta a aplicação, os resultados obtidos e conclusão do procedimento.

2. EQUAÇÃO GERAL (TEÓRICA)

Administração de capacidade parece simples de ser resolvida. A idéia inicial de uma condição ideal de operação é que todos os elementos do sistema, em qualquer instante de tempo, que saem de todos os i 's recursos do tipo 1 devam ser processados em todos os j 's recursos do tipo 2. Esta expressão genérica pode ser vista em (1).

$$\sum Capacidade_projeto_{recurso_1(i)} = \sum Capacidade_projeto_{recurso_2(j)} \quad (1)$$

Esta igualdade é uma situação ideal de projeto. O resultado desta igualdade é um fluxo contínuo, e todos os equipamentos operando a uma taxa de utilização de 100%. Infelizmente sabe-se que isso é quase impossível de acontecer porque os equipamentos vendidos em lojas possuem tempos de operação diferentes e os equipamentos também podem falhar. Por estas razões, as capacidades passam a variar conforme o tempo, como mostrado em (2).

Toda parte esquerda de (2), representa na realidade a quantidade processada por todos os recursos₁ dos instantes a à $(a+tempo_operacao(i))$. Esta mesma de ser processada pelos recursos₂ após percorrer $\frac{d_{ij}}{v_{ij}(t)}$ unidades de tempo, que é o tempo da trajetória.

$$\sum \int_a^{a+tempo_operacao(i)} Capacidade_projeto_{recurso_1(i)} d(t) = \sum \int_{a+tempo_operacao(i)+\frac{d_{ij}}{v_{ij}(t)}}^{a+tempo_operacao(i)+\frac{d_{ij}}{v_{ij}(t)}+tempo_operacao(j)} Capacidade_projeto_{recurso_2(j)} d(t) \quad (2)$$

Em que:

a é um instante de tempo qualquer, e é o início do período de análise;

i é a i -ésimo recurso do tipo 1;

j é o j -ésimo recurso do tipo 2;

t representa o instante de tempo após o instante a ;

Capacidade_projeto(t) é uma função que varia ao longo do tempo;

v é a velocidade de percurso entre recursos do tipo 1 e 2;

$\frac{d_{ij}}{v_{ij}(t)}$ representa o tempo de percurso na tubulação entre recursos 1 e 2.

Slack et al. (1999) entendem capacidade produtiva como sendo a disponibilidade de equipamentos e o tempo que os mesmos estão disponíveis. As diferenças destas características entre os recursos geram gargalos. Assim, quando existe um recurso gargalo, significa que ele tem menor capacidade produtiva, e portanto só pode ser uma consequência de um menor tempo disponível para realizar a operação ou menor número de equipamentos disponíveis. Quando decide-se, por exemplo, que os recursos não gargalos devam operar conforme a capacidade projetada, mais peças serão produzidas e a consequência direta é que haverá formação de filas antes do gargalo, já que este último não será capaz de acompanhar a produção dos demais. Disponibilidade de tempo pode ser entendida também como turnos de trabalho.

Caso os turnos de trabalho são constantes ao longo do tempo, as capacidades se tornam constante, então estes podem ser removidos da integral. O termo restante é o número de equipamentos que permanece na integral do tempo, e então a expressão (2) se reduz a (3).

$$\sum Capacidade_projeto_{recurso_1(i)} * \int número_{recurso_1(i)} d(t) = \sum Capacidade_projeto_{recurso_2(j)} * \int número_{recurso_2(j)} d(t) \quad (3)$$

Esta expressão (3) sugere, então, um procedimento iterativo de acréscimo do número de recursos ao longo do tempo de tal forma a melhorar a taxa de utilização de capacidade. Considera-se neste trabalho como razoável a taxa de utilização dos equipamentos estar entre 85% a 100%. Quando isso acontece, o procedimento encerra. Tal procedimento está exposto no tópico 3.

3. PROCEDIMENTO

Este tópico irá descrever o procedimento proposto por este artigo para melhorar iterativamente a taxa de utilização dos equipamentos de um sistema produtivo. Tal procedimento está exposto já na linguagem de programação Pascal 7.0, mostrando que não é necessário um programa sofisticado para implementá-lo. Portanto, outras ferramentas de programação também poderiam ser utilizadas.

O passo inicial do procedimento é pedir ao usuário (Decisor) inserir no programa a demanda por hora do produto final. Ou seja, é a quantidade que o equipamento deve ser capaz de produzir ou processar para atender a demanda. Neste trabalho estamos considerando que a demanda é constante ao longo do tempo. Entretanto este procedimento também pode ser aplicado a uma demanda variável. Deve também inserir o número de diferentes tipos de equipamentos (por exemplo, 3 etapas de produção significa que existem 3 tipos de equipamentos).

Em seguida o procedimento solicita ao usuário inserir a capacidade de projeto de cada tipo de equipamento. Ou seja, é a capacidade máxima que um equipamento pode processar/produzir.

O procedimento prossegue incrementando uma unidade da capacidade do gargalo por iteração. Este se repete várias vezes comparando o recurso gargalo incrementado com os demais até que a condição $(\text{Demanda_hora}/\text{Menor_capacidade}) < 1$ seja satisfeita. A menor capacidade se refere ao equipamento gargalo.

E por fim, pode acontecer da capacidade incrementada do gargalo ser muito superior a Demanda_hora, fazendo com que a taxa seja inferior a 85%. Para evitar isso, este passo apresenta também uma metodologia que permite ao usuário escolher os equipamentos disponíveis no mercado para que a taxa seja de, pelo menos, de 85%.

Program Procedimento;

Var

Demanda_hora, Menor_capacidade, Maior: Real;

Tipo_equipamentos, Iteracao, i, Equipamento_gargalo: Integer;

Limitante_superior, Limitante_inferior: Array [1..100] of Real;

Capacidade_equipamento, Capacidade_Total, Divisao: Array [1..100] of Real;

Quantidade_equipamento_superior, Quantidade_equipamento_inferior: Array [1..100] of Real;

Begin

Writeln ('Entre com a demanda por hora');

Readln (Demanda_hora);

Writeln('Entre com o numero do tipo de equipamentos');

Readln(Tipo_equipamentos);

```
Menor_capacidade:=1.0E+20;
Iteracao:=1;
For i:=1 to Tipo_equipamentos do
    Begin
        Writeln('Entre com a capacidade do equipamento ',i,' em horas');
        Readln(Capacidade_equipamento[i]);
        Capacidade_total[i]:=Capacidade_equipamento[i];
        End;

        Maior:=1;
        For i:=1 to Tipo_equipamentos do
            Begin
                Divisao[i]:=Demanda_hora/Capacidade_Total[i];
                If Divisao[i] > Maior then
                    Maior:=Divisao[i];
                End;

            While Maior>1 do
                Begin
                    For i:=1 to Tipo_equipamentos do
                        If Capacidade_Total[i]<Menor_capacidade then
                            Begin
                                Menor_capacidade:=Capacidade_Total[i];
                                Equipamento_gargalo:=i;
                            End;

                    Capacidade_Total[Equipamento_gargalo]:=Capacidade_equipamento[Equipamento_g
                    argalo]+Capacidade_Total[Equipamento_gargalo];
                    Writeln;
                    Writeln('Iteracao Atual e:',Iteracao);
                    Writeln('O equipamento gargalo e:',Equipamento_gargalo);
                    Iteracao:=Iteracao+1;
                    Menor_capacidade:=1.0E+20;
                    Writeln;
                    Maior:=1;
                    Writeln('*****');
```

```
Writeln;  
Readln;  
For i:=1 to Tipo_equipamentos do  
    Begin  
        Divisao[i]:=Demanda_hora/Capacidade_Total[i];  
        If Divisao[i] > Maior then  
            Maior:=Divisao[i];  
        End;
```

End;

{Calculo da capacidade extra que deve ser subtraída para que a taxa de utilização seja de 85% }

```
For i:=1 to Tipo_equipamentos do  
{(Capacidade_Total[i]-Limitante_inferior[i])*0,85<=Demanda_hora}  
{(Capacidade_Total[i]-Limitante_superior[i])*1 >=Demanda_hora}  
    Begin  
        Limitante_inferior[i]:=Capacidade_Total[i]-1.176*Demanda_hora;  
        Limitante_superior[i]:=Capacidade_Total[i]-Demanda_hora;  
  
        If Limitante_inferior[i]<=0 then  
            Limitante_inferior[i]:=0;  
  
        If Limitante_superior[i]<=0 then  
            Limitante_superior[i]:=0;  
  
        Writeln('A taxa de utilizacao dos equipamentos ',i,'  
e:',(Demanda_hora)/(Capacidade_Total[i]));  
        Writeln('A Capacidade Total ',i,' e:',Capacidade_Total[i]);  
        Writeln('Deve-se remover do equipamento ',i,' uma capacidade extra superior  
a:',Limitante_inferior[i]);  
        Writeln('Deve-se remover do equipamento ',i,' uma capacidade extra inferior  
a:',Limitante_superior[i]);  
        Quantidade_equipamento_inferior[i]:=(Capacidade_Total[i]-  
Limitante_inferior[i])/Capacidade_equipamento[i];  
        Quantidade_equipamento_superior[i]:=(Capacidade_Total[i]-  
Limitante_superior[i])/Capacidade_equipamento[i];
```

```

Writeln('Sao necessarios no minimo',Quantidade_equipamento_superior[i],
equipamentos do tipo',i);
Writeln('Sao necessarios no maximo',Quantidade_equipamento_inferior[i]',
equipamentos do tipo',i);
Writeln;
Writeln('*****');
Writeln;
Readln;
End;
End.

```

4. EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO E COMENTÁRIOS

4.1. DESCRIÇÃO DA EMPRESA

Para testar a funcionalidade do procedimento, os passos apresentados no tópico 3 serão aplicados numa empresa processadora de grãos de café.

A obtenção do café empacotado, como é encontrado nas prateleiras dos supermercados, só é concretizada após passar por 5 etapas de processamento. Os recursos produtivos, então, recebem o café, em grão ou em pó (dependendo da produtiva) e realizam as suas atividades visando atender a demanda mensal.

O fluxograma da empresa processadora dos grãos de café segue na Figura 01. Assim que a empresa recebe os grãos de café, estes são despejados nos torreadores cuja capacidade de processamento é 1260Kg/h operando a uma temperatura de 40°C. Este é a capacidade do equipamento de processar 1260kg/h sem paradas (capacidade de projeto). Sabe-se que todos os equipamentos trabalham segundo os turnos apresentados na Tabela 01. Quando existem turnos, a disponibilidade de tempo do equipamento se reduz, e então a capacidade é menor que 1260k/h. Como os turnos de trabalho são idênticos para todos os equipamentos, estes são desconsiderados porque ambos são simplificados nos dois lados da expressão (3) e então o valor de 1260 pode ser diretamente utilizado.

Tabela 01. Turnos de trabalho de todos os equipamentos.

TURNOS	INICIO	FIM
TURNO A	06:00	14:00
ALMOÇO	11:30	12:30
TURNO B	14:00	22:00
LANCHE	15:30	15:45
TURNO C	22:00	06:00
CEIA	00:00	00:40

Na etapa seguinte, os grãos seguem para uma etapa de repouso de 1h, que acontece nos silos de grão. As capacidades máximas (em kg) de armazenamento são distintas e valem respectivamente: 2016, 4032, 4032, 4032, 2016. Assim, após uma hora de repouso dos grãos de café, estes são liberados para os moinhos.

Os moinhos consistem de 2 rolos espaçados suficientemente para moer os grãos resultando em pós. A capacidade de processamento é 2000 kg/h. Assim que passam pela etapa de moagem, é necessário que todo pó esteja novamente em repouso, o que garante a qualidade. Este repouso acontece nos silos de pó, a uma temperatura de 60 °C. As capacidades de armazenamento dos silos de pó são idênticas e valem 5000kg. Após uma hora, estes pós são liberados para o processo de empacotamento. Esta empresa trabalha com três tipos de embalagens (100g, 250g e 500g) e as empacotadeiras são capazes de

serem constantemente ajustadas conforme a necessidade. As suas capacidades de processamento (em kg/h) são 330, 675, 975, 1050, 450 e 975. O tempo de *set-up* para cada tipo de embalagem vale 10 min. A demanda (em kg) por pacotes de 100g, 250g e 500g por mês é 405000, 970000 e 39000, respectivamente. Pode-se deduzir que a demanda média seja de em torno de 2618,52kg/h

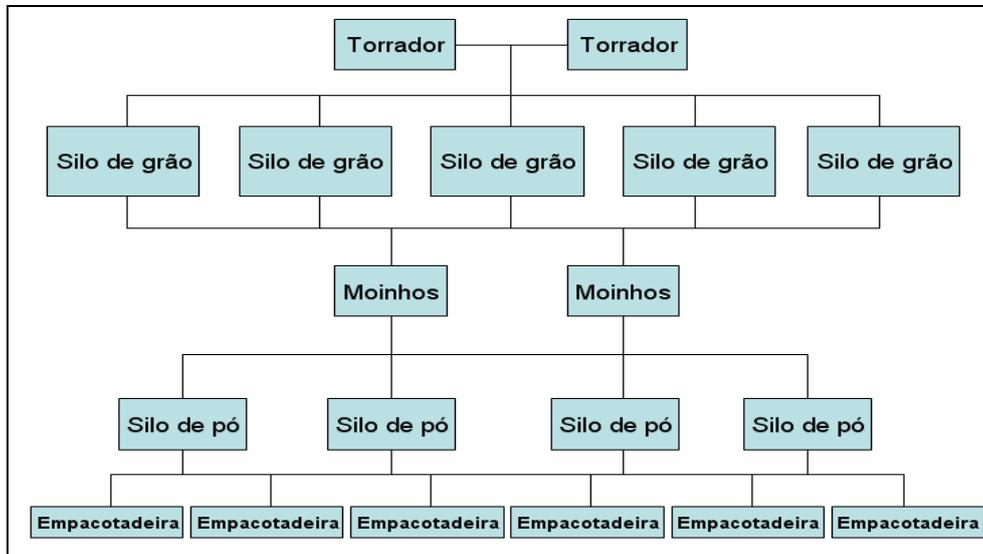


Figura 01. Fluxograma do processamento de grãos de café.

Como dito anteriormente, é possível identificar a formação de gargalo por meio de comparação da taxa de utilização dos recursos. Existe uma outra forma para calcular a taxa de utilização, deduzida matematicamente por Blackstone (1989) como se pode ver na expressão (4).

$$Utilização = \left(\frac{Tempo_total_disponível - Tempo_total_parado}{Tempo_total_disponível} \right) \times 100 \quad (4)$$

Entretanto na prática, é difícil e inviável mensurar a todo instante as taxas de utilização dos recursos ao longo do tempo, e por isso são construídos modelos de simulação. O tópico 4.2 então irá descrever o modelo de simulação propriamente dito.

4.2. CONSTRUÇÃO E EXECUÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO

Para realizar estudos dos sistemas reais, costuma-se construir modelos de simulação para verificar o comportamento dos sistemas. A simulação foi dividida em 3 etapas para mostrar a evolução do sistema ao longo de tempo e de como se comportam os recursos produtivos. Deve-se levar em consideração o período de *warm-up*, que é o tempo para estabilizar o sistema, afinal diversos recursos ainda não iniciaram as operações. Uma replicação representa um dia. No caso no experimento realizado, 1 replicação equivale a 1 dia. A Figura 02 mostra a visão geral do modelo de simulação construído em *software* de simulação Arena 5.0. O próprio Arena fornece diretamente os resultados das taxas de utilização. Outros programas de simulação também poderiam ser utilizadas, visto que o importante não era discutir se algum outro *software* era mais apto que o outro, mas sim apenas teve importância para coletar as taxas de utilização.

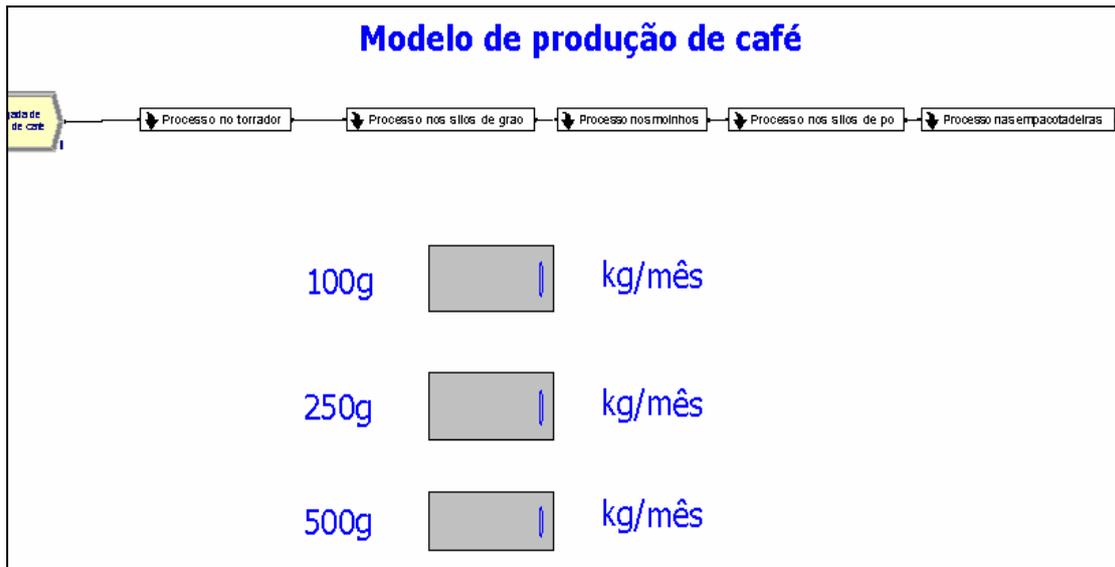


Figura 02. Modelo de simulação do processo produtivo.

Após as primeiras 5 replicações, ver Figura 03, verifica-se que os torradores são os gargalos pela simples comparação das taxas de utilização, o que indica que os demais recursos trabalham em função destas. A medida em que avançamos o número de replicações, estatisticamente, maior é a confiabilidade dos dados, e então nota-se que os gargalos passam a ser os moinhos, fato que se concretiza após replicação de número 30.

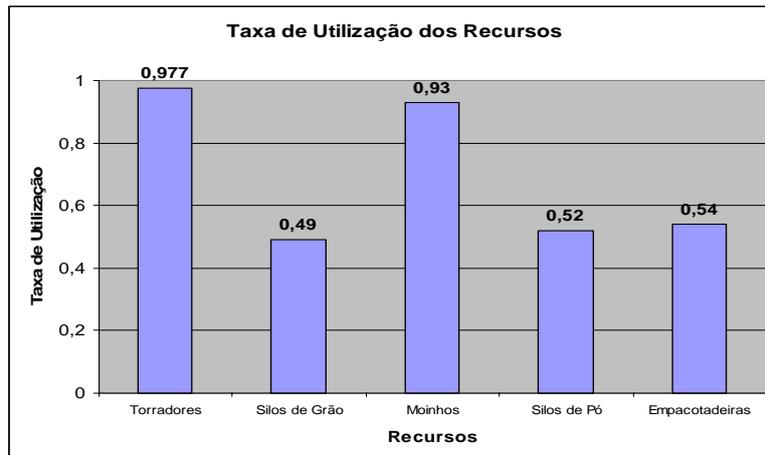


Figura 03. Taxa de utilização dos recursos após a 5 replicações.

Em resumo, o início das replicações, a torradora é considerada como gargalo do sistema, porque o sistema ainda não alcançou *warm-up*. Isso significa que o modelo do sistema ainda não estava estabilizado e por isso a taxa de utilização dos demais recursos opera inferiormente. À medida que é avançado o número de replicações, os elementos (grão ou pó de café) estarão preenchendo o modelo e por isso as taxas de utilização passam a aumentar com o tempo porque o volume de produção também aumenta, como mostrados nas replicações 15 e 30 (Figuras 04 e 05).



Figura 04. Taxa de utilização dos recursos após 15 replicações.



Figura 05. Taxa de utilização após 30 replicações.

Notou-se que os moinhos do sistema real passam a ser os gargalos, pois estes estão operando acima dos demais, ou seja, 0,976. Semelhantemente a dizer que outros recursos operam abaixo do que é capaz de processar, o que resulta em ociosidade.

Considere o caso em que se deseja determinar o número de moinhos necessários ao longo do tempo para que a igualdade da expressão (3) seja verdadeira. Para testar a validade desta expressão, vamos isolar o fluxograma em silos de grãos (SG)-moinhos, como mostrado em (5).

$$\sum Q_{SG(i)} * n_{SG(i)}(t) / \frac{a + \text{tempo_operação}(i)}{a} = \sum Q_{moinhos(j)} * n_{moinhos(j)}(t) / \frac{a + \text{tempo_operação}(i) + \frac{d_{ij}}{v_{ij}(t)} + \text{tempo_operação}(j)}{a + \text{tempo_operação}(i) + \frac{d_{ij}}{v_{ij}(t)}} \quad (5)$$

É natural que os valores de n's sejam nulos apesar de já estarem instalados no sistema produtivo. Por exemplo, dependendo da demanda, pode não ser necessário inserir grande quantidade de matéria-prima grãos de café.

Sabendo-se que a taxa de utilização é dado por (ver expressão 6):

$$\text{taxa} = \frac{\text{Demanda}}{\text{Capacidade} * n} = \frac{\text{Demanda}}{\text{Capacidade_Total}} \quad (6)$$

Os dados da Figura 05 da replicação 5 mostram que a taxa de utilização de silos de grão vale 0,49. Então é possível obter a quantidade de café que foi processada. Ao inserir o valor da demanda de 2619, tem-se:

$$0,49 = \frac{2619}{\text{Quantidade_total_processada}} \rightarrow \text{Quantidade_total_processada} = 5344,90 \text{ kg/h.}$$

Isto significa que os moinhos devem processar também a esta quantidade. Toda parte esquerda da expressão (7) vale, para replicação 5, 5344,90. Fazendo os mesmos cálculos para as replicações 15 e 30, resulta na Tabela 02.

$$5344,90 = Q_{\text{moinho}} * \sum (n_{\text{moinhos}}) / \frac{a + \text{tempo_operação}(i) + \frac{d_{ij}}{v_{ij}(t)} + \text{tempo_operação}(j)}{a + \text{tempo_operação}(i) + \frac{d_{ij}}{v_{ij}(t)}} \quad (7)$$

Tabela 02. Variação do número de moinhos em função da variação da demanda ao longo do tempo.

Replicação	Quantidade processada(Silos de grão)	Número de moinhos necessários
5	5344,9	2,672
15	5017,24	2,51
30	5344,9	2,672

Pode-se notar que o resultado da variável n pode ser um valor não inteiro, e por esta razão, arredondar-se-á o valor para cima por se tratar do número de moinhos. Nota-se também que a sua quantidade inicial é suficiente (na empresa existem 2 moinhos). Com o passar do tempo, representado pelas replicações, e com o sistema mais estabilizado apesar da instabilidade da demanda, os moinhos tendem a ficarem sobrecarregados e passam a exigir 3 moinhos, ver Figura 06. Entretanto acrescentar moinhos pode transferir gargalos para outros equipamentos.

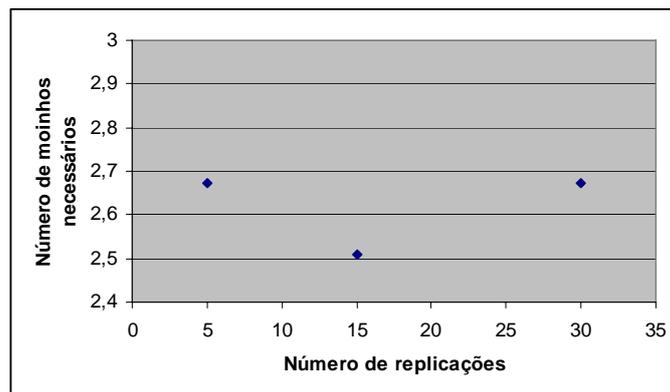


Figura 06. Número de moinhos necessários em função do número de replicações.

Por esta razão o tópico 4.3 apresenta a aplicação do procedimento na empresa.

4.3. APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO

Os dados de entrada ao modelo são: Demanda_hora=2619; Número de tipos de equipamentos=5; Capacidade equipamento 1 (torrador) =1260; Capacidade equipamento 2 (silos de grão) =2016; Capacidade equipamento 3 (moinhos) =2000; Capacidade equipamento 4 (silos de pó) =5000; Capacidade equipamento 5 (empacotadeiras) =330. Ao inserir os dados de entrada ao programa computacional, obteve-se os seguintes resultados:

Entre com a demanda por hora	2619
Entre com o numero do tipo de equipamentos	5
Entre com a capacidade do equipamento 1 em horas	1260
Entre com a capacidade do equipamento 2 em horas	2016
Entre com a capacidade do equipamento 3 em horas	2000
Entre com a capacidade do equipamento 4 em horas	5000
Entre com a capacidade do equipamento 5 em horas	330

Iteracao Atual e:1
O equipamento gargalo e:5

Iteracao Atual e:2
O equipamento gargalo e:5

Iteracao Atual e:3
O equipamento gargalo e:5

Iteracao Atual e:4
O equipamento gargalo e:1

Iteracao Atual e:5
O equipamento gargalo e:5

Iteracao Atual e:6
O equipamento gargalo e:5

Iteracao Atual e:7
O equipamento gargalo e:5

Iteracao Atual e:8
O equipamento gargalo e:3

Iteracao Atual e:9
O equipamento gargalo e:2

Iteracao Atual e:10
O equipamento gargalo e:5

Iteracao Atual e:11
O equipamento gargalo e:1

A taxa de utilizacao dos equipamentos 1 e: 6.9285714286E-01
A Capacidade Total 1 e: 3.7800000000E+03
Deve-se remover do equipamento 1 uma capacidade extra superior a: 7.0005600000E+02
Deve-se remover do equipamento 1 uma capacidade extra inferior a: 1.1610000000E+03
Sao necessarios no minimo 2.0785714286E+00 equipamentos do tipo1
Sao necessarios no maximo 2.4444000000E+00 equipamentos do tipo1

A taxa de utilizacao dos equipamentos 2 e: 6.4955357143E-01
A Capacidade Total 2 e: 4.0320000000E+03

Deve-se remover do equipamento 2 uma capacidade extra superior a: 9.5205600000E+02
Deve-se remover do equipamento 2 uma capacidade extra inferior a: 1.4130000000E+03
Sao necessarios no minimo 1.2991071429E+00 equipamentos do tipo2
Sao necessarios no maximo 1.5277500000E+00 equipamentos do tipo2

A taxa de utilizacao dos equipamentos 3 e: 6.5475000000E-01
A Capacidade Total 3 e: 4.0000000000E+03
Deve-se remover do equipamento 3 uma capacidade extra superior a: 9.2005600000E+02
Deve-se remover do equipamento 3 uma capacidade extra inferior a: 1.3810000000E+03
Sao necessarios no minimo 1.3095000000E+00 equipamentos do tipo3
Sao necessarios no maximo 1.5399720000E+00 equipamentos do tipo3

A taxa de utilizacao dos equipamentos 4 e: 5.2380000000E-01
A Capacidade Total 4 e: 5.0000000000E+03
Deve-se remover do equipamento 4 uma capacidade extra superior a: 1.9200560000E+03
Deve-se remover do equipamento 4 uma capacidade extra inferior a: 2.3810000000E+03
Sao necessarios no minimo 5.2380000000E-01 equipamentos do tipo4
Sao necessarios no maximo 6.1598880000E-01 equipamentos do tipo4

A taxa de utilizacao dos equipamentos 5 e: 9.9204545455E-01
A Capacidade Total 5 e: 2.6400000000E+03
Deve-se remover do equipamento 5 uma capacidade extra superior a: 0.0000000000E+00
Deve-se remover do equipamento 5 uma capacidade extra inferior a: 2.1000000000E+01
Sao necessarios no minimo 7.9363636364E+00 equipamentos do tipo5
Sao necessarios no maximo 8.0000000000E+00 equipamentos do tipo5

4.4. INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS DO PROGRAMA E COMENTÁRIOS

O tópico 4.3 é composto na realidade por três partes. A primeira mostra o número da iteração e o equipamento gargalo.

A iteração representa a repetição da etapa de acréscimo de capacidades a fim de atingir $(\text{Demanda_hora}/\text{Capacidade_equipamento_gargalo}) \leq 1$ seja satisfeita. Quando isso acontece, a Capacidade_equipamento_gargalo pode ser chamado de Capacidade_Total_equipamento, porque é toda capacidade que foi somada para que a razão seja ≤ 1 . À medida que a iteração aumenta, apenas a capacidade do gargalo é acrescentada com capacidade unitária do equipamento gargalo. Por exemplo, considere o caso em que o programa fornece no resultado que o equipamento 1 é gargalo na iteração 4. Isto significa após três repetições, o equipamento 1 é gargalo passa a ser gargalo e então deve ser adicionada a capacidade unitária a ele. E assim por diante.

Já na segunda parte dos resultados apresenta a taxa de utilização dos equipamentos. Esse é obtido a partir de $\text{Demanda_hora}/\text{Capacidade_Total_equipamento}$. Quando a relação tende a 1, significa que a capacidade projetada tende a produzir o que a demanda exige. Deve-se lembrar que a taxa de utilização é inversamente proporcional a Capacidade_Total_equipamento. Assim quando a Capacidade_Total é acrescentada, significa que a taxa de utilização será reduzida podendo ser inferior a 85%. Dessa forma, é necessário que calcule a capacidade que deve ser removida para que a taxa de utilização esteja entre 0,85 a 1.

Ao removermos a capacidade extra, estipulada pelos limitantes superior e inferior, a taxa de utilização passa a variar entre 85 a 100%. Por exemplo, considere ainda o caso do equipamento 1. O programa sugere que removamos uma capacidade maior que 700 e

menor que 1161. Assim, a Capacidade total restante seria 3780-700 e 3780-1161, ou seja, 3080 e 2619, respectivamente. Ao dividir a demanda_hora por estes dois valores, resultam justamente em 0,85 e 1.

4.5. ESCOLHA DOS EQUIPAMENTOS DO MERCADO

E por fim, a última parte dos resultados obtidos no tópico 4.3 mostra o número maior e menor dos equipamentos necessários para que a faixa de utilização atinja entre 85 a 100%, que é na realidade consequência das capacidades extras que foram removidas. Ainda segundo o equipamento 1, por exemplo, o programa sugere que no mínimo sejam utilizados 2.08 e no máximo 2.44 de capacidade 1260kg/h. Ou seja, duas unidades do equipamento 1 mais 0,08 e 0,44 de 1260, que são 100,8kg/h e 554,4kg/h. Utilizar justamente duas unidades do equipamento 1 não será capaz de atender a demanda e utilizar três unidades fará com que a capacidade dos equipamentos seja mal aproveitados por estarem superdimensionados. O ideal, portanto, seria que o mercado pudesse dispor equipamentos de ampla variedade de capacidade tais como capacidades entre 100,8 e 554,4kg/h.

4.6. COMPARAÇÃO COM A EMPRESA ATUAL

Os resultados obtidos aplicando-se o procedimento no programa Pascal 7.0 permitem que se façam comparações entre o melhor resultado da heurística proposta com o do modelo (da empresa).

O programa fornece o número de equipamentos necessários para que a taxa de utilização esteja entre 0,85 a 100%. Ao compararmos estes dados com a instalação real, verifica-se que:

Equipamento 1:

O número de equipamentos do tipo 1 da empresa estudada está abaixo do exigido. Equipamento extra deveria ser adquirido mas não de capacidade 1260 e sim um equipamento entre 100,8kg/h e 554,4kg/h.

Equipamento 2:

O número de equipamentos exigidos está entre 1.299 e 1.52775. Como os equipamentos na empresa são superiores a este intervalo, significa que grande parte dos equipamentos estão ociosos e portanto custos extras de instalação gerando por fim aumento do preço final do produto.

Equipamento 3:

Note que o equipamento já está superdimensionado. Se trabalhar somente com os resultados de simulação pode conduzir o Decisor ao erro, pois solicita ter 3 equipamentos. Isso acontece porque inicialmente o sistema produtivo foi mal projetado fazendo com que os equipamentos estejam trabalhando desproporcionalmente o que acarretou na sobrecarga sobre os moinhos. Segundo a proposta, o que pode ser feito é adquirir um equipamento de capacidade 2000kg/h mais um outro que varie entre 620 a 1080 kg/h.

Equipamento 4:

O equipamento 4 está superdimensionado, sendo que deveria escolher equipamentos entre 2620kg/h a 3080kg/h. Isso explica o por quê a taxa de utilização ser tão reduzido.

Equipamento 5:

E por fim verifica-se também que existe um superdimensionamento de capacidade, pois existem diversos equipamentos acima de 330kg/h de capacidade de processamento.

5. CONCLUSÃO

É importante que o Decisor planeje o sistema produtivo baseado na relação da demanda e capacidade de equipamentos antes de realizar qualquer tipo de instalação. Equipamentos superdimensionados acarretam em maiores custos de instalação, o que pode encarecer o produto final.

Aumentar o número de equipamentos gargalo pode causar ociosidade como também transferir gargalos para outros equipamentos. É importante que o mercado disponibilize uma ampla variedade de capacidade de equipamentos, dando assim maior flexibilidade ao valor da taxa de utilização.

Mesmo assim, a chance de resolver a questão do gargalo é remota porque na prática a demanda em si não é constante, o que altera a razão da demanda/capacidade. Isso quer dizer que sempre haverá equipamento gargalo. Felizmente é possível melhorar a taxa de utilização, como apresentado pelo procedimento proposto neste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

BANKS, J. et al. **Discrete-event system simulation**. New Jersey: 2nd ed, Prentice-Hall, 1984.

Benjaafar, S. & Sheikhzadeh, M. Design of flexible layouts for manufacturing systems. In: Proceedings of the 1996 IEEE – International Conference on Robotics and Automation, 1996, Minneapolis, Minnesota.

Blackstone, J. H. Jr. **Capacity management**. Cincinnati: 10. Ed. South-Western College Publishing, 1989.

CORRÊA, H. L. & GIANESI, I. G. N. **Just in time, MRP II e OPT: Um enfoque estratégico**. São Paulo: Ed. 2, Atlas, 1993.

Filho, E. V. G. **Sistemas de manufatura: projeto de arranjo físico**. São Carlos: Publicações-EESC, 2005.

Gordon, G. **System simulation**. New Jersey: 2nd ed, Prentice-Hall, 1969.

Heragu, S. **Facilities design**. Boston: PWS Publishing Company, 1997.

Law, A.M. & Kelton, W.D. **Simulation modeling and analysis**. New York: 2nd ed., McGraw-Hill, 1991.

Ribeiro, J. F. F. & Meguelati, S. Organização de um sistema de produção em células de fabricação. **Revista gestão & produção**, v. 9, n. 1, p. 62-77, 2002.

Slack, N.; Chambers, S.; Harland, C.; Harrison, A. & Johnston, R. **Administração da produção**. São Paulo: Atlas, 1999.

Iterative methodology to improve the resources utilization rate of a production system

Chin Shih, sychin@sc.usp.br

Universidade de São Paulo (USP), Doutorado em Engenharia Mecânica
São Carlos, SP, Brasil

*Received: November, 2006 / Accepted: August, 2007

ABSTRACT

The management of production resources is an important activity to acquire competitive advantage, which its goal is to integrate the equipments aiming at attending the demand with a lower final product price. This paper presents a typical issue in production resources management which when extra capacity of bottleneck equipment is added, it generates over sizing and therefore idle. In addict to this, this decision may transfer the bottleneck to other equipments. A model in discrete simulation in Arena® 5.0 is constructed and executed to monitor the bottleneck formation, based on the information of the utilization rate. Next, it is presented in this paper an iterative methodology to improve the utilization rates of all equipments, obtained from the mathematical modeling of balancing elements which pass through the production system. This methodology can be easily implemented in programming software Pascal 7.0.

Key-words: Management capacity of production resources. Discrete of simulation model. Performance of the system.
