

METODOLOGIA PARA OTIMIZAÇÃO EM SUBCONTRATAÇÃO DE SERVIÇOS DE USINAGEM

Anderson Rogério Faia Pinto^{a*}, Antonio Fernando Crepaldi^a,
Marcelo Seido Nagano^b, Jair Wagner de Souza Manfrinato^a

^aUniversidade Estadual Paulista– UNESP(FEB), Bauru – SP, Brasil

^bUniversidade de São Paulo – USP(EESC), São Carlos – SP, Brasil

Resumo

A Pesquisa Operacional (PO) é uma ciência eminente à competitividade empresarial e a capacidade dos algoritmos e planilhas eletrônicas hoje existentes permite aplicá-la por um custo menor e com menos complexidade. Todavia, planilhas eletrônicas atreladas às técnicas de PO, quando direcionadas a problemas reais, são ainda pouco exploradas em seu pleno potencial. A fim de melhor utilizá-las, este artigo emprega o *Microsoft Office Excel* a um problema prático de otimização e tomada de decisão de subcontratação de usinagem. Em geral, embora considerado um problema frequente, não é de fácil solução, otimizar o *mix* de produção versus a subcontratação, em função das restrições e recursos disponíveis, demanda investimentos em softwares específicos. Neste sentido, esta pesquisa tem como objetivo desenvolver um software a ser denominado de SOSU (Software de Otimização para Subcontratação de Usinagem). O SOSU deve apresentar o melhor *mix* de usinagem interna e subcontratada para n tipos de peças que, ao longo de determinado período de tempo t , maximize a capacidade instalada e atenda toda a demanda ao menor custo possível. A metodologia adotada segue o referencial bibliográfico e assume-se que os dados necessários a modelagem matemática provem das áreas de produção e de um sistema de custos já estruturado. A natureza do problema fundamenta a aplicação da Programação Linear (PL), o *Visual Basic for Applications (VBA)* é utilizado para a implementação computacional e interface com o usuário e o suplemento *Solver* para encontrar a solução. As análises dos experimentos demonstram que o SOSU otimiza os recursos e aperfeiçoa o processo decisório, além de fácil operacionalização, pode ser implementado ou adaptado de forma ágil e sem a necessidade de grandes investimentos.

Palavras-chave: Usinagem; Tomada de Decisões; Pesquisa Operacional; Programação Linear.

Abstract

Operational Research (OR) is an eminent science to business competitiveness and the capacity of algorithms and spreadsheets that exist today allows people to apply them for a lower cost and with less complexity. However, spreadsheets linked to OR techniques, when directed to real problems, are still little explored in their full potential. In order to use them better, this article utilizes the Microsoft Office Excel to solve an optimization practical problem and decision-making of machining subcontracting. In general, although considered a frequent problem, is not of easy solution, optimize the mix of production versus outsourcing, because of the restrictions and resources available, it requests investments in specific software. In this way, this research aims to develop software to be called SOSU (Optimization Software for Machining Subcontracting). SOSU should introduce the best mix of internal and subcontracted machining for n types of parts that, over a certain period of time t , maximize capacity and meet all the demand at the lowest cost possible. The methodology adopted follows the bibliographic reference and it is assumed that the necessary data to prove from mathematical modeling of production areas and from a system of costs already structured. The nature of the problem justifies the application of Linear Programming (LP), Visual Basic for Applications (VBA) is used for computational implementation and interface with the user and the supplement Solver to find the solution. The analysis of the experiments show that the SOSU optimizes resources and improves the decision-making process, besides an easy operation, it can be implemented or quickly adapted and without the need of large investments.

Keywords: Machining, Decisions Making; Operations Research; Linear Programming.

*Autor para correspondência: e-mail: anderson@life.com.br

1. Introdução

Diariamente surgem nas empresas problemas relacionados à utilização dos recursos de forma mais econômica, rápida e segura, o que torna a tomada de decisões uma tarefa complexa com as quais os gestores têm de lidar (BOGHI; SHITSUKA, 2005). Evidentemente, a otimização de recursos é elemento indispensável à competitividade e maximização do resultado empresarial (SCALABRIN *et al.*, 2006; PINTO, 2012). De acordo com essa perspectiva, os gestores tentam eliminar os riscos das decisões utilizando-se de técnicas de Pesquisa Operacional (PO) que os auxiliem nos processos de gestão e otimização, o que faz da PO elemento eminente ao alcance dos objetivos corporativos (ACKOFF, 1979; GOLDBARG; LUNA, 2005).

Não obstante, grande parte das atividades de PO requer análise de dados, modelagem matemática, programação e simulações computacionais (YANG; KOZIEL, 2010). Porém, a capacidade de cálculo dos algoritmos e planilhas eletrônicas hoje existentes, em particular o *Microsoft Office Excel* em ambiente *Windows*, e sua facilidade de implementação em microcomputadores, torna possível a modelagem da PO por um custo menor e com menos complexidade (THIRIEZ, 2004; MOURA, 2007).

É inquestionável que as planilhas eletrônicas são ferramentas analíticas onipresentes em diferentes ambientes de negócios e as organizações dependem fortemente delas para a tomada de decisão (MCGILL; KLOBAS, 2005; GROSSMAN, 2006; HESSE; SCERNO, 2009). Entretanto, embora muito conhecidas no meio acadêmico das ciências de gestão, seu uso em modelagens empíricas de PO projetadas à solução de problemas reais tem recebido pouca atenção ou não exploradas em pleno potencial (GASS; HIRSHFELD; WASIL, 2000; THIRIEZ, 2001; MUNISAMY, 2009).

A fim de melhor utilizá-las como ferramentas de apoio gerencial, este artigo emprega o *Microsoft Office Excel* 2010 a um problema prático de otimização e tomada de decisão de subcontratação de usinagem. Segundo Souza (1997) e Marcondes (2012), o mercado de usinagem é extremamente sensível às variações econômicas e altamente competitivo em relação a preço e qualidade. Desta forma, muitas empresas buscam sobrevivência e competitividade otimizando processos e custos por meio de práticas intimamente relacionadas à estratégia de manufatura, dentre outras, como o *downzising* e *just-in-time*, a terceirização ou subcontratação (NETO, 1995; MARCONDES, 2012; OKE; ONWUEGBUZIE, 2013).

Nos Estados Unidos e Brasil a subcontratação de usinagem tem aumentado significativamente, principalmente na indústria automotiva, uma vez que é muito utilizada para comportar a demanda variável (NETO, 1995; ELLRAM; BILLINGTON, 2001). De acordo com Borges (2011), pesquisa divulgada em 2007 na *World Cutting Toll Conference* afirmava que o mercado mundial de ferramentas de corte somavam 12 bilhões de EUR/ano e o Brasil representava 4% deste total, i.e., R\$1,1 bilhão/ano ao câmbio corrente em 2011. Embora não haja dados consolidados até o presente, espera-se uma elevação da subcontratação de usinagem no mercado brasileiro. Isto porque, conforme o IBGE, na comparação do mês de jan/2013 e jan/2012, o setor industrial do país cresceu 5,7%, o que corresponde à segunda expansão mais expressiva desde fev/2011 (7,5% na comparação com o mês de fev/2010).

Nesta pesquisa, o problema em estudo consiste, essencialmente, em encontrar o melhor *mix* de usinagem interna e subcontratada para n tipos de peças que ao longo de determinado período de tempo t maximize a capacidade instalada e atenda toda a demanda ao menor custo possível. Em geral, este problema pode ser atribuído a estudos que tem como escopo a obtenção de vantagens competitivas ou mesmo em face de um aumento inesperado na demanda ao qual exceda a capacidade de produção. Na ocorrência de tais eventos,

considerando a dificuldade de se optar por novos investimentos e de maneira a suprir toda a demanda, às únicas alternativas são; a realização de horas extras ou a subcontratação deste tipo de serviço.

No entanto, embora considerado um problema frequente, muitas empresas não dispõem de um sistema para resolvê-lo de forma otimizada, sem que para isso sejam necessários grandes investimentos em softwares específicos. O fato é que, encontrar a solução ótima a cada novo volume de demanda, em função das restrições dos recursos empregados, é na maioria das vezes muito difícil, devido às seguintes questões: i) diversidade de peças a usinar; ii) número de operadores e de máquinas; iii) tempos dos processos e de paradas de máquinas (*setup*, manutenções, etc.); iv) análise de viabilidade para subcontratações e realização de horas extras, tanto em dias normais quanto em dias especiais (feriados, finais de semana, etc.).

Evidentemente, a falta de informações quantitativas dificulta a formulação do planejamento e acaba por acarretar deficiências aos processos de negociação e tomada de decisões. Se a questão custos é elemento essencial à competitividade, sua má gestão pode onerar o sistema fabril e gerar impactos financeiros negativos à organização. Logo, a formulação de uma ferramenta que se adéque ao contexto apresentado justifica esta pesquisa. O objetivo, então, é o desenvolvimento de um software de fácil utilização e reprodução a ser denominado de SOSU (Software de Otimização para Subcontratação de Usinagem) que apresente uma solução otimizada para o problema em questão.

A metodologia adotada é baseada em Arenales *et al.* (2007), Lachtermacher (2007) e Taha (2008). A natureza do problema, que apresenta um comportamento linear onde as variáveis de decisão são variáveis inteiras, fundamenta a aplicação da Programação Linear (PL). O *Visual Basic for Applications (VBA)* é utilizado para a implementação computacional

e interface com o usuário e o suplemento *Standard Solver* para encontrar o conjunto solução. O SOSU será submetido à experimentação computacional em um microcomputador com processador Core I5 de 2.3GHz, 8GByte de RAM e 750 GByte de HD. Doravante, a seção 2 apresenta uma breve explanação da PO e suas subseções o embasamento teórico da PL e as etapas da metodologia proposta. A seção 3 trata de aspectos teóricos para a definição do problema e a seção 4 a sua representação e notações lógicas para o SOSU. As seções 5, 6 e 7 estabelecem a essência da pesquisa no qual exprimem a formulação do modelo de PL, a modelagem matemática e as interfaces do SOSU até a solução do problema. As seções 8 e 9 trazem a experimentação, análise dos resultados obtidos e critérios para validação e implementação do SOSU, o artigo se encerra com as respectivas conclusões.

2. A Pesquisa Operacional (PO)

A Pesquisa Operacional (PO) é um método científico de tomada de decisões aplicado ao estudo de alternativas num problema, visando à obtenção de uma base quantitativa com a finalidade de se obter uma solução ótima em termos de metas visadas, que melhor satisfaçam aos objetivos de uma organização (ACKOFF; SASIENI, 1974; SHAMBLIN; STEVENS JR., 1979; KOONTZ; O'DONNELL; WEIHRICH, 1987). Atualmente a PO envolve o conhecimento de diversas disciplinas entre as quais Matemática, Lógica, Estatística, Computação, Produção, Administração, Contabilidade e Logística (BOGHI; SHITSUKA, 2005). Devido ao avanço tecnológico, tornou-se possível às organizações uma maior agilidade na busca por soluções otimizadas em virtude da possibilidade de se aplicar a PO por meio de sofisticados programas computacionais.

A sociedade internacional que representa as áreas de estudos da PO esta sediada nos EUA e é intitulada de INFORMS (*Institute for Operations Research and the Management Sciences*), no Brasil este órgão é a SOBRAPO (Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional)

(LACHTERMACHER, 2007). O instituto americano INFORMS define a PO como uma disciplina profissional que trata da aplicação da tecnologia da informação para a tomada de decisão (ARENALES *et al.*, 2007). Em resumo a PO é um método para orientar os executivos na tomada de decisões a respeito de operações sob o seu controle. Utiliza-se da programação de modelos matemáticos, estatísticos e computacionais cuja função é encontrar soluções otimizadas, de forma lógica, para os problemas quantificáveis que envolvam o uso de recursos escassos nas mais diversas atividades. Lachtermacher (2007) descreve ainda que a PO pode ser utilizada em problemas de: otimização de recursos, localização, roteirização, carteiras de investimento, alocação de pessoas e de previsão e planejamento.

2.1. Programação Linear (PL)

A Programação Linear (PL) consiste em uma técnica matemática que tem como finalidade distribuir de forma eficiente o uso de recursos limitados para atender a um determinado objetivo, em geral, maximizar lucros ou minimizar custos, e a essa solução dá-se o nome de solução ótima (ARENALES *et al.*, 2007; LACHTERMACHER, 2007; TAHA, 2008). Os recursos limitados são denominados restrições e podem ocorrer tanto em relação à maneira que devem ser utilizados como em relação às quantidades existentes. Deste modo, a formulação de um modelo de PL deve ser estruturada por meio de um sistema de equações matemáticas lineares e sempre limitada por restrições de atuação. Taha (2008) explica que um modelo de PL, como em qualquer modelo de PO, tem três componentes básicos:

1. Variáveis de decisão (o que se procura determinar);
2. Função objetivo (o que se precisa otimizar);
3. Restrições (o que a solução deve satisfazer).

A modelagem de um problema de otimização é tão importante quanto a sua solução e caracteriza-se como um modelo de programação matemática (ALMEIDA; VIANA;

THOMAZ, 2009). Em Lachtermacher (2007) é demonstrada uma programação matemática de PL em que todas as funções-objetivos e restrições são apresentadas por funções lineares:

Otimizar: $Z = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$

Sujeito a:

$$\left. \begin{array}{l} g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ g_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \vdots \\ g_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{array} \right\} \begin{array}{l} \leq \\ = \\ \\ \leq \end{array} \left\{ \begin{array}{l} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{array} \right. \quad (1)$$

Onde:

$$f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$$

$$g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{in}x_n, \text{ para } i = 1, \dots, m$$

- n é o número de variáveis;
- m é o número de restrições do problema;
- i é o índice de uma determinada restrição ($i = 1, 2 \dots m$);
- j é o índice de uma determinada variável ($j = 1, 2 \dots n$);
- c_i é o coeficiente (constante) da variável x_i da função objetivo;
- a_{ij} é o coeficiente (constante) da variável x_i da j -ésima restrição.

Ou na forma reduzida:

Maximizar: $Z = \sum_{j=1}^n c_j x_j$

Sujeito a: $\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i \quad i = (1, 2, \dots, m)$ (2)

$$x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0$$

Conforme demonstrado, as restrições representam as limitações dos recursos e são expressas sob a forma de um conjunto de equações ou inequações lineares que traduzem a condição real de que o modelo só pode ser manipulado dentro de certos limites ou proporções, i.e., obedecendo a critérios previamente estabelecidos (ACKOFF; SASIENI, 1974; SCALABRIN *et al.*, 2006; PINTO; COSTA; CREPALDI, 2011). Portanto, a programação matemática de um problema de PL é baseada em um conjunto de variáveis e restrições, e que

podem ser implementadas por meio de arquétipos computacionais para realizar simulações do que se quer ver presente na função objetivo.

Em síntese, a PL melhora a utilização dos recursos, e ao possibilitar simular cenários permite uma infinidade de análises, o que torna possível redefinir estratégias em curto espaço de tempo (SCALABRIN *et al.*, 2006). No entanto, as empresas devem ser capazes de reconhecer os problemas que podem ser solucionados pela PL, i.e., aqueles classificados como problemas de otimização contínua, isto é, que apresentam um comportamento linear tanto em relação às restrições como em relação à função objetivo (BIEGLER; GROSSMANN, 2004; SCALABRIN *et al.*, 2006).

2.2. Metodologia de Aplicação da PL

Predominantemente quantitativa, a metodologia de aplicação da PL requer obrigatoriamente uma série de etapas específicas e procedimentos sistematicamente combinados e adequados ao objeto de pesquisa. A metodologia de PL aqui proposta, adaptada às características do problema em questão, é baseada em Arenales *et al.* (2007), Lachtermacher (2007) e Taha (2008). Em relação às análises econômicas para a otimização de usinagem, são dois os modelos básicos amplamente abordados pela literatura; o mínimo custo e a máxima produção, mas quando utilizados grande parte das pesquisas considera somente os custos diretos (SOUZA, 1997). Particularmente, este artigo não tem como escopo propor um método de custeio, mas considera imprescindível a inclusão dos custos indiretos de produção. Destarte, assume-se que as tarifas referentes a cada recurso de usinagem devem provir de um sistema de custos já estruturado, enquanto que os tempos de processos são de responsabilidade das áreas correlatas à produção. Por conseguinte, cada etapa da metodologia bem como a modelagem matemática e aspectos interativos do *VBA* e *Solver* são apresentadas de forma sucinta e ilustrativa, fundamentadas por meio de uma abordagem explicativa com forte

embasamento teórico. Seguindo as metodologias sugeridas, as etapas propostas são:

- Definição do Problema;
- Representação do Problema;
- Construção do Modelo de PL;
- Software de Apoio (SOSU);
- Solução do Problema;
- Validação do Modelo;
- Implementação do Modelo.

3. Definição do Problema

A definição do problema é a primeira etapa para a formulação de qualquer modelo de PO, é nela em que se apresentam as bases na qual se caracteriza e transforma o problema em documento formal. Ainda que esta fase já tenha sido tratada na introdução, uma abordagem teórica explicativa sobre a definição de problemas se faz necessário ao melhor entendimento da metodologia proposta. Por conseguinte, é essencial que o problema em consideração seja claramente definido, visto que:

- A sua tradução em elementos tangíveis é que se faz compreender a clara percepção de todo o desafio apresentado (GOLDBARG; LUNA, 2005);
- É quase impossível obter uma resposta certa a partir de um problema errado (SHAMBLIN; STEVENS JR., 1979);
- A adequada escolha do melhor ou mais eficiente método depende da natureza e características do problema em si, e do grau de complexidade do modelo para representá-lo, bem como a qualidade das adequações para as soluções em causa (SILVA FILHO; CEZARINO; RATTO, 2009; YANG; KOZIEL, 2010).

A ocorrência de um problema se dá quando o estado atual de uma situação é diferente do estado desejado (LACHTERMACHER, 2007). Seguindo esses conceitos, pode-se afirmar que um problema é sempre determinado pela sua natureza e pode ser identificado por meio de:

- Percepção (Experiência e Casualidade): de forma causal e sequencial por meio do processo pelo qual os indivíduos organizam e interpretam suas impressões sensoriais com a finalidade de dar sentido ao seu ambiente (ROBBINS, 2005).

- **Intenção (Estudo e Pesquisa):** métodos científicos onde o que se busca é atingir algum objetivo, pode ser, uma redução de custos, aumento de produtividade etc.

4. Representação do Problema

A representação do problema é uma das mais importantes etapas, isto porque, é a fase no qual o problema é detalhado de forma que seja possível identificar as variáveis, estabelecer restrições e especificar os parâmetros e notações que mapeiem todo o objeto de pesquisa. O problema em questão é, então, delimitado e configurado sob a complexidade dos aspectos referentes à estrutura organizacional e políticas decisórias que pré-definidas configuram os critérios específicos de gestão.

No problema em estudo, o número de peças é denotado por n e o total de máquinas por $Tmaq$. Seja X o conjunto de n , x refere-se ao registro de cada peça para $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ onde o subscrito $i = (1, 2, \dots, n)$. As máquinas são idênticas e x_i exige um único estágio de processamento, logo, a usinagem de x_i denota uma operação us_i associado a um tempo processamento t_i , i.e., $t_{x1} = t_{x2} = \dots = t_i$. O total de horas estimadas para eventuais paradas de máquinas é intitulado de $Thpar$ e o total de horas de *setup* por $Thset$, ambos podem ser definidos como restrições na disponibilidade de processamento para $Tmaq$. A demanda de x_i é dada por k_i e a data de entrega é equivalente a determinado período t o que não exige sequenciamento de operações para k_i .

O total de operadores é dado por $Thom$ e os dias úteis por du , assim, h^{du} representa as horas de trabalho em du . As horas-extras são pré-determinadas em função de fatores legais e de custos, assim, se de é a notação dada para dias especiais, então he^{du} refere-se à quantidade de horas-extras permitidas em du e he^{de} às permitidas em de . Para efeito de estudo, a tabela 1 esboça uma representação detalhada do problema por meio de um conjunto de dados

PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

hipotéticos configurados em planilha *Excel* no qual serão utilizados na formulação matemática e implementação computacional do software proposto.

Tabela 1 – Planilha da base de dados

Rg. das Peças e Demanda	Custo Minuto dos Recursos de Usinagem			Tempo Minuto de Usinagem			Demanda de Tempo de Usinagem			Custo Unitário		Custo Total de Usinagem CTU		
	x_i	k_i	C_{hom}	C_{maq}	C_{set}	M_{hom_i}	M_{maq_i}	CM_{set_i}	Minutos	Horas	Dias	Cus_i	$CSub_i$	$CTus_i$
1	810	0,98	0,52	1,05	1,50	1,50	30,00	1.245,00	20,75	3	2,29	2,87	1.854,00	2.322,20
2	385	0,98	0,52	1,05	1,50	1,50	30,00	607,50	10,13	1	2,33	3,12	897,75	1.201,81
3	380	0,98	0,52	1,05	1,80	1,80	30,00	714,00	11,90	1	2,78	3,37	1.057,50	1.281,59
4	470	0,98	0,52	1,05	1,80	1,80	30,00	876,00	14,60	2	2,77	3,37	1.300,50	1.585,12
5	2045	0,98	0,52	1,05	2,10	2,10	45,00	4.339,50	72,33	9	3,17	3,89	6.489,00	7.945,97
6	2045	0,98	0,52	1,05	2,10	2,10	45,00	4.339,50	72,33	9	3,17	3,88	6.489,00	7.939,36
7	2045	0,98	0,52	1,05	2,50	2,50	45,00	5.157,50	85,96	11	3,77	3,88	7.716,00	7.939,36
8	810	0,98	0,52	1,05	2,98	2,98	58,00	2.471,80	41,20	5	4,55	6,25	3.681,60	5.060,91
9	385	0,98	0,52	1,05	3,10	3,10	58,00	1.251,50	20,86	3	4,81	6,45	1.851,15	2.483,89
10	380	0,98	0,52	1,05	3,18	3,18	58,00	1.266,40	21,11	3	4,93	6,89	1.873,50	2.616,34
11	470	0,98	0,52	1,05	3,85	3,85	58,00	1.867,50	31,13	4	5,90	7,16	2.775,15	3.364,96
12	810	0,98	0,52	1,05	5,25	5,25	80,00	4.332,50	72,21	9	7,98	8,99	6.462,75	7.283,14
13	385	0,98	0,52	1,05	5,96	5,96	80,00	2.374,60	39,58	5	9,16	9,79	3.525,90	3.769,98
14	380	0,98	0,52	1,05	8,10	8,10	80,00	3.158,00	52,63	7	12,37	9,97	4.701,00	3.788,13
15	470	0,98	0,52	1,05	10,55	10,55	80,00	5.038,50	83,98	10	16,00	10,05	7.521,75	4.724,06
Total	-	-	-	-	-	-	-	27.693,88	461,56	58	-	-	58.196,55	63.306,81

Notações de Custos e Tempos	x - Registro ou modelo da peça	$Mset_i$ - Minutos de <i>setup</i> para k_i
	k_i - Demanda total para cada x_i	$Mmaq_i$ - Minutos de máquina para k_i
	$Cset$ - Custo minuto de <i>setup</i>	Sub_i - Custo de usinagem subcontratada para k_i
	$Cmaq$ - Custo minuto de máquina	Cus_i - Custo médio interno de usinagem para k_i
	$Chom$ - Custo minuto de mão de obra	$CTus_i$ - Custo total de usinagem interna para k_i
$Mhom_i$ - Minutos de mão de obra para k_i	$CTsub_i$ - Custo total de usinagem subcontratada para k_i	

Fonte: Autor

Na planilha é possível visualizar os custos, tempos de processo e as notações de referencia que a torna auto-explicativa. O coeficiente de custo médio interno para usar k_i em dias normais no período t é apurado de acordo com a equação 3.

$$Cus_i = \frac{Chom_i \times Mhom_i \times Cmaq_i \times Mmaq_i \times k_i + Cset_i \times Mset_i}{k_i} \quad (3)$$

Não obstante, a provisão da planilha com dados de custos e tempos cabe às áreas específicas detalhadas na seção 2.2, seus métodos de apuração são, portanto, omitidos. Para referencias sobre abordagem de custeio, tempos e velocidade de usinagem vide Souza (1997). Já para mensurar o total da demanda em minutos de usinagem, intitulada de *DTMus*, considera-se às restrições de $Thset$ e $Thpar$ conforme demonstrado pela expressão 4.

$$DTMus = \sum_{i=1}^{15} t_{xi} \times k_i + Thset + Thpar \quad (4)$$

Se $Thset$ e $Thpar$ geram ociosidades de não operação, o total disponível de minutos de usinagem $TMus$ é dado pela equação 5, sendo, então, equivalente ao tempo de processo para $Tmaq$.

$$TMus = du \times h^{du} - Thset - Thpar \times Tmaq \times 60 \quad (5)$$

Nota-se que o problema apresenta um comportamento linear no qual as variáveis de decisão k_i são variáveis inteiras, logo, se $Cusi$ e $TMusi$ são variáveis contínuas não negativas, a Programação Linear (PL) é empregada como técnica de solução. Todavia, se $TMus < DTMus$ faz-se necessário mensurar a viabilidade de se realizar horas extras ou optar por subcontratações ao qual, atrelado aos níveis de complexidade abordados, fundamenta o desenvolvimento de um software de apoio.

5. Construção do modelo de PL

A construção do modelo é a etapa onde se exprime a representação do problema reproduzindo-o em expressões matemáticas. Boghi e Shitsuka (2005) salientam que é fundamental que se identifique as variáveis do problema, crie as equações e estabeleça as restrições. Segundo Taha (2008) e Goldberg e Luna (2005), isto requer a resposta a três perguntas, que, atreladas a alguns métodos para ajustar a demanda, conforme propostos por Slack *et al.* (1999), tem-se:

1. Quais são as **alternativas** para a decisão?

- *Usinar as peças internamente ($Qusi$):* as x_i peças devem ser usinadas em dias úteis, utilizando-se de horas extras, tanto he^{du} como he^{de} ;
- *Utilizar processo de subcontratação ($Qsub_i$):* o serviço de usinagem de x_i deve ser subcontratado quando $Sub_i > Cus_{ir}$ ou $TMus_r < DTMus_r$.

2. Sob quais **restrições** a decisão é tomada?

- *Área de Usinagem:* a usinagem de x_i depende da capacidade e quantidade disponível dos seguintes recursos $Tmaq$, $Thom$ e $TMus_r$.

3. Qual o **critério** objetivo para avaliar as alternativas?

- *Definir um Modelo de PL:* o modelo deve apresentar o melhor *mix* de operações, tal que minimize o custo total de usinagem *CTU* e atenda k_i .

O modelo deve, então, determinar a relação ótima entre as variáveis de solução Qus_i e $Qsub_i$ de forma a minimizar *CTU* conforme expresso pela equação 6.

$$\text{Minimizar } CTU = \sum_{i=1}^{15} Cus_i + Sub_i$$

Sujeito a: (6)

$$\sum_{i=1}^{15} Qus_i + Qsub_i = k_i \quad i = (1, 2, \dots, n)$$

$$TMus \leq TMus_r$$

$$\sum_{i=1}^{15} x_i \geq 0$$

É possível constatar que as restrições sujeitas ao modelo em questão compreendem as condições pré-definidas de negociação e da capacidade disponível dos recursos utilizados no processo, e são detalhadas a seguir:

1. *Restrições de Demanda:* O modelo deve atender k_i independente de tempo, se $Qus_i + Qsub_i = k_i$, a expressão que representa esta restrição é definida pela equação 7.

$$\sum_{i=1}^{15} Qus_i + Qsub_i = k_i \quad i = (1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

2. *Tempo de Usinagem Interna:* Limita todo o processo e garante que Qus_i deve respeitar o tempo estipulado não podendo ser superior a $TMus_{ri}$, conforme demonstra a equação 8.

$$\sum_{i=1}^{15} TMus_{ki} \leq TMus_r \quad (8)$$

3. *Restrições de Não Negatividade:* Adota-se o padrão de não negatividade para todas as peças, i.e., $QT_i \geq 0$:

$$\sum_{i=1}^{15} k_i \geq 0 \quad (9)$$

6. Software de apoio (SOSU)

Esta seção apresenta a interface do Software de Otimização de Serviços de Usinagem (SOSU) e a programação matemática para o recálculo dos custos e tempos de processo. O programa é configurado de forma que a inserção das informações, introduzidas pelo usuário, considera os parâmetros pré-definidos que compõem os coeficientes das restrições e da função objetiva durante o período t . A figura 1 ilustra a janela “PROGRAMAÇÃO DE USINAGEM” e “PARÂMETROS” programados em formulários do VBA.

The image shows two overlapping windows from the SOSU software. The 'PROGRAMAÇÃO DE USINAGEM' window on the left contains three buttons: 'PARÂMETROS', 'LANÇAMENTOS', and 'SAIR'. The 'PARÂMETROS' window on the right is divided into several sections for data entry:

- Horas:**
 - Total de Dias Úteis no Período: 22
 - Total de Horas de Trabalho por Dia: 8
 - Total de Dias Especiais no Período: 8
 - Hrs. Extras Permitidas em Dias Úteis: 2
 - Hrs. Extras Permitidas em Dias Especiais: 4
 - Taxa da Hr. Extra Dia Útil + Encargos: 1,5
 - Taxa da Hr. Extra Dia Especial + Encargos: 2
- Máquinas:**
 - Número de Máquinas Disponíveis - Usinar: 2
 - Número Operadores Por Máquina - Usinar: 2
 - Total de Horas de Setup Para Todas Peças: 13
 - Estimativa de Horas Paradas de Máquinas: 10
- Demanda de Tempo de Usinagem:**
 - Dias: 81
 - Horas: 651
 - Minutos: 39.040,00
- Horas Normais e Custo Minuto:**
 - Totais de Horas:**
 - Total de Horas de Mão de Obra Dias Normais: 352
 - Total de Horas de Máquinas Dias Normais: 329
 - Total de Horas a Subcontratar: 321,66
 - Custo Minuto:**
 - Custo Minuto de Mão de Obra Dias Normais: 0,98
 - Custo Minuto de Máquina Dias Normais: 0,52
 - Custo Minuto de Setup Dias Normais: 1,05
- Horas Extras e Custo Recalculado:**
 - Restrições-Hrs.Extras:**
 - Máximo de Hrs. Extras Em Dias Úteis: 88
 - Máximo de Hrs. Extras Dias Especiais: 64
 - Totais Horas Extras:**
 - Total de Horas Extras a Realizar em Dias Úteis: 88
 - Total de Horas Extras a Realizar - Dias Especiais: 64
 - Totais de Horas:**
 - Total de Horas de Mão de Obra Recalculado: 504
 - Total de Horas de Máquinas Recalculado: 481
 - Total de Horas a Subcontratar: 169,66
 - Custo Recalculado:**
 - Custo Minuto de Mão de Obra Recalculado: 1,19
 - Custo Minuto de Máquina Recalculado: 0,54
 - Custo Minuto de Setup Recalculado: 1,05

Figura 1: Janela de opções e janela de inserção dos parâmetros

Conforme pode ser visualizado na figura 1, a janela “PROGRAMAÇÃO DE USINAGEM” é visualizada automaticamente ao abrir o software e contempla as seguintes opções “PARÂMETROS” e “LANÇAMENTOS”. Já o módulo “PARÂMETROS” define os parâmetros e recursos disponíveis. Destarte, utilizando como base de dados a planilha representada na tabela 1, o programa irá recalculer Cus_i e o $TMus$, de acordo com o volume de

horas extras a realizar e que serão expressos de forma sequencial por meio de modelagem matemática.

Inicialmente, $TMus$ serve de verificador, já que, se $TMus < DTMus$ subentende-se que há Rh^{du} restrições de h^{du} . O usuário será então informado pela seguinte *messagebox*; “Realizar Horas Extras ou Subcontratar”. O total de he^{du} e he^{de} deverá ser informado e irá gerar duas restrições onde $Maxhe^{du}$ é o máximo permitido de he^{du} e $Maxhe^{de}$ será o máximo permitido de he^{de} . Matematicamente, $Maxhe^{du} = du \times he^{du}$ e $Maxhe^{de} = de \times he^{de}$, logo, o total de horas-extras a realizar é expresso pela equação 10.

$$\begin{aligned} The &= The^{du} + The^{de} \\ The^{du} &\leq Maxhe^{du} \\ The^{de} &\leq Maxhe^{de} \end{aligned} \quad (10)$$

Onde

The - Total de horas-extras a realizar;

The^{du} - Total de horas-extras a realizar em dias úteis;

The^{de} - Total de horas-extras a realizar em dias especiais;

Evidentemente, há um incremento de custo associado à The no qual demanda o recálculo de $Cusi$. Antemão, se δ^{du} é a taxa de he^{du} e δ^{de} à de he^{de} , e $\delta^{du} < \delta^{de}$, o sistema definirá a melhor condição para The de acordo com os seguintes critérios demonstrados na equação 11.

$$\text{Se } \begin{cases} Rh^{du} \leq Maxhe^{du} \rightarrow The^{du} = Rh^{du} \Rightarrow The = Rh^{du} \\ Maxhe^{du} + Maxhe^{de} < Rh^{du} > Maxhe^{du} \rightarrow The = Maxhe^{du} + Rh^{du} - The^{du} \\ Rh^{du} > Maxhe^{du} + Maxhe^{de} \rightarrow The = Maxhe^{du} + Maxhe^{de} \end{cases} \quad (11)$$

A partir destes parâmetros o software faz o recálculo de $TMus$ que é dado pela seguinte equação $TMus_r = The \times 60 + TMus$. Logo, se $Rh^{du} > TMaxhe \rightarrow RT^{sub} = Rh^{du} - TMaxhe$, onde RT^{sub} é a restrição quando $TMus_r < DTMus$, i.e., o total de minutos a subcontratar. As operações para recalculer $Cmaq$ e $Chom$ são expressas pelas equações 12 e 13.

PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

$$Cmaq_r = \frac{Cmaq \times du \times h^{du} + The \times 60 \times Cmaq}{TMus_r} \quad (12)$$

$$Chom_r = \frac{Chom \times du \times h^{du} \times 60 + The^{du} \times \delta^{du} + The^{de} \times \delta^{de} \times Thom}{du \times h^{du} + The \times 60 \times Thom} \quad (13)$$

Nota-se que, acréscimos em $Cmaq_i$ e $Chom_i$ dependem do quanto $The > 0$ enquanto $Cset_i$ é fixo. Na sequência, tem-se o novo coeficiente de custo médio dado por Cus_{ir} conforme expresso pela equação 14.

$$Cus_{ir} = \frac{Chom_{ir} \times Mhom_i \times Cmaq_{ir} \times Mmaq_i \times k_i + Cset_{ir} \times Mset_i}{k_i} \quad (14)$$

Logo, reduções no Cus_i , sem que haja variações nas restrições, estão sujeitas do quão eficiente são os processos, i.e, os recursos de produção precisam ser otimizados em função do fator tempo ($Mhom$, $Mmaq$, $Mset$), o que requer, por exemplo, a minimização dos minutos de *setup* e dos processos de corte, movimentação e troca das ferramentas. Já alterações no Sub_i dependem exclusivamente de variações nos custos de transações. Por conseguinte, todos estes dados serão utilizados na formulação do modelo no qual serão dirigidos à planilha de solução do *Solver* por meio do módulo “LANÇAMENTO” demonstrado na figura 2.

The image shows a software interface with three main windows:

- LANÇAMENTOS (Launchments):** A form for entering data for a piece. Fields include:
 - Nº. Registro da Peça: 1
 - Descrição da Peça: Peça - 1
 - Demanda do Período: 810
 - Custo Unitário Horas Normais: 2,29
 - Custo Unitário Horas Extras: 2,64
 - Custo Unitário Subcontratação: 2,87
 - Tempo Minuto Usin. Interna: 1,5
 Buttons: Confirmar, Usinar, Subcontratar.
- Usinagem Interna (Internal Machining Report):** A table showing the following data:

Registro da Peça	Descrição da Peça	Qtd. de Peças	Custo Médio Unitário	Custo Total
1	Peça - 1	810	2,64	2.138,40
2	Peça - 2	385	2,68	1.031,80
3	Peça - 3	380	3,21	1.219,80
4	Peça - 4	470	3,19	1.499,30
5	Peça - 5	2.045	3,67	7.505,15
6	Peça - 6	2.045	3,67	7.505,15
8	Peça - 8	810	5,25	4.252,50
9	Peça - 9	385	5,54	2.132,90
10	Peça - 10	380	5,68	2.158,40
11	Peça - 11	470	6,81	3.200,70
Total	-	-	-	32.644,10
- Relatório Subcontratação (Subcontracting Report):** A table showing the following data:

Registro da Peça	Descrição da Peça	Qtd. de Peças	Custo Médio Unitário	Custo Total
7	Peça - 7	2.045	3,88	7.934,60
12	Peça - 12	810	8,99	7.281,90
13	Peça - 13	385	9,79	3.769,15
14	Peça - 14	380	9,97	3.788,60
15	Peça - 15	470	10,05	4.723,50
Total	-	-	-	27.497,75

Figura 2: Janela de lançamentos e relatórios de usinagem interna e subcontratada

PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

Conforme ilustrado pela figura 2, no módulo “LANÇAMENTO” o operador deverá informar x_i e k_i onde o programa não permitirá a entrada de um item inadequado ou já lançado informando ao usuário por meio de uma *messagebox*. Todos os lançamentos são, então, transportados como equações matemáticas lineares para a planilha de execução do *Solver*. Para a solução tem o botão “SOLVER” e para novas simulações a tecla “NOVO”. Fundamentado na solução encontrada é possível imprimir relatórios de usinagem interna e subcontratada por meio dos ícones “USINAR” e “SUBCONTRATAR” o que permite uma melhor gestão do processo.

7. Solução do Problema

Para a solução do problema é necessário que o tomador de decisão modele a planilha de forma precisa e insira os dados no *Solver* (FYLSTRA, *et al.*, 1998; BOGHI; SHITSUKA, 2005; GROSSMAN, 2006). Conforme demonstrado anteriormente, as etapas de lançamento como também os ícones de solução e relatórios estão contidas no módulo “LANÇAMENTO”. Para a solução deve-se clicar no botão “RESOLVER”, o algoritmo simplex é, então, ativado e o *Solver* apresentará a saída ótima para o problema. Também é possível selecionar os relatórios de Resposta, Sensibilidade e Limites no qual permitem uma visualização dos acréscimos/decréscimos permissíveis na disponibilidade/limitação dos recursos. A figura 3 apresenta a planilha de execução do *Solver*.

SOFTWARE		PLANEJAMENTO DE USINAGEM																															
Tipo	Usinagem Interna															Usinagem Terceiros															Função Objetivo		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15			
Peças																																	
Custo	1,64	1,68	3,21	3,19	3,67	3,67	4,36	5,25	5,54	5,68	6,81	9,21	10,56	14,27	15,48	2,87	3,12	3,37	3,37	3,89	3,88	3,88	6,25	6,45	6,59	7,16	8,99	9,79	9,97	10,05			
Totais	810	385	380	470	2.045	2.045	-	810	385	380	470	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	RS 60.141,85	
Restrições de Usinagem - Interna																Restrições de Usinagem - Terceiros															Utilizado	Disponível	
Tempo	1,5	1,5	1,5	1,5	2,1	2,1	2,5	2,98	3,1	3,18	3,85	5,25	5,96	8,1	10,55																	28.860,00	
Peça-1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	810	810	
Peça-2	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	385	385	
Peça-3	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	380	380	
Peça-4	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	470	470	
Peça-5	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.045	2.045	
Peça-6	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.045	2.045	
Peça-7	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	810	810	
Peça-8	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	385	385	
Peça-9	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	380	380	
Peça-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	470	470	
Peça-11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	810	810	
Peça-12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	385	385	
Peça-13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	380	380	
Peça-14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	470	470
Peça-15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	470	470

Figura 3: Planilha de execução do *Solver*

Na figura 3 é possível visualizar os dois processos que vão de k_1 até k_{15} para “Usinagem Interna” e “Usinagem Terceiros”. As linhas “Custo” demonstra $C_{us_{ir}}$ e Sub_{ir} , “Totais” corresponde à Q_{us_i} e Q_{sub_i} e “Tempo” informa $TM_{us_{ki}}$. A coluna “Disponível” representam TM_{us_r} e k_i e a coluna “Utilizado” demonstra que o resultado satisfaz TM_{us_r} e k_i onde o valor da “Função Objetivo” é o CTU otimizado. Caso seja necessário aumentar o número de variáveis e restrições, é possível fazê-los sem grande complexidade de programação. Para uma nova simulação existe o botão “SOFTWARE” onde o sistema retornará à janela ilustrada na figura 1.

Note que uma vantagem significativa do *Excel* reside na interatividade e velocidade com que se pode projetar e realizar mudanças nos parâmetros de modelos que exigem rápida adaptação (SAVAGE, 1997; THIRIEZ, 2001; LEBLANC; GROSSMAN, 2008). Entretanto, o SOSU pode apresentar restrições em aplicações de grande escala, não pelo tamanho da planilha em si, mas pelo fato do *Standart Solver* possuir um limite de apenas 200 variáveis. Neste caso, o modelo pode ser tratado pelo *Open Solver* que não possui limitações e tem licença de software livre, consultas e *downloads* pelo site (<<http://opensolver.org/>>). Existe também a opção de aquisição da versão *Premium Solver* da Frontline que tem um limite de 2.000 variáveis para problemas lineares. Informações podem ser obtidas pelos sites da Microsoft (<<http://support.microsoft.com/kb/75714/pt>>) ou da Frontline (<www.solver.com>). Exemplo prático do *Premium Solver* vide Pasupathy e Medina-Borja (2008), quando utilizado em um sistema para alocação de recursos e medição de desempenho da Cruz Vermelha Americana.

8. Validação do Modelo

A validação do modelo depende de a solução ser coerente com o contexto original a que foi proposto (GASS; HIRSHFELD; WASIL, 2000; ARENALES *et al.*, 2007). Portanto, nesta

fase é realizada a análise do que foi sugerido por meio da avaliação dos resultados obtidos nos experimentos, no qual o objetivo é verificar o comportamento do sistema e da sua interface com o usuário. De acordo com testes realizados, o programa se demonstrou viável para a solução do problema em questão, além da fácil operacionalização, apresenta soluções otimizadas em tempo satisfatório. Posteriormente aos lançamentos de demanda, o *Solver* é capaz de ajustar o *mix* de usinagem em tempo médio inferior a 5 segundos sem gerar ociosidade ou alterar a capacidade dos recursos utilizados, encontrando a opção que atenda toda a demanda de forma a minimizar o custo total de toda a operação. Note que, conforme ressaltado por Moura (2007), o *Solver* é conciso na modelagem e solução de problemas lineares. Ragsdale (2001), Palocsay e Markham (2002) e Leblanc e Grossman (2008) ressaltam ainda que a interface do *VBA* permite que usuários pouco familiarizados com modelos matemáticos e ferramentas computacionais se adaptem ao uso do aplicativo. Em síntese, o emprego do *Solver* em ação interativa com o *VBA* fornece alta transparência na inclusão de dados e na geração de relatórios para a tomada de decisões (LEBLANC; GALBRETH, 2007; PASUPATHY; MEDINA-BORJA, 2008).

9. Implementação do Modelo

A implementação e o sucesso de um modelo de PO dependem tanto de eficácia e eficiência quando de transmissibilidade, i.e., deve proporcionar até aos usuários não técnicos uma dinâmica de compreensão em relação à utilização e análise de resultados (RONEN; PALLEY; LUCAS JR., 1989; GROSSMAN, 2006; ARENALES *et al.*, 2007; LEBLANC; GALBRETH, 2007). Em suma, a implementação esta sujeita à comprobatória funcionalidade do software e dar-se-á no momento em que se transfere o projeto proposto para as execuções práticas das simulações. Em geral, deve satisfazer os seguintes critérios:

- É simples e de fácil compreensão a ser considerado de maneira prática;

- Toda a estrutura sequencial do modelo é apropriada para a realidade da empresa;
- A realização de simulações permite uma melhor compreensão de como avaliar impactos e tomar ações em casos de alterações nas variáveis, permitindo maior flexibilidade na redefinição de estratégias e aprimoramento nos processos de negociação, planejamento e tomada de decisões.

10. Conclusão

Este artigo apresentou a formulação de um software, denominado de SOSU, para otimizar o *mix* de produção versus a subcontratação de usinagem. O SOSU foi inteiramente desenvolvido por meio do *Microsoft Office Excel* 2010 e seguiu sistematicamente as etapas abordadas no referencial bibliográfico de forma a adequá-la ao problema em questão. A PL foi utilizada como técnica de otimização, o VBA para a interface das entradas e cálculo dos dados e o *Solver* como objeto de solução. Não obstante, para que a distribuição dos custos e tempos de processos não ocorra de forma arbitrária, o SOSU depende inteiramente das informações da área de produção e de um sistema de apuração de custos já estruturado. As experimentações permitiram uma avaliação criteriosa e evidenciaram a viabilidade da ferramenta para a resolução do problema abordado. O SOSU é capaz de, em função dos parâmetros e restrições, apresentar a solução otimizada em tempo satisfatório. Alguns pontos do SOSU que merecem destaque são: i) é simples, pode ser implementado sem que se incorra em custos expressivos; ii) é flexível, facilmente adaptado a diferentes famílias de produtos ou à aumentos do número de variáveis e restrições, sem grande complexidade de programação; iii) é inovador, no sentido de prover condições para antecipar custos unitários e consequências sobre o futuro, tornando as empresas mais aptas a realidade de problemas desta natureza; iv) é dinâmico, permite agilidade na manipulação dos dados a cada nova situação de demanda; v) é interativo, em relação a interface e na geração dos relatórios referentes à melhor utilização dos recursos, essenciais às tarefas de planejar e tomar decisões com mais eficiência. Em síntese, o

SOSU configura uma ferramenta potencial que permite aos gestores analisar a viabilidade de possíveis ações e redefinir estratégias em curto espaço de tempo, o que aprimora os processos de tomada de decisões. É possível concluir que a aplicação da PL por meio do *Excel*, atrelado ao *VBA* e o suplemento *Solver*, comporta o desenvolvimento de ferramentas de otimização com potencial gerencial eficiente e de fácil operacionalização sem que para isso haja a necessidade de grandes investimentos.

Referências

- Ackoff, R. L. & Sasieni, M. W. (1974). Pesquisa operacional. Rio de Janeiro: LTC.
- Ackoff, R. L. (1979). The future of Operational Research is Past. *Operations Research*, v. 30, n. 2, 93-104.
- Almeida, F.W. C; Viana, G. V. R. & Thomaz, A. C. F. (2009). Algoritmo genético para a solução de problemas de programação linear inteira. In: Encontro Regional de Pesquisa Operacional do Nordeste, 3., 2009, Fortaleza. Anais... Fortaleza: UECE/SOBRAPO, 1 CD-ROM.
- Arenales, M. *et al.* (2007). Pesquisa operacional para cursos de engenharia. Rio de Janeiro: Elsevier.
- Biegler, L. T. & Grossmann, I. E. (2004). Retrospective on optimization. *Computers and Chemical Engineering*, v. 28, 1169-1192.
- Boghi, C. & Shitsuka, R. (2005). Aplicações práticas com Microsoft Office Excel 2003 e Solver: Ferramentas computacionais para a tomada de decisão. 1. ed. São Paulo: Érica.
- Borges A. (2011). Qual o tamanho do mercado brasileiro? *Usinagem-Tech*, São Paulo: De Fato Comunicações Ltda, n. 6, 8-9.
- Silva Filho, O. S; Cezarino, W & Ratto, J. (2009). Planejamento agregado da produção: modelagem e solução via planilha Excel & Solver. *Revista Produção Online*, v.9, n.2, 572-599.
- Ellram, L. & Billington, C. (2001). Purchasing leverage considerations in the outsourcing decision. *European Journal of Purchasing & Supply Management*, v.7, n.1, 15-27.
- Fylstra, D. *et al.* (1998). Design and use of the Microsoft Excel Solver. *Interfaces*, v. 28, n. 5, 29-55.
- Gass, S. I.; Hirshfeld, D. S. & Wasil, E. A. (2000). Model world: the spreadsheeting of OR/MS. *Interfaces*, v. 30, n. 5, 72-81.
- Goldberg, M. C. & Luna, H. P. L. (2005). Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier.
- Grossman, T. A. (2006). Integrating spreadsheet engineering in a management science course: a hierarchical approach. *INFORMS Transactions on Education*, v. 7, n. 1, 18-36.

PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

- Hesse, R. & Scerno, D. H. (2009). How Electronic spreadsheets changed the world. *Interfaces*, v. 39, n. 2, 159-167.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2013). Indicadores do IBGE: Pesquisa Industrial Mensal de Produção Física Brasil. Janeiro, 2013. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/industria/pimpfregional/pim-pf-regional_201302caderno.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2013.
- Koontz, H.; O'Donnell, C. & Weihrich, H. (1987). *Administração: organização, planejamento e controle*. 14. ed. São Paulo: Pioneira, 2. vol.
- Lachtermacher, G. (2007). *Pesquisa operacional na tomada de decisões: modelagem em Excel*. 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier.
- Leblanc, L. J. & Galbreth, M. R. (2007). Implementing large-scale optimization models in Excel using VBA. *Interfaces*, v. 37, n. 4, 370-382.
- Leblanc, L. J. & Grossman, T. A. (2008). Introduction: The use of spreadsheet software in the application of Management Science and Operations Research. *Interfaces*, v. 38, n. 4, 225-227.
- Marcondes, F. C. (2012). A evolução dos serviços em usinagem: uma abordagem do ponto de vista do fornecedor de ferramentas. *Manufatura em Foco*. Florianópolis: CIMM, n. 1, 20-24.
- Mcgill, T. J. & Klobas, J. E. (2005). The role of spreadsheet knowledge in user-developed application success. *Decision Support Systems*, v. 39, n. 3, 355-369.
- Moura, L. F. (2007). *Excel para engenharia: formas simples para resolver problemas complexos*. São Carlos: EDUFSCAR, 1. vol. 151 p.
- Munisamy, S. A. (2009). Spreadsheet-based approach for operations research teaching. *International Education Studies*, v. 2, n. 3, 82-88.
- Neto, J. A. (1995). Reestruturação industrial terceirização e redes de subcontratação. *RAE - Revista de Administração de Empresas*, v. 35, n. 2, 33-42.
- Oke, A. & Onwuegbuzie, H. (2013). Outsourcing, subcontracting-in and radical innovativeness: The moderating effect of manufacturing strategy. *Journal of Manufacturing Technology Management*, v. 24, n. 4, 511-535.
- Palocsay, S. W. & Markham, I. S. (2002). Teaching spreadsheet-based decision support systems with Visual Basic for applications. *Information Technology, Learning, and Performance Journal*, v. 20, n.1, 27-35.
- Pasupathy, K. S. & Medina-Borja, A. (2008). Integrating Excel, Access, and Visual Basic to deploy performance measurement and evaluation at the American Red Cross. *Interfaces*, v. 38, n. 4, 324-337.
- Pinto, A. R. F. (2012). Algoritmo genético aplicado ao sequenciamento de picking e faturamento. 2012. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Bauru.
- Pinto, A. R. F.; Costa, A. F. & Crepaldi, A. F. (2011). A contribuição do pensamento sistêmico para o planejamento de modelos de pesquisa operacional. In: Simpósio de Engenharia de Produção, 18. 2011, Bauru. Anais... Bauru: UNESP/SIMPEP, 1 CD-ROM.

PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

- Ragsdale, C. T. (2001). Teaching management science with spreadsheets: from decision models to decision support. *INFORMS Transactions on Education*, v. 1, n.2, 68-74.
- Robbins, S. P. (2005). *Comportamento organizacional*. 11. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall.
- Ronen, B.; Palley, M. A. & Lucas, H. C. Jr. (1989). Spreadsheet analysis and design. *Communication of the ACM*, 32, 84-9.
- Savage, S. (1997). Weighing the pros and cons of decision technology in spreadsheets. *OR/MS Today*, v. 24, n. 1, 42-45.
- Scalabrin, I. *et al.* (2006). Programação Linear: Estudo de caso com utilização do Solver da Microsoft Excel. *Revista Universo Contábil*, v. 2, n. 2, 54-66.
- Shamblin, J. E. & Stevens, G. T. Jr. (1979). *Pesquisa operacional - Uma Abordagem Básica*. São Paulo: Atlas.
- Slack, N. *et al.* (1999). *Administração da produção*. São Paulo: Atlas.
- Souza, A. C. (1997). Condições econômicas no processo de usinagem: uma abordagem para consideração dos custos. 1997. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção)- Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá.
- Taha, H. A. (2008). *Pesquisa operacional*. 8. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall.
- Thiriez, H. (2001). Improved OR education through the use of spreadsheet models. *European Journal of Operational Research*, v. 135, n. 3, 14-27.
- Thiriez, H. (2004). Spreadsheet-based professional modelling. *INFORMS Transactions on Education*, v. 4, n. 2, 14-27.
- Yang, X. S. & Koziel, S. (2010). Computational optimization, modelling and simulation - a paradigm shift. *Procedia Computer Science*, v. 1, n. 1, 1291-1294.