

UM MODELO HÍBRIDO DE SELEÇÃO DE FORNECEDORES PARA CADEIAS DE SUPRIMENTOS

Éverton Santi

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção – Universidade Federal do Rio Grande do Norte¹

Avenida Senador Salgado Filho, 3000. Lagoa Nova, Natal-RN
santi.everton@gmail.com

Luciano Ferreira, Caroline Thenecy de Medeiros Rocha^{1,2}

Escola de Ciências e Tecnologia – Universidade Federal do Rio Grande do Norte²

Avenida Senador Salgado Filho, 3000. Lagoa Nova, Natal-RN
ferreira@ufrnet.br, caroline.rocha@ect.ufrn.br

Daniel Aloise¹

Departamento de Engenharia de Computação e Automação, CT
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Avenida Senador Salgado Filho, 3000. Lagoa Nova, Natal-RN
aloise@dca.ufrn.br

RESUMO

Este artigo apresenta um modelo de seleção de fornecedores baseado em lógica *fuzzy*, teoria da decisão multi-atributo e GRASP. O modelo foi projetado em duas etapas. Primeiro, as preferências dos decisores devem ser identificadas, definindo critérios e pesos como variáveis *fuzzy*. Após, um modelo de otimização multiobjetivo minimiza o custo total da compra e o prazo de entrega e maximiza o desempenho médio do fornecedor, obtido na primeira etapa. Dessa forma, o modelo consegue avaliar a subjetividade do processo de decisão de compras, as restrições, custos e lead time dos fornecedores. Os resultados obtidos demonstraram que o modelo tem capacidade para reduzir o número de alternativas a serem avaliadas, respeita as preferências dos decisores e apresenta desempenho similar em todas as instâncias testadas.

PALAVRAS CHAVE. Seleção de Fornecedores. Tomada de decisão multicritério. Metaheurísticas.

Apoio à Decisão Multicritério. PO na Administração & Gestão da Produção.

ABSTRACT

This paper presents a supplier selection model based on fuzzy logic, multi-attribute decision theory and GRASP. The model was designed in two stages. In the first, the preferences of the decision maker must be identified, defining criteria and weights as fuzzy variables. In the second, a multi-objective optimization model minimizes the total cost of purchase and lead-time, and maximizes the supplier performance, obtained in the previous step. Thus, the model is able to evaluate the subjectivity of decision-making purchases, the restrictions, costs and lead times of each supplier. The obtained results demonstrated that the model reduces the number of alternatives to be evaluated, complies with the preferences of the decision-maker, and presents similar performance in the all instances tested.

KEYWORDS. Supplier Selection. Multicriteria Decision Making. Metaheuristics.

Multicriteria Decision Analysis. OP in Administration & Production Management.

1. Introdução

A função de compras ganha cada vez mais destaque dentro das empresas do mercado globalizado, chegando a responder por aproximadamente 60% dos gastos empreendidos por essas organizações (BOWERSOX *et al.*, 2002). Essa informação pode ser traduzida como justificativa frente à postura adotada por muitos gestores, que em muitos casos consideram seus fornecedores como parceiros a níveis estratégicos, táticos e operacionais, atribuindo-lhes um papel fundamental no aumento e na manutenção da competitividade de sua empresa. Talluri e Narasimhan (2004) apresentam as principais diferenças entre esses níveis de participação.

O fato mais importante percebido nesse contexto é que, em paralelo à crescente importância percebida em relação às operações de compra e aos fornecedores, percebe-se também um crescente interesse pela melhoria dos processos pelos quais esses fornecedores são avaliados, havendo notável espaço para a pesquisa e aplicação de abordagens multicritérios, conforme destacam Ho *et al.* (2010).

Tradicionalmente, são conhecidas duas principais filosofias com relação à abordagem do problema de seleção de fornecedores: uma abordagem qualitativa, traduzida pela ótica dos pesquisadores da escola de negócios, os quais se atêm principalmente à experiência de seus decisores, e uma segunda abordagem quantitativa, que considera basicamente a otimização de variáveis. Essa última abordagem é geralmente considerada por pesquisadores oriundos das áreas de engenharia.

Huang e Keskar (2007) defendem que essa diferenciação não seja tendenciosa, pois, uma vez que a abordagem do problema considere ambas as filosofias, podem-se observar novos elementos pertinentes a esse problema, favorecendo-se assim sua modelagem de forma mais fidedigna. A literatura relacionada à Pesquisa Operacional, por sua vez, apresenta variada gama de estudos que consideram essa hibridização.

De maneira a corroborar com essa afirmação, citam-se os trabalhos de revisão de literatura de Degraeve *et al.* (2000), De Boer *et al.* (2001) e Ho *et al.* (2010), onde os autores destacam a aplicação de diferentes métodos ao problema de seleção de fornecedores. DEA (*Data Envelopment Analysis*), AHP (*Analytical Hierarchical Process*), Lógica Fuzzy, Redes Neurais Artificiais e ANP (*Analytical Network Process*) são algumas das abordagens mais comumente observadas pelos autores. Também são destacadas as hibridizações entre essas abordagens, como por exemplo, Fuzzy e AHP e Fuzzy e Programação Linear, dentre outras.

Além dos trabalhos revisados por esses autores, os quais foram publicados até meados do ano de 2008, citam-se alguns trabalhos mais recentes, que também apresentam modelos para tratar o problema de seleção de fornecedores, tais como Razmi *et al.* (2009), Shen e Yu (2009), Wang (2010), Kheljani *et al.* (2009), Lin *et al.* (2009), Lee (2009), Lee *et al.* (2009), Kuo *et al.* (2010), Saen (2010), Bhattacharya (2010), Azadeh e Alem (2010), Shih e Lin (2009) e Golmohammadi *et al.* (2009).

Tais trabalhos consideram a seleção de fornecedores como um processo voltado ao aumento da capacidade competitiva, tanto das empresas vistas como entidades isoladas quanto como elos das chamadas Cadeias de Suprimentos (CS), destacadas por Lambert e Cooper (2000) como nova unidade de competição por mercados. Assim, considerando-se uma CS como uma rede de processos integrados, onde, matérias primas são convertidas em produtos finais e esses produtos entregues aos consumidores finais, a melhoria dessa capacidade competitiva deve se basear no alinhamento do fluxo de materiais e informações ao longo dessa estrutura (THOMAS e GRIFFIN, 1996; BEAMON, 1998).

Nesse contexto, considerando-se a CS como unidade competitiva, a disputa por mercados baseada no tempo é apontada por Christopher (2005) como de grande impacto em relação ao nível de eficiência supra citado, pois, quanto menor o tempo que um produto leva para chegar até o consumidor final (*lead time*), maior será o seu valor agregado, valor pelo qual esse cliente está disposto a pagar. Na perspectiva do autor, selecionar fornecedores eficientes contribui para a redução do *lead time* total de uma CS, pois o *lead time* relativo ao processo de aquisição de materiais geralmente é longo.

Outro fator que pode ser considerado em termos de competitividade está associado à

flexibilidade e à confiabilidade no atendimento à demanda que uma CS deve apresentar. Assim, assume-se que o termo flexibilidade se relaciona à capacidade de gerenciar flutuações da demanda e, confiabilidade, a evitar paradas no processo produtivo, principalmente em função da ruptura no fornecimento das matérias-primas.

Constantino e Pellegrino (2010) consideram a natureza globalizada do mercado como responsável por esse risco de ruptura, destacando a possibilidade de ocorrerem desastres naturais, problemas políticos e étnicos, entre outros. Com relação à flexibilidade, os autores destacam o fato de que atribuir toda a demanda a apenas um fornecedor (*single sourcing*) pode exaurir sua capacidade de abastecimento, implicando em diversos tipos de problema, como por exemplo, tornar-se dependente desse fornecedor, passando a restringir sua capacidade produtiva quando o fornecedor estiver operando em seu nível máximo. Para o trato desses problemas, os autores consideram a utilização de dois ou mais fornecedores para um mesmo item (*multiple sourcing*).

Considerando-se também a competitividade no âmbito de um mercado global, deve-se primar pela escolha de fornecedores baseada na estratégia corporativa. Talluri e Narasimhan (2004) assinalam a importância dessa visão no sentido de que o fornecedor tende a influenciar desde o processo de desenvolvimento de um novo produto até a imagem da organização frente a seus consumidores. Basicamente, esse ponto de vista considera uma avaliação qualitativa das alternativas como mais apropriada, cabendo aos decisores elucidar suas preferências no planejamento da empresa a curto, médio e longo prazo, visando o estabelecimento de relações de parceria longas com seus fornecedores.

De uma maneira mais tradicional, todos os aspectos discutidos acerca de competitividade em CS se relacionam, em uma visão mais simplificada, aos fatores custo, qualidade e entrega, apontados por Ho *et al.* (2010) como critérios mais comumente utilizados na literatura de compras. Portanto, esse trabalho considerará a seleção de fornecedores com base nesses três indicadores, objetivando o aumento da competitividade das organizações simultaneamente em termos de tempo, confiabilidade e flexibilidade e postura estratégica, baseando-se na avaliação qualitativa e quantitativa dos fornecedores.

O modelo proposto nesse trabalho busca não apenas ranquear fornecedores, como na maioria dos trabalhos citados anteriormente, mas também considera sua atuação de forma conjunta no atendimento da demanda, indicando aos decisores um grupo capaz de garantir elevado grau de desempenho em relação às preferências dos decisores. Além disso, dado que em empresas de grande porte o tamanho de suas bases de dados pode vir a ser um fator limitante quanto à profundidade e viabilidade de análise dos dados, o modelo busca prover um suporte mais apurado aos decisores, fornecendo conjuntos de soluções mais significativas e de mais fácil interpretação. Esta abordagem também difere dos demais trabalhos citados, pois, tais modelos, em sua maioria, foram demonstrados com base em um conjunto de dados bastante reduzido.

O modelo proposto é projetado em duas etapas distintas, onde, na primeira etapa, utiliza-se o método qualitativo descrito por Chen *et al.* (2006), o qual é baseado na Teoria dos Conjuntos *Fuzzy*, como mecanismo de pré-seleção para reduzir o conjunto de alternativas face às preferências dos decisores. Após, na segunda etapa, utiliza-se um algoritmo de otimização combinatória, baseado na meta-heurística GRASP (FEO e RESENDE, 1989), para a seleção final dos fornecedores, considerando-se as seguintes restrições de cada fornecedor: custo de fornecimento, prazos de entrega e seu indicador de desempenho, este último resultante e da primeira etapa do modelo.

O modelo proposto é explicado em detalhes na seção 2 do texto. A seção 3 apresenta os resultados obtidos a partir de sua implementação e aplicação e, por fim, a seção 4 apresenta as considerações finais para o texto.

2. O Modelo Proposto

O modelo proposto foi concebido com base no *framework* de apoio à decisão apresentado em De Boer (1998) e De Boer *et al.* (2001), o qual contém 4 etapas básicas.

2.1. Primeira Etapa: Definição do Problema

A primeira etapa do processo descrita pelos autores consiste na definição dos objetivos

que se pretendem atingir com a seleção de fornecedores, os quais irão refletir na eficiência da CS. Assim, como primeira meta é destacada a redução do risco de desabastecimento da produção, buscando-se formar uma base multi-fornecedores de alta confiabilidade. O segundo objetivo é permitir maior flexibilidade aos decisores na hora de expressar preferências, facilitando a visão do interesse da empresa em um âmbito qualitativo. O terceiro objetivo consiste em buscar, especificamente, fornecedores que permitam à organização compradora adquirir elevado grau de competitividade em relação a preços, qualidade e prazos de entrega. Assim, de maneira resumida, considera-se que o modelo deve:

1. Recomendar um conjunto de fornecedores de tamanho restrito aos decisores;
2. Recomendar fornecedores que apresentem melhores chances de contribuir com o aumento da capacidade competitiva da empresa;
3. Recomendar fornecedores que apresentem conformidade com as políticas e estratégias da organização, baseando-se nas preferências dos decisores.
4. Ter capacidade de lidar com bases de dados de fornecedores de tamanho relativamente grande.

2.2. Segunda Etapa: Definição de Critérios

Dado que a terceira etapa do modelo consiste em uma pré-seleção dos fornecedores, considera-se um conjunto de critérios qualitativos C_i ($i = 1, 2, \dots, L$), os quais devem expressar os objetivos destacados na primeira etapa. Essa etapa do modelo visa tratar as incertezas do processo de decisão, permitindo aos decisores expressar suas preferências quanto à estratégia da empresa, a fatores táticos e a fatores operacionais simultaneamente. Exemplos de critérios qualitativos que podem ser utilizados nesta fase são, por exemplo: nível de investimento do fornecedor em programas de inovação, nível de investimento em políticas ambientais, grau de positividade de sua imagem no mercado consumidor e seu nível de colaboração em processos de desenvolvimento de novos produtos, entre outros. O número de critérios qualitativos que se pode definir para essa etapa não é arbitrário, cabendo aos decisores elencar quais são os critérios de maior interesse à sua empresa ou CS.

A quarta etapa do processo, por sua vez, tem critérios definidos arbitrariamente, pois está associada aos seguintes objetivos: (1) redução de lead-time; (2) redução do risco de desabastecimento; (3) aumento da qualidade e (4) redução do custo total de fornecimento. Tais objetivos se baseiam nos três critérios a seguir: (1) capacidade diária de produção do fornecedor, (2) custo unitário de cada fornecedor e (3) indicador de desempenho médio. Este último corresponde a uma medida escalar que será gerada a partir da execução da terceira etapa do processo.

A diferença entre os critérios da terceira e quarta etapas é relativa à maneira como tais indicadores são considerados: na terceira etapa, as métricas são definidas como variáveis qualitativas e seus valores estão associados ao julgamento dos decisores, enquanto que, na etapa final, os critérios assumirão valores quantitativos, oriundos de uma base de dados. Nessa fase, busca-se a otimização de um conjunto final de fornecedores para indicação aos tomadores de decisão.

2.3. Terceira Etapa: Pré-seleção

O método de avaliação qualitativa empregado nessa etapa de pré-seleção foi proposto por Chen *et al.* (2006), baseando-se no trabalho de Chen *et al.* (2000). No método, como primeiro passo, cada decisor D_k ($k = 1, 2, \dots, K$) deve atribuir um peso a cada um dos critérios C_i ($i = 1, 2, \dots, L$), que serão utilizados na avaliação de cada fornecedor S_j ($j = 1, 2, \dots, N$), utilizando-se de termos linguísticos. Tais termos, por sua vez, associam palavras a um número *fuzzy* \tilde{v} qualquer, onde $\tilde{v} = (n_1, n_2, n_3, n_4)$ e n_1, n_2, n_3 e n_4 são números reais.

De maneira a exemplificar a definição do método, considera-se C_1, C_2 e C_3 como critérios de avaliação dos fornecedores S_1 e S_2 , onde os decisores D_1, D_2 e D_3 atribuirão pesos na forma das Variáveis Linguísticas (VL) representadas por EB (Extremamente Baixo), B (Baixo), M (Moderado), A (Alto) e EA (Extremamente Alto), cujos valores *fuzzy* são mostrados na Tabela

1.

MB	B	M	A	MA
(0, 0, 0.1, 0.2)	(0.1, 0.2, 0.3, 0.4)	(0.1, 0.2, 0.3, 0.4)	(0.5, 0.6, 0.7, 0.8)	(0.7, 0.9, 1, 1)

Tabela 1: Valor *fuzzy* para variáveis linguísticas.

Assim, dados os valores dos pesos $\tilde{n}_{ik} = (n_{ik1}, n_{ik2}, n_{ik3}, n_{ik4})$, atribuídos pelos decisores para cada critério, o peso agregado de cada critério, $\tilde{w}_i = (n_{i1}, n_{i2}, n_{i3}, n_{i4})$, é calculado da seguinte maneira:

$$n_{i1} = \min_k \{n_{ik1}\} \tag{1}$$

$$n_{i2} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K n_{ik2}, \tag{2}$$

$$n_{i3} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K n_{ik3}, \tag{3}$$

$$n_{i4} = \max_k \{n_{ik4}\}. \tag{4}$$

Tomando-se como julgamentos de cada decisor D_k as atribuições contidas na Tabela 2, obtêm-se os seguintes pesos *fuzzy* agregados para cada um dos critérios: $\tilde{w}_1 = (0.5, 0.7, 0.8, 1)$, $\tilde{w}_2 = (0.3, 0.46, 0.56, 0.8)$ e $\tilde{w}_3 = (0.5, 0.8, 0.9, 1)$. Esses valores \tilde{w}_i , por sua vez, expressam uma medida de consenso entre os decisores com relação ao nível de importância de cada critério.

Critério	D_1	D_2	D_3
C_1	A	MA	A
C_2	M	A	M
C_3	MA	A	MA

Tabela 2: Pesos atribuídos aos critérios pelos decisores.

Após a avaliação do julgamento dos níveis de importância dos critérios, avalia-se o desempenho de cada critério C_i relativo a cada fornecedor S_j ($j = 1, 2, \dots, N$) com base no julgamento de cada decisor D_k , onde, analogamente à avaliação dos pesos, atribui-se um número *fuzzy* $\tilde{v}_{ijk} = (a_{ijk}, b_{ijk}, c_{ijk}, d_{ijk})$, também representados por VLs. Assim, pode-se calcular o valor *fuzzy* agregado $\tilde{v}_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}, d_{ij})$ de cada critério C_i , relativo a cada fornecedor S_j , utilizando-se também as equações (1), (2), (3) e (4), ou seja, utiliza-se o mesmo método de agregação, tanto para pesos quanto para valor dos critérios. A Tabela 3 demonstra um possível julgamento dos três decisores em relação aos fornecedores.

Critério	D_1		D_2		D_3	
	S_1	S_2	S_1	S_2	S_1	S_2
C_1	M	A	A	A	M	M
C_2	MA	MA	A	MA	A	A
C_3	MB	B	B	B	B	B

Tabela 3: Julgamentos individuais de cada fornecedor (\tilde{v}_{ijk})

A Tabela 4 apresenta o peso agregado (\tilde{w}_i) e o valor agregado de cada critério (\tilde{v}_{ij}). A partir destas informações, o produto vetorial $\tilde{v}_{ij} \otimes \tilde{w}_i$ é calculado para representar o desempenho ponderado (\tilde{z}_{ij}) de cada fornecedor.

	\tilde{v}_{ij}	\tilde{w}_i	\tilde{z}_{ij}
Fornecedor S_1			
C_1	(0.3, 0.46, 0.56, 0.8)	(0.5, 0.7, 0.8, 1)	(0.15, 0.32, 0.44, 0.8)
C_2	(0.5, 0.7, 0.8, 1)	(0.3, 0.46, 0.56, 0.8)	(0.15, 0.32, 0.44, 0.8)
C_3	(0, 0.13, 0.23, 0.4)	(0.5, 0.8, 0.9, 1)	(0, 0.1, 0.2, 0.4)
Fornecedor S_2			
C_1	(0.3, 0.53, 0.63, 0.8)	(0.5, 0.7, 0.8, 1)	(0.15, 0.37, 0.50, 0.8)
C_2	(0.5, 0.79, 0.9, 1)	(0.3, 0.46, 0.56, 0.8)	(0.15, 0.37, 0.51, 0.8)
C_3	(0.1, 0.2, 0.3, 0.4)	(0.5, 0.8, 0.9, 1)	(0.05, 0.16, 0.27, 0.4)

Tabela 4: Indicadores ponderados de desempenho (\tilde{z}_{ij})

Por fim, os últimos passos do método são utilizados para definir uma medida escalar, estimando o desempenho relativo de cada fornecedor. Assim, calcula-se a solução ideal positiva *fuzzy* (A^*) e a solução ideal negativa *fuzzy* (A^-) como

$$A^* = \{\tilde{v}_1^*, \tilde{v}_2^*, \dots, \tilde{v}_L^*\}, \quad (5)$$

$$A^- = \{\tilde{v}_1^-, \tilde{v}_2^-, \dots, \tilde{v}_L^-\}, \quad (6)$$

onde

$$\tilde{v}_i^* = \max_j \{\tilde{z}_{ij4}\}, \quad (7)$$

$$\tilde{v}_i^- = \min_j \{\tilde{z}_{ij1}\}. \quad (8)$$

Dados os valores obtidos como medidas de desempenho dos fornecedores S_1 e S_2 , apresentados na Tabela 4, e as definições apresentadas acima, obtêm-se $A^* = [(0.8, 0.8, 0.8, 0.8), (1, 1, 1, 1), (0.4, 0.4, 0.4, 0.4)]$ e $A^- = [(0.3, 0.3, 0.3, 0.3), (0.5, 0.5, 0.5, 0.5), (0, 0, 0, 0)]$. A partir das soluções ideais *fuzzy* A^* e A^- , calcula-se a que distância cada fornecedor S_j ($j = 1, 2, \dots, N$) se encontra dessas soluções por meio das seguintes equações:

$$d_j^* = \sum_{i=1}^L d_v(\tilde{z}_{ij}, \tilde{v}_i^*), \quad (9)$$

$$d_j^- = \sum_{i=1}^L d_v(\tilde{z}_{ij}, \tilde{v}_i^-), \quad (10)$$

onde, dados dois números *fuzzy* trapezoidais $\tilde{m} = (m_1, m_2, m_3, m_4)$ e $\tilde{n} = (n_1, n_2, n_3, n_4)$, a distância d_v entre \tilde{m} e \tilde{n} é dada por

$$d_v(\tilde{m}, \tilde{n}) = \sqrt{\frac{1}{4} [(m_1 - n_1)^2 + (m_2 - n_2)^2 + (m_3 - n_3)^2 + (m_4 - n_4)^2]}. \quad (11)$$

Como resultado final do método, Chen *et al.* (2006) estabelecem uma medida escalar, chamada Coeficiente de Proximidade (*CP*), utilizada como parâmetro para determinar o desempenho e a ordem de preferência entre os fornecedores. O *CP* corresponde à distância de um fornecedor S_j em relação às soluções A^* e A^- simultaneamente. Seu valor é obtido por

$$CP_j = \frac{d_j^-}{d_j^* + d_j^-}, j = 1, 2, \dots, J. \quad (12)$$

A Tabela 5 mostra os valores d_j^* , d_j^- e CP_j para os fornecedores S_1 e S_2 , onde se pode observar, a partir do valor do coeficiente CP_j , que o fornecedor S_2 é preferível em relação ao

fornecedor S_1 ($S_2 > S_1$) segundo as preferências e julgamentos avaliados.

S_j	d_j^*	d_j^-	$d_j^*+d_j^-$	CP_j
S_1	1.14	0.97	2.11	0.45
S_2	1.05	1.03	2.08	0.49

Tabela 5: Resultado da avaliação de S_1 e S_2 pelo de Chen *et al.* (2006)

Visto que o método apresentado se mostra bastante apropriado como estratégia *ranking*, a próxima etapa do modelo utilizará o Coeficiente de Proximidade gerado por esse método como um dos critérios de avaliação dos fornecedores. Destaca-se também a flexibilidade percebida no método para considerar as preferências dos decisores, pois, por se valer de Lógica *Fuzzy*, auxilia na redução das incertezas do processo de tomada de decisão apresenta.

2.4. Quarta Etapa: Seleção Final

A quarta e última etapa de seleção do modelo consiste na formação de grupos de fornecedores com reduzido número de elementos, com o objetivo de facilitar a tomada da decisão final. Portanto, para cada elemento de grupo, será realizada a atribuição de uma parte da demanda da empresa compradora com base em múltiplos objetivos. Dessa forma, considerando-se a natureza combinatória e multi-objetivo do problema, propõe-se um algoritmo baseado na meta-heurística GRASP para a obtenção desses grupos.

A partir das definições de Jaskiewicz (2002) e Farina e Amato (2004), um problema desse gênero é definido como:

$$\text{Minimizar } z = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)), \quad (13)$$

sujeito a $x \in X^*$, onde X é o espaço de decisões, $x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in X$ é um vetor de decisão, Z é imagem de X ou espaço objetivo, $z = (z_1, z_2, \dots, z_n) \in Z$ é um vetor objetivo, $X^* = \{x \in X: g(x) \leq b\}$ é o conjunto das soluções possíveis, $g(x)$ são as restrições e $b \in \mathbb{R}^p$.

Assim, para o modelo proposto, considera-se um conjunto de fornecedores $S = \{S_1, S_2, \dots, S_N\}$, do qual se busca extrair um subconjunto de fornecedores S^* de tamanho máximo T , considerando como funções-objetivo $\min F$, $\max G$ e $\min H$, onde, F é o custo total da compra, G representa o desempenho médio do conjunto de fornecedores S^* , considerando-se a quantidade comprada de cada fornecedor S_j , e H é o maior prazo de entrega dentre todos os fornecedores inseridos no conjunto, considerando uma certa quantidade menor ou igual à demanda total D da empresa compradora. F , G e H são definidas por:

$$F = \sum_{j=1}^N x_j p_j, \quad (14)$$

$$G = \sum_{j=1}^N d e_j \frac{x_j}{D}, \quad (15)$$

$$H = \max_j \frac{x_j}{c_j}, j = 1, 2, \dots, N \quad (16)$$

sujeito a

$$\sum_{j=1}^N x_j = D, \quad (17)$$

$$\sum_{j=1}^N y_j \leq T, y_j \in \{0,1\}, \quad (18)$$

$$x_j \leq y_j D, \quad (19)$$

onde, p_j é o custo unitário relativo de S_j , x_j é quantidade comprada de S_j , c_j é a capacidade diária

de produção de S_j , de_j é indicador de desempenho de S_j , obtido pela equação (12) e $x_j \in \mathbb{N}$.

A meta-heurística GRASP proposta foi implementada em suas duas etapas básicas: (1) construção gulosa-aleatória e (2) busca local. Na primeira etapa, é construída uma solução elemento a elemento, satisfazendo-se as restrições do problema. Nessa fase, ainda se considera um coeficiente guloso α , utilizado para determinar quais são os candidatos aptos a serem escolhidos para fazer parte do conjunto-solução a cada iteração. O valor desse parâmetro indica o quão guloso ou aleatório o algoritmo deve ser, sendo zero para totalmente guloso e 1 um para totalmente aleatório.

Visto que a etapa de busca local tem a função de explorar soluções vizinhas à solução construída inicialmente, melhorando sua qualidade, a avaliação dessa melhoria será realizada pelo conceito de *Otimalidade de Pareto* (JASZKIEWICZ, 2002; FARINA E AMATO, 2004). As seções seguintes descrevem cada uma das duas etapas consideradas.

2.4.1. Construção Gulosa-Aleatória

Inicialmente, o algoritmo considera a lista de todos os candidatos a fornecedor ordenados pelo indicador de desempenho médio de_j . Após, forma-se a Lista de Candidatos Restrita (LCR), utilizando-se um limite de aceitação l , dado em função do coeficiente guloso α , onde

$$l = \max_j(de_j) - \alpha (\max_j(de_j) - \min_j(de_j)), \quad j = 1, 2, \dots, N. \quad (20)$$

Assim, caso um fornecedor S_j possua um coeficiente de proximidade de_j menor que l , S_j é automaticamente descartado da LCR.

O próximo passo consiste em selecionar aleatoriamente um dos membros da LCR e atribuir a esse membro uma parcela $x_j < D$, desconsiderando-se inicialmente sua capacidade de produção (c_j) e seu custo unitário (p_j), atendo-se somente à preferência dos decisores avaliadas na terceira etapa do modelo (avaliação qualitativa). Num segundo momento, estas variáveis serão otimizadas de acordo com as funções-objetivo, dadas nas equações (14) e (16). O valor de x_j para cada iteração ℓ é dado por

$$x_j = \begin{cases} \frac{D - \sum_{j=1}^N x_j}{T - \ell} + r, & \ell \leq T \\ D - \sum_{j=1}^N x_j, & \ell = T \end{cases}, \quad (21)$$

onde r é um número aleatório uniformemente distribuído no intervalo $\left[0, \frac{D - \sum_{j=1}^{\ell-1} x_j}{T - \ell}\right]$ e T é o número total de fornecedores que serão selecionados, ou seja, o número total de iterações.

Esse processo de construção é repetido por um número finito de iterações, onde a última solução gerada, tida como dominante pela definição de Otimalidade de Pareto é repassada para a etapa de Busca Local (BL). Optou-se pela geração de um maior número soluções nesta etapa, pois, durante os testes do algoritmo, foram obtidas soluções iniciais de melhor qualidade em função dessa repetição.

2.4.2. Busca Local

A etapa de busca local do algoritmo consiste em realizar trocas de unidades dos valores x_j parciais da demanda total D entre os fornecedores S_j da solução corrente. Assim, para cada iteração de busca local, tem-se um percentual de troca p_troca definido em 100%. Cada iteração, por sua vez, é composta por três passos principais: (1) substituição, (2) escolha de um ponto de início e (3) procura da melhor aprimorante, sendo que, ao final da execução desses três passos, o valor de p_troca é decrementado de acordo com um passo de redução, denotado por $p_reducao$, cujo valor é definido pelo usuário. Cada iteração irá repetir esses três passos enquanto o valor de p_troca for maior que zero. Assim, quando p_troca atingir um valor menor ou igual a zero, uma

nova iteração será iniciada, redefinindo-se o valor de p_troca em 100%.

Os três passos de cada iteração são descritos a seguir:

1. *Substituição*: no início de cada iteração da busca local, caso o percentual de troca p_troca seja igual a 100% (seu valor inicial) e um número aleatório qualquer a gerado e distribuído uniformemente no intervalo $[0,1]$, for par e caso existam fornecedores da base de dados ainda não utilizados pela solução corrente, o fornecedor contido na solução corrente que apresentar a menor parcela x_j da demanda total atribuída deverá ser substituído por outro fornecedor da lista de fornecedores ainda não utilizados. A seleção do fornecedor substituído segue o mesmo critério de seleção da etapa de construção aleatória-gulosa e esse fornecedor selecionado recebe a parcela x_j relativa ao fornecedor retirado da solução;
2. *Escolha de um ponto de início*: escolhe-se por meio de um sorteio seguindo uma distribuição uniforme, um dos fornecedores da solução corrente, sendo então este o elemento a partir do qual a BL será iniciada. A seleção é feita de modo que todos os fornecedores contidos na solução sejam selecionados como ponto de partida cada vez que o valor de p_troca for alterado.
3. *Procura da melhor aprimorante*: para cada fornecedor da solução selecionado como ponto de partida, descrito pelo passo acima, remove-se uma quantidade inteira de sua parte da demanda. Essa quantidade é dada pela parte inteira do resultado da multiplicação da quantidade x_j pelo percentual de troca p_troca relativo à iteração corrente da BL. Na sequência, essa quantidade é adicionada ao valor x_j de cada um dos outros fornecedores da solução, verificando-se se a alteração gera melhoria na solução. Considera-se a melhor aprimorante como critério de efetivação da troca.

Cada iteração do procedimento de BL descrito tem complexidade $O(n^2)$, onde n representa o número máximo T de fornecedores que se deseja colocar no subconjunto-solução S^* .

3. Resultados

O modelo proposto foi codificado na plataforma Java™ e executado em um computador com processador Intel Centrino Duo de *clock* com frequência de 1.83GHz e 1,5GB de memória RAM. As instâncias para teste foram geradas aleatoriamente segundo uma distribuição uniforme com 20, 50, 100, 500 e 1000 fornecedores, dado que, até então, não existiam instâncias com tamanhos relativamente grandes e com tais atributos. As instâncias e soluções obtidas podem ser adquiridas no endereço <http://www.myupdate.com.br/sbpo2011.rar>.

Foram considerados para as instâncias os mesmos critérios qualitativos definidos na seção 2.3 do texto, onde o método de Chen *et al.* (2006) é exemplificado. Assim, assumem-se também os mesmos pesos agregados calculados para cada critério, baseando-se nas atribuições dos K decisores, demonstradas na Tabela 2. Com relação aos parâmetros de configuração do algoritmo GRASP, utilizou-se como tamanho máximo T de subconjunto a ser formado um valor igual a 10, um coeficiente guloso α igual a 0.25, um número máximo de iterações igual a 10, e para cada uma dessas iterações, 200 iterações de busca local. Para cada uma das 10 iterações, o algoritmo gera uma solução final, ou seja, o algoritmo irá retornar um conjunto de 10 soluções ao decisor. Ainda, para cada uma das 200 iterações de busca local, o coeficiente de redução $p_reducao$ empregado foi definido em 15%. A Tabela 6 apresenta uma síntese dos resultados obtidos com o modelo para demonstrar sua efetividade e coerência com o problema alvo.

Instância	N	Tempo	\bar{Q}	σ_M	\bar{F}	σ_F	\bar{G}	σ_G	\bar{H}	σ_H
ssp20	20	3,7seg	7	1	2.426.892	182.306	0,47	0,01	6	1
ssp50	50	3,7 seg	7	1	1.884.826	121.935	0,49	0,02	6	1
ssp100	100	3,7 seg	6	1	1.744.600	111.452	0,53	0,01	6	1
ssp500	500	3,9 seg	7	1	1.842.694	139.565	0,53	0,01	6	1
ssp1000	1000	4,1 seg	6	1	1.781.418	199.337	0,52	0,02	7	2

N = tamanho da entrada; \bar{Q} = número médio de fornecedores na solução final; σ_M = desvio padrão no número de fornecedores na solução; \bar{F} = custo médio das soluções; σ_F = desvio padrão do custo das soluções; \bar{G} = desempenho médio das soluções; σ_G = desvio padrão do desempenho das soluções; \bar{H} =prazo médio das soluções; σ_H = desvio padrão do prazo das soluções

Tabela 6: Resultados para a meta-heurística

Com base na Tabela 6, pode-se dizer que, em termos de tempo de execução, o método é indiferente ao tamanho da instância a ser processada, pois não se observa diferença significativa nos tempos de execução da menor e da maior instância. Este comportamento já era previsível a partir do projeto do algoritmo, dado que a cota assintótica do procedimento de busca local é $O(n^2)$, onde o valor de n é igual a T , tamanho máximo do subconjunto S^* . Portanto, n não está associado ao tamanho total N da instância.

Destaca-se, contudo, que o objetivo maior do modelo não consiste em somente retornar uma solução em um tempo reduzido, mas também permitir a exploração das várias alternativas de que se dispõe em uma base de dados grande, sem negligenciar as preferências dos decisores. Nesse sentido, considera-se que o método também é eficiente, pois, mesmo para instâncias maiores, foram encontradas soluções equivalentes ou melhores às obtidas em instâncias menores, dado que para instâncias maiores existem mais alternativas, ou seja, havendo boas opções, mesmo em instâncias grandes, o algoritmo as encontra. Esta situação pode ser visualizada tanto no arquivo disponibilizado com as soluções obtidas, comparando-se a solução 8 da instância SSP1000 com a solução 5 da instância SSP50, quanto pela análise comparativa da média e do desvio-padrão das soluções obtidas para essas duas instâncias, expostas na Tabela 6.

Portanto, considera-se que o algoritmo é capaz de explorar com a mesma eficácia tanto instâncias grandes quanto instâncias pequenas. Porém, deve-se considerar que esse grau de otimalidade não deve ser avaliado apenas do ponto de vista quantitativo, ou seja, valores máximos ou mínimos, pois, mesmo que uma solução apresente um custo alto, por exemplo, se os fornecedores contidos nela estiverem em concordância com as preferências dos decisores em termos de qualidade, esta solução é considerada ótima em função do indicador de desempenho obtido na terceira etapa do modelo, uma vez que seu valor seja elevado, por exemplo. Esta situação pode ser visualizada na solução 2 da instância SSP1000.

Apesar do conceito de Otimalidade de Pareto não expressar a noção de preferência, o modelo consegue considerar uma vez que a solução é construída e melhorada com base na ordem da lista de fornecedores dada pelo indicador de desempenho, obtido na terceira etapa do modelo.

As soluções obtidas ainda permitem aos decisores uma visão mais privilegiada das alternativas para tomar sua decisão final, pois apresenta como resultado um número muito reduzido de fornecedores. Para ilustrar esta situação, considere, por exemplo, a necessidade de selecionar fornecedores apenas em função do *ranking* criado na terceira etapa do método para a instância SSP1000. Levando-se em consideração que o melhor coeficiente de proximidade apresenta o valor 0,5915, que o pior valor é 0,2457 e que os decisores estipulassem uma margem de tolerância de 0,05 em relação ao maior valor, restariam ainda 48 alternativas para serem avaliadas. Assim, métodos de *ranking* empregados isoladamente não são eficientes nestas circunstâncias, pois podem retornar uma lista com tamanho demasiadamente grande, contendo alternativas muito próximas quanto a seus coeficientes de desempenho, o que pode indicar um empate técnico.

Por fim, destaca-se também que a indicação de mais de um fornecedor com base na demanda, realizada pelo modelo, contribui para a formação da base multi-fornecedores da empresa, ajudando os decisores no planejamento da gestão do risco de desabastecimento e aumento da flexibilidade da organização com relação à demanda de seus clientes. Ainda, o *lead time* pode ser reduzido em função do fornecimento em paralelo, uma vez que se considere confiabilidade de entrega como critério relevante na etapa qualitativa do modelo.

4. Considerações Finais

Este trabalho apresentou o projeto e a construção de um modelo de seleção de fornecedores sistemático, baseando-se na hibridização do método qualitativo de Chen *et al.* (2006) e da metaheurística GRASP (FEO e RESENDE, 1989), obtendo-se, ao final, expressiva contribuição no sentido de tornar a tarefa da decisão final mais prática e simplificada para o problema quando da necessidade de se considerar muitas alternativas e critérios.

A principal distinção entre a abordagem apresentada neste trabalho e as abordagens anteriores dadas ao problema, refere-se à incorporação da visão dos decisores ao modelo de avaliação de natureza combinatória, pois, de acordo com Gomes *et al.* (2009), a subjetividade está sempre presente nos processos decisórios. Dessa forma, encontram-se diferentes juízos de valor relativos aos diferentes atores de decisão, tornando-se fundamental a construção de modelos que legitimem a elaboração desses juízos.

A continuidade dessa pesquisa prevê a aplicação do modelo em uma situação de decisão real e a expansão do modelo na quarta etapa, considerando outras funções objetivo ainda a serem levantadas no estudo de caso, a realização de testes com instância maiores para aprimoramento do método heurístico e a definição de critérios qualitativos e seus pesos de acordo com a postura dos decisores envolvidos no processo decisório.

Referências

- Azadeh, A. e Alem, S. M.** (2010), A flexible deterministic, stochastic and fuzzy Data Envelopment Analysis approach for supply chain risk and vendor selection problem: Simulation analysis. *Expert Systems with Applications*, 37, 7438-7448.
- Bhattacharya, A., Geraghty, J. e Young, P.** (2010), Supplier selection paradigm: An integrated hierarchical QFD methodology under multiple-criteria environment. *Applied Soft Computing*, 10, 1013-1027.
- Beamon, B. M.** (1999), Measuring supply chain performance. *International Journal of Operations & Production Management*, 19:3, 275-292.
- Bowersox, D., Closs, D. e Cooper, M. B.** Supply chain logistics management. McGraw-Hill. Nova Iorque, 2002.
- Chen, C. T., Lin, C. T. e Huang S. F.** (2006), A fuzzy approach for supplier evaluation and selection in supply chain management. *Int. J. Production Economics*, 102, 289-301.
- Chen, C. T.** (2000), Extensions of the TOPSIS for group-decision making under fuzzy environment. *Fuzzy Sets and Systems*. 114, 1-9.
- Christopher, M.** Logistics and Supply Chain Management: Creating Value – Aiding Network (3ª Ed.). Financial Times/Prentice Hall, Londres, 143-160, 2005.
- Constantino, N. e Pellegrino R.** (2010), Choosing between single and multiple sourcing on supplier default risk: a real options approach. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 16, 27-40.
- De Boer, L., Labro, E. e Morlacchi, P.** (2001), A review of methods supporting supplier selection. *European Journal of Purchasing & Supply Management*, 7, 75-89.
- De Boer, L.** (1998), Operations research in support of purchasing. Design of a toolbox for supplier selection. Ph.D. Thesis, University of Twente, Enschede, The Netherlands.
- Degraeve, Z., Labro, E. e Roodhooft, F.** (2000), An evaluation of supplier selection methods from a Total Cost of Ownership perspective. *European Journal of Operational Research*, 125/1, 34-59.
- Farina, M. e Amato, P.** (2004), A Fuzzy definition of “Optimality” for Many-Criteria optimization Problems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part A: Systemams and Humans*, 34:3.
- Feo, T. A. e Resende, M. G. C.** (1989), A probabilistic heuristic for a computationally difficult set covering problem. *Operations Research Letters*, 5, 67-71.

- Golmohammadi, D., Creese, R. C., Valian, H. e Kolassa, J.** (2009), Supplier Selection Based on a Neural Network Model Using Genetic Algorithm. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 20:9, 1504 - 1519.
- Gomes, L. F. A. M., Gomes, C. F. S. e Almeida, A. T.** Tomada de Decisão Gerencial, 3ª Edição, Atlas, São Paulo, 2009.
- Ho, W., Xu, X. e Dey, P. K.** (2010), Multi-criteria decision making approaches for supplier evaluation and selection: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 202, 16–24.
- Huang, S. H. e Keskar, H.** (2007), Comprehensive and configurable metrics for supplier selection. *Int. J. Production Economics*, 105, 510-523.
- Jaszkiewics, A.** (2002), Genetic local search for multi-objective combinatorial optimization. *European Journal Of Operations Research*, 137, 50-71.
- Keskin, G. A., Ilhan, S. e Özkan, C.** (2010), The Fuzzy ART algorithm: A categorization method for supplier evaluation and selection. *Expert Systems with Applications*, 37, 1235-1240.
- Kheljani, J. G., Ghodsypour e S.H.; O'Brien, C.** (2009), Optimizing whole supply chain benefit versus buyer's benefit through supplier selection. *Int. J. Production Economics*, 121, 482-493.
- Kuo, R. J., Wang, Y. C. e Tien, F.C.** (2010), Integration of artificial neural network and MADA methods for green supplier selection. *Journal of Cleaner Production*, 18, 1161-1170.
- Lambert, D. M. e Cooper, M. C.** (2000), Issues in Supply Chain Management. *Industrial Marketing Management*, 29, 65-83.
- Lee, A. H. I.** (2009), A fuzzy supplier selection model with the consideration of benefits, opportunities, costs and risks. *Expert Systems with Applications*, 36, 2879-2893.
- Lee, A. H. I., Kang, H-Y., Hsu, C-F. e Hung, H-C.** (2009), A green supplier selection model for high-tech industry. *Expert Systems with Applications*, 36, 7917-7927.
- Lin, R-H., Chuang, C-L., Liou, J. J. H. e Wu, G-D.** (2009), An integrated method for finding key suppliers in SCM. *Expert Systems with Applications*, 36, 6461-6465.
- Ordoobadi, S. M.** (2009), Development of a supplier selection model using fuzzy logic. *Supply Chain Management: An International Journal*, 14:4, 314-327.
- Razmi, J., Rafiei, H. e Hashemi, M.** (2009), Designing a decision support system to evaluate and select suppliers using fuzzy analytic network process. *Computers & Industrial Engineering*, 57, 1282-1290.
- Saen, R. F.** (2010), Restricting weights in supplier selection decisions in the presence of dual-role factors. *Applied Mathematical Modelling*, 34, 2820-2830.
- Shen, C-Y. e Yu, K-T.** Enhancing the efficacy of supplier selection decision-making on the initial stage of new product development: A hybrid fuzzy approach considering the strategic and operational factors simultaneously. *Expert Systems with Applications*, 36, 11271-11281.
- Shih, K-H. e Lin, B.** (2009), Supplier evaluation model for computer auditing and decision-making analysis. *Kybernetes*, 38:9, 1439-1460.
- Talluri, S. e Narasimhan, R.** (2004), A methodology for strategic sourcing. *European Journal Of Operational Research*, 154, 236-250.
- Thomas, D. J. e Griffin, P. M.** (1996), Coordinated supply chain management. *European Journal of Operational Research*, 94,1-15.
- Wang, W-P.** (2010), A fuzzy linguistic computing approach to supplier evaluation. *Applied Mathematical Modelling*, 34, 3130-3141.