

# Multicriteria Decision-Making System for Supplier Selection Considering Risk: A Computational Fuzzy AHP-Based Approach

M. V. C Fagundes, Á. C. Keler, E. O. Teles, S. A. B. Vieira de Melo, and F. G. M. Freires

**Abstract** - In the latest years, supply chain academics and practitioners have been increasingly concerned with the supplier selection problem. In this paper, a computational system based on 'Fuzzy Extended Analytic Hierarchy Process (Fuzzy AHP)' was developed for supplier selection considering risks. Specifically, we aimed to assess the use of the Fuzzy AHP method in supplier selection and to analyze the support of the proposed system to supplier selection considering risks through a practical application in the Brazilian oil industry. For this, the main criteria, sub-criteria, and alternatives for supplier selection were identified and comparatively assessed by expert managers from the focal company. Through the Fuzzy AHP computational approach the priority weights of each item were calculated. After computing the final score for each supply alternative, supplier  $A_1$  was defined as the preferred supplier as it obtained the highest priority weight (0.848), followed by supplier  $A_2$  with the second highest priority weight (0.151). The results of the research raised important opportunities for improving supplier selection considering risks, such as decision rationalization, flexible modeling of decision variables, and automation of subjective judgments and evaluations by decision-makers. These benefits may contribute to lower purchasing costs and improve the overall assessment of supply risks, promoting supply chain competitiveness.

**Index Terms** - Multicriteria decision-making, Supplier selection, Matlab programming, Fuzzy AHP.

## I. INTRODUÇÃO

Na atualidade, o processo de seleção de fornecedores é um aspecto vital da cadeia de suprimentos, pois engloba diversos riscos inerentes ao negócio. O desempenho dos fornecedores decidirá o nível de competitividade de toda a cadeia de suprimentos. A seleção dos fornecedores certos não apenas reduz os custos de aquisição de suprimentos, mas também contribui para a inovação do produto e ajuda a alcançar processos de produção eficazes. À medida que a estrutura de uma cadeia de suprimentos se torna mais ampla, complexa e globalizada as empresas se tornam mais dependentes de seus fornecedores e também vulneráveis a riscos e interrupções [1].

M. V. C. Fagundes, State University of Southwest Bahia, Vitória da Conquista, Bahia, Brazil (email: marcus@uesb.edu.br).

Á. C. Keler, State University of Southwest Bahia, Vitória da Conquista, Bahia, Brazil (email: atilack@hotmail.com).

E. O. Teles, Federal Institute of Bahia, Camaçari, Bahia, Brazil (email: eduardo.teles@ifba.edu.br).

S. A. B. Vieira de Melo, Federal University of Bahia, Salvador, Bahia, Brazil (email: sabvm@ufba.br).

F. G. M. Freires, Federal University of Bahia, Salvador, Bahia, Brazil (email: francisco.gaudencio@ufba.br).

Certas rupturas podem impedir o fluxo de bens, recursos e capital, gerando reações críticas da sociedade. Um exemplo dramático disso é a pandemia provocada pelo coronavírus (COVID-19), que afetou severamente as operações, o trabalho e as finanças das empresas, destacando a necessidade de planos efetivos de gestão de riscos. Por isso, uma metodologia adequada para a seleção de fornecedores é uma necessidade cada vez mais importante para as cadeias de suprimentos.

Uma parte da literatura sobre a 'gestão de riscos da cadeia de suprimentos' considera que a seleção de fornecedores pode ser tratada como um problema de tomada de decisão multicritério. Os diferentes critérios de seleção de fornecedor podem variar dependendo da necessidade da empresa, suas preferências, estratégia tecnológica e riscos [2]. Modelar um problema de decisão pode envolver um único ou vários agentes, afetando um ou mais critérios ao longo do processo. Cada agente de decisão é dotado de valores pessoais de julgamento a respeito de critérios, atributos e alternativas, por isso, o valor destas variáveis sofre inerente influência subjetiva [3]. Os modelos decisórios que envolvem mais de um critério são denominados de 'Métodos de Tomada de Decisão Multicritério' (*Multicriteria Decision-Making - MCDM*). Nesses métodos, avaliam-se as alternativas de acordo com a quantidade de critérios definidos, sendo que cada critério estimula a uma organização própria das alternativas, tornando necessária a utilização de um aparato para ordenação ou classificação geral de preferências [4].

Normalmente, o conhecimento e a informação crítica para a seleção de fornecedores são captados de especialistas, respeitando-se a prioridade da empresa quanto à importância de um critério sobre outro. Para isso, o 'Processo de Hierarquia Analítica' (*Analytic Hierarchy Process - AHP*) tem sido amplamente utilizado, pois pode lidar com problemas reais de tomada de decisão multicritério [5]. Apesar da popularidade e simplicidade conceitual, esse método é frequentemente criticado pela incapacidade de lidar com a incerteza e imprecisão inerentes ao mapeamento da percepção do tomador de decisão [6]. Na formulação tradicional do *AHP*, os julgamentos humanos são representados como números exatos ou nítidos. No entanto, em muitos casos práticos, o modelo de preferência humana é incerto, vago e subjetivo, sendo inviável para o tomador de decisão expressar as suas preferências através de valores numéricos exatos.

Por isso, é mais adequado para o decisor utilizar 'avaliações de intervalo' ou 'avaliações difusas (*fuzzy*)'. A teoria dos conjuntos *fuzzy* se assemelha ao raciocínio humano, representando matematicamente o uso de informações

aproximadas e incertas nas decisões [7]. A necessidade do mundo atual em encontrar soluções reais para problemas onde existe imprecisão, fez com que a lógica *fuzzy* se tornasse importante nas áreas econômica, social, industrial, política, entre outras [8]. Uma abordagem *Fuzzy AHP* integrada pode melhorar o processo de seleção de fornecedor, tornando-o mais efetivo para representar os julgamentos de comparação e prioridade dos tomadores de decisão.

Diante disso, neste artigo desenvolveu-se um sistema computacional baseado no ‘Processo de Hierarquia Analítica Estendida Difusa’ (*Fuzzy Extended Analytic Hierarchy Process - Fuzzy AHP*), introduzido por Chang [9], para seleção de fornecedor considerando riscos. Especificamente, buscou-se: a. avaliar o uso do método *Fuzzy AHP* na seleção de fornecedor; e b. analisar o apoio do sistema proposto à seleção de fornecedor considerando riscos através do caso real de uma indústria brasileira de petróleo e gás natural. O método de Chang [9] usa números *fuzzy* triangulares para a comparação pareada no *AHP*. Ele é o mais popular das abordagens *Fuzzy AHP*, pois seu algoritmo é mais rápido e necessita de menor esforço computacional [6] [10].

A contribuição deste artigo é tripla. Primeiramente, é discutido o uso de uma abordagem integrada de tomada de decisão multicritério na solução de um importante problema das atuais cadeias de suprimentos; segundo, é proposto um novo sistema computacional que apoia a seleção de fornecedor de modo racional, flexível e ágil; e terceiro, a ferramenta computacional desenvolvida é aplicada em um caso real de seleção de fornecedor considerando riscos de uma grande empresa petrolífera, o que possibilitou análises empíricas importantes para a área de gestão de operações.

Além desta introdução, o presente artigo possui mais cinco seções. Na próxima seção, é apresentada a revisão de literatura sobre riscos na seleção de fornecedor. Na seção III, é discutida a metodologia da pesquisa. Na seção IV apresenta-se a aplicação da abordagem computacional *Fuzzy AHP* no caso real de seleção de fornecedor. Os resultados da pesquisa empírica e suas implicações teóricas e gerenciais são discutidas na seção V. Finalmente, na seção VI tem-se as conclusões do estudo.

## II. RISCOS NA SELEÇÃO DE FORNECEDOR

Nas duas primeiras décadas deste século, vários eventos mostraram as dramáticas consequências e dependências entre entidades da cadeia de suprimentos e sua vulnerabilidade a gatilhos disruptivos [11] [12]. De acordo com [13], o risco de interrupções na cadeia de suprimentos aumentou nos últimos anos devido ao progresso da globalização, aumento da terceirização e do foco intensificado na eficiência e no *lean management*.

Apesar do aumento dos riscos da cadeia de suprimentos poucas empresas tomam medidas efetivas para gerenciá-los [14]. Essa lacuna torna a ‘gestão de riscos da cadeia de suprimentos (GRCS)’ uma área atraente de pesquisa e prática profissional. De acordo com [15], a GRCS resulta da coordenação ou colaboração entre parceiros da cadeia de suprimentos para garantir rentabilidade e continuidade,

englobando duas dimensões: riscos operacionais e de violação; e mitigação de riscos. Segundo [16] a GRCS envolve todos os riscos do fluxo de informações, materiais e produtos, desde os fornecedores à entrega do produto ao usuário final. Numa perspectiva evolutiva, muitos estudiosos definem que o processo de GRCS é uma estrutura que envolve a identificação, avaliação, mitigação e controle de possíveis interrupções na cadeia de suprimentos e seus impactos negativos [17] [18] [19] [20] [21] [22] [23].

Segundo [19], os riscos de fornecimento atraíram significativa atenção no campo de estudos sobre GRCS, com destaque para problemas de seleção de fornecedor. A seleção do fornecedor é uma questão crítica porque decisões ruins podem causar várias dificuldades relacionadas ao fornecimento, como atrasos nas entregas e altas taxas de defeitos [24]. Além disso, à medida que as cadeias de suprimentos se tornam globais, fatores externos, além dos internos, influenciam cada vez mais os riscos de fornecimento. Portanto, neste estudo, a seleção de fornecedores é considerada a partir de uma perspectiva de gestão de risco. Os riscos de seleção de fornecedores podem ser agrupados em riscos recorrentes, se os eventos de risco são frequentes, mas curtos; e riscos de interrupção, se os eventos de risco são raros, mas longos [25] [26].

Através de uma ampla pesquisa de literatura, foram identificados 26 artigos publicados nas duas últimas décadas, em periódicos internacionais revisados por pares, que abordam a seleção de fornecedor considerando riscos. Constatou-se que 11 ‘tipos de risco’ incluem diversos ‘fatores de risco’ que afetam a seleção de fornecedores, tais como: 1. *qualidade* (má qualidade [27] [28] [29] [30]); 2. *entrega* (atraso na entrega [27] [28] [29] [30], baixa velocidade de entrega [31]); 3. *desempenho* (capacidade incerta [32] [33], falha do fornecedor [34] [35] [36], baixo desempenho [31], falta de disposição para cooperar e falta de envolvimento do fornecedor [31] [37], restrição de fornecimento, restrição entre comprador-fornecedor e perfil ruim do fornecedor [38], interrupção do fornecimento [39] [40] [41] [29], serviço de fornecedor ruim [42] [43], baixa confiabilidade do fornecedor [1], baixa capacidade de fabricação, alta taxa de defeito, falta de garantia e de planos para lidar com interrupções [30]); 4. *localização* (localização geográfica dispersa [2]); 5. *flexibilidade* (falta de/ou baixa flexibilidade do fornecedor [44] [30]); 6. *preço* (preço alto [30] [31]); 7. *tecnologia* (riscos tecnológicos [31] [45] [30]); 8. *financeiro* (riscos financeiros [31], estresse financeiro do fornecedor [46], condição financeira ruim [30]); 9. *econômico* (riscos econômicos [47] [45], risco de sustentabilidade econômica [48]); 10. *ambiental* (risco ambiental [45], defeito de projeto ambiental, alta emissão de gases de efeito estufa, poluição, descumprimento ambiental e desgastes naturais [49], risco de sustentabilidade ambiental [48]); e 11. *social* (riscos sociais [45] [50] e risco de sustentabilidade social [48]).

Pela revisão aprofundada dos artigos selecionados, observou-se que apenas quatro publicações utilizam os métodos *Fuzzy* e *AHP* de forma integrada, sendo elas [2] [33] [38] [50]. No trabalho de [2], o método *Fuzzy AHP* é adotado

na seleção de fornecedor global a partir da avaliação de critérios político-econômicos, infraestruturais, fatores de risco, etc. Em [33] os métodos *Fuzzy AHP* e *TOPSIS* são usados na seleção de fornecedores com base no ecossistema da cadeia de suprimentos, desempenho e critérios de risco. Já em [38] o *Fuzzy AHP* é aplicado ao conceito de benefícios, oportunidades, custos e riscos para avaliar vários aspectos dos fornecedores. Por fim, [50] adotam o *Fuzzy AHP* e o modelo *input-output* para avaliar os riscos sociais da seleção de fornecedores na indústria automotiva alemã.

Com base nesta pesquisa de literatura, foram identificadas três importantes observações/lacunas: i. os estudos apontam que a abordagem integrada *Fuzzy AHP* supera as fraquezas individuais de cada método; ii. há uma literatura muito limitada sobre a aplicação prática da abordagem *Fuzzy AHP* no ambiente industrial; e iii. não há qualquer estudo sobre o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para apoio automatizado à seleção de fornecedor considerando riscos. Portanto, neste artigo, busca-se atender a essas observações/lacunas de conhecimento com a proposição de um novo sistema computacional baseado em *Fuzzy AHP* para apoio à seleção de fornecedor considerando riscos.

### III. METODOLOGIA

#### A. O Processo de Hierarquia Analítica Estendida Difusa

A importância relativa de diferentes critérios de decisão na seleção de fornecedores envolve um alto grau de julgamento subjetivo. A hierarquia das variáveis de decisão é objeto de uma comparação entre pares do *AHP*, que converte as preferências humanas entre as alternativas disponíveis como ‘igual, pouco forte, forte, muito forte e extremamente forte’ [5]. Mesmo que a escala nítida do *AHP* tenha as vantagens de simplicidade e facilidade de uso, ela não é suficiente para considerar a incerteza associada ao mapeamento da percepção do tomador de decisão [6].

Em razão disso, os números *fuzzy* triangulares são usados para decidir a prioridade de uma variável de decisão sobre a outra. O método de ‘Análise de Extensão Sintética’ proposto por Chang [9] é frequentemente usado para decidir os pesos finais de prioridade com base em números *fuzzy* triangulares. A teoria dos conjuntos *fuzzy* tem provado vantagens em contextos vagos e imprecisos, pois se assemelha ao raciocínio humano no uso de informações aproximadas para gerar decisões. Ela implementa classes de dados com limites que não são claramente definidos, ou seja, difusos [51].

Neste artigo, uma abordagem computacional do ‘Processo de Hierarquia Analítica Estendida Difusa (*Fuzzy AHP*)’ é usada para lidar com a imprecisão dos dados envolvidos em um caso real de seleção do melhor fornecedor para uma indústria brasileira de petróleo e gás natural. Os números *fuzzy* triangulares são usados para definir as preferências de um critério em relação a outro e, em seguida, usando o método de análise de extensão, o valor de extensão sintética da comparação de pares é calculado. Com base nisso, os vetores de peso são definidos e normalizados. Como resultado, a partir dos diferentes pesos de critérios e subcritérios, os pesos finais

de prioridade das alternativas de fornecedores são decididos. A prioridade mais alta é dada ao fornecedor com maior peso.

As etapas do método *Fuzzy AHP* adotado neste artigo são discutidas a seguir.

#### B. Etapas de Implementação do Método Fuzzy AHP

O método de ‘Análise de Extensão Sintética’ em *Fuzzy AHP* de Chang [9] é usado para dimensionar o quanto um objeto pode satisfazer a um objetivo ou meta, ou seja, a ‘extensão da satisfação’. Essa ‘extensão da satisfação’ é quantificada usando os números *fuzzy* triangulares. Com base em valores *fuzzy* para a análise de extensão de cada objeto, podem ser obtidos valores de graus sintéticos difusos. Suponha que  $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$  seja um conjunto de objetos, e  $U = \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_m\}$  um conjunto de metas. Cada objeto é tomado e a análise de extensão para cada meta,  $g_i$ , é realizada, respectivamente. Portanto,  $m$  valores de análise de extensão para cada objeto podem ser obtidos, com os seguintes sinais:  $M_{g_i}^1, M_{g_i}^2, M_{g_i}^3, \dots, M_{g_i}^m$  com  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ . Todos  $M_{g_i}^j$  são números *fuzzy* triangulares, ou seja,  $j = 1, 2, 3, \dots, m$ . A seguir, são detalhadas as oito etapas de implementação desse método, conforme adotado nesta pesquisa.

##### 1) Etapa 1

O problema é decomposto em uma hierarquia de objetivo (meta), critérios, subcritérios e alternativas. A hierarquia indica uma relação entre elementos de um nível com os do nível imediatamente abaixo, fazendo com que cada elemento seja conectado a todos os demais, pelo menos indiretamente. A Fig. 1 mostra a estrutura hierárquica do problema real de seleção de fornecedor abordado. Em sua parte superior, está a raiz da hierarquia com o objetivo do problema. Na parte inferior estão as folhas com as alternativas a serem comparadas. Entre esses dois níveis estão vários critérios e subcritérios. No processo de julgamento, o decisor compara a contribuição dos elementos de nível inferior em relação ao nível superior.

##### 2) Etapa 2

Os dados são coletados de gestores especialistas (decisores), de acordo com a estrutura hierárquica da Fig. 1. Para isso, um questionário foi projetado com a comparação pareada de todos os quesitos (critérios, subcritérios e alternativas), utilizando uma escala linguística qualitativa. Os especialistas classificaram a comparação como ‘igual, pouco forte, forte, muito forte e extremamente forte’, conforme [5].

##### 3) Etapa 3

A próxima etapa refere-se à construção das matrizes de comparação pareada dos quesitos julgados pelos especialistas no questionário. A escala linguística do questionário representa valores qualitativos que são então convertidos em valores quantitativos, conforme Tabela I. Os valores numéricos de ‘intensidade da importância’ e ‘intensidade da importância inversa’ correspondem aos julgamentos qualitativos dos especialistas.

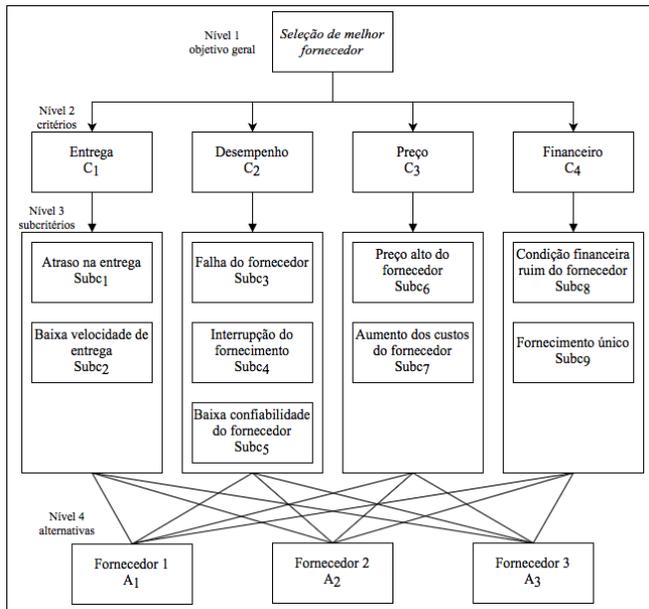


Fig. 1. Estrutura hierárquica do problema real de seleção de fornecedor.

TABELA I  
ESCALA PARA COMPARAÇÃO DE JULGAMENTOS

Esca	Intensidade da Importância	Intensidade da importância inversa
Igual	1	1
Pouco forte	3	1/3
Forte	5	1/5
Muito forte	7	1/7
Extremamente forte	9	1/9
Valores intermediários entre dois julgamentos	2, 4, 6, 8	1/2, 1/4, 1/6, 1/8

FONTE: [52]

A Tabela II apresenta os valores da matriz de comparação pareada de uma parte do questionário aplicado, ou seja, relativa aos critérios julgados. Este procedimento foi realizado para todos os demais quesitos da estrutura hierárquica do problema de seleção abordado neste artigo.

TABELA II  
MATRIZ DE COMPARAÇÃO PAREADA

	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>
C <sub>1</sub>	1	1	7	5
C <sub>2</sub>	1	1	9	9
C <sub>3</sub>	1/7	1/9	1	1
C <sub>4</sub>	1/5	1/9	1	1

4) Etapa 4

Esta etapa corresponde a fuzzificação das matrizes de comparação pareada estabelecidas na etapa 3. Para tanto, foi utilizada a teoria dos conjuntos fuzzy triangulares. Para cada valor numérico das matrizes de comparação pareada foram associados três valores que correspondem ao valor baixo (lower), médio (medium) e alto (upper). Esses valores triangulares foram representados por (1) e (2), que correspondem ao ‘valor fuzzificado’ e ao ‘valor fuzzificado inverso’, respectivamente.

$$M_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij}) \tag{1}$$

$$M_{ij}^{-1} = \left(\frac{1}{u_{ij}}, \frac{1}{m_{ij}}, \frac{1}{l_{ij}}\right) \tag{2}$$

5) Etapa 5

Nesta etapa calcula-se o valor da extensão sintética difusa de cada uma das matrizes fuzzificadas na etapa 4, utilizando (3):

$$S_i = \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \otimes \left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1} \tag{3}$$

Para obter  $\sum_{j=1}^m M_{gi}^j$ , a operação de adição difusa dos valores da análise de extensão  $m$  para uma matriz particular é realizada conforme (4):

$$\sum_{j=1}^m M_{gi}^j = \left( \sum_{j=1}^m l_j, \sum_{j=1}^m m_j, \sum_{j=1}^m u_j \right) \tag{4}$$

E para obter  $\left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1}$  o operador de adição difusa dos valores  $M_{gi}^j$  é realizado com (5):

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j = \left( \sum_{i=1}^n l_i, \sum_{i=1}^n m_i, \sum_{i=1}^n u_i \right) \tag{5}$$

Já o inverso do vetor calculado é obtido em (6):

$$\left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1} = \left( \frac{1}{\sum_{i=1}^n u_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n m_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n l_i} \right) \tag{6}$$

6) Etapa 6

Esta etapa consiste em calcular o grau de possibilidade. Para calcular o grau de possibilidade de supostos dois conjuntos fuzzificados dados por  $M_1 = (l_1, m_1, u_1)$  e  $M_2 = (l_2, m_2, u_2)$  utiliza-se (7):

$$V(M_2 \geq M_1) = \sup_{y \geq x} [\min(\mu_{M_1(x)}, \mu_{M_2(y)})] = \text{hgt}(M_1 \cap M_2) = \mu_{M_2(d)} \tag{7}$$

O resultado de (7) corresponde a interseção entre  $M_1$  e  $M_2$  (“ponto  $d$ ”). Entretanto, para solucionar (7) são necessários os cálculos estabelecidos em (8):

$$V(M_2 \geq M_1) = \begin{cases} 1, & \text{se } m_2 \geq m_1 \\ 0, & l_1 \geq u_2 \\ \frac{(l_1 \geq u_2)}{(m_2 - u_2) - (m_1 - l_1)}, & \text{de outra forma} \end{cases} \tag{8}$$

7) Etapa 7

Nesta etapa define-se o grau de possibilidade de um número fuzzy convexo ser maior do que  $k$  números fuzzy convexos  $M_i (i = 1, 2, \dots, k)$ , conforme (9):

$$V(M \geq M_1, M_2, \dots, M_k) = V[(M \geq M_1) \text{ e } (M \geq M_2) \text{ e } \dots \text{ e } (M \geq M_k)] = \min V(M \geq M_i) \tag{9}$$

Considerando que (10) é:

$$d'(A_i) = \min V(S_i \geq S_k) \tag{10}$$

Para  $k = 1, 2, \dots, n; k \neq i$ , o peso do vetor é dado por (11):

$$W' = (d'(A_1), d'(A_2), \dots, d'(A_n))^T \tag{11}$$

Onde  $A_i (i = 1, 2, \dots, n)$  são  $n$  elementos.

8) *Etapa 8*

Aqui os vetores de peso normalizados são calculados em (12), onde  $W$  é um número não *fuzzy*:

$$W = (d(A_1), d(A_2), \dots, d(A_n))^T \tag{12}$$

Após a execução das oito etapas descritas, é possível obter os vetores de peso normalizados de todos os quesitos da estrutura hierárquica (critérios, subcritérios e alternativas) do problema de seleção de fornecedor para a empresa estudada.

IV. APLICAÇÃO DA ABORDAGEM COMPUTACIONAL *FUZZY AHP* NA SELEÇÃO REAL DE FORNECEDOR

A empresa na qual aplicamos o sistema proposto é a maior operadora independente de exploração e produção de petróleo e gás natural *onshore* do Brasil. Essa empresa desejava selecionar o melhor fornecedor para um de seus componentes críticos: tubos e conexões industriais de aço para gasodutos e oleodutos. Para tanto, ela devia considerar todos os possíveis riscos que podem afetar o fornecimento desse importante suprimento.

O processo de seleção de fornecedor considerando riscos na empresa enfocada foi conduzido entre junho e agosto de 2020. Inicialmente, foi formado um grupo de decisão composto por gestores especialistas da área de suprimentos da empresa. Em uma entrevista primária com esses especialistas foram identificados os principais critérios, subcritérios e alternativas para seleção de fornecedor a partir dos ‘tipos de risco’ e seus respectivos ‘fatores de risco’ extraídos da revisão de literatura.

Como resultado dessa entrevista primária, foram identificados quatro critérios, nove subcritérios e três alternativas de potenciais fornecedores, conforme Fig. 1. Deste modo, na estruturação hierárquica do problema de seleção definiu-se o objetivo geral em primeiro nível, os critérios no segundo nível, os subcritérios no terceiro nível e as alternativas de decisão no quarto nível. Os critérios ( $C_x$  - tipos de risco) e seus respectivos subcritérios ( $Subc_x$  - fatores de risco) selecionados foram:  $C_1$  entrega ( $Subc_1$ - atraso na entrega;  $Subc_2$ - baixa velocidade de entrega),  $C_2$  desempenho ( $Subc_3$ - falha do fornecedor;  $Subc_4$ - interrupção do fornecimento;  $Subc_5$ - baixa confiabilidade do fornecedor),  $C_3$  preço ( $Subc_6$ - preço alto do fornecedor;  $Subc_7$ - aumento dos custos do fornecedor) e  $C_4$  financeiro ( $Subc_8$ - condição financeira ruim do fornecedor;  $Subc_9$ - fornecimento único). Os fornecedores alternativos foram designados como  $A_1, A_2$  e  $A_3$ .

Após a construção da hierarquia, a comparação da importância de um critério, subcritério ou alternativa em relação aos outros foi feita através do questionário aplicado. A preferência de uma medida em relação a outra foi decidida consensualmente a partir do conhecimento e da experiência dos gestores especialistas.

Os diferentes pesos de prioridade foram calculados usando a abordagem computacional baseada no método *Fuzzy AHP*. Para isso, inicialmente, a primeira matriz de avaliação *fuzzy*

foi construída pela comparação pareada dos diferentes critérios em relação ao objetivo geral usando números *fuzzy* triangulares, conforme Tabela III.

TABELA III  
AVALIAÇÃO FUZZY: CRITÉRIOS EM RELAÇÃO AO OBJETIVO GERAL

O	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$W_o$
$C_1$	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(6, 7, 8)	(4, 5, 6)	0
$C_2$	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	(9, 9, 9)	(9, 9, 9)	1
$C_3$	(1/8, 1/7, 1/6)	(1/9, 1/9, 1/9)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	0
$C_4$	(1/6, 1/5, 1/4)	(1/9, 1/9, 1/9)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)	0

Os valores da extensão sintética difusa com relação a cada critério foram calculados usando (3) e as operações algébricas *fuzzy* definidas em (4), (5) e (6), conforme  $S_1, S_2, S_3$  e  $S_4$ :

$$S_1 = (12, 14, 16) \otimes \left( \frac{1}{40.638}, \frac{1}{38.565}, \frac{1}{36.513} \right) = (0.2952, 0.363, 0.438)$$

$$S_2 = (20, 20, 20) \otimes \left( \frac{1}{40.638}, \frac{1}{38.565}, \frac{1}{36.513} \right) = (0.4921, 0.5186, 0.5477)$$

$$S_3 = (2.236, 2.253, 2.277) \otimes \left( \frac{1}{40.638}, \frac{1}{38.565}, \frac{1}{36.513} \right) = (0.055, 0.0584, 0.0623)$$

$$S_4 = (2.277, 2.311, 2.361) \otimes \left( \frac{1}{40.638}, \frac{1}{38.565}, \frac{1}{36.513} \right) = (0.056, 0.0599, 0.0646)$$

O grau de possibilidade de  $S_i$  sobre  $S_j (i \neq j)$  foi determinado usando (8):

$$V(S_1 \geq S_2) = 0, \quad V(S_1 \geq S_3) = 1, \quad V(S_1 \geq S_4) = 1, \quad V(S_2 \geq S_1) = 1, \\ V(S_2 \geq S_3) = 1, \quad V(S_2 \geq S_4) = 1, \quad V(S_3 \geq S_1) = 0, \quad V(S_3 \geq S_2) = 0, \\ V(S_3 \geq S_4) = 0.8103, \quad V(S_4 \geq S_1) = 0, \quad V(S_4 \geq S_2) = 0, \quad V(S_4 \geq S_3) = 1$$

Utilizando (10), o grau mínimo de possibilidade foi estabelecido como:

$$d'(S_1 \text{ ou } C_1) = V(S_1 \geq S_2, S_3, S_4) = \min(0, 1, 1) = 0 \\ d'(S_2 \text{ ou } C_2) = V(S_2 \geq S_1, S_3, S_4) = \min(1, 1, 1) = 1 \\ d'(S_3 \text{ ou } C_3) = V(S_3 \geq S_1, S_2, S_4) = \min(0, 0, 0.8103) = 0 \\ d'(S_4 \text{ ou } C_4) = V(S_4 \geq S_1, S_2, S_3) = \min(0, 0, 1) = 0$$

Portanto, com (11) o vetor de peso foi dado como  $W' = (0, 1, 0, 0)$ . Após o processo de normalização, o vetor de peso em relação aos critérios de decisão  $S_1(C_1), S_2(C_2), S_3(C_3)$  e  $S_4(C_4)$  foi representado em (12) como  $W_o = (0, 1, 0, 0)^T$ .

Posteriormente, o mesmo procedimento descrito acima foi utilizado para avaliar os diferentes subcritérios com relação aos critérios, bem como para avaliar as alternativas de decisão em relação aos subcritérios.

Como exemplo, a Tabela IV apresenta a matriz de avaliação *fuzzy* dos subcritérios ( $Subc_1, Subc_2, Subc_3$ ) com relação ao critério  $C_1$ , bem como a matriz de avaliação *fuzzy* das alternativas ( $A_1, A_2, A_3$ ) em relação ao  $Subc_1$ . Os respectivos vetores de peso são calculados em  $W_{C_1}$  e  $W_{Subc_1}$ .

TABELA IV  
AVALIAÇÃO FUZZY: SUBCRITÉRIOS EM RELAÇÃO AO CRITÉRIO  $C_1$  E ALTERNATIVAS EM RELAÇÃO AO  $Subc_1$

$C_1$	$Subc_1$	$Subc_2$	$Subc_3$	$W_{C_1}$
$Subc_1$	(1, 1, 1)	(6, 7, 8)	(4, 5, 6)	0.799
$Subc_2$	(1/8, 1/7, 1/6)	(1, 1, 1)	(9, 9, 9)	0.2
$Subc_3$	(1/6, 1/5, 1/4)	(1/9, 1/9, 1/9)	(1, 1, 1)	0
$Subc_1$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$W_{Subc_1}$
$A_1$	(1, 1, 1)	(2, 3, 4)	(4, 5, 6)	0.536
$A_2$	(1/4, 1/3, 1/2)	(1, 1, 1)	(1/8, 1/7, 1/6)	0
$A_3$	(1/6, 1/5, 1/4)	(6, 7, 8)	(1, 1, 1)	0.463

Neste ponto, a partir dos valores obtidos, foi realizada a combinação sumária dos pesos de prioridade das alternativas de fornecedores em relação a cada critério. Para tanto, foram somados os pesos do fornecedor que foram multiplicados pelos pesos dos subcritérios correspondentes. A Tabela V exemplifica este procedimento em relação aos subcritérios ( $Subc_1, Subc_2, Subc_3$ ) do critério  $C_1$ . A mesma conduta foi realizada no cálculo dos pesos das alternativas em relação aos demais subcritérios ( $Subc_4, \dots, Subc_9$ ) dos critérios  $C_2, C_3$  e  $C_4$ .

TABELA V

COMBINAÇÃO DOS PESOS DE PRIORIDADE: SUBCRITÉRIOS DO CRITÉRIO  $C_1$ 

Pesos	$Subc_1$	$Subc_2$	$Subc_3$	Pesos de prioridade das alternativas
Alternativas	0.799	0.2	0	
$A_1$	0.536	0.135	1	0.4552
$A_2$	0	0.15	0	0.03
$A_3$	0.463	0.713	0	0.5125

Por fim, os pesos finais de prioridade de cada fornecedor foram calculados através da soma dos pesos do fornecedor multiplicados pelos pesos dos critérios correspondentes. A alternativa que obteve o maior peso prioritário foi definida como o melhor fornecedor para a empresa estudada. Os resultados deste procedimento são mostrados na Tabela VI.

TABELA VI

COMBINAÇÃO SUMÁRIA DE PONDERAÇÕES DE PRIORIDADE: CRITÉRIOS DO OBJETIVO GERAL

Pesos dos critérios	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	Pesos de prioridade das alternativas
Alternativas	0	1	0	0	
$A_1$	0.4552	0.848	1	0.135	0.848
$A_2$	0.03	0.151	0	0.15	0.151
$A_3$	0.5125	0	0	0.713	0

De acordo com a pontuação final, o fornecedor  $A_1$  foi o fornecedor preferencial, pois obteve o peso de prioridade mais alto, seguido pelo fornecedor alternativo  $A_2$ .

Todo o cálculo dos pesos de prioridade das alternativas de seleção do melhor fornecedor foi feito através de um sistema computacional, desenvolvido em linguagem Matlab, no software MATLAB R2019b. Esse sistema é composto por três módulos. Os módulos 1 e 2 representam códigos denominados como *functions*, e o módulo 3 corresponde ao programa principal. Os módulos 1 e 2 são acionados pelo módulo 3. A interação entre os três módulos do sistema fornece como saída principal a decisão multicritério mais adequada. Se essa saída atender apropriadamente o objetivo geral de decisão, o resultado é aprovado pelo(s) decisor(es) e/ou especialista(s); senão, a estrutura do problema de decisão e seus respectivos dados podem ser retificados para reprocessamento do sistema.

Em suma, o sistema desenvolvido automatizou todas as etapas de cálculo do método *Fuzzy AHP* de Chang [9]. Através do módulo 1 há a conversão das matrizes de comparação pareada do questionário e a aplicação do método *Fuzzy AHP*; os resultados do módulo 1 são ordenados hierarquicamente no módulo 2; o módulo 3 corresponde à interface de comunicação

usuário-sistema e é capaz de modelar a ‘hierarquia analítica estendida difusa’ de qualquer problema de seleção multicritério, independentemente do número de variáveis.

## V. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS EMPÍRICOS

A Fig. 2 mostra o resultado final da seleção do melhor fornecedor para a empresa estudada na interface do sistema computacional proposto. Nela, é possível constatar que o fornecedor  $A_1$  obteve o maior peso de prioridade (0.848), seguido pelo fornecedor  $A_2$  que atingiu o segundo maior peso de prioridade (0.151).

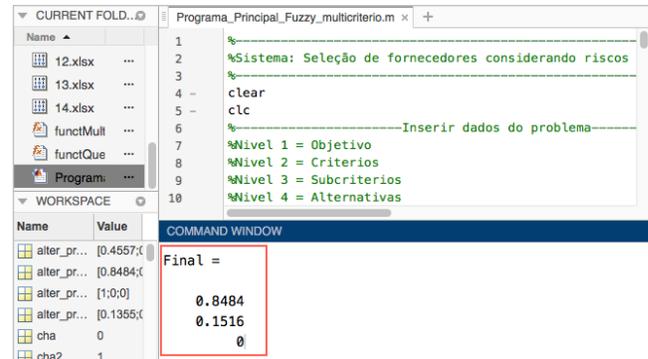


Fig. 2. Pesos finais de cada fornecedor no sistema computacional proposto.

Na análise detalhada dos resultados, constata-se que os pesos finais de prioridade dos diferentes critérios mostram que o ‘desempenho ( $C_2$ )’ do fornecedor teve a maior importância. Por se tratar de um suprimento crítico para a empresa abordada, qualquer falha do fornecedor, interrupção do fornecimento ou baixa confiabilidade dos produtos/serviços fornecidos podem afetar as operações industriais e o valor entregue ao cliente final. Fato que corrobora esta descoberta é o alto peso de prioridade do subcritério ‘baixa confiabilidade do fornecedor ( $Subc_5$ )’, pois o componente a ser fornecido deve atender rigorosamente às exigências intrínsecas à atividade de exploração e produção de petróleo e gás natural. Os subcritérios ‘preço alto do fornecedor ( $Subc_6$ )’ e ‘fornecimento único ( $Subc_9$ )’ também obtiveram elevados pesos de prioridade; o primeiro por aumentar os custos de produção e operação do comprador, e o segundo por aumentar a dependência com o fornecedor, diminuindo o poder de barganha do comprador.

Através da experiência empírica do caso real aqui apresentado, é possível hipotetizar que a abordagem computacional do método *Fuzzy AHP* proposta apresenta importantes oportunidades para a melhoria do processo de seleção multicritério de fornecedor considerando riscos, pois: i. busca racionalizar o processo de decisão, fornecendo insights úteis na escolha de fornecedores em ambiente de riscos; ii. tem a capacidade de modelar de forma flexível o processo de decisão, independentemente do número de variáveis que podem ser hierarquicamente estruturadas na avaliação e seleção de fornecedores; e, iii. contribui para agilidade na seleção de fornecedores ao automatizar julgamentos e percepções subjetivas de gestores especialistas (decisores).

Além disso, em termos gerenciais, é possível supor que o sistema desenvolvido poderá promover a diminuição de custos de aquisição de produtos e serviços, bem como melhorar a avaliação de riscos de fornecimento da empresa focal, contribuindo para a competitividade de toda a cadeia de suprimentos.

## VI. CONCLUSÕES

A literatura sobre a seleção de fornecedores tem atraído cada vez mais atenção, pois a medida que as cadeias de suprimentos se tornam globais e complexas os riscos de fornecimento aumentam significativamente. Neste artigo desenvolveu-se um sistema computacional baseado no 'Processo de Hierarquia Analítica Estendida Difusa' (*Fuzzy AHP*) para seleção de fornecedor considerando riscos. Especificamente, buscou-se avaliar o uso do método *Fuzzy AHP* na seleção de fornecedor e analisar o apoio do sistema proposto à seleção de fornecedor considerando riscos através do caso real de uma indústria brasileira de petróleo e gás natural.

Os principais critérios, subcritérios e alternativas para o problema de seleção de fornecedor foram identificados pelos gestores especialistas da empresa focal a partir da revisão de literatura. Como resultado disso, quatro critérios, nove subcritérios e três alternativas de potenciais fornecedores foram estruturados hierarquicamente; a comparação pareada desses quesitos foi feita pelos gestores especialistas por meio de um questionário com escala linguística qualitativa. Através da aplicação da abordagem computacional *Fuzzy AHP* desenvolvida, os pesos de prioridade de todos os quesitos avaliados foram calculados. Após a computação da pontuação final de cada alternativa de fornecimento, o fornecedor  $A_1$  foi definido como o preferencial, pois obteve o maior peso de prioridade (0.848), seguido pelo fornecedor  $A_2$ , com o segundo maior peso de prioridade (0.151).

A partir dos resultados empíricos do caso real abordado, constatou-se importantes oportunidades para a melhoria da seleção de fornecedor considerando riscos, tais como a racionalização do processo de decisão, a modelagem flexível das variáveis decisórias, além da automatização dos julgamentos e avaliações subjetivas dos decisores. Esses benefícios podem contribuir para a diminuição dos custos de aquisição e melhoria da avaliação geral de riscos de fornecimento, promovendo melhor desempenho competitivo da cadeia de suprimentos.

As principais limitações deste estudo são a impossibilidade de generalização dos resultados, pois a análise empírica baseia-se no estudo de caso de uma empresa brasileira de petróleo e gás natural, além de possíveis ruídos e distorções nas informações oriundas da percepção avaliativa dos gestores especialistas. Pesquisas futuras podem examinar um conjunto maior de empresas, incluindo vários escalões da cadeia de suprimentos, além de critérios relacionados à sustentabilidade. Por fim, a abordagem proposta pode ser comparada e/ou combinada com outras técnicas de *MCDM*.

O Fundo Monetário Internacional [53] prevê uma recessão

global de 4.9% em 2020 em razão da pandemia mundial provocada pela COVID-19. Essa é a maior queda econômica desde a Grande Depressão de 1929. Portanto, a sociedade tem a difícil tarefa de recuperar cadeias de suprimentos severamente colapsadas. Apesar das limitações expostas, acredita-se que este estudo contribua com a redução das vulnerabilidades das cadeias de valor, promovendo a melhor reflexão de pesquisadores e gerentes sobre os riscos de fornecimento.

## REFERÊNCIAS

- [1] J. Yoon, "Models for supplier selection and risk mitigation: a holistic approach", *International Journal of Production Research*, vol. 56, no. 10, pp. 3636-3661, Mar., 2018, DOI: 10.1080/00207543.2017.1403056
- [2] F. T. S. Chan, "Global supplier selection: a fuzzy-AHP approach", *Int. J. of Prod. Res.*, vol. 46, no. 14, pp. 3825-3857, Jun., 2008, DOI: 10.1080/00207540600787200
- [3] F. R. Lima Junior, L. Osiro, and L. C. R. Carpinetti, "Métodos de decisão multicritério para seleção de fornecedores: um panorama do estado da arte", *Gestão & Produção*, vol. 20, no. 4, pp.781-801, Nov., 2013, DOI: 10.1590/S0104-530X2013005000005
- [4] C. Kahraman, "Multi-criteria decision making methods and Fuzzy sets", in *Fuzzy multicriteria decision making: theory and applications with recent development*. 1st ed. Turkey: Springer US, 2008, ch. 1, pp. 1-18. [Online]. Available: <https://www.springer.com/gp/book/9780387768120>
- [5] T. L. Saaty, *The Analytic Hierarchy Process*. New York: McGraw-Hill, 1980
- [6] V. Yadav and M. K. Sharma, "Multi-criteria decision making for supplier selection using fuzzy AHP approach", *Benchmarking: An International Journal*, vol. 22, no. 6, pp. 1158-1174, Aug., 2018, DOI: 10.1108/BIJ-04-2014-0036
- [7] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets", *Information and Control*, vol. 8, no. 3, pp. 338-353, Jun., 1965, DOI: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X
- [8] E. Zapa and J. Cogollo, "Fuzzy-BSC Methodology for Decision Making in Indemnity Area of Insurance Companies", *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, no. 10, pp. 2539-2546, Oct., 2018, DOI: 10.1109/TLA.2018.8795133
- [9] D. Y. Chang, "Applications of the Extent Analysis Method on Fuzzy AHP", *Eur. J. of Operational Research*, vol. 95, no. 3, pp. 649-655, Dec., 1996, DOI: 10.1016/0377-2217(95)00300-2
- [10] F. Ahmed and K. Kilic, "Fuzzy Analytic Hierarchy Process: A performance analysis of various algorithms", *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 362, pp. 110-128, May, 2019, DOI: 10.1016/j.fss.2018.08.009
- [11] Y. Sheffi, "Supply chain management under the threat of international terrorism", *Int. J. of Logistics Management*, vol. 12, no. 2, pp. 1-11, Jul, 2001, DOI: 10.1108/09574090110806262
- [12] U. Jüttner, H. Peck, and M. Christopher, "Supply chain risk management: outlining an agenda for future research", *Int. J. of Logistics Res. and Applications*, vol. 6, no. 4, pp. 197-210, 2003, DOI: 10.1080/13675560310001627016
- [13] K. E. Stecke and S. Kumar, "Sources of Supply Chain Disruptions, Factors That Breed Vulnerability, and Mitigating Strategies", *J. of Marketing Channels*, vol. 16, no. 3, pp. 193-226, Jun., 2009, DOI: 10.1080/10466690902932551
- [14] B. Fahimnia, "Quantitative models for managing supply chain risks: A review", *Eur. J. of Operational Research*, vol. 247, no. 1, pp. 1-15, Nov., 2015, DOI: 10.1016/j.ejor.2015.04.034
- [15] C. S. Tang, "Perspectives in supply chain risk management", *Int. J. of Production Economics*, vol. 103, no. 2, pp. 451-488, Oct., 2006, DOI: 10.1016/j.ijpe.2005.12.006
- [16] H. Peck, "Reconciling supply chain vulnerability, risk and supply chain management", *Int. J. of Logistics Research and Applications*, vol. 9, no. 2, pp. 127-142, 2006, DOI: 10.1080/13675560600673578
- [17] M. N. Faisal, D. K. Banwet, and R. Shankar, "Quantification of risk mitigation environment of supply chains using graph theory and matrix methods", *Eur. J. Industrial Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 22-39, Mar., 2007, DOI: 10.1504/EJIE.2007.012652

- [18] S. Wagner and C. Bode, "An empirical examination of supply chain performance along several dimensions of risk", *J. of Business Logistics*, vol. 29, no. 1, pp. 307, 2008, DOI: 10.1002/j.2158-1592.2008.tb00081.x
- [19] W. Ho., "Supply chain risk management: A literature review", *Int. J. of Production Research*, vol. 53, no. 16, pp. 5031-5069, Apr., 2015, DOI: 10.1080/00207543.2015.1030467
- [20] F. Aqlan and S. S. Lam, "Supply chain optimization under risk and uncertainty: A case study for high-end server manufacturing", *Comput. and Ind. Engineering*, vol. 93, pp. 78-87, Mar., 2016, DOI: 10.1016/j.cie.2015.12.025
- [21] N. Bugert and R. Lasch, "Supply chain disruption models: A critical review", *Logistics Research*, vol. 11, no. 5, pp. 1-35, 2018, DOI: 10.23773/2018\_5
- [22] Y. Fan and M. Stevenson, "A review of supply chain risk management: Definition, theory, and research agenda", *Int. J. of Phys. Distr. & Logist. Management*, vol. 48, no. 3, pp. 205-230, Apr., 2018, DOI: 10.1108/IJPDLM-01-2017-0043
- [23] J. B. Oliveira, "The role of simulation and optimization methods in supply chain risk management: Performance and review standpoints", *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 92, pp. 17-44. Apr., 2019, DOI: 10.1016/j.simpat.2018.11.007
- [24] L. R. Smeltzer and S. P. Siferd, "Proactive Supply Management: The Management of Risk", *Int. J. of Purch. and Mat. Management*, vol. 34, no. 4, pp. 38-45, 1998. DOI: 10.1111/j.1745-493X.1998.tb00040.x
- [25] B. Tomlin, "On the Value of Mitigation and Contingency Strategies for Managing Supply Chain Disruption Risks". *Management Science*, vol. 52, no. 5, pp. 639-657, May, 2006, DOI: 10.1287/mnsc.1060.0515
- [26] S. Chopra, G. Reinhardt, and U. Mohan, "The Importance of Decoupling Recurrent and Disruption Risks in a Supply Chain". *Naval Research Logistics*, vol. 54, no. 5, pp. 544-555, Mar., 2007. DOI: 10.1002/nav.20228
- [27] S. Talluri, and R. Narasimhan, "Vendor Evaluation with Performance Variability: A Max-Min Approach", *Eur. J. of Operational Research*, vol. 146, no. 3, pp. 543-552, May, 2003, DOI: 10.1016/S0377-2217(02)00230-8
- [28] S. Talluri, R. Narasimhan, and A. Nair. "Vendor Performance with Supply Risk: A Chance-constrained DEA Approach", *Int. J. of Production Economics*, vol. 100, no. 2, pp. 212-222, Apr., 2006, DOI: 10.1016/j.ijpe.2005.01.005
- [29] C. Fang, X. Liao, and M. Xie, "A Hybrid Risks-informed Approach for the Selection of Supplier Portfolio", *Int. J. of Production Research*, vol. 54, no. 7, pp. 2019-2034, 2016, DOI: 10.1080/00207543.2015.1076947
- [30] M. Er Kara and S.Ü.O. Firat, "Supplier Risk Assessment Based on Best-Worst Method and K-Means Clustering: A Case Study", *Sustainability*, Apr., 2018, vol. 10, 1066, DOI: 10.3390/su10041066
- [31] G. J. L. Micheli, E. Cagno, and M. Zorzini, "Supply risk management vs supplier selection to manage the supply risk in the EPC supply chain", *Management Research News*, vol. 31, no. 11, pp. 846-866, Sep., 2008, DOI: 10.1108/01409170810913042
- [32] M. Kumar, P. Vrat, and R. Shankar, "A Fuzzy Programming Approach for Vendor Selection Problem in a Supply Chain". *Int. J. of Production Economics*, vol. 101, no. 2, pp. 273-285, Jun., 2006, DOI: 10.1016/j.ijpe.2005.01.005
- [33] N. Viswanadham and A. Samvedi, "Supplier Selection Based on Supply Chain Ecosystem, Performance and Risk Criteria", *Int. J. of Production Research*, vol. 51, no. 21, pp. 6484-6498, Mar., 2013, DOI: 10.1080/00207543.2013.825056
- [34] T. J. Kull and S. Talluri, "A Supply Risk Reduction Model Using Integrated Multicriteria Decision Making", *IEEE Transactions on Engineering Management*, vol. 55, no. 3, pp. 409-419, Jun., 2008, DOI: 10.1109/TEM.2008.922627
- [35] A. R. Ravindran, "Risk Adjusted Multicriteria Supplier Selection Models with Applications", *Int. J. of Production Research*, vol. 48, no. 2, pp. 405-424, 2010, DOI: 10.1080/00207540903174940
- [36] A. J. Ruiz-Torres, F. Mahmoodi, and A. Z. Zeng. "Supplier Selection Model with Contingency Planning for Supplier Failures", *Computers & Ind. Engineering*, vol. 66, no. 2, pp. 374-382, Oct., 2013, DOI: 10.1016/j.cie.2013.06.021
- [37] A. Chaudhuri, B. K. Mohanty, and K. N. Singh, "Supply Chain Risk Assessment during New Product Development: A Group Decision Making Approach Using Numeric and Linguistic Data", *Int. J. of Production Research*, vol. 51, no. 10, pp. 2790-2804, 2013, DOI: 10.1080/00207543.2012.654922
- [38] A. H. I. Lee, "A fuzzy supplier selection model with the consideration of benefits, opportunities, costs and risks", *Expert Systems with Applications*, vol. 36, no. 2, pp. 2879-2893, Mar., 2009, DOI: 10.1016/j.eswa.2008.01.045
- [39] D. D. Wu and D. Olson, "Enterprise Risk Management: A DEA VaR Approach in [40] P. Meena, S. Sarmah, and A. Sarkar, "Sourcing Decisions Under Risks of Catastrophic Event Disruptions", *Transp. Research Part E: Log. and Transportation Review*, vol. 47, no. 6, pp. 1058-1074, Nov., 2011, DOI: 10.1016/j.tre.2011.03.003
- [40] D. D. Wu and D. Olson, "Enterprise Risk Management: A DEA VaR Approach", *Int. J. of Production Research*, vol. 48, no. 16, pp. 4919-4932, 2010, DOI: 10.1080/00207540903051684
- [41] T. Sawik, "Joint Supplier Selection and Scheduling of Customer Orders under Disruption Risks: Single vs. Dual Sourcing", *Omega*, vol. 43, pp. 83-95, Mar., 2014, DOI: 10.1016/j.omega.2013.06.007
- [42] Z. Wu, T. Y. Choi, and M. J. Rungtusanatham, "Supplier-supplier Relationships in Buyer-supplier-supplier Triads: Implications for Supplier Performance", *Journal of Operations Management*, vol. 28, no. 2, pp. 115-123, Mar., 2010, DOI: 10.1016/j.jom.2009.09.002
- [43] P.-S. Chen and M.-T. Wu, "A Modified Failure Mode and Effects Analysis Method for Supplier Selection Problems in the Supply Chain Risk Environment: A Case Study", *Computers & Ind. Engineering*, vol. 66, no. 4, pp. 634-642, Dec., 2013, DOI: 10.1016/j.cie.2013.09.018
- [44] S. Jharkharia and R. Shankar, "Selection of logistics service provider: An analytic network process ANP approach", *Omega-Int. J. Management*, vol. 35, no. 3, pp. 274-289, Jun., 2007, DOI: 10.1016/j.omega.2005.06.005
- [45] C. Rao, "Compound Mechanism Design of Supplier Selection Based on Multi-attribute Auction and Risk Management of Supply Chain", *Computers & Ind. Engineering*, vol. 105, pp. 63-75, Mar., 2017, DOI: 10.1016/j.cie.2016.12.042
- [46] A. Lockamy III and K. McCormack, "Analysing Risks in Supply Networks to Facilitate Outsourcing Decisions", *Int. J. of Production Research*, vol. 48, no. 2, pp. 593-611, 2010, DOI: 10.1080/00207540903175152
- [47] K. S. Moghaddam, "Supplier Selection and Order Allocation in Closed-loop Supply Chain Systems Using Hybrid Monte Carlo Simulation and Goal Programming", *Int. J. of Production Research*, vol. 53, no. 20, pp. 6320-6338, Jun., 2015, DOI: 10.1080/00207543.2015.1054452
- [48] N. Jain and A. R. Singh, "Sustainable supplier selection under must-be criteria through Fuzzy inference system", *J. of Cleaner Production*, vol. 248, 119275, Mar. 2020, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119275
- [49] M. Yazdani, "A risk-based integrated decision-making model for green supplier selection: A case study of a construction company in Spain", *Kybernetes*, vol. 49, no. 4, pp. 1229-1252, May, 2019, DOI: 10.1108/K-09-2018-0509
- [50] K. Zimme, "Assessing social risks of global supply chains: A quantitative analytical approach and its application to supplier selection in the German automotive industry", *J. of Cleaner Production*, vol. 149, pp. 96-109, Apr., 2017, DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.02.041.
- [51] T. L. Cerqueira, F. C. Bertoni, and M. G. Pires, "Instance Genetic Selection for Fuzzy Rule-based Systems Optimization to Opinion Classification", *IEEE Latin America Transactions*, vol. 18, no. 7, pp. 1215-1221, Jul., 2020, DOI: 10.1109/TLA.2020.9099762
- [52] T. Saaty, "The analytic hierarchy and analytic network measurement processes: Applications to decisions under Risk", *Eur. J. of Pure App. Math.*, vol. 1, no. 1, pp. 122-196, 2008, [Online]. Available: <https://www.ejpam.com/index.php/ejpam/article/view/6>
- [53] IMF. "World Econ. Outl. Upd. June 2020". Washington, USA. [Online] Available: <https://www.imf.org/en/Publications/WEO/Issues/2020/06/24/WEOUpdJune2020>



**Marcus Vinicius Carvalho Fagundes** holds a PhD in Industrial Engineering (2021) and is a professor at the State University of Southwest Bahia, Brazil. He has experience in the areas of production management, operations engineering, and information systems. He researches supply chain risk management,

multicriteria decision-making models, artificial intelligence, and energy systems.



**Átila Cheles Keler** is a Master's degree student in Physics at the State University of Southwest Bahia, Brazil. He holds degrees in Production Engineering (2017), Physics (2019), and Computer Engineering (2020). He has experience in the areas of systems engineering and artificial intelligence.



**Eduardo Oliveira Teles** holds a PhD in Industrial Engineering (2016) and is a professor at the Federal Institute of Bahia, Brazil. He has experience in innovation, decision modeling, and assistive technologies. He is a professor of the Master in Intellectual Property and Technology Transfer for Innovation

(IFBA).



**Silvio Alexandre B. Vieira de Melo** holds a PhD in Chemical Engineering (1997) and is a professor at the Federal University of Bahia, Brazil. He has experience in the areas of chemical engineering, reliability engineering, and risk analysis. He is a professor of the Graduate Program in Industrial Engineering and of the Doctorate in

Energy and Environment (UFBA).



**Francisco Gaudêncio Mendonça Freires** holds a PhD in Industrial Engineering and Management (2007) and is a professor at the Federal University of Bahia, Brazil. He has experience in the areas of production engineering, operations management, and logistics. He is a professor at the Graduate Program in

Industrial Engineering (UFBA).