Uma contribuição do método ELECTRE TRI à obtenção da classificação de riscos industriais

Helder Gomes Costa †
Hélvio Pessanha Guimarães Santafé Júnior ‡
Assed Naked Haddad ††

† Universidade Federal Fluminense
Brasil
hgc@vm.uff.br
http://www.professores.uff.br/helder

‡ Universidade Estadual do Norte Fluminense
Brasil
santafe@uenf.br

†† Universidade Federal do Rio de Janeiro
Brasil
assed@civil.ufrj.br

Abstract

Risk classification is a relevant problem in industrial context. The complexity of this problem is magnified when statistical databases are not accessible. This work proposes an original approach to classify industrial risks, which is based on integration between a Risk Management tool (Risk Classification Matrix) and a Multiple Criteria Decision Aid method (ELECTRE TRI). In addition, this work presents a sample application of the proposed methodology. The results highlight the viability of the proposal, especially in situations where historical operational data are not accessible.

Resumo

A classificação de riscos é um problema reevante no contexto industrial, cuja complexidade é amplificada quando dados estatísticos não estão disponívieis. Este artigo propõe uma abordagem inédita para a classificação de Riscos Industriais, a qual é fundamentada na integração de uma ferramenta de Gerenciamento de Riscos (Matriz de Classificação de Riscos) a um método de Auxílio Multicritério à Decisão (Método ELECTRE TRI). Apresenta-se também uma aplicação da proposta, cujos resultados indicam a viabilidade de aplicação da presente proposta, especialmente em situação onde dados históricos não estão acessíveis.

Keywords: ELECTRE, Multicriteria, Risk, MCDM, MCDA

Title: CONTRIBUTION OF ELECTRE TRI INDUSTRIAL RISK CLASSIFICATION.

Apdio © *2007 Associação Portuguesa de Investigação Operacional*

1 Introdução

Ao longo da História da Humanidade, ocorreram grandes desastres. Em particular, nas últimas décadas eventos catastróficos introduziram novos nomes no vocabulário mundial: Bhopal (vazamento químico ocorrido na ÌNDIA em 1984), Challenger (explosão da nave espacial nos EUA em 1986); Kobe (terremoto ocorrido no JAPÃO em 1995); World Trade Center (destruição das "Torres Gêmeas" nos EUA, 2001); a explosão da nave espacial Columbia (2003); e, os "tsunami" ocorridos na Ásia (2004). A palavra risco associa a incerteza relacionada à ocorrência de um evento às conseqüências oriundas desta ocorrência. Conforme reportado em Tsé (2001) e Aleshin (2001), dentre os problemas presentes no contexto da Análise dos Riscos, destaca-se o problema da classificação do risco. Neste tipo de problema, classifica-se o risco associado a um evento genérico em classes distintas. A Figura 1 ilustra um problema desta natureza: classificar o risco associado a um evento X em uma dentre *n* classes distintas.

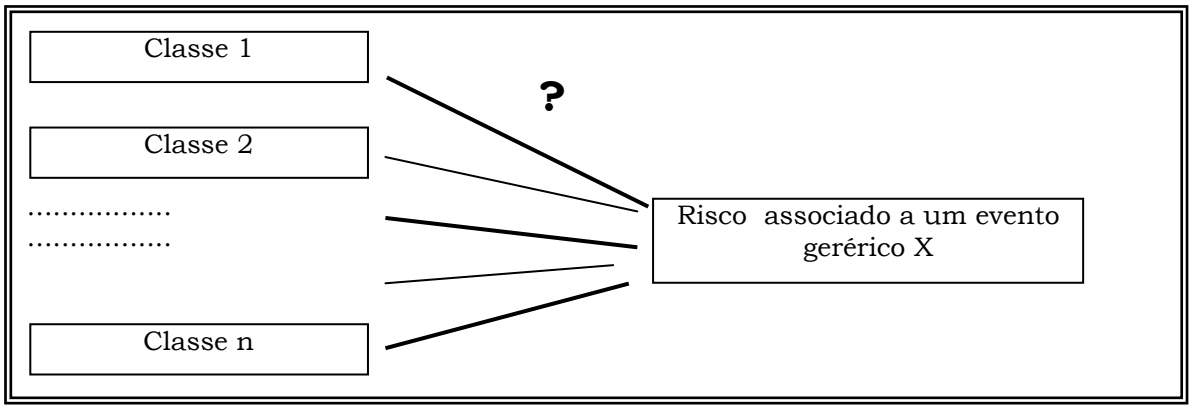


Figura 1: Classificação do risco

Este problema envolve múltiplos critérios e, em alguns casos, avaliações subjetivas - em especial quando não se conhece a estatística de ocorrência do evento. Objetivando contribuir a resolução desse tipo de problema, pesquisas têm sido desenvolvidas buscando a integração de conceitos do Auxílio Multicritério à Decisão (AMD) à avaliação de riscos. Alguns trabalhos neste contexto são citados a seguir.

No âmbito dos riscos financeiros, destacam-se os seguintes trabalhos:

- Siskos e Zopounidis (1986) propõem a aplicação da análise multicritério na avaliação de riscos de falência bancária. Na mesma linha de investigação seguiram as pesquisas reportadas em Kosmidou, Pasiouras et al. (2006), Pendaraki, Zopounidis et al. (2005), Zopounidis (1987), Zopounidis (1999), Zopounidis e Dimitras (1998), Zopounidis e Doumpos (1999), Zopounidis e Doumpos (2001). Esses trabalhos constituem um excelente referencial no âmbito da integração da abordagem de superação da análise multicritério à classificação de riscos de investimentos, especialmente por considerarem: uma ampla gama de métodos multicritério, como o UTA, o PROMETHÉE e o ELECTRE TRI; e diferentes mercados financeiros – francês, inglês e grego.
- Gupta, Chevalie et al. (2009) buscam classificar o risco associado a investimentos em empresas de alta tecnologia situadas nos EUA. A abordagem multicritério consiste em uma combinação linear aditiva (soma ponderada) de fatores de risco para a obtenção de um score global do risco;
- Cook e Hebner (1993) avaliam o risco financeiro associado a empresas japonesas. Ainda no âmbito da classificação de riscos financeiros, Mareschal e Brans (1991)

apresenta o BANKADVISER, um sistema computacional que permite a avaliação de riscos de negócios. Este sistema se baseia nos fundamentos do método PROMETHÉE.

No contexto dos riscos ambientais, as seguintes abordagens foram identificadas:

- Chen, Blonga et al. (1999) apresentam uma ferramenta computacional (MCE-RISK) que incorpora conceitos de AMD e Sistemas de Informações Geográficas (SIG) para avaliação de riscos ambientais. Essa proposta considera a escala de Saaty (1980) e incorpora conceitos da teoria dos conjuntos nebulosos.
- Giupponi, Eiselt et al. (1999) desenvolvem uma modelagem fundamentada no AMD para desenvolver mapas de risco para poluição agrícola oriunda de sistemas alternativos de cultivo adotados na região da Laguna de Veneza (Itália). Foram avaliados os riscos associados a duas alternativas de produção agrícola, definidas com base na política de produção agrícola apresentada pela Comunidade Européia.

No âmbito dos riscos industriais (associados à falhas em plantas ou equipamentos industriais), identificou-se um número reduzido de publicações que consideram o AMD. Na pesquisa bibliográfica realizada na presente pesquisa, as seguintes abordagens foram identificadas:

- Opperhuizen e Hutzinger (1982) é o marco mais antigo encontrado de alguma tentativa de aplicação da aplicação da análise multicritério à avaliação do perigo e do risco no manuseio de produtos químicos. Esse trabalho fundamenta-se no emprego do método ELECTRE I.
- Santafé Jr, Costa et al. (1998) investiga a integração e técnicas de AMD à classificação de riscos de falhas em equipamentos. Mais especificamente este trabalho investiga a integração do Método ELECTRE III à matriz de classificação de riscos e APR. Esse trabalho se desdobrou posteriormente na dissertação de Santafé Jr (1999).
- Lima (2000) investiga a aplicação do AMD à classificação de riscos de setores industriais, estudando a aplicação do método ELECTRE III à matriz de classificação de riscos e introduzindo a simulação de Monte Carlo na definição dos pesos dos critérios.
- Pires, Almeida et al. (2004) reporta a aplicação do método ELECTRE I à análise de risco de incêndio, e ultiza o AMD para investigar os efeitos sobre o ambiente de substâncias tóxicas emitidas por combustíveis para atmosfera.

1.1 Justificativa

Apesar dos avanços reportados nestes textos, existem questões ainda não respondidas quanto à integração da análise multicritério à classificação de riscos – especialmente no contexto de riscos industriais.

1.2 Objetivo

O presente trabalho investigações integração da análise multicritério à classificação de riscos industriais em situações onde dados estatísticos não estão presentes.

1.3 Resumo da abordagem proposta

A Figura 2 apresenta um quadro comparativo entre o problema em questão (classificação de Riscos) e os problemas de decisão abordados pelo método ELECTRE TRI. Essa analogia

é adaptada de Freitas e Costa (1998), que investiga a integração do AMD qualidade de serviços.

A abordagem proposta fundamenta-se na aplicação integrada de um método de Análise de Riscos e um método de AMD ou MCDA (Multicriteria Decision Aid). Como método de Análise de Riscos, adota-se a Matriz de Classificação de Riscos (MCR); e, como Método de AMD, adota-se o método ELECTRE TRI.

	ELECTRE TRI	Riscos
Objetivo	Classificação de alternativas	Classificação de eventos
Tipos de variáveis	Subjetivas	Subjetivas
Elementos que julga	Especialista	Especialistas

Figura 2: ELECTRE TRI .vs. RISCOS.

Mais especificamente, o presente trabalho está estruturado na realização das seguintes etapas:

- Classificação da severidade associada à ocorrência de um evento genérico. Obtida pelo emprego da Análise Preliminar de Riscos (APR).
- Classificação da possibilidade de ocorrência deste evento genérico. Obtida pelo emprego da análise Multicritério (Método ELECTRE TRI).
- Emprego da Matriz de Classificação de Riscos (MCR) para a combinação destas duas classificações preliminares e obtenção da classificação final do risco.

2 - Sobre a matriz de classificação dos riscos (MCR)

A MCR classifica o risco associado a um evento, combinando a classificação da probabilidade de ocorrência do mesmo à classificação da sua severidade. Segundo Hse (1997), nessa técnica estabelecem-se duas classificações preliminares (quanto à probabilidade; e, quanto à severidade), as quais são combinadas em uma classificação final.

2.1 Classificação do evento quanto à probabilidade

A Tabela 1 apresenta a classificação da possibilidade de ocorrência de um evento em um dos seguintes quatro níveis de probabilidade: Alta; Média; Baixa; e, Improvável. Essa classificação é oriunda dos estudos de oriunda de Hse (1997) sobre a técnica denominada por Análise Preliminar de Riscos (APR).

Tabela 1: Classificação do evento quanto à probabilidade de ocorrência.

Classificação	Probabilidade
A	Alta Probabilidade
B	Média probabilidade
C	Baixa probabilidade
D	Improvável

2.2 Classificação do evento quanto a Severidade

A Tabela 2, também oriunda de Hse (1997), apresenta a classificação da gravidade das conseqüências associadas à ocorrência de um evento em uma das seguintes classes: Catastrófica; Crítica; Marginal; e, Desprezível.

Tabela 2: Classificação da severidade da à ocorrência de um evento.

Categoria	Nome	Características
I	Catastrófica	- Mortes ou lesões incapacitantes. Perda total de instalações e equipamentos.
II	Crítica	- Lesões severas ou incapacitantes com possibilidade de agravamento. - Danos severos a instalações e equipamentos
III	Marginal	- Lesões moderadas. - Danos moderados a instalações equipamentos.
IV	Desprezível	- Ausência de lesões, podendo ser necessários primeiros socorros ou tratamento médico menor. - Sem danos ou danos não significativos às instalações e equipamentos.

2.3 Classificação final do risco associado a um evento

As classificações preliminares, referentes as classes da severidade e da probabilidade, são combinadas na Matriz de Classificação de Riscos, obtendo-se a classificação final do risco associado ao evento. A Figura 3, oriunda de Hse (1997) ilustra a MCR e as classes de risco, ao passo que a Tabela 3, apresenta uma descrição verbal dessas classes

Classes de Severidade	Classes de "Probabilidade"			
	A	B	C	D
I	Classe 1	Classe 1	Classe 2	Classe 3
II	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
III	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5
IV	Classe 3	Classe 4	Classe 5	Classe 5

Figura 3: Matriz de Classificação dos Riscos. Adaptada de Hse (1997)

3 – Auxílio multicritério à decisão e o método ELECTRE TRI

Conforme reportado em Saaty (1980), Changkong (1983), Roy e Boyssou (1985) e Zeleny (1982), a tomada de decisão em um ambiente complexo envolve a consideração de múltiplos critérios. Segundo Vincke (1992), os métodos de AMD podem ser classificados como pertencentes a uma das seguintes famílias: Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT); Métodos Interativos; e, Métodos de Subordinação.

Tabela 3: Descrição da classe do Risco

Classificação	Descrição da importância do risco
Classe 1	Risco Crítico
Classe 2	Risco Sério
Classe 3	Risco Moderado
Classe 4	Risco Menor
Classe 5	Risco Desprezível

No âmbito dos Métodos de Subordinação, dado conjunto finito de alternativas/ações (A), valoradas sobre uma família/vetor de critérios (F), são construídas relações de subordinação entre as alternativas, a partir das valorações estabelecidas pelo decisor. A construção destas relações de baseia em uma lógica não compensatória.

Buscando apresentar uma ilustração didática deste conceito, Costa (2004b) apresenta a seguinte reflexão:

"Para se estabelecer bem a diferença entre o emprego da média ponderada e dos métodos de superação, pode-se tomar uma analogia com o que acontece em uma partida de voleibol no confronto entre os times A e B.

Se no primeiro "set" B ganha de A por 25 a 0; porém, nos demais três "sets" A ganha de B por 25 a 20. Pode-se fazes duas análises:

- Usar um método aditivo, como a soma de pontos, a média ponderada para obter o resultado final. Nesse caso B seria o vencedor da partida por 85 a 75.
- Usar o número de "sets" ganhos, para definir o vencedor. Nesse caso A seria o vencedor por 3 a 1.

O princípio fundamental dos métodos de superação pode ser considerado semelhante a esta segunda abordagem, se considerarmos que cada "set" equivale a cada um dos critérios da análise multicritério." (Costa (2004b))

A mais conhecida família de métodos multicritério de superação ou subordinação é a família ELECTRE. Estes métodos têm origem no trabalho pioneiro de ROY (1968). Atualmente, a família ELECTRE é composta pelos seguintes métodos: ELECTRE (ROY (1968)), ELECTRE II (ROY e BERTIER (1971)), ELECTRE III (ROY (1978)), ELECTRE IV (ROY e HUGONNARD (1981)), ELECTRE IS (ROY e M. (1985)) e ELECTRE TRI (MOUSSEAU et al. (1999) e YU (1992). A seguir apresenta-se um breve resumo a respeito de cada um destes métodos:

- **Métodos ELECTRE I e IS.** Particionam o conjunto de alternativas em dois subconjuntos: alternativas não dominadas; e, alternativas dominadas. O método ELECTRE I usa o conceito de critério verdadeiro, segundo o qual há uma concordância plena (em um critério genérico j) de que uma alternativa a é pelo menos tão boa quanto uma outra alternativa b se o desempenho de b for inferior ao de a (mesmo que apenas infinitesimalmente inferior). O ELECTRE IS usa o conceito de pseudo-critério, segundo o qual há uma concordância plena (em um critério genérico j) de que uma alternativa a é pelo menos tão boa quanto uma outra alternativa b mesmo que o desempenho de a seja um pouco menor (dentro de um limite aceitável q) do que o de b. Ou seja: o pseudo-critério considera a possibilidade de hesitação ou incerteza de uma avaliador afirmar que uma alternativa é, de fato, pelo menos tão boa quanto uma outra.
- **Métodos ELECTRE II, III e IV.** Ordenam as alternativas presentes no conjunto de alternativas viáveis. O método ELECTRE II usa o conceito de critério verdadeiro

para estabelecer as relações de subordinação, porém usa uma estrutura de relaxamento para obter a ordenação das alternativas. Nesta estrutura de relaxamento considera-se a construção de dois grafos: Grafo forte; e, Grafo Fraco. Os métodos ELECTRE III e IV utilizam o conceito de pseudo-critério para estabelecer uma relação de credibilidade, a partir do qual ordenam as alternativas através de um processo de "destilação". O método ELECTRE IV é utilizado em problemas de ordenação quando não se pode (ou não se deseja) atribuir pesos aos critérios.

- **Métodos ELECTRE TRI.** O método ELECTRE TRI busca resolver problemas de classificação ordenada. Neste tipo de problema busca-se classificar alternativas presentes no conjunto de alternativas viáveis em classes que mantém uma relação de preferência entre si. Este método usa o conceito de pseudo-critério para estabelecer as relações de subordinação.

Observa-se que cada um dos métodos ELECTRE tem uma finalidade distinta. Portanto, a escolha do método depende do tipo de problema. No presente trabalho, por se tratar da classificação do risco em classes ordenadas, optou-se pela modelagem com o ELECTRE TRI. A seguir apresenta-se uma breve descrição desse método.

3.1 Princípios do ELECTRE TRI

O Método ELECTRE TRI caracteriza-se por tratar de problemas específicos de classificação ordenada. Ou seja: dado um conjunto de **A** de alternativas, associa-las a um conjunto de classes ordenadas **C** = $[C_1, C_2, \ldots\ldots C_n]$.

Isso é feito considerando o desempenho de **A** à luz de um conjunto de critérios **F**=$[g_1, g_2, ..., g_m]$. A Figura 4, adaptada de Mousseau, Slowinski et al. (2000) ilustra um conjunto formado por *p+1* classes, delimitadas por *p* limites de classes. Uma classe genérica C_h é delimitada por um limite inferior b_h e um limite superior b_{h-1}.

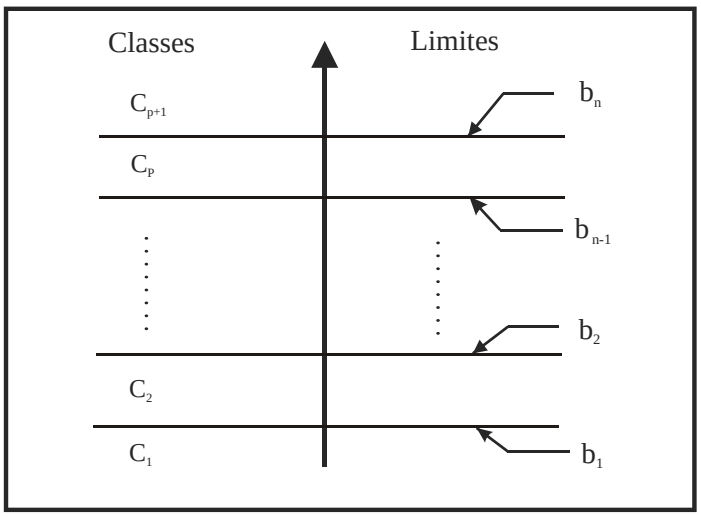


Figura 4: Classes de equivalência no ELECTRE TRI.

Segundo Yu (1992) e Mousseau et al. (2000), esse método integra funções que dão suporte ao decisor no processo de preferência e reduzem o esforço cognitivo requerido na fase de modelagem.

3.2 Relação de subordinação no ELECTRE TRI

A relação de subordinação é construída para tornar possível a comparação de uma alternativa a com um limite padrão b_h. A afirmação de que $aSbh$, significa que "a não tem um desempenho pior do que o limite b_h".

Na validação da afirmação aSb_h devem-se verificar duas condições:

- Concordância: para que aSb_h (ou b_hSa) seja aceita, uma maioria suficiente de critérios deve ser a favor desta afirmação.
- Não-discordância: quando na condição de concordância esperada, nenhum dos critérios na minoria deve se opor à afirmação aSb_h (ou b_hSa).

Os seguintes passos são seguidos na obtenção da relação de subordinação:

- Computar o índice de concordância parcial $c_j(a, b_h)$ e $c_j(b_h, a)$,
- Computar o índice de concordância global c(a, b_h),
- Computar o índice de discordância parcial $d_j(a, b_h)$ e $d_j(b_h, a)$,
- Computar a relação de subordinação fuzzy conforme o índice de credibilidade $\sigma(a, b_h)$,
- Determinar um plano de corte λ , referente a relação fuzzy para obter uma relação de subordinação. Isto é: se $\sigma(a,b_h) \geq \lambda$ => aSb_h.

O grau de credibilidade da relação de subordinação $\sigma(a, b_h)$ expressa com que intensidade se pode "acreditar" que "a subordina b_h" de acordo com o índice de concordância global $c_j(a, b_h)$ e com o índice de discordância $d_j(a, b_h)$.

A relação de subordinação *fuzzy* S é obtida com base em um nível de corte λ. Esse nível é considerado como o menor valor do índice de credibilidade compatível com a afirmação de que "a subordina b_h". Isto é: aSb_h se e somente se $\sigma(a, b_h) \geq \lambda$.

3.3 Procedimentos de classificação

O ELECTRE TRI classifica as alternativas seguindo dois passos consecutivos: construção de uma relação de subordinação S, que caracteriza como as alternativas são comparadas aos limites das classes; e, exploração (através de procedimentos de classificação) da relação S.

A regra do procedimento de exploração é realizada para analisar o modo em que uma alternativa a é comparada com os limites padrão determinados para a classe na qual a deve ser enquadrada. Dois procedimentos de classificação são avaliados.

O procedimento de classificação descendente é descrito a seguir:

- Compare a sucessivamente com b_i, *para* $i = p, p - 1, ..., 1$.
- Encontre um b_h que seja o primeiro limite tal que aSb_h
- Classifique a na classe C_{h+1}. Ou seja: na Classe limitada inferiormente pelo limite b_h).

O procedimento de classificação ascendente é descrito a seguir:

- Compare a sucessivamente com b_i, $i=1, 2, ..., p$.
- Encontre o primeiro bh para o qual $b_h > a$
- Classifique a na classe limitada superiormente por este limite. Ou seja: classifique a na classe C_h.

Sendo estes dois procedimentos diferentes, conseqüentemente, pode ocorrer a classificação de algumas alternativas em diferentes classes, pois: o procedimento otimista tende a classificar as alternativas em classes mais altas; o procedimento descendente tende a classificar as alternativas nas categorias mais baixas; e, o procedimento ascendente tende a classificar as alternativas nas categorias mais elevadas.

No caso do ELECTRE TRI, uma divergência entre estas classificações indica uma incapacidade do sistema em comparar a alternativa a algum dos perfis das classes de equivalência utilizadas.

Tradicionalmente, considera-se que essa incapacidade pode ser causada tanto por incoerência do avaliador, quanto do modelo de classificação (incluindo o conjunto de critérios) ou pelo sistema de coleta de dados. Costa (2004b) propõe que a divergência das classificações é comum em situações em que haja critérios conflitantes (por exemplo: custo e qualidade), sendo neste caso inerente ao problema e não devendo ser considerada com o uma falha na modelagem.

Assim quando ocorre divergência entre as classificações pessimista e otimista, o classificador deve adotar uma das duas classificações de acordo com o seu perfil: (mais exigente ou menos exigente).

4 - APLICAÇÃO DA AORDAGEM PROPOSTA

Objetivando identificar as dificuldades encontradas na aplicação da metodologia aqui proposta, foi realizada uma aplicação da mesma a identificação dos riscos industriais em um equipamento de uma usina sucro-alcooleira da Região Norte Fluminense do Estado do Rio de Janeiro, Brasil. Nesta seção, descrevem-se aspectos relevantes da modelagem.

4.1 Caracterização do objeto de estudo.

O objeto de estudo é uma caldeira aqua-tubular, funcionando em uma usina produtora de açúcar e álcool, situada na região Norte Fluminense do Estado do Rio de Janeiro, Brasil. Esse equipamento possui as seguintes características:

- Marca: Zanini.
- Modelo: AZ – 365.
- Dimensões: altura = 15,5 m; comprimento = 20,5 m; largura = 13,1 m.
- Ano de fabricação: 1984.
- Produção de vapor: 65.000kg/h.
- Máxima pressão de trabalho admissível (MPTA): 21 kg / cm2.
- Pressão de projeto: 28 kg /cm2.
- Temperatura de vapor: 3000 C.
- Temperatura da água de alimentação: 900 C.
- Período de operação: Aproximadamente 8 meses ao ano (abril a novembro).
- Faixa de operação: à plena carga.
- Combustível principal: Bagaço de cana.
- Umidade do combustível principal: 50 %.
- Combustível auxiliar: Lenha fina.
- Consumo de combustível a plena carga: 29.618 kg / h.
- Volume de água em nível normal: 53,3 m3.
- Volume de água total: 65,7 m3.
- Superfície de aquecimento por radiação: 312 m2.
- Superfície de aquecimento por convecção: 1.812 m2.

A escolha desse equipamento se deve aos seguintes fatos:

- É um equipamento fundamental à operação deste tipo de sistema de produção sucro-alcooleiro, o qual é o principal sistema de produção da região – com grande impacto na economia local;
- Apresenta condições peculiares, visto que passou por um processo de revisão e reforma "artesanal" 5 anos antes da realização desta pesquisa. Isso resultou em uma situação de modelagem na qual não há registros históricos claros e preciso sobre os seus processos de manutenção e operação.

O contexto destacado no último tópico inviabiliza a aplicação de técnicas tradicionais de análise de risco, demandando técnicas mais afeitas às decisões sob incerteza e com grande interferência de aspectos subjetivos. Essa condição indica a adoção de um métoto multicritério que incorpore o tratamento de aspectos nebulosos ou *fuzzy*.

4.2 Estratégia de modelagem e Comissão de especialistas (CE)

A modelagem do problema foi desenvolvida pelos autores deste trabalho, que interagiram com uma Comissão de Especialistas (CE), que detinham conhecimento sobre o equipamento em foco. Para fins didáticos, no presente texto denota-se a equipe formada pelos autores do presente trabalho como Equipe de Facilitadores.

A composição da CE é apresentada a seguir:

- 01 Engenheiro Mecânico que já atuou como presidente da CIPA (Comissão Interna de Prevenção de Acidentes) da usina durante três anos e trabalhou na indústria sucro-alcooleira em um período total de quatro anos.
- 01 Engenheiro Mecânico/Segurança, inspetor de caldeiras da usina e que atuou como supervisor geral em várias usinas, com experiência superior a 20 anos no ramo.
- 01 Engenheiro Mecânico que já foi supervisor geral de uma indústria sucro-alcooleira com vivência também de vinte anos na área.
- 02 Técnicos de Segurança do Trabalho integrantes da CIPA, possuindo experiência e conhecimento do processo produtivo, no todo e em detalhes.

De uma forma geral, a Equipe de Facilitadores atuou buscou extrair informações consensuais para a construção do modelo. A decisão de se buscar avaliações consensuais em detrimento de votações se deve ao fato de que os métodos ELECTRE têm a característica de "enxergar" os julgamentos como oriundos de um único avaliador ou unidade de decisão.

No processo de modelagem a Equipe de Facilitadores apresentava propostas para a modelagem as quais eram analisadas e discutidas pela Comissão de Especialistas que retornavam as suas impressões à Equipe de Facilitadores. Essa equipe avaliava esse retorno e re-desenhava as suas propostas, submetendo-as novamente à Comissão de Especialistas. Esse ciclo era repetido até que se chegasse a um consenso. Ou seja: adotou-se uma técnica de busca de consenso – o que é diferente de um sistema de votação, com opiniões unânimes. Assim, todas as decisões da modelagem foram desenvolvidas de forma consensual – mesmo que não houvesse unanimidade em um primeiro momento da discussão.

Vale registrar que, em algumas situações, a Comissão de Especialistas se reuniu com a participação de um a participação de um dos membros da Equipe de Facilitadores. Esse fato ocorreu com maior intensidade na definição dos critérios – permitindo eliminar redundâncias, na definição dos pesos de cada um dos critérios.

Esse tipo de abordagem caracteriza pelo apoio de especialistas em construção de modelos de decisão aos decisores, o que permite classificar a abordagem adotada como uma *apoio ou suporte a decisão* .

4.3 Identificação dos eventos

Os eventos foram definidos conforme descrito na seção anterior – com destaque para o fato de que a Equipe de Facilitadores visitou o local onde estava instalado o objeto de estudo antes de fazer a sua proposta inicial. A Tabela 4 apresenta os eventos que foram escolhidos para terem os riscos associados as suas ocorrências analisados.

Tabela 4: Eventos a serem analisados

Evento	Código
Explosão do balão principal ou de qualquer parte da caldeira.	X1
Liberação de chama e/ou fumaça para o exterior da caldeira.	X2
Queima da tubulação de vapor super aquecido	X3
Paralisação de uma das fornalhas da caldeira.	X4

4.4 Classificação da Severidade

Com base nos conceitos da Análise Preliminar de Riscos (APR) sumarizados na Tabela 2, os eventos identificados no tópico anterior (Tabela 4) os foram classificados quanto à severidade associada à sua ocorrência. A Tabela 5 apresenta a APR construída para os eventos e, também, a classificação da severidade dos mesmos. Esta classificação foi definida de forma consensual pela Comissão de Especialistas – sem a necessidade de participação da Comissão de Facilitadores.

4.5 Identificação da Classe de Probabilidade

Os critérios descritos na Tabela 6 foram escolhidos de forma consensual pela Comissão de Especialistas, com o apoio da Equipe de Facilitadores. A Comissão de Especialistas considerou que esses três critérios abrangentes e suficientes, pois consideram desde aspectos vinculados a sua instalação até a sua operação. È relevante registra que no processo de construção dos critérios, a Equipe de facilitadores gerou um conjunto inicial de critérios com base em revisão bibliográfica, esse cojunto foi avaliado pela Comissão de especialistas e, após duas rodadas de negociaçõ,chegpu

Tabela 5: Severidades associadas aos eventos

Evento	Código	Efeito (conseqüência)	Severidade

Explosão do balão principal ou de qualquer parte da caldeira.	X1	Perda total do equipamento. Danos severos a equipamentos vizinhos. Lesões incapacitantes e/ou morte. Paralisação da produção.	I
Liberação de chama e/ou fumaça para o exterior da caldeira.	X2	Danos graves ao equipamento. Lesões sérias ou leves. Paralisação da produção.	II
Queima da tubulação de vapor super aquecido	X3	Dano grave ao equipamento com paralisação da produção. Lesões graves	I
Paralisação de uma das fornalhas da caldeira.	X4	Dano leve ao equipamento. Sem paralisação da produção. Lesões leves.	II

Tabela 6: Descrição dos critérios e codificação dos mesmos

Código	Descrição dos critérios
Cr1	Instalação do objeto de estudo
Cr2	Condições de operação do objeto de estudo
Cr3	Mão de obra operacional do objeto de estudo

4.6 Definir escala para avaliação da importância (peso) de cada critério.

A Tabela 7 apresenta uma escala com cinco posições, para que a importância dos pesos dos critérios. O uso de uma escala com cinco posições segue a orientação de Miller (1954): uma escala para julgamentos subjetivos deve permitir que o avaliador "conte nos dedos" na emissão de seus julgamentos.

Tabela 7: Escala da importância dos pesos de cada critério

Importância do Critério	Pesos
Extrema	4
Alta	3
Média	2
Baixa	1
Desprezível	0

4.7 Julgar a influência dos critérios

A Tabela 8 apresenta os pesos atribuídos aos critérios. Estes pesos foram emitidos pela Comissão de Especialistas (CE), apoiada pela Equipe de Facilitadores. Esses pesos também foram obtidos por consenso. Neste aspecto é importante registrar que houve uma proposição inicial da Comissão de Especialistas no sentido de se utilizar uma votação com adoção dos pesos médios, visto que a mesma é mais rápida e gera menos desgaste. Após discussão estabelecida em conjunto com a Comissão de Especialistas, essa tendência inicial foi revista, por se considerar a importância da discussão dos diferentes pontos de vistas possibilitaria um maior ganho global sobre o entendimento do processo.

Tabela 8: Importância dos critérios

Códigos	Critérios	Pesos
Condições de instalação do equipamento	Cr1	5
Condições de manutenção em equipamento	Cr2	4
Treinamento da mão de obra operacional	Cr3	3

4.8 Identificação das classes de equivalência para cada critérios

A Matriz de Classificação de Riscos considera a existência de quatro classes de probabilidades distintas, o que levou a adoção de quatro classes de possibilidades na modelagem do problema pelo ELECTRE TRI. Conforme descrito na seção 2 do presente trabalho, no ELECTRE TRI as classes de equivalência são definidas por limites inferiores e superiores. De tal forma que uma alternativa cuja avaliação, em todos os critérios, fique situada entre os limites inferiores e superiores de uma determinada classe, seja alocadas nesta classe. A Tabela 9 apresenta as classes adotadas na presente modelagem e os limites que as definem. A única restrição com relação a definição desses limites é que os mesmos devem viabilizar a comparação com os julgamentos atribuídos aos eventos – cuja escala é definida na próxima seção, em acordo com os limites aqui propostos.

Tabela 9: Valores dos limites superiores e inferiores das classes de possibilidade

Classes de Possibilidade	Código	Limite Inferior	Limite Superior
Improvável	D	$-\alpha$	1,5
Baixa	C	1,5	2,5
Média	B	2,5	3,5
Alta	A	4,5	α

4.9 Definição da escala para avaliação da possibilidade de ocorrência do evento à luz cada critério

Em virtude de se considerar quatro classes de referência, adotou-se uma escala com quatro posições para estimar a possibilidade ocorrência de um evento. A mesma escala foi adotada para todos os critérios, por decisão consensual dos membros da Comissão de Especialistas que consideraram que com esta ação a emissão dos julgamentos seria facilitada. A Tabela 10 ilustra essa escala.

Tabela 10: Escala da importância dos pesos de cada critério

Escala numérica	Escala verbal
4	Alta
3	Média
2	Baixa
1	Improvável

4,10 Estimativa da possibilidade de ocorrência dos eventos à luz de cada critério

Nesta etapa, com base na escala apresentada no Quadro 7, os membros do Comissão de Especialistas estimaram, através da emissão de julgamentos de valor e de forma consensual, a classe de probabilidade de ocorrência de cada evento considerado, à luz de cada um dos critérios considerados.

Nesse ponto da modelagem, também houve divergência inicial entre os especialistas. No entanto, possivelmente em função da discussão já ocorrida na definição dos critérios (ver seção 4.2) houve convergência entre os julgamentos dos membros da Comissão de Especialistas. Essa convergência mais rápida o foi interpretada pela Comissão de Facilitadores como um efeito associado a "curva de aprendizagem". Os resultados obtidos para os julgamentos estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11: Estimativas da possibilidade da ocorrência do evento

Eventos	Cr1	Cr2	Cr3
X1	Baixa	Média	Média
X2	Baixa	Baixa	Média
X3	Baixa	Baixa	Média
X4	Improvável	Baixa	Média

4.11 Definir limites de preferência, indiferença e veto para cada critério

Para utilização do método ELECTRE TRI é necessário definir limites de preferência (p_j), indiferença (q_j) e veto (v_j), para cada critério. Esses limites possibilitam considerar a hesitação ou incerteza associada ao julgamento humano e são definidos a partir da escala de julgamentos ilustrada na Tabela 9 e leva em conta que $0 \leq q_j(b_h) \leq p_j(b_h) \leq I/2$, onde $j \varepsilon$ **F**; e, I é o intervalo entre dois limites de classe adjacentes.

Devido ao fato da escala apresentada na Tabela 10 ter intervalos unitários, observa-se que $0 \leq q_j(b_h) \leq p_j(b_h) \leq 0{,}5$, para todos os critérios e todas as classes. Considerando, ainda que essa escala de julgamentos é composta por valores inteiros e discretos, observa-se que o resultado apresentado pelo modelo não é sensível a valores $q_j(b_h)$ e $p_j(b_h)$ ε [0; 0,5). Assim, foram utilizados os limites de preferência e indiferença de $q_j(b_h)$ e $p_j(b_h)$ =0, para todos os critérios e todas as classes.

O uso do limite de veto no ELECTRE TRI, induz uma tendência a se classificar uma alternativa em uma classe mais baixa. Após explicação apresentada pela Comissão de Facilitadores sobre esse efeito do limite de veto, a Comissão de Especialistas decidiu por não utilizar esse limite. Essa comissão observou que os critérios adotados tinham direção inversa. Ou seja: quanto maior o valor do julgamento, pior é a situação. Nesse caso, vetar a classificação de um evento em uma classe mais alta, poderia "mascarar" a classificação de desse evento induzindo a classificação final do mesmo em uma classe que requeira menor atenção.

Matematicamente, a não habilitação do conceito de veto presente no ELECTRE TRI implica em usar um limite de veto extremamente grande, anulando o efeito da discordância e igualando a credibilidade à concordância.

Assim, ainda a respeito ao veto, utilizou-se uma estratégia diferente daquela proposta no ELECTRE TRI. Considerou-se que se existisse algum evento que em algum critério tenha uma possibilidade muito grande de ocorrência, o mesmo seria classificado como de alta "probabilidade" de ocorrência, mesmo que na "combinação" com os outros critérios ele pudesse ser classificado como de baixa possibilidade de ocorrência. Este procedimento foi adotado em favor da segurança, visto que se trata da classificação de riscos industriais.

4,12 Execução do algoritmo de ordenação do ELECTRE TRI

O algoritmo de classificação do ELECTRE TRI foi executado como o apoio do sistema computacional Multicriteria Lab Costa (2004a). Esse sistema computacional permite a execução dos algoritmos de alguns métodos multicritério, já tendo sido testado e validado para a execução dos métodos: ELECTRE I, II, III, TRI e IS; PROMETE I e II; Borda; e, Condorcet.

Na execução do ELECTRE TRI, adotou-se um plano de corte (λ) para o grau de credibilidade igual a 0,75, para se obter os resultados das classificações de possibilidade de ocorrência dos eventos. Essas classificações estão ilustradas na Tabela 11.

Tabela 11: Classificação da probabilidade de cada evento.

Classificação da Probabilidade	
Pessimista	Otimista
	X1
X1, X2, X3	X2, X3, X4
X4	

Os resultados apresentados no Quadro 11 são interpretados da seguinte maneira:

- A possibilidade de ocorrer um evento X1 (explosão do balão principal ou qualquer parte da caldeira) foi classificada pelo algoritmo pessimista na Classe C (baixa possibilidade de ocorrência) e, pelo algoritmo otimista, na Classe B (média possibilidade de ocorrência).
- A possibilidade de ocorrer os eventos X2 e X3 (liberação de chama e/ou fumaça para o exterior da caldeira e queima da tubulação de vapor super aquecido, respectivamente) foi classificada na Classe C (baixa possibilidade ocorrência) por ambos os algoritmos (pessimista e pessimista).
- A possibilidade de ocorrer um evento X4 (paralisação de uma das fornalhas da caldeira) foi classificada pelo algoritmo pessimista na Classe D (improvável possibilidade de ocorrência) e, pelo algoritmo otimista, na Classe C (baixa possibilidade de ocorrência).

4.13 Análise dos resultados.

Nestes resultados observa-se uma incomparabilidade na classificação dos eventos X1 e X4, que foram classificados em classes diferentes pelos diferentes algoritmos de ordenação do ELECTRE TRI. Conforme reportado em Costa 2005, isso indica que os eventos X1 e X4 apresentam comportamento heterogêneo à luz dos diferentes critérios e que uma classificação mais precisa dos mesmos demanda uma análise mais aprofundada, Note que este é um sinal importante, não apresentado em sistemas tradicionais de classificação, como, por exemplo, a média ponderada.

Porém, em um caso específico de classificação de riscos industriais, recomenda-se a adoção da classificação que opere no sentido favorável a maior segurança. Ou seja: a classificação 'otimista', que, neste caso em que os critérios têm direção inversa, classifica os riscos na classe mais alta. Adotando esta política, obtem-se a classificação ilustrada na Tabela 13, apresentado a seguir:

Tabela 13: Definição das classes de Possibilidade para cada evento

Classes de Possibilidade	Possibilidade
Alta Possibilidade (A)	----------
Média Possibilidade (B)	X1
Baixa Possibilidade (C)	X2, X3, X4.
Improvável (D)	----------

4.14 Classificação final do Risco

Combinando os resultados do Grau de Severidade com o do Grau de Possibilidade, na Matriz de Classificação de Riscos descrita na figura 3, obtêm-se a classificação final do risco. Os resultados desta classificação estão ilustrados na Tabela 14.

Tabela 14: Classificação final do risco

Evento	Classe de severidade	Classe de possibilidade	Classificação Final dos Riscos
X1	I	B	Classe1 (Risco Crítico)
X2	II	C	Classe 3 (Risco Moderado)
X3	I	C	Classe 2 (Risco Sério)
X4	II	C	Classe 3 (Risco Moderado)

Analisando este quadro, pode-se afirmar que:

- Risco associado à ocorrência do evento X1 (Explosão do balão principal ou de qualquer parte da caldeira) é considerado Crítico.
- Risco associado à ocorrência do evento X2 (Liberação de chama e/ou fumaça para o exterior da caldeira) é considerado Moderado.
- Risco associado à ocorrência do evento X3 (Queima da tubulação de vapor superaquecido) é considerado Sério.
- Risco associado à ocorrência do evento X4 (Paralisação de uma das fornalhas da caldeira) é considerado Moderado.

De posse desses resultados, a gerência de operações da usina pôde priorizar ações no sentido de mitigar os riscos. É importante observar que o critério 1 considera as condições em que o equipamento re-manufaturado foi instalado; ou seja: refere-se a uma situação ocorrida no passado e que não pode mais ser alterada. Portanto, resta a gerência da organização atuar nos demais critérios.

Nesse sentido, a Comissão de Especialistas sugeriu a gerência que priorizasse:

- A execução, em caráter emergencial, de atividades de treinamento na operação e na manutenção do Balão Principal da Caldeira; e,
- O contínuo planejamento, acompanhado de controle e inspeções severas, da operação e manutenção desse equipamento.

A Comissão de Especialistas também sugeriu a gerência que estas ações deveriam ser estendidas para os demais componentes estudados. Mais ainda, sugeriu que estas ações

deveriam ter caráter permanente, dadas a importância da Caldeira Aqua-tubular para o funcionamento do sistema de produção; e, os riscos associados à operação do Balão Principal e da Tubulação de Vapor Superaquecido.

5 – Conclusões

Este trabalho apresentou uma abordagem multicritério que para a classificação do risco em equipamentos industriais. Os resultados obtidos demonstram que esta é uma alternativa que pode ser considerada no tratamento desse tipo de problema em situações especiais – nas quais não estejam disponíveis dados estatísticos que permitam o uso dos métodos tradicionais de avaliação de riscos. Essa é a contribuição central do presente trabalho.

Os dados utilizados na construção da aplicação aqui reportada (critérios, limites de preferências e escala de julgamentos, julgamentos de valor, plano de corte, não consideração do veto, dentre outros) foram obtidos em consenso junto a especialistas no problema abordado. No entanto, mesmo com estas características, trata-se de uma modelagem particular e, sendo assim, ressalta-se, que os resultados desta aplicação são particulares e não devem ser extrapolados para situações distintas da investigada. Esse fato é comum na modelagem de problemas decisórios e não representa restrição a proposta aqui apresentada.

Analisando os resultados obtidos na aplicação constatou-se que o modelo proposto mostrou-se operacional na classificação de riscos, mesmo trabalhando-se com variáveis subjetivas e na ausência de uma série histórica confiável – o que represntra uma contribuição significativa. Ou seja, a não existência de uma base de dados estatísticos não inviabilizou a aplicação da metodologia e o modelo de aplicação que mostrou-se como alternativa viável para a solução do problema nesta condição - em ausência de dados estatísticos.

Na modelagem desenvolvida, o valor numérico definido na escala de julgamento (Quadro 7) não influencia o resultado. Ou seja: o resultado é independente da escala numérica definida neste Quadro. Esta afirmação está fundamentada em dois fatos: o ELECTRE TRI é um método baseado na "subordinação" das alternativas, o que elimina o efeito compensatório das escalas de julgamento; e, na modelagem desenvolvida o veto foi considerado em processamento prévio ao ELECTRE TRI. Isso facilita em muito a modelagem, pois os avaliadores podem emitir seus julgamentos usando apenas uma escala verbal, eliminando-se a necessidade de uma escala numérica para avaliação de desempenho, aspecto esse que não tem sido destacado na literatura em modelagens pelo ELECTRE TRI, sendo destacado de forma inédita no presente texto.

Outro ponto a ser destacado é que a opção pelo ELECTRE TRI, e detrimento ao emprego de outros métodos multicritério deve-se ao fato de que este é um método nativo para o tratamento de classificação ordenada – conforme descrito na seção .

Quanto a estudos futuros, novos ensaios devem ser realizados, de forma a se caracterizar um experimento que permita estender e consolidar o domínio de validade para a aplicação da metodologia proposta. Estudos futuros também devem explorar a integração de outras técnicas de Gerenciamento de Riscos (Série de Riscos; Árvore de Falhas; Análise de Árvore de Falhas; e, HAZOP, dentre outros) e de AMD (AMD, AHP; PROMETHE; MACBETH e UTA, dentre outras). Finalmente, sugere-se o desenvolvimento de um sistema computacional dedicado ao emprego da metodologia apresentada.

6. Referências

Aleshin, A. (2001) Risk Management of international projects in Russia, International Journal of Project Management, Vol.19, No 1, pp. 207-222.

Changkong, Y. H., Y. (1983) Multiobjective Decision Making, Ed. North Holland, Amsterdam.

Chen, K., Blonga, R. e Jacobson, C. (1999) MCE-RISK: integrating multicriteria evaluation and GIS for risk decision-making in natural hazards, Journal of Environmental Management, Vol.16, No 4, pp. 259–269.

Cook, W. D. e Hebner, K. J. (1993) A multicriteria approach to country risk evaluation: With an example employing Japanese data, International Review of Economics & Finance, Vol.2, No 4, pp. 327-348.

Costa, H. G. (2004a). Multicriteria LAB (Version 2.0), Projeto Análise Multicritério Aplicada, Niterói, RJ, Brasil.

Costa, H. G. (2004b). Multicriteria Lab: Manual do Usuário. Niterói, RJ: Universidade Federal Fluminense.

Freitas, A. L. P. e Costa, H. G. (1998) Uma abordagem multicritério para avaliação e classificação de serviços, Gestão e Produção, Vol.5, No 3, pp. 272 -283.

Giupponi, C., Eiselt, B. e Ghetti, P. F. (1999) A multicriteria approach for mapping risks of agricultural pollution for water resources: The Venice Lagoon watershed case study, Journal of Environmental Management, Vol.56, No 4, pp. 259-269.

Gupta, P. J., Chevalie, A., Dutta, S. e (2009) Multicriteria model for risk evaluation for venture capital firms in an emerging market context, European Journal of Operational Research, No, pp. 18.

Hse. (1997). Risk ranking: Centre for Environmental and Risk Management (CERM).

Kosmidou, K., Pasiouras, F., Zopounidis, C. e Doumpos, M. (2006) A multivariate analysis of the financial characteristics of foreign and domestic banks in the UK, Omega, Vol.34, No 2, pp. 189-195.

Lima, G. B. A. (2000). Uma abordagem Multicritério na Avaliação do Grau de Risco em Empresas Industriais. Paper presented at the X CLAIO, Cidade do México, México.

Mareschal, B. e Brans, J. P. (1991) BANKADVISER: An industrial evaluation system European Journal of Operational Research, Vol.5, No 3, pp. 318-324.

Miller, G. A. (1954) The Magical Number Seven, Plus or Minus Two: Some Limits on Our Capacity for Processing Information, Psychological Review, Vol.101, No 2, pp. 343-352.

Mousseau, V., Slowinski, R. e Zielniewicz (2000) A user-oriented implementation of the ELECTRE-TRI method integrating preference elicitation support, Computers & Operations Research, Vol.27, No 7, pp. 757-777.

Opperhuizen, A. e Hutzinger, O. (1982) Multi-criteria analysis and risk assessment, Chemosphere, Vol.11, No 7, pp. 675-678.

Pendaraki, K., Zopounidis, C. e Doumpos, M. (2005) On the construction of mutual fund portfolios: A multicriteria methodology and an application to the Greek market of equity mutual funds, European Journal of Operational Research, Vol.163, No 2, pp. 462-481.

Pires, T. T., Almeida, A. T. e Duarte, D. (2004) A Decision-Aided fire risk analysis, Fire Technology, Vol.41, No 1, pp. 25-35.

Roy, B. e Boyssou, D. (1985) Mèthodologie Multicritère d'Àide à la Dècision, Ed. Economica, Paris

Saaty, T. L. (1980) The Analytic Hierarquic Process, (W. D. S. E. Silva, Trans.), McGraw-Hill International, New York, USA.

Santafé Jr, H. P. G. (1999). Avaliação de Riscos: Uma Abordagem Multicritério. Unpublished Dissertação, Universidade Estadual do Norte Fluminense "Darcy Ribeiro", Campos dos Goytacazes, Brasil.

Santafé Jr, H. P. G., Costa, H. G. e Haddad, A. N. (1998). Integração de Técnicas de Gerenciamento de Riscos e Análise Multicritério à Análise de falhas. Paper presented at the XVIII ENEGEP (Encontro Nacional de Engenharia de Produção), Niterói, Brasil.

Siskos, J. e Zopounidis, C. (1986) L'investissement en capital risque en France: Mise en place d'une méthodologie multicritère d'évaluation, La Revue du Financier, Vol.44, No, pp. 6-15.

Tsé, C. Y. (2001) Risk Quality Choice, International Journal of Industrial Organization, Vol.19, No 12, pp. 185-212.

Vincke, P. (1992) Multicriteria decision Aid, John Wiley, New York.

Yu, W. (1992). ELECTRE TRI - Aspects methodologiques et guide d'utilisation. Paris: Université de Paris–Dauphine.

Zeleny, M. (1982) Multiple Criteria Decision Making, McGraw-Hil, New York.

Zopounidis, C. (1987) A multicriteria decision-making methodology for the evaluation of the risk of failure and an application, Foundations of Control Engineering, Vol.12, No 1, pp. 45-67.

Zopounidis, C. (1999) Multicriteria decision aid in financial management, European Journal of Operational Research, Vol.119, No 2, pp. 404-415.

Zopounidis, C. e Dimitras, A. I. (1998) Multicriteria Decision Aid Methods for the Prediction of Business Failure, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

Zopounidis, C. e Doumpos, M. (1999) A multicriteria decision aid methodology for sorting decision problems: The case of financial distress, Computational Economics, Vol.14, No 3, pp. 197-218.

Zopounidis, C. e Doumpos, M. (2001) A preference disaggregation decision support system for financial classification problems, European Journal of Operational Research, Vol.130, No 2, pp. 402-413.