



Camila Barbeito Voto

**Aplicação de Redes Bayesianas na Modelagem de Riscos
em Cadeia de Suprimentos: Um Estudo de Caso Aplicado
à Avaliação de Fornecedores**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação
em Engenharia Industrial da PUC-Rio como requisito
parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de
Produção.

Orientador: Prof. Carlos Patrício Samanez

Rio de Janeiro
Setembro de 2013



Camila Barbeito Voto

**Aplicação de Redes Bayesianas na Modelagem de Riscos
em Cadeia de Suprimentos: Um Estudo de Caso Aplicado
à Avaliação de Fornecedores**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre (opção profissional) pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Carlos Patricio Samanez

Orientador e Presidente

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

Prof. Fabricio Carlos P. de Oliveira

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

Prof. Nélcio Domingues Pizzolato

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 24 de setembro de 2013

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

Camila Barbeito Voto

Graduou-se em Engenharia de Produção na PUC-Rio (Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro) em 2006. Trabalhou em planejamento de suprimento em empresa de varejo da área de cosméticos. Atualmente, atua na área de Suprimento de bens do tipo MRO na gerência do Suporte Operacional do Abastecimento-Refino da Petrobras, participando do desenvolvimento de estratégias de contratação, análise do mercado fornecedor e análise de riscos e garantia de continuidade operacional dos contratos.

Ficha Catalográfica

Voto, Camila Barbeito

Aplicação de redes bayesianas na modelagem de riscos em cadeia de suprimentos: um estudo de caso aplicado à avaliação de fornecedores / Camila Barbeito Voto; orientador: Carlos Patrício Samanez. – 2013.

117 f. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Industrial, 2013.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Industrial – Teses. 2. Avaliação de fornecedores. 3. Análise de riscos. 4. Redes bayesianas. 5. Cadeia de suprimentos. I. Samanez, Carlos Patrício. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. III. Título.

CDD: 658.5

À minha família.

Agradecimentos

Ao meu orientador, Prof. Carlos Patrício Samanez, pelo estímulo, motivação e ajuda para a realização deste trabalho.

Aos meus colegas do Mestrado e da Petrobras, que tornaram o programa de Mestrado uma rica troca de experiências e conhecimentos profissionais.

Aos meus gerentes Salgado e Chiquinho e à Petrobras que me possibilitaram ingressar no curso de Mestrado Profissional.

A todos os meus amigos, familiares e ao meu companheiro de vida Estêvão pela amizade, paciência e compreensão.

A todos os professores e funcionários do Departamento pelos ensinamentos e pelos auxílios concedidos.

Aos professores que participaram da Comissão Examinadora.

Resumo

Voto, Camila Barbeito; Samanez, Carlos Patrício (Orientador). **Aplicação de Redes Bayesianas na Modelagem de Riscos em Cadeia de Suprimentos: Um Estudo de Caso Aplicado à Avaliação de Fornecedores**. Rio de Janeiro, 2013. 117p. Dissertação de Mestrado (Opção profissional) - Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Como consequência da atuação focada na eficiência da cadeia de suprimento, as organizações aumentam sua dependência nos fornecedores de matérias primas e componentes e tornam-se mais suscetíveis ao perfil de risco dos mesmos. O papel do gerenciamento de riscos em cadeias de suprimento é de entender e tentar evitar os efeitos devastadores ou mesmo os de menores amplitudes de rupturas de suprimento. Torna-se necessário para os gestores o desenvolvimento da capacidade para avaliação de risco, principalmente o risco de rupturas. É preciso estimar os riscos aceitáveis associados às possíveis rupturas e, então, desenvolver estratégias e diretrizes para o gerenciamento de tais riscos, já que, somente com o conhecimento dos mesmos, torna-se viável o desenvolvimento de planos de mitigação ou contingenciais. Nesta dissertação discutir-se-á o tema de gerenciamento e modelagem de riscos associados a fornecedores, destacando-se a aplicação de um modelo probabilístico de redes bayesianas como um recurso útil nos assuntos relacionados ao gerenciamento e à modelagem de riscos. As rupturas de suprimento serão modeladas utilizando-se um modelo probabilístico de redes bayesianas que possuem a habilidade de representar as relações de causa e efeito em um ambiente envolvendo incertezas. Um estudo de caso com a aplicação da metodologia na indústria de Refino também é apresentada.

Palavras-chave

Avaliação de fornecedores, Análise de riscos; Redes Bayesianas; Cadeia de Suprimentos.

Abstract

Voto, Camila Barbeito; Samanez, Carlos Patrício (Advisor). **Bayesian Network for Modeling Supply-Chain Risks: A Case Study on Suppliers Evaluation**. Rio de Janeiro, 2013. 117p. MSc Dissertation (Opção profissional) - Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

As a consequence of the supply chain management pursuit for efficiency, the organizations become more dependent on the suppliers of raw materials and more sensitive to their risk profiles. The Supply chain risk management (SCRM) objective is to understand and reduce the likelihood of disruptions. SCRM puts its effort in sharpen the notions of risk and reliability and tries to quantify them. The methodology used in this study can be used by managers to formulate supply chain risk management strategies and tactics that mitigate overall supply chain risks correlated with the most critical suppliers. This research is concerned with developing a Bayesian Network approach to model and to analyze supply chain disruptions associated with suppliers. The Bayesian Networks is a method of modeling the cause and effect of events and has proven to be a powerful tool under conditions of uncertainty. A case study is used to illustrate the application proposed to make the supply chain more reliable.

Keywords

Supply Chain; Bayesian Networks; Risk Analysis; Supplier Evaluation.

Sumário

1	Introdução	12
2	Revisão Bibliográfica	16
2.1	A evolução do gerenciamento da cadeia de suprimentos (SCM).....	16
2.2	Gerenciamento e mitigação de riscos e rupturas na cadeia de suprimento..	18
2.3	Fontes de risco na cadeia de suprimento	22
2.4	Efeitos de Riscos de Suprimento	27
2.5	Modelagem de risco na cadeia de suprimento.....	28
2.5.1	Abordagens Qualitativas	29
2.5.2	Abordagens Quantitativas	30
2.5.2.1	Modelos Determinísticos.....	31
2.5.2.2	Modelos Estocásticos	32
2.5.2.3	Modelos híbridos, de Simulação e Causais	33
2.5.2.4	Redes Bayesianas	36
2.6	Conclusão	40
3	Redes Bayesianas.....	42
3.1	Introdução.....	42
3.2	Cálculo das probabilidades e o Teorema de Bayes	43
3.3	Definição de redes bayesianas.....	47
3.3.1	Representação gráfica.....	49
3.3.2	Inferência em redes bayesianas	54
3.3.3	Modelagem de redes bayesianas	58
3.3.4	Algoritmos para resolução de inferências	61
3.3.4.1	Programas de simulação	64
3.4	Modelos de redes bayesianas aplicados ao risco de suprimento	65
4	Estudo de caso e modelo proposto	70
4.1	Estrutura da Rede	70
4.2	Levantamento de informações para alimentação do modelo	77
4.2.1	Seleção dos fornecedores	79
4.2.2	Estabelecimento das probabilidades, cálculo da rede bayesiana e ranking dos fornecedores.....	80
4.3	Valoração do risco: Significância dos impactos.....	88
4.4	Análise de Sensibilidade e Simulações com a Rede Bayesiana.....	93
4.4.1	Alternativa para especificação de pesos para as variáveis utilizando a rede bayesiana.....	94
4.4.2	Alterações das probabilidades iniciais.....	96
4.4.3	Alterações nas variáveis de entrada do modelo.....	96
4.4.4	Valor da Informação.....	101
4.4.5	Análise de sensibilidade da evidência	102
5	Conclusão	106
	Referências bibliográficas	109
	Apêndice 1	116

Lista de Figuras

Figura 1: Áreas de Risco de maior preocupação das empresas.....	24
Figura 2: $A \cap B$. Fonte: Ross (2010)	44
Figura 3: $P(B A)$. Fonte: Ross (2010).....	44
Figura 4: O nó B é condicionalmente independente do nó A, dado o nó C.	46
Figura 5: Grafo construído a partir de variáveis e suas relações	50
Figura 6: Figura gráfico DAG com suas distribuições de probabilidade condicionais	50
Figura 7: Figura gráfico DAG com suas distribuições de probabilidade a posteriori	51
Figura 8: Modularidade de um nó, levando-se em consideração todas as relações do grafo.....	53
Figura 9: O Grafo mais simples – Representação da inferência.....	55
Figura 10: Síntese de informação do teorema de Bayes.....	56
Figura 11: Adaptado de BASU <i>et al.</i> , 2008.....	65
Figura 12: Modelo hipotético para gestão de riscos em cadeias de suprimento.	66
Figura 13: Modelo de rede bayesiana para avaliação de risco de suprimento.	69
Figura 14: Representação gráfica do Modelo de Risco de Suprimento para um fornecedor.....	76
Figura 15: Representação gráfica e respectivas probabilidades na ferramenta HUGIN para o Fornecedor F.	84
Figura 16: Tabelas de Probabilidades Condicionais para o fornecedor F.	87
Figura 17: Nova configuração de probabilidades condicionais para o fornecedor F.....	95
Figura 18: Nova configuração da rede com a inclusão de eventos observados para o fornecedor F.....	96
Figura 19: Entrada de casos diretamente no modelo.	97
Figura 20: Nova configuração para a entrada da variável <i>atraso de entrega</i> para o fornecedor F.....	97
Figura 21: Série histórica- número de dias para entrega, distribuição Triangular e representação gráfica, implementadas no programa <i>Mathematica</i>	99
Figura 22: Probabilidades em cada uma das três situações definidas	100
Figura 23: Modelo alimentado com a distribuição triangular para a variável <i>Atraso de Entrega</i>	100

Figura 24: Tabelas de Probabilidades Condicionais para o fornecedor F com a distribuição triangular para <i>Atraso de Entrega</i>	101
Figura 25: O valor da informação para cada variável da rede.	102
Figura 26: O valor da informação para cada variável da rede alternativa para o fornecedor F.	102
Figura 27: Distribuição de probabilidade a posteriori de <i>Riscos Operacionais</i> para a evidência <i>Problemas de Entrega</i>	103
Figura 28: A verossimilhança normalizada para os diferentes conjuntos de evidência dado cada estado da variável de hipótese.	104
Figura 29: A distribuição a posteriori da variável de hipótese <i>Riscos Operacionais</i> em função das observações em <i>Problemas de Entrega</i>	104

Lista de Tabelas

Tabela 1: Categorias e Direcionadores de Risco	26
Tabela 2: $P(A B)$	45
Tabela 3: Probabilidade de $A \cap B$	45
Tabela 4: $P(B A)$	47
Tabela 5: Categorias de Risco, eventos de risco e probabilidades de ocorrência.	68
Tabela 6: Indicadores de risco (índice) x fonte de informação	73
Tabela 7: Modelo de Rede Bayesiana: Tipo de Risco, Categorias de Risco e índices de Risco.	75
Tabela 8: Valores transacionados nos últimos 2 anos por fornecedor.....	80
Tabela 9: probabilidades para cada índice de risco por fornecedor	81
Tabela 10: Probabilidades para as categorias de risco por fornecedor.....	82
Tabela 11: Probabilidades para os tipo de risco por fornecedor.....	84
Tabela 12: Configuração da rede mais provável para <i>Risco de Suprimento do Fornecedor</i>	85
Tabela 13: Ranking dos fornecedores baseado no perfil de risco.	85
Tabela 14: Categorias de Fornecimentos – Petrobras (2009).....	90
Tabela 15: Categorias e notas para cada critério.	92
Tabela 16: Categorias, notas para a criticidade do Item e Complexidade do Mercado e respectivos fornecedores avaliados.....	92
Tabela 17: Ranking dos fornecedores baseado no índice de risco global.	93
Tabela 18: Definição de pesos para as categorias de riscos para definição alternativa da Rede Bayesiana.	94
Tabela 19: Tabela de probabilidades condicionais anterior a configuração de pesos, onde os tipos de risco possuem pesos iguais.....	95
Tabela 20: Tabela de probabilidades condicionais com a configuração de pesos diferentes.....	95
Tabela 21: Indicador de atendimento na data requerida por fornecedor.	98

Introdução

A competitividade no meio empresarial vem estimulando a adoção de sistemas de gestão mais modernos e gera uma busca constante por processos mais eficientes que se tornam fatores-chave de sucesso. Como resultado da competição global, as organizações verificam que não é mais suficiente a gestão de seus processos internos e passam também a gerenciar uma nova unidade competitiva. A visão integrada e o gerenciamento efetivo das relações ao longo da cadeia de suprimento geram um meio de se criar valor, possibilitando o alcance de uma vantagem competitiva sustentável.

Como consequência desta nova forma de atuação focada na eficiência da cadeia, as organizações aumentam sua dependência na cadeia de suprimento e nos fornecedores de matérias primas e componentes e tornam-se mais suscetíveis ao perfil de risco de seus fornecedores. Este novo foco no gerenciamento da cadeia de suprimento, com ênfase nas relações entre fornecedores e compradores, eleva o processo de contratação a um nível estratégico.

A eficiência das cadeias de suprimento deve sempre vir acompanhada de medidas de monitoramento de riscos das mesmas, de forma a desenvolver estratégias de mitigação e de atuação e resposta face aos riscos observados. Recentemente, o interesse no risco relacionado à cadeia de suprimento tem aumentado nas pesquisas acadêmicas em assuntos relacionados aos efeitos das rupturas e no desenvolvimento de abordagens que visam a identificação, avaliação, análise e tratamento das áreas de vulnerabilidade e riscos em cadeias de suprimento, e consequentemente no desenvolvimento de estratégias que estarão focadas em aumentar a eficiência das mesmas.

O papel do gerenciamento de riscos em cadeias de suprimento é de entender e tentar evitar os efeitos devastadores ou mesmo as de menores amplitudes, como rupturas de suprimento sem maiores consequências. Torna-se necessário para os gestores o desenvolvimento da capacidade para avaliação de risco, principalmente o risco de rupturas. É preciso estimar os riscos aceitáveis associados às possíveis rupturas, e então, desenvolver estratégias e diretrizes

para o gerenciamento de tais riscos, já que somente com o conhecimento dos mesmos, torna-se viável o desenvolvimento de planos de mitigação ou contingenciais.

Nesta dissertação discutir-se-á o tema de gerenciamento e modelagem de riscos associados a fornecedores nas cadeias de suprimento, destacando-se a aplicação de um modelo probabilístico de redes bayesianas como um recurso útil nos assuntos relacionados ao gerenciamento e à modelagem de riscos. As redes bayesianas possuem a habilidade de representar as relações de causa e efeito em um ambiente envolvendo incertezas e serão utilizadas para a modelagem de rupturas de suprimento de fornecedores por possuir.

O objetivo da dissertação é propor uma metodologia de avaliação de riscos da cadeia de suprimento de fornecedores, para responder quais os elos da cadeia associados a fornecedores estão mais expostos a riscos de rupturas e quais as rupturas que podem ser mais críticas para a companhia. O modelo proposto tem a habilidade de determinar os fornecimentos mais críticos e importantes a serem gerenciados em função da cadeia de suprimento dos fornecedores avaliados e da criticidade interna da aplicação do material e possibilitar o desenvolvimento e adoção de estratégias e diretrizes para o gerenciamento dos riscos identificados. A aplicação da metodologia permitirá que os gestores tomem conhecimento do grau de confiança dos fornecedores analisados, além da habilidade do modelo de demonstrar quais os elos da cadeia são mais críticos e que necessitam de uma atenção e atuação diferenciada, de modo a mitigar os riscos observados.

As metodologias utilizadas para a elaboração da dissertação são variadas e podem ser denominadas tanto qualitativas como quantitativas. Incluem, como base, a identificação de variáveis ou indicadores críticos direcionados para a mensuração do risco de ruptura associados a fornecedores, a partir de uma vasta pesquisa bibliográfica. Estes indicadores são adaptados a um modelo para mensuração de riscos e são aplicados a um estudo de caso de empresa de forma a permitir uma análise profunda dos mesmos com o objetivo de conhecê-los e compreendê-los melhor.

As informações necessárias para a construção do modelo foram coletadas tanto internamente à companhia, junto aos especialistas de cadeia de suprimento, quanto externamente, junto aos fornecedores. Para a coleta de dados junto aos fornecedores e especialistas, foi utilizada a aplicação de questionários, obtenção

de dados históricos de fornecimentos e da experiência e conhecimento subjetivo dos especialistas de Supply Chain.

Finalmente, a metodologia inclui a modelagem de uma rede bayesiana com a função de identificar os riscos de ruptura com base no perfil de risco associado a cada fornecedor, estabelecendo um índice denominado *Risco de Suprimento* atribuído a cada fornecedor individualmente. De forma a se permitir a comparação de diferentes fornecedores, em função da natureza de seus fornecimentos e da criticidade interna do fornecimento para a companhia e da disponibilidade de similares no mercado, serão gerados índices levando-se em consideração os índices de risco associados à categoria do fornecimento.

Por fim, foi utilizado o solver HUGIN para simular dados de entrada para prazos de entrega e análises de sensibilidade alterando-se o estado inicial das variáveis e o critério de entrada das variáveis. Foi realizada também a análise de sensibilidade quanto à configuração de novas evidências e calculadas o “valor da informação” que é baseada na importância da variável para o modelo.

Esta dissertação é constituída por cinco capítulos distintos, organizados conforme descrição que segue:

O capítulo 1 refere-se à introdução do estudo. Nele é apresentada a ideia central, juntamente com os objetivos gerais e específicos do trabalho. Também são expostas as metodologias utilizadas e a organização do estudo.

O capítulo 2 apresenta parte da base conceitual do estudo. Primeiramente faz-se uma revisão teórica conceitual sobre cadeia de suprimentos, descrevendo seu conceito e objetivos e expondo a importância do tema no atual cenário dos negócios. Discute-se sobre a gestão da cadeia de suprimentos, assim como também é abordada a relevância do gerenciamento e mitigação de riscos na cadeia de suprimento. Finalizando o capítulo, são apresentados estudos teórico-conceituais de técnicas de modelagem de riscos na cadeia de suprimento, uma delas sendo as redes bayesianas.

O capítulo 3 descreve a parte da base conceitual do estudo relacionada a redes bayesianas. Primeiramente faz-se a introdução à teoria do Cálculo das probabilidades e o Teorema de Bayes. Em seguida é explicado o conceito de redes bayesianas, seu modelo gráfico, o conceito de inferência em redes bayesianas, os métodos para construção de redes bayesianas, os algoritmos para

resolução de inferências e, finalizando, os modelos de Redes Bayesianas aplicados à análise de riscos de suprimento.

No capítulo 4 é apresentado o estudo de caso na área de negócio do refino da Petrobras e modelo de rede bayesiano proposto à luz da metodologia estudada no capítulo anterior utilizado para a identificação de riscos. No mesmo capítulo há a definição dos participantes do estudo e o procedimento para coleta de dados e a construção e aplicação do modelo. É apresentada também uma análise de sensibilidade do modelo.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões, limitações do estudo e recomendações relevantes para trabalhos futuros.

2

Revisão Bibliográfica

Neste capítulo é realizada uma revisão bibliográfica de tópicos relevantes para o estudo teórico-conceitual de gerenciamento, riscos e modelagem de riscos na cadeia de suprimento.

2.1

A evolução do gerenciamento da cadeia de suprimentos (SCM)

O conceito de Gerenciamento da Cadeia de Suprimento, ou simplesmente o termo em inglês SCM, surgiu de uma evolução natural do conceito de Logística Integrada que, por sua vez, representa uma integração interna de atividades. Esta visão se ampliou, e hoje a SCM é a integração de processos chave desde o usuário final ao supridor inicial que provê os bens, serviços e informações para adicionar valores aos consumidores e outros stakeholders (LAMBERT e COOPER, 2000). A logística ganha uma nova dimensão, envolvendo a integração de todas as atividades ao longo da cadeia de valores, desde a geração de matérias primas ao serviço ao cliente final. Ela deixa de ter um enfoque operacional para adquirir um caráter estratégico e, neste contexto, o SCM, representa uma nova e promissora fronteira para as empresas que desejam a obtenção de vantagens competitivas de forma efetiva (PIRES, 1998) em resposta ao novo contexto de competitividade mundial.

A competitividade no meio empresarial vem estimulando a adoção de sistemas de gestão mais modernos e a busca constante por processos mais eficientes que se tornam fatores-chave de sucesso, desta forma, a gestão da cadeia como um todo contribui significativamente para a redução de custos, assim como identificar formas de agregar valor aos produtos.

Como consequência da globalização, esse ambiente dinâmico exige que as empresas mantenham desempenhos elevados em qualidade, confiabilidade, flexibilidade e responsividade (PIRES, 1998).

A cadeia de suprimento é uma rede que engloba todas as empresas que participam das etapas de formação desde a compra de matéria prima, passando pela transformação desta matéria em produtos intermediários e depois em produtos finais, até a entrega deste último ao cliente final através de canais de comercialização e distribuição (LEE e BILLINGTON, 1995).

De acordo com o Council of Supply Chain Management Professionals (2012), o SCM tem a responsabilidade principal de integrar as principais funções e processos comerciais internos e, entre empresas, em um modelo coesivo e de alta performance. O SCM inclui o gerenciamento de todas as atividades logísticas assim como do processo de manufatura e coordena as interfaces de processos com marketing, vendas, design de produtos, finanças e tecnologia da informação.

A eficiência no gerenciamento da cadeia de suprimento esteve muito ligada à gestão de estoques, planejamento e programação da produção, custos, distribuição e levantamento de demanda, e novas abordagens vêm sendo realizadas sob as perspectivas atuais da cadeia de suprimento (NORRMAN e JANSSON, 2004).

De acordo com Pires (1998), a potencialidade para gerar vantagem competitiva não está mais dentro dos limites de uma única empresa, mas sim entre as empresas que pertencem à mesma cadeia de suprimento e a competição entre empresas ou unidades de negócios se torna uma competição entre cadeias produtivas, considerada como unidades virtuais de negócios. As práticas comerciais do futuro serão definidas sob uma nova unidade de análise, a cadeia de suprimento, e não a organização individual. Como resultado da competição global, as organizações verificam que não é mais suficiente a gestão de seus processos internos e passam então a gerenciar uma nova unidade competitiva. Com uma visão integrada e com o gerenciamento efetivo das relações ao longo da cadeia de suprimento pode-se criar valor, possibilitando alcançar uma vantagem competitiva sustentável (HANDFIELD, 2002).

Conforme previram Pires (1998) e Handfield (2002), ultimamente a visão da SCM torna-se expandida, atualizada e sobretudo holística na administração de materiais tradicional, que abrange a gestão de toda a cadeia produtiva de forma estratégica e integrada.

A gestão da cadeia de suprimento requer uma integração cruzada de diversos elos da cadeia que gerenciam funções diferentes na mesma. O ponto crucial, já que não é possível coordenar uma integração entre os diversos “players” da cadeia, é determinar os pontos mais críticos e importantes a serem gerenciados. As relações não podem ser mais empresa a empresa e sim uma cadeia de relacionamentos (LAMBERT e COOPER, 2000).

Ferreira e Borenstein (2012) evidenciam que o foco no gerenciamento da cadeia de suprimento, com ênfase nas relações entre fornecedores e compradores, eleva o processo de contratação a um nível estratégico. O papel do gerenciamento do relacionamento com fornecedores, ou simplesmente o termo em inglês SRM – Supplier Relationship Management, é de tornar as relações entre empresa compradora e seus fornecedores mais efetivas. Adicionalmente, SAWHNEY *et al.* (2006) identificaram as cadeias de suprimento como mecanismos de se promover inovações entre as organizações através da adoção de fluxos de informação direcionados, reestruturação de processos e aumento do ambiente colaborativo entre seus membros.

2.2

Gerenciamento e mitigação de riscos e rupturas na cadeia de suprimento

A apreciação científica do mundo se dá em termos do que pode ser medido. Medir significa comparar com um padrão e descrever em números, ou seja, quantificar. Com a quantificação, é possível se valer da força da lógica e da argumentação matemática. Certamente, nem tudo pode ser quantificado, mas claro que isso não significa que não se possa medir sua utilidade.

O termo risco é utilizado para expressar a exposição a uma possível consequência adversa. A quantificação do risco é requerida para se construir um sistema de apoio à decisão, especialmente decisões relativas à segurança e bem-estar. Quando as medidas quantificadas de risco são avaliadas com um sistema de apoio à decisão normativa, atividade denominada de gerenciamento de riscos, pode-se dizer que o elemento comum a todas as análises de risco é a existência de eventos incertos (SINGPURWALLA, 2006).

Com o fornecimento tomando proporções globais e buscando cada vez mais a redução de custos para a obtenção de vantagem competitiva, o risco da cadeia de suprimento, ou seja, sua vulnerabilidade é aumentada. As cadeias de suprimento globais têm mais risco do que as nacionais ou domésticas, devido aos numerosos elos que interligam uma ampla cadeia de empresas (MANUIJ e MENTZER, 2008). Levando-se em consideração que todas as cadeias de suprimento estão inerentemente sujeitas ao risco de ruptura, quanto mais complexa é a cadeia, maiores são os riscos de falha (CRAIGHEAD *et al.*, 2007).

O fenômeno de internacionalização das cadeias de suprimento e políticas globais de fornecimento que levam a uma maior complexidade operacional e à busca por eficiência e redução de custo através da adoção de práticas como o Just-in-time, racionalização da fonte fornecedora e de estoques, aumentam a probabilidade do risco de rupturas no fluxo de produtos e serviços assim como a própria magnitude de tais rupturas e de seus efeitos que podem demandar mais tempo para se reestabelecerem (McCORMACK *et al.*, 2010 ; HENDRICKS e SINGHAL, 2005a).

Para Yang *et al.* (2009), existem diferentes análises quantitativas para se medir o risco, mas todas elas são baseadas basicamente nos dois fatores: A probabilidade de ocorrência de um evento de risco e as consequências de ocorrência do evento.

Mitchell (1995) define risco como “a probabilidade de perda e a significância da mesma para a organização ou indivíduo”. Para um dado evento n , Mitchell expressou através de uma equação a colocação anterior:

$$Risco_n = probabilidade(perda_n) \times significância(perda_n) \quad (1)$$

A essência da análise de risco é se conhecer as probabilidades de ocorrência dos eventos e avaliar os possíveis impactos correspondentes a cada risco, enquanto o objetivo do gerenciamento de riscos é de se investigar os *trade-offs* entre as conveniências e as consequências, tanto tangíveis quanto intangíveis, das ações mitigadoras dos riscos e das situações geradoras dos mesmos.

No ambiente da cadeia de suprimento, o risco de suprimento pode ser definido como a probabilidade ou possibilidade de ocorrência de um incidente associado ao abastecimento interno a partir de uma ruptura individual de um

fornecedor ou de um mercado, o que resulta na incapacidade da empresa em atender as demandas dos clientes ou colocam em risco a vida e segurança dos mesmos (ZSIDISIN, 2003). O risco engloba tanto as proporções das consequências que podem vir a ocorrer como a probabilidade de ocorrerem.

As empresas não devem apenas olhar para seus próprios riscos, mas também para os riscos dos outros membros da cadeia de suprimento. Esta preocupação justifica-se com a analogia muito utilizada de que a cadeia de suprimento é tão forte quanto seu elo mais fraco. Os relacionamentos em uma cadeia de suprimento são essenciais já que qualquer membro da cadeia pode afetar o desempenho de outros membros (PAI *et al.* 2003).

Recentemente, o interesse no risco relacionado à cadeia de suprimento tem aumentado nas pesquisas acadêmicas em assuntos relacionados aos efeitos das rupturas e no desenvolvimento de abordagens que visam a identificação, avaliação, análise e tratamento das áreas de vulnerabilidade e riscos em cadeias de suprimento, fruto de estratégias que estão focadas em aumentar a eficiência das mesmas (BASU *et al.*, 2008; CRAIGHEAD *et al.* 2007; SHEFFI, 2005). O papel do gerenciamento de riscos em cadeias de suprimento é de entender e tentar evitar os efeitos devastadores ou de menores amplitudes como rupturas de suprimento sem maiores consequências (NORRMAN e JANSSON, 2004). Torna-se necessário desenvolver a capacidade para avaliação de risco, principalmente o risco de rupturas. É preciso estimar os riscos aceitáveis associados às possíveis rupturas, e então, desenvolver estratégias e diretrizes para o gerenciamento de tais riscos (McCORMACK *et al.*, 2010).

Avaliar e gerenciar riscos em cadeias de suprimento podem de fato reduzir o risco da ocorrência e de seus efeitos (ZSIDISIN *et al.*, 2000). Somente com o conhecimento dos riscos, torna-se viável o desenvolvimento de planos de mitigação ou de contingências.

De acordo com Manuj e Mentzer (2008), o gerenciamento de riscos de suprimento consiste na identificação e análise de riscos e consequentes perdas na cadeia de suprimento, e a aplicação de estratégias apropriadas com uma abordagem coordenada entre seus membros com o objetivo de reduzir um ou mais dentre as seguintes: perdas, probabilidade, duração do evento, velocidade das perdas, tempo até detecção do problema, frequência e exposição.

A vulnerabilidade da cadeia de suprimento pode ser definida como a propensão das fontes e direcionadores de risco de superarem as estratégias de mitigação, causando então consequências adversas na cadeia (JÜTTNER *et al.*, 2003).

Decisões estratégicas, assim como o modelo de cadeia, podem gerar vulnerabilidades específicas para a cadeia de suprimento. Desta forma, é necessário o desenvolvimento de processos e de ferramentas que ajudem os gestores a antecipar e rastrear, não somente os benefícios, como também os riscos intrínsecos de suas cadeias (JÜTTNER *et al.*, 2003).

Examinando as vulnerabilidades da cadeia de suprimento, os gestores serão capazes de mitigar o risco e desenvolver estratégias de respostas rápidas com o objetivo de reduzir as rupturas e seus efeitos. Portanto, modelar as rupturas é um desafio que ajudará a determinar os efeitos e planejar as possíveis soluções dos problemas (SOBERANIS, 2010).

De acordo com Wu e Olson (2010), em um mundo ideal, os gestores seriam capazes de identificar qualquer risco e desenvolveriam um plano de contingência para cada uma das situações. Toda organização deve responder ao risco. Mas existem diversas estratégias diferentes para fazê-lo. Em qualquer uma delas, o risco deve primeiro ser identificado, depois monitorado através de indicadores de desempenho. Deverão também ser selecionadas as melhores respostas a esses riscos que serão mitigados de acordo com o *trade-off* implícito entre segurança e redução de custo.

As empresas podem utilizar diversas táticas para o gerenciamento de riscos. As estratégias de mitigação são aquelas que as empresas implementam de modo a, antecipadamente, evitar a ruptura ou reduzir seus efeitos. As estratégias de contingência são aquelas em que as empresas recorrem somente após de um evento de ruptura acontecer (TOMLIN, 2006).

A resiliência, um termo emprestado na ciência dos materiais, quando utilizado para empresas, seria a habilidade e o tempo transcorrido para retornar ao seu nível normal de desempenho após uma falha de suprimento (SHEFFI, 2005). Desenvolver cadeias de suprimento mais resilientes é entendido como um meio de se reduzir a probabilidade e a severidade de rupturas das mesmas (BLACKHURST *et al.*, 2011). Lockamy III (2011) traz outra definição muito próxima à resiliência, denominada de reatividade, que trata da habilidade da

cadeia de suprimento de reduzir seu lead time quando necessário, da capacidade de adaptação a alterações inesperadas de demanda e de se lidar com incertezas de mercado.

Uma forma de se conseguir resiliência, é tornar a cadeia mais flexível (ZSIDISIN e WAGNER, 2010). Quando os riscos estão fora do controle da cadeia de suprimento, como riscos de mercado, usa-se a criação de redundâncias, como formar estoques de segurança (buffer) que podem, no entanto, ser custosos ou o desenvolvimento de fontes múltiplas de fornecimento (ZSIDISIN e WAGNER, 2010; SHEFFI 2005; SOBERANIS, 2010). Outras formas de se mitigar riscos incluem estratégias para melhoria dos processos, como de firmar alianças com fornecedores, estabelecimento de cláusulas contratuais sobre elaboração de planos de mitigação de riscos e a divisão de riscos com outros os participantes da cadeia (ZSIDISIN *et al.*, 2000).

De acordo com Beamon (1998) e Basu *et al.* (2008), os gestores devem buscar o equilíbrio entre os custos oriundos das estratégias de mitigação de risco e a performance e lucro desejados. Isto significa que a situação ótima em termos de riscos pode ser muito custosa para ser implementada.

2.3

Fontes de risco na cadeia de suprimento

Diversos estudos vem sendo realizados sobre os principais direcionadores de riscos da cadeia de suprimento. Algumas tendências de negócio dos últimos anos que aumentam o risco nas cadeias de suprimento elencados são (JÜTTNER *et al.*, 2003; NORRMAN e JANSSON, 2004; BASU *et al.*, 2008; YANG *et al.*, 2009):

- globalização da cadeia de suprimento e o aumento do outsourcing que alongam a cadeia de suprimento (*end-to-end*);
- redução e concentração das fontes fornecedoras;
- a redução nos estoques intermediários e nos lead times devido ao foco na eficiência da cadeia (reduced buffer);

- ciclos de vida do produto cada vez mais curtos que aumentam a ocorrência de obsolescência de estoques;
- a restrição de capacidade associada com a incerteza de mercado que aumentam a dificuldade em se ajustar à demanda.

Aprofundando-se mais nos direcionadores acima, a globalização da cadeia de suprimento ou, como coloca Elkins *et al.* (2005), a complexidade operacional de um canal de distribuição global, aumenta não somente a probabilidade de riscos de ruptura como também da própria magnitude e efeitos de tais rupturas. Há no ambiente global uma concentração e redução das fontes fornecedoras, onde a adoção de estratégias de fonte exclusiva (*single sourcing*), pode levar a uma alta dependência com o risco do fornecedor, que pode explorar sua posição e tomar vantagem de seu cliente aumentando o custo de fornecimento (ZSIDISIN *et al.*, 2000).

Estoques enxutos aumentam a probabilidade de perda de produção, causadas por falta momentânea dos recursos necessários, que podem gerar consequências em vasta amplitude da cadeia de suprimentos (McCORMACK *et al.*, 2010).

Em relação ao ciclo de vida dos produtos que estão cada vez mais curtos, há a necessidade de reaver os custos de desenvolvimento em um período menor de tempo, estressando assim a eficiência da cadeia de suprimento, onde qualquer atraso nas vendas afeta o ciclo de vida desenhado como ideal do produto (SOBERANIS, 2010), além de aumentar a chance de obsolescência de estoques (BASU *et al.*, 2008).

Conforme levantado por Yang *et al.* (2009) e demonstrado na Figura 1, de acordo com uma pesquisa realizada por uma empresa de Corretagem de Seguros e Consultoria de Riscos com executivos de diferentes segmentos de indústrias, os riscos associados à cadeia de suprimento foram classificados nos seguintes direcionadores: roubo de propriedade intelectual e pirataria, risco de reputação da marca, risco de demanda, desastres naturais, atrasos logísticos e rupturas, riscos com planta, armazém e lojas, risco e atraso com fornecedores, risco de preço. Dentre as empresas consultadas e destacando-se os riscos que podem ocasionar rupturas de fornecimentos, cerca de 50% das empresas estão

preocupadas com riscos associados a atrasos de fornecimentos e 40% se preocupam com rupturas de fornecimento.

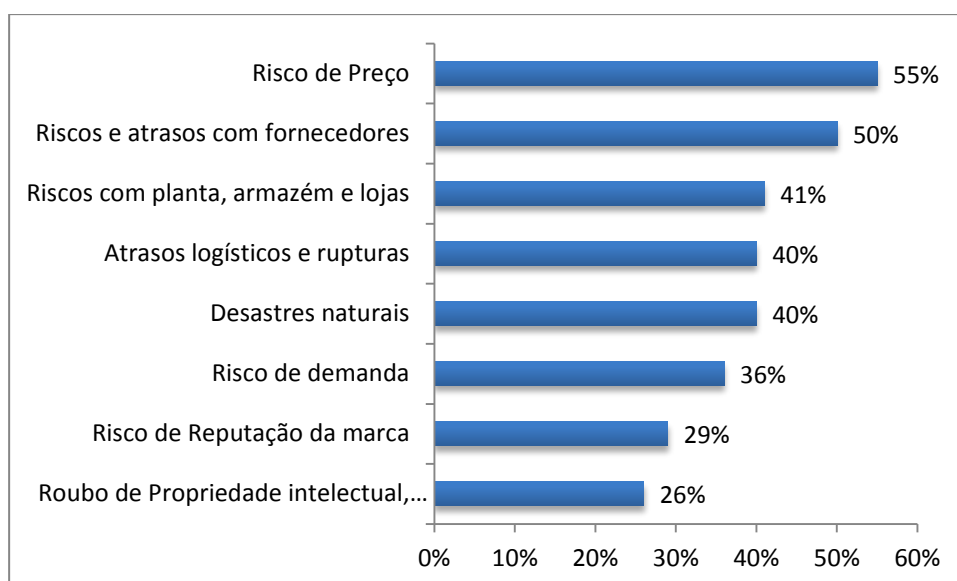


Figura 1: Áreas de Risco de maior preocupação das empresas. Adaptado de Yang *et al.*, 2009.

Ainda de acordo com Yang *et al.* (2009), o risco de ruptura de suprimento pode se manifestar de diversas formas, incluindo atrasos no transporte, indisponibilidade logística (portos, trens, etc.), acidentes, desastres naturais e problemas de qualidade, por exemplo.

Os riscos podem ainda ser separados em atributos dos fornecedores ou das estruturas de suprimento. Compreendendo a fonte, bem como a classificação dos riscos de suprimento, torna-se possível estabelecer estratégias que permitam minimizá-los de forma eficiente (McCORMACK *et al.*, 2010).

Handfield e McCormack (2008) desenvolvem uma metodologia de abordagem ao risco que consiste em um processo de identificação de riscos englobando a preparação, coleta e análise de dados e modelagem onde são definidas três categorias de risco associadas às de cadeias de suprimento: risco operacional, de cadeia e de fatores externos. O risco operacional é definido como o risco de perda resultante de falhas em processos internos, de pessoas ou do sistema. Problemas de qualidade e outros de serviço são exemplo de riscos operacionais. O risco de cadeia é definido como o risco resultante da estrutura da cadeia do fornecedor, como propriedades, estratégias de suprimento e acordos

entre os subfornecedores. O risco externo é definido como um evento gerado por forças externas como clima, terremotos, política, regulação e mercado.

Além desta categorização, Handfield e McCormack (2008) definem três perspectivas para se definir riscos: os riscos associados aos fornecedores, à demanda e internos à organização. Identificando apenas os riscos associados a fornecedores, aplicam uma abordagem proposta pela modelagem de riscos que elenca seis categorias de riscos associadas a um fornecedor representadas pelos eventos abaixo:

- Falhas no abastecimento da cadeia (rupturas de suprimento)
- Desempenho (Performance)
- Recursos Humanos
- Ambiente
- Relacionamento
- Saúde financeira

Chopra e Sodhi (2004) identificaram as principais categorias de riscos potenciais de suprimento como atrasos, rupturas, previsão de vendas incorretas, falhas gerais de sistema, brechas de propriedade intelectual, falhas nos sistemas de compras, problemas de inventário e restrição de capacidade e elencaram alguns direcionadores do risco de acordo com sua categoria conforme a Tabela 1.

Tabela 1: Categorias e Direcionadores de Risco.

Categoria de Risco	Direcionadores do Risco
Rupturas	<ul style="list-style-type: none"> • Desastres Naturais • Disputas trabalhistas • Falência de Fornecedor • Guerra e terrorismo • Dependência de fonte exclusiva de suprimento • Capacidade e responsividade de fornecedores alternativos
Atrasos	<ul style="list-style-type: none"> • Utilização de alta capacidade dos fornecedores • Baixa qualidade dos fornecedores • Inflexibilidade dos fornecedores • Demora no despacho devido a manuseio excessivo, inspeções ou alterações na modalidade de entrega
Previsões	<ul style="list-style-type: none"> • Inacurácia nas previsões devido a longos prazos de fornecimento, sazonalidade, variedade de produtos, ciclos de vida curtos, base fornecedora escassa • Efeito chicote ou distorção da informação devido a promoções em vendas e incentivos, falta de visibilidade da cadeia de suprimento e exagero da demanda em tempos de falta de produto
Sistemas	<ul style="list-style-type: none"> • Falha na infra-estrutura da informação • Integração do sistema ou cadeia extensa • Falhas em sistemas de e-commerce
Propriedade Intelectual	<ul style="list-style-type: none"> • Integração vertical da cadeia de suprimento • Mercado e outsourcing global
Compras	<ul style="list-style-type: none"> • Risco cambial • Percentual de um componente chave ou matéria-prima fornecido de uma única fonte • Capacidade produtiva • Contratos de curto e longo prazos
Recebíveis	<ul style="list-style-type: none"> • Número de Clientes • Avaliação financeira dos clientes
Capacidade	<ul style="list-style-type: none"> • Custo da Capacidade • Flexibilidade
Inventário	<ul style="list-style-type: none"> • Taxa de obsolescência de produtos • Custo de imobilização de capital (custo de oportunidade) • Valor dos produtos • Demanda e suprimento incerto

Fonte: Adaptada de Chopra e Sodhi (2004).

Similar à proposta acima, Sodhi e Lee (2007) dividem os riscos como sendo relacionados ao suprimento (rupturas e atrasos na entrega) denominados de riscos de suprimento ou de natureza da demanda. Associados aos riscos de suprimento são elencados os seguintes riscos:

- Riscos políticos no país de origem
- Ameaças de junção (Merge) e aquisição de empresas
- “Acts of god”, guerras e terrorismo

- Riscos de capacidade e problemas de qualidade de produção
- Riscos de propriedade intelectual
- Fonte exclusiva de suprimento
- Atrasos do fornecedor
- Riscos de inventários.

Os riscos de demanda estão relacionados com: Recessões, Reputação, Mudança de tecnologia, Mudança nas referências dos clientes e Riscos de previsões e de recebíveis (receitas).

Referente a fontes de riscos, Blackhurst *et al.* (2011) desenvolveram uma abordagem através de um *framework* empírico, levantando os fatores que reduzem ou que aumentavam a resiliência. Os principais fatores identificados relativos à cadeia de suprimento, como redutores de resiliência e que, conseqüentemente, amplificam os impactos de rupturas de suprimento associados a fornecedores foram:

- número de elos (ou nós) da cadeia;
- regulamento aduaneiro e problemas de segurança;
- restrições de capacidade nos portos e meios de transporte;
- limitações na capacidade do fornecedor.

Wu *et al.* (2006) classificam os riscos como internos ou externos à cadeia de suprimento e, além disso, os dividiram em controláveis, parcialmente controláveis e incontroláveis e, dessa forma, ajudam os gestores a identificar claramente onde os riscos estão alocados e como lidar, evitar e mitigar cada tipo de risco.

2.4

Efeitos de Riscos de Suprimento

De acordo com o estudo relacionando falhas de suprimento ao desempenho operacional, a análise de uma amostra de 885 falhas de suprimento relatadas por empresas resultaram, em média, 7% menores crescimentos de vendas, 11% no

aumento de custos e 14% no aumento de estoques ao longo de um ano após o evento de ruptura (HENDRICKS e SINGHAL, 2005a).

Os efeitos das rupturas podem ser elencados em: aumento no lead time, podendo resultar na falta de produto no mercado (MANUJ e MENTZER, 2008), redução no nível de serviço e queda na qualidade, associado a uma perda de reputação e de credibilidade, e dano na reputação (ZSIDISIN, 2003), aumento de custos associados à expedição, inventário obsoleto, marketing adicional, e multas pagas (JÜTTNER *et al.*, 2003), com reflexos nos resultados financeiros, como decréscimo no valor de mercado e das receitas (HENDRICKS e SINGHAL, 2005a). As empresas que aceitam passivamente os riscos de ruptura de suprimento ficam mais expostas ao perigo de perdas financeiras e de market-share mais severas (TOMLIN, 2006).

As rupturas podem também ser classificadas quanto a seus efeitos. A análise dos riscos consiste em determinar a probabilidade de um evento de risco ocorrer, que podem ser classificados como de alta, média e baixa chance, estimando para isso duração e o impacto provável do evento (ZSIDISIN *et al.*, 2000).

Para evitar perdas de receitas, os gestores precisam equilibrar os estoques, capacidade e outros elementos em níveis apropriados e, entendendo os tipos de risco da cadeia de suprimentos, podem tecer abordagens de redução de riscos eficientes para suas atividades (CHOPRA e SODHI, 2004).

2.5

Modelagem de risco na cadeia de suprimento

Várias empresas estão utilizando modelos de otimização para apoiar à tomada de decisões táticas e estratégicas na cadeia de suprimento. (SODHI, 2003).

Um elemento importante da modelagem da cadeia de suprimento é o estabelecimento de indicadores de desempenho apropriados. Os indicadores de desempenho podem ser tanto qualitativos como quantitativos e devem medir a satisfação do cliente, flexibilidade, fluxos de informação e material, gerenciamento efetivo de riscos e de avaliação de fornecedores, custos e lucro (BEAMON, 1998).

Para organizações “compradoras” torna-se necessário o desenvolvimento da capacidade de se selecionar e avaliar sistematicamente os fornecedores membros da cadeia, para que sejam capazes de atingir os níveis de performance desejados e para mitigar os riscos da dependência criada no relacionamento firmado (LOCKAMY III, 2011).

De acordo com Hendricks e Singhal (2005b), as empresas estiveram muito focadas em redução de custos e não deram a importância devida aos riscos atrelados a rupturas de fornecimento.

Em relação aos indicadores de risco, podem existir indicadores que são relativos à frequência das perdas ou rupturas e outros que são relativos à severidade das perdas e ainda indicadores que podem ser relativos a ambos. Por outro lado, a existência de indicadores de risco em modelos que não são causas de frequência ou severidade das perdas não é necessariamente um problema. Entretanto, se as probabilidades condicionais forem obtidas de dados históricos, e estes não forem abundantes, indicadores podem parecer erroneamente ser causas de perdas, quando na realidade a influência é inexistente (QUEIROZ, 2008).

Existem diversas abordagens sendo realizadas em relação à modelagem de riscos na cadeia de suprimento. As pesquisas bibliográficas mostram que diversos estudos vêm sendo conduzidos no assunto com diferentes métodos para medir o desempenho do fornecedor. Considerando a definição de Crouhy *et al.* (2004) e Khan e Burnes (2007), as abordagens podem ser qualitativas e quantitativas.

2.5.1

Abordagens Qualitativas

As estratégias de mitigação são feitas sob medida e muitas vezes incluem a abordagem qualitativa dos riscos. Chopra e Sodhi (2004) sugerem que os gerentes devem levar duas coisas em consideração quando construírem uma estratégia de supply chain risk. Primeiro, eles devem criar um entendimento divulgado por toda a Cia, dos riscos da cadeia de suprimento. Depois, eles precisam determinar como adaptar uma estratégia genérica de mitigação de riscos em suas circunstâncias particulares.

De acordo com Jüttner *et al.* (2003), as estratégias de mitigação de riscos podem ser divididas em categorias de ação denominadas de instrumentos para o risco (*risk intruments*). Eles elencam quatro estratégias genéricas que as empresas usam de forma a mitigar seus riscos que podem ser adaptadas para o contexto da cadeia de suprimento:

- **Precaução (*Avoidance*):** Uma empresa pode abandonar algum produto, mercados e fornecedores para evitar exposição ao risco;
- **Controle (*Control*):** Inclui as estratégias de integração vertical, aumento de estoque para venda e de estoque de segurança, manutenção de excedente de capacidade de produção, armazenagem, manuseio e transporte ou através do estabelecimento de cláusulas contratuais com fornecedores;
- **Cooperação (*Cooperation*):** Técnicas utilizadas para melhorar a visibilidade e entendimento e fluxo das informações, para dividir informações sobre a exposição a fontes de riscos e finalmente para preparar planos conjuntos de continuidade operacional em resposta a estes riscos; e
- **Flexibilidade (*Flexibility*):** A flexibilidade está relacionada à responsividade. Aplicadas na cadeia de suprimento são técnicas que reduzem a dependência nas previsões e fontes de suprimento.

Uma abordagem qualitativa mais recente é definida no trabalho de Norrman e Jansson (2004), que apresenta um framework utilizado pela Ericsson para gerenciamento de riscos após um acidente grave com um subfornecedor. O estudo sugere um acompanhamento próximo dos principais fornecedores e o estabelecimento de requisitos formais junto aos mesmos. De natureza exploratória, o estudo possui o propósito de descrever uma prática pioneira e não de validá-la externamente e generalizá-la para outras aplicações, por isso o trabalho foi definido como qualitativo. Sodhi e Lee (2007) descreveram os riscos levantados e as estratégias de mitigação aplicadas na Samsung Eletronics.

2.5.2

Abordagens Quantitativas

Em relação às abordagens quantitativas, de maneira geral, devido às incertezas envolvidas, a análise estatística e simulação (WU e OLSON, 2010;

BASU *et al.*, 2008) são muito apropriadas para representar as incertezas relacionadas a eventos de risco (BASU *et al.*, 2008) e para a análise do risco na cadeia de suprimento.

A modelagem da cadeia de suprimento é decidida levando-se em consideração a natureza dos inputs e objetivo do estudo (BEAMON, 1998). Levando-se isto em consideração, adaptando as categorizações propostas por Beamon (1998), McCormack *et al.* (2010), Soberanis (2010) e Basu *et al.* (2008), as categorias de análises quantitativas poderiam ser divididas em quatro abordagens diferentes que serão descritas a seguir.

2.5.2.1

Modelos Determinísticos

Nas modelagens determinísticas, as variáveis são conhecidas e especificadas necessitando-se assim de dados históricos. Os modelos determinísticos estabelecem relações funcionais entre valores definidos das variáveis e cujos resultados dependem inteiramente da situação inicial. As relações estabelecidas no modelo devem ser exatas e não funções de probabilidade. Na modelagem da cadeia de suprimento, estes modelos foram muito utilizados para determinar o custo mínimo de produção e distribuição, níveis de estoque e prazos de fornecimento, lote econômico de compra (BEAMON, 1998; McCORMACK *et al.*, 2010) e maximização de lucro e flexibilidade da cadeia (IGNÁCIO, 2009; COHEN e LEE, 1989) e localização (CAMM *et al.*, 1997).

Em relação à aplicação de modelos determinísticos aplicados a riscos de suprimento, foi proposto por Deane *et al.* (2009) a utilização de técnicas de otimização multicritério de forma a mitigar riscos analisando duas fontes de riscos: riscos do ambiente, associado a riscos políticos, econômicos e naturais na localidade do fornecedor e o e risco de densidade, associado a quantidade de fornecedores em uma mesma região de abrangência, que estariam sujeitos aos mesmos riscos de ruptura, devido ao acesso a recursos, dado a proximidade dos mesmos.

Wu *et al.* (2006) utilizaram o método AHP (método da análise hierárquica ou Analytic Hierarchy Process) para classificar os riscos relacionados a

fornecedores. Este método realiza a hierarquização dos riscos analisando a importância relativa dos mesmos em pares e permite considerar tanto fatores subjetivos como objetivos, aproximando-se de uma melhor resposta de medição única de desempenho. Power (2013) define o método AHP como uma abordagem para a tomada de decisão que envolve a estruturação da escolha de diversos critérios em uma hierarquia, que avalia a importância relativa dos critérios, compara alternativas para cada critério e determina um ranking geral das alternativas.

Sarkis e Talluri (2002) aplicaram o método ANP, uma derivação do método AHP, para a seleção de fornecedores. Enquanto o método AHP estrutura um problema utilizando um sistema de hierarquia, o método ANP estrutura o problema como se fosse uma rede, e ambos utilizam a comparação em pares para definição do peso dos componentes da estrutura e finalmente para estabelecer um ranking das alternativas da estrutura.

De maneira geral, por não considerarem a variabilidade, os modelos determinísticos e estudos aplicados na análise de riscos na cadeia de suprimento são limitados e não englobam o tratamento à incerteza (PIDD, 1998).

2.5.2.2

Modelos Estocásticos

A modelagem estocástica lida com modelos de otimização e algoritmos em que parte das informações possui grande incerteza associada. Os modelos estocásticos são utilizados quando ao menos uma das variáveis é desconhecida e é assumido que ela siga uma distribuição de probabilidade conhecida (particular). Esses modelos são muito aplicados nos casos em que uma decisão deve ser tomada anteriormente à coleta de dados (SOBERANIS, 2010).

Os estudos voltados à cadeia de suprimento englobam um grande espectro de aplicações, como a modelagem de política de MRP baseado em minimização do custo total envolvendo as atividades de controle de material, controle da produção, armazenagem e distribuição (COHEN e LEE, 1989), modelos para minimizar o custo de estoque considerando o nível de performance (PYKE e COHEN, 1993), metodologias de localização e centralização (LEE *et al.*, 1993).

Foram desenvolvidos diversos modelos de avaliação de riscos associados à cadeia de suprimento, como o modelo definido por Schwarz (1989), de divisão dos riscos entre os membros da cadeia, para um dado nível de serviço. Há ainda o modelo que descreve o comportamento do Efeito Chicote¹ originalmente descrito por LEE *et al.* (1997), incluindo a condição do compartilhamento de informações (DISNEY *et al.*, 2008) e posteriormente o modelo que busca minimizar o Efeito Chicote, levando-se em consideração o equilíbrio entre a estratégia de produção e o mesmo (POTTER *et al.*, 2009).

2.5.2.3

Modelos híbridos, de Simulação e Causais

Alguns estudos combinam a modelagem estocástica e simulação, onde é possível analisar os resultados de um exemplo numérico da modelagem para otimizar a cadeia de suprimento. Modelos de simulação são mais versáteis para a modelagem de risco na cadeia de suprimento, no entanto mais complexos para se construir e manter (BASU *et al.*, 2008).

De acordo com Dougan e Aydin (2011), dentre os diferentes critérios utilizados para avaliação de riscos de suprimento, destacando-se os riscos voltados na seleção de fornecedores, vem sendo muito explorada com a utilização de diferentes técnicas os Métodos de Decisão Multicritério, onde destaca-se a utilização do método AHP (método da análise Hierárquica ou Analytic Hierarchy Process), ANP (Analytical Network Process) já citados anteriormente e o DEA (Data Envelopment Analysis), Lógica Fuzzy, estes últimos cujos exemplos de aplicação em estudos serão abordados a seguir.

Tomlin (2006) propõe um modelo de otimização de riscos, baseado em um único produto de uma empresa sendo suprido por dois fornecedores: um que é confiável e de maior custo e outro que não é confiável. O modelo analisa comparativamente estratégias diferentes de mitigação de riscos e de contingências, voltadas para as fontes fornecedoras, a níveis de estoque e estratégias contingenciais. A aplicação de cada uma das estratégias deve ser

¹ O efeito Chicote originalmente descrito por Lee *et al.* (1997) explica a distorção da informação de demanda ao longo da cadeia de suprimento, ou seja, entre o fabricante, distribuidores e pontos finais de vendas.

modelada de acordo a tolerância ao risco da empresa e com as características fontes fornecedoras como tipo e frequência das rupturas (frequentes e curtas ou raras e longas) custo e flexibilidade.

Wu e Olson (2008a) comparam os resultados de três abordagens diferentes, o CCP (*Chance Constrained Programing*), DEA (*Data Envelopment Analysis*) e modelos MOP (*Multi Objective programming*) que se mostraram úteis para avaliar e melhorar a seleção de fornecedores em um ambiente de incertezas. No trabalho são apresentados três modelos de simulação de Monte Carlo aplicados aos modelos de diferentes abordagens: MOP, CCP e DEA. Com a comparação da aplicação dos três modelos, eles concluem que o CCP proporciona a habilidade de incorporar incertezas no modelo. O DEA garante soluções não dominantes, mas não conseguem incorporar as preferências do tomador de decisão e o MOP proporciona flexibilidade para os tomadores de decisão de refletirem suas preferencias em relação a cada um dos critérios.

Wu e Olson (2008b) também compararam os resultados de modelos de DEA com um modelo de otimização multicritério para realizar a seleção de fornecedores. A conclusão é que, quando há incerteza nas informações disponíveis, o DEA permite a condução de análises de eficiência dos modelos testados. Contudo, é afirmada uma preferência à simulação combinada com análise multicritério já que assim é possível a realização de ranking das alternativas, dado o input do tomador de decisão nos modelos iniciais.

Pohl e Miman (2008) utilizam técnicas de distorção da distribuição de probabilidade das fontes de fornecimento e de demanda para modelar os riscos associados a rupturas de fornecimento.

Yang *et al.* (2009) utilizaram a ferramenta @Risk 5.0 que, por sua vez, utiliza a simulação de Monte Carlo, para desenvolverem um modelo de simulação de avaliação e mitigação de riscos associados a riscos de suprimento, riscos operacionais, risco de demanda e o risco financeiro.

Li e Wang (2007) aplicaram o algoritmo fuzzy para modelar as negociações e trade-offs da cadeia de suprimento de uma indústria eletrônica, com o objetivo de chegar aos melhores acordos tanto para o comprador quanto para o vendedor.

Lee (2009) propõe uma metodologia que integra a lógica fuzzy e o método AHP que leva em consideração critérios de desempenho para realizar o ranking

dos fornecedores. Os critérios de desempenho levados em consideração são divididos em três grupos: Benefícios - que englobam qualidade, flexibilidade e entrega, Oportunidades - que englobam critérios de tecnologia e relacionamento e, por fim, Custos e Riscos - que englobam restrições e perfil dos fornecedores e restrições no relacionamento comprador *versus* fornecedor. O modelo considera os critérios simultaneamente.

A programação Fuzzy é um ramo importante da pesquisa operacional. Até o momento, diversos modelos e algoritmos foram criados para resolver problemas de otimização (YANG e IWAMURA, 2008). A Lógica Fuzzy, também denominada Lógica Difusa ou ainda Lógica Nebulosa, diferente da Lógica Clássica, que apenas permite a classificação de “Verdadeiro” ou “Falso”, é capaz de atribuir valores lógicos intermediários, representando decisões abstratas, do tipo "mais ou menos", "talvez sim", "um pouco mais", e outras tantas variáveis que representem as decisões humanas. Uma das principais potencialidades da Lógica Fuzzy, quando comparada com outros modelos que tratam com dados imprecisos, é que suas bases de conhecimento, as quais estão no formato de regras de produção, são fáceis de examinar e entender (KOHAGURA, 2007). Ainda assim, existe a necessidade de se representar as relações das variáveis no formato de regras, o que pode ser difícil de ser operacionalizado. Estas regras são utilizadas para representar a incerteza e muitas vezes são operadas por variáveis linguísticas para definição das notas e dos pesos dos fatores (critérios) do modelo, devido à capacidade de representar situações e decisões mais abstratas em modelos fuzzy (FERREIRA e BORENSTEIN, 2012; DOGAN e AYDIN, 2011).

Wu *et al.* (2007) propuseram uma abordagem baseada na metodologia de modelagem de rede (network-based), para determinar como alterações e rupturas se propagam na cadeia de suprimento e como estas alterações e rupturas afetam a performance operacional do sistema.

Cruz (2002) aborda em seu livro diferentes metodologias para a modelagem de riscos operacionais. Como modelos causais são apontadas diferentes técnicas como: redes neurais artificiais, lógica fuzzy e redes bayesianas. Cruz (2002) ressalta que apenas é indicada a utilização dos modelos causais quando não houver informação suficiente ou por outra impossibilidade de construção de modelos lineares.

Ainda relacionado a modelo causais, Cowell *et al.* (2003) sugerem que a capacidade de modelagem causal de perdas ou riscos provê uma base na qual o gerenciamento pode intervir para conseguir a alteração desejada no perfil de riscos. A falta de dados ou de informações e a complexidade do modelo sugerem ainda a inclusão de informações qualitativas de especialistas, que podem ser melhor incorporadas através de modelos não lineares, como lógica difusa (fuzzy), redes neurais e redes bayesianas. Não é o escopo deste trabalho se aprofundar nas técnicas das duas primeiras metodologias citadas, mas sim de localizar as metodologias em uma mesma “família” em função no tipo de modelo gerado, os denominados modelos causais não lineares que se baseiam na incerteza.

Já as redes neurais, que não foram citadas em nenhum trabalho relacionado a riscos de suprimento, possuem a capacidade de aprendizado e reconhecimento de padrões. Fazendo uma alusão da aplicação das redes em diagnósticos médicos, as redes neurais são capazes de dar diagnósticos avaliando uma série de sintomas. As redes neurais tentam reconhecer padrões nas informações observadas, identificar as relações entre as informações para se construir o modelo de rede neural. Os modelos são construídos na base da tentativa e erro. (POWER, 2013; JENSEN, 2013). Contudo, estas redes não são capazes de ler a incerteza da conclusão dos diagnósticos e de dar o próximo diagnóstico mais provável. Desta forma, conclui-se que o conhecimento só pode ser obtido a partir de uma série de exemplos e desta forma possuem a desvantagem de necessitar de disponibilidade de dados. Por outro, lado possuem a vantagem de serem aplicáveis em modelagens complexas e em áreas onde a atividade da rede é parecida com um atributo humano baseado somente em experiência (JENSEN, 2013).

2.5.2.4

Redes Bayesianas

As redes bayesianas também conhecidas como redes de opinião, redes causais ou gráficos de dependência probabilística são modelos gráficos que representam de forma simples as relações de causalidade das variáveis de um sistema para raciocínio baseado na incerteza. São modelos de representação do

conhecimento que trabalham com o conhecimento incerto e incompleto por meio da Teoria da Probabilidade Bayesiana de 1763, do matemático Thomas Bayes. Ela vem se tornando a metodologia padrão para a construção dos sistemas que baseiam-se no conhecimento probabilístico e têm sido aplicada como alternativas à inteligência artificial (AI), diagnósticos médicos e modelos de previsão climática, em cálculos de riscos operacionais de instituições financeiras, dentre outras aplicações (CHARNIAK, 1991).

As redes bayesianas oferecem uma abordagem para o raciocínio probabilístico que engloba a teoria dos grafos para o estabelecimento das relações entre sentenças e, ainda, a teoria das probabilidades, para a atribuição de níveis de confiabilidade (MARQUES e DUTRA, 2008). Uma rede bayesiana é um grafo direcionado acíclico onde os nós representam as variáveis, que podem ser discretas ou contínuas, e os arcos representam as dependências condicionais das variáveis.

A utilização da abordagem probabilística teria uma vantagem segundo Charniak (1991):

“A principal vantagem do raciocínio probabilístico sobre o raciocínio lógico é o fato de que agentes podem tomar decisões racionais mesmo quando não existe informação suficiente para provar que uma ação funcionará.”

Modelos probabilísticos construídos na forma de redes bayesianas servem como alternativa quando não se possui dados históricos suficientes. Redes bayesianas permitem que decisões sejam tomadas baseadas em probabilidades, permitem adicionar critérios de julgamento e analisar o sistema a fim de buscar os aspectos do modelo que possuam maior impacto sob as variáveis de consulta.

As redes bayesianas têm a capacidade de representar as dependências condicionais entre as variáveis e podem ser utilizadas para modelar preferências, hábitos e eventos incertos, sendo uma solução para a modelagem causal permitindo o entendimento do comportamento das variáveis estudadas. O estabelecimento de um modelo causal pode também incorporar o conhecimento subjetivo dos especialistas, dessa forma as probabilidades podem ser medidas baseando-se em uma combinação de conhecimentos teóricos e empíricos e combinando estimativas mais ou menos subjetivas (JENSEN, 2013).

As vantagens potenciais da utilização das redes bayesianas comparadas com as outras abordagens utilizadas para modelagem de riscos na cadeia de suprimento incluem a representação compacta e intuitiva, a robustez para pequenas alterações no modelo, a habilidade para se operar com diferentes tipos de variáveis, a facilidade de se utilizar conhecimentos anteriores tanto qualitativos quanto quantitativos, a facilidade para a medição de incertezas, a habilidade para lidar com dados incompletos e a capacidade de aperfeiçoamento e aprendizado do modelo utilizando-se da inclusão de evidências (SOBERANIS, 2010).

Soberanis (2010) propôs a utilização de análise de redes bayesianas para modelar a integração de conhecimento e de informação em cadeias complexas. Ainda no assunto de compartilhamento de informações, Glenn *et al.* (2004) propuseram um modelo de abordagem bayesiana combinada com o processo estocástico de cadeias de Markov para modelar a distribuição de demanda do ponto de vista do fornecedor, assim como dos distribuidores, e como o compartilhamento de informações das vendas afetam as decisões de estoque.

Kao *et al.* (2005) utilizaram as redes bayesianas como um mecanismo descritivo para modelar as relações de causa e efeito do ponto de vista do fornecedor em relação a seus clientes, de forma a permitir um diagnóstico da cadeia de suprimento de uma indústria.

Shafti *et al.* (2010) desenvolvem um modelo para gerenciamento de risco para provedores de serviço capaz de determinar os tipos mais relevantes de riscos associados a cada tipo de serviço. Os dados foram analisados utilizando-se das redes bayesianas e aglomeração hierárquica (hierarchical clustering). A aglomeração hierárquica é uma denominação genérica para um grupo de técnicas que são utilizadas para criar grupos de características similares a partir das relações de similaridade entre os membros e os aglomerados (clusters). O modelo desenvolvido tem a finalidade de ajudar no desenvolvimento de estratégias de mitigação de riscos.

Na IBM, Basu *et al.* (2008) descreveram a aplicação de um método de modelagem baseado em redes bayesianas para quantificar os riscos da cadeia de suprimento, modelados em efeitos de rupturas e outras falhas na performance da cadeia de suprimento.

Ferreira e Borenstein (2012) propõem uma metodologia combinando as técnicas fuzzy e Diagramas de Influência, que trata de um conceito de redes bayesianas aplicadas a modelos de decisão, para avaliação de fornecedores. A ferramenta foi desenvolvida para suportar os tomadores de decisão na seleção de fornecedores, ajudando a explorar as forças e fraquezas associadas a cada alternativa de suprimento, a priorizar critérios de seleção conflitantes e levando em consideração as características dinâmicas de relações de longo prazo com os fornecedores. Neste trabalho, o estado de cada nó da rede, assim como a importância relativa do nó, podem ser representados por um conjunto de até sete variáveis discretas linguísticas, permitindo traduzir informações vagas e imprecisas e reduzir a complexidade do modelo.

Dogan e Aydin (2011) combinam técnicas de redes bayesianas e análise do custo total (TCO) para analisar o processo de seleção de fornecedores. A utilização das duas técnicas em conjunto ajudam a identificar as incertezas inerentes ao processo de contratação e a integrar no modelo o conhecimento do agente “comprador”. Para a construção da rede, os nós são representados por critérios relacionados ao fornecedor como capacidade de inovação, flexibilidade, qualidade, situação financeira, entregas, relacionamento, cultura organizacional e preço, assim como critérios do custo total, ou seja, relativos ao processo de aquisição, compreendendo custos relacionados a design de produto, logística, operação, administração e transacional.

Finalmente, Lockamy III e McCormack (2012) desenvolveram uma metodologia para classificar os fornecedores baseados em seus riscos com a aplicação de redes bayesianas. As redes expressam os riscos operacionais, de cadeia e externos dos principais fornecedores de uma empresa automotiva. Indo mais além, além da classificação de riscos, Lockamy III (2011) desenvolve uma metodologia para modelar e avaliar os riscos associados aos fornecedores, englobando no modelo os impactos financeiros das eventuais rupturas de suprimento associados a cada fornecedor.

2.6

Conclusão

Este capítulo teve o objetivo de realizar a revisão bibliográfica dos assuntos relacionados a riscos da cadeia de suprimento e as técnicas aplicadas para a modelagem dos mesmos. Primeiramente foi discutida a evolução do gerenciamento da cadeia de suprimentos onde os estudos de riscos vem assumindo importância crescente ao longo dos anos. O subitem seguinte ressalta a importância do gerenciamento e mitigação de riscos e rupturas na cadeia de suprimento, que deve ser realizado pelas empresas para garantir a competitividade no cenário de globalização. Em seguida, foram levantadas as principais fontes de risco da cadeia de suprimento e de seus principais efeitos, com impactos significantes nas operações de uma empresa, nas receitas e no market-share.

A revisão bibliográfica buscou explorar a literatura no que diz respeito às abordagens de modelagem ao risco inerentes a toda cadeia de suprimento. As abordagens ao risco foram categorizadas primeiramente como quantitativas ou qualitativas. As qualitativas devem ser ajustadas e desenvolvidas para as situações específicas de cada empresa. Em relação às abordagens quantitativas, de maneira geral, modelos que englobam estatística e simulação são muito apropriados para considerar a análise do risco na cadeia de suprimento, devido à inerência das incertezas envolvidas a todas as cadeias. Já os modelos determinísticos devem, de alguma forma ser incluídos em frameworks que considerem também a simulação de eventos incertos ou do contrário, possuirão aplicação limitada por não considerarem a variabilidade dos inputs. Já os modelos estocásticos e híbridos ou de simulação podem requerer grandes recursos computacionais para a modelagem e ser de difícil entendimento para os gestores.

Em relação aos pontos negativos levantados na aplicação de algumas técnicas, para o método AHP por exemplo, não há o conhecimento da relação de dependência dos critérios. Em relação aos métodos AHP e ANP, ambas abordagens são determinísticas e não permitem a consideração de imprecisão de dados no processo de tomada de decisão. Em relação a técnica Fuzzy, além de existir a necessidade de se representar as relações das variáveis no formato de

regras, o processo de inferência assim como a representação da incerteza não são claros para o criador do modelo (DOGAN e AYDIN, 2011).

As redes bayesianas por sua vez, devido à natureza probabilística das operações realizadas na cadeia de suprimento, podem ser bem sucedidas para a modelagem de riscos associadas a rupturas de fornecimento. No caso da indisponibilidade de dados históricos para se fazer inferências estatísticas, podem ser utilizadas as probabilidades baseadas em dados subjetivos. Além disso, em relação aos outros modelos probabilísticos, as redes bayesianas apresentam vantagens por ser facilmente compreendidas, dado que as relações entre as variáveis são, em grande parte, intuitivas e por demandarem menor tempo computacional de solução (McCormack *et al.*, 2010).

Outro ponto positivo das redes bayesianas é que quando um novo critério é adicionado ao processo, só é necessário identificar a relação deste novo critério com outros critérios e as relações de efeito, diferente do que ocorre para modelos de AHP e ANP, onde é necessária a nova comparação de todos os critérios em pares (DOGAN e AYDIN, 2011).

Na medida em que as organizações aumentam sua dependência nas cadeias de suprimento, elas tornam-se mais vulneráveis a rupturas e mais suscetíveis aos perfis de risco de seus fornecedores. Embora não seja possível prever com precisão os eventos de risco que podem levar a rupturas de suprimento ao longo da cadeia, é possível se avaliar a probabilidade de ocorrência de tais eventos através da criação de perfis de risco associados aos principais fornecedores (LOCKAMY III, 2011). Este será justamente o foco que se quer neste trabalho dar à modelagem de riscos.

Um ponto negativo em relação às referências bibliográficas pesquisadas das redes bayesianas aplicadas ao risco de suprimento é que não são abordadas as formas de se obter os parâmetros (probabilidades condicionais) da rede ou as informações para coleta de informações são muito vagas como no caso dos trabalhos de Kao *et al.* (2005) e Handfield e McCormack (2008) e Soberanis (2010).

A revisão bibliográfica para a aplicação efetiva das redes bayesianas para a modelagem de riscos de ruptura associados aos fornecedores na cadeia de suprimento será abordada separadamente no próximo capítulo.

3

Redes Bayesianas

Neste capítulo será realizada uma revisão bibliográfica do conceito de redes bayesianas, da modelagem de dados nas redes bayesianas, e mais especificamente, de modelos de redes bayesianos aplicados ao risco de suprimento.

3.1

Introdução

A probabilidade é um ramo da matemática que visa à formulação de modelos teóricos abstratos para o tratamento matemático da ocorrência (ou não ocorrência) de fenômenos aleatórios. Singpurwalla (2006) relata que a probabilidade é o único meio satisfatório de se quantificar a incerteza e relata que, conforme constatara Bernoulli, a probabilidade não é somente uma chance ou possibilidade da ocorrência de um evento, e sim o estado de nosso conhecimento em relação a ocorrência do evento.

O'Hagan *et al.* (2003) definem diferentes pontos de vista para a definição da probabilidade. O ponto de vista frequentista define a probabilidade de um evento com base nas frequências populacionais observadas, de modo que o raciocínio e julgamento desses últimos também são baseados em frequências populacionais. Para os frequentistas, o cerne da incerteza está nos eventos. Um frequentista portanto tenta quantificar “a probabilidade de um evento” como sendo uma característica de um conjunto de eventos similares, que são em princípio cópias repetidas. O ponto de vista Bayesiano olha para cada evento como único, que pode ou não ocorrer. A teoria Bayesiana afirma que a probabilidade de um evento indica a opinião de um observador acerca da ocorrência ou não ocorrência do evento em uma observação particular. Para um bayesiano, o cerne da incerteza descrita pela probabilidade está no observador. Para tratamento matemático e filosófico das várias concepções de probabilidade,

O'Hagan *et al.* (2003) recomendam em seu trabalho a consulta a Kyburg e Smokler (1964).

A Royal Society (1992) relaciona o risco e a probabilidade:

“Assim como a probabilidade no sentido da teoria estatística, o risco obedece todas as leis formais da conjunção de probabilidades.”

As redes bayesianas têm a capacidade de representar graficamente a estrutura de probabilidade de um problema, isto é, de representar a relação de dependências das variáveis, utilizando-se de conceitos de independência condicional, facilitando o cálculo para o sistema, devido ao número reduzido de probabilidades condicionais (WOOLDRIDGE, 2003).

Além de serem incluídos na família de técnicas de modelos causais conforme proposto por Cruz (2002), Wooldridge (2003) sugere que as Redes Bayesianas podem também ser incluídas em uma família de técnicas conhecidas como Sistemas Especialistas (Expert Systems). Uma definição de sistema especialista é a de um sistema que imita o comportamento humano no processo decisório de um domínio específico. Outras técnicas desta mesma família são o sistema fuzzy, sistemas baseados em regras e as redes neurais.

3.2

Cálculo das probabilidades e o Teorema de Bayes

O cálculo das probabilidades, denominado de inferência bayesiana, utiliza basicamente três axiomas da probabilidade, que serão desenvolvidos a seguir. Calcular a probabilidade de um evento B ocorrer dado a ocorrência de um evento A é o mesmo que calcular $P(B)$ onde $P(B|A)$ é a probabilidade do evento conjunto, ou seja, $P(A \cap B)$. $A \cap B$ representa os eventos que são comuns a A e a B , representado pela Figura 2.

Figura 2: A interseção B . Fonte: Ross (2010)

A probabilidade condicional, ou seja, a probabilidade de um evento B ser condicionada por um evento A , dado $P(B) > 0$, é definida por:

$$P(B|A) = \frac{P(A \cap B)}{P(A)} \quad (2)$$

Esta situação é representada graficamente pela Figura 3:

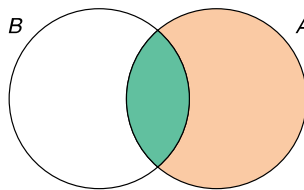


Figura 3: $P(B|A)$. Fonte: Ross (2010).

A regra da probabilidade total

Considere dois eventos A e B :

$P(B) = P(B \cap A) + P(B \cap A')$, onde A e A' são eventos mutuamente exclusivos. De acordo com a regra de multiplicação de probabilidades define-se:

$$P(A \cap B) = P(A|B) \cdot P(B) = P(B|A) \cdot P(A) \quad (3)$$

Conjunção de probabilidades

Para calcular a conjunção de probabilidades, seja A uma variável aleatória com n estados, a_1, \dots, a_n e $P(A)$ é a distribuição de probabilidades para estes estados é

$$P(A) = (a_1, \dots, a_n); \quad a_i \geq 0; \quad \sum a_i = 1 \quad (4)$$

onde a_i é a probabilidade de A estar no estado a_i .

Se a variável B possui os estados b_1, \dots, b_m , então $P(A|B)$ representa uma tabela $n \times m$ contendo os valores $P(a_i|b_i)$, conforme a Tabela 2. Os exemplos abaixo foram adaptados de Marques e Dutra (2008):

Tabela 2: $P(A|B)$.

	b_1	b_2	b_3
a_1	0.4	0.3	0.6
a_2	0.6	0.7	0.4

A conjunção de probabilidades para as variáveis A e B é também uma tabela $n \times m$, representada pela probabilidade de cada configuração (a_i, b_i) .

Aplicando a regra $P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)}$ para as variáveis A e B , considerando

$P(B) = \langle 0,4; 0,4; 0,2 \rangle$, chega-se aos resultados da Tabela 3.

Tabela 3: Probabilidade de $A \cap B$.

	b_1	b_2	b_3
a_1	0.16	0.12	0.12
a_2	0.24	0.28	0.08

Pode-se também calcular a probabilidade $P(A)$ a partir da Tabela 3 calculando o resultado para $P(a_i) = \sum P(a_i, b_j)$. Este cálculo é chamado marginalização de $P(A)$ em $P(A \cap B)$. O resultado para a tabela 3 será: $P(A) = \langle 0,4, 0,6 \rangle$.

Eventos independentes

Dois eventos dizem-se independentes se:

$$P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B) \quad (5)$$

Isto significa que:

$$P(B|A) = \frac{P(A) \cdot P(B)}{P(A)} = P(B) \quad (6)$$

Ou seja, a ocorrência de B não tem qualquer efeito sobre a probabilidade de acontecer A . Em outras palavras, caso se disponha da informação sobre o evento $A=a$, a mesma não modifica a incerteza sobre B . A independência condicional está ilustrada na Figura 4.

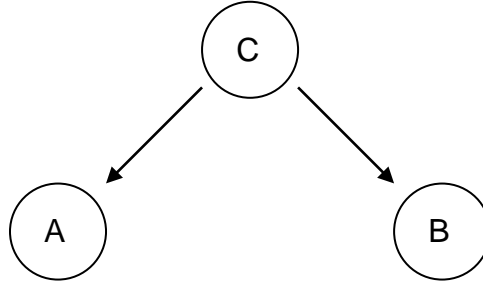


Figura 4: O nó B é condicionalmente independente do nó A , dado o nó C .

Teorema de Bayes

Dado dois eventos A e B , tal que $P(A) \neq 0$ e $P(B) \neq 0$, temos que a probabilidade do evento B ocorrer dado que o evento A ocorre, é dada pela equação:

$$P(B|A) = \frac{P(A|B) \cdot P(B)}{P(A)} \quad (7)$$

Além disso, dado N eventos mutuamente exclusivos e exaustivos B_1, B_2, \dots, B_N tais que:

$$P(B_1|A) = \frac{P(B_1 \cap A)}{P(A)} = \frac{P(A|B_1) \cdot P(B_1)}{\sum_{i=1}^n P(A|B_i) \cdot P(B_i)} \quad (8)$$

Isto quer dizer que para cada variável B que possui como pais A_1, A_2, \dots, A_N existe uma tabela de probabilidades $P(B|A_1, A_2, \dots, A_N)$ (MARQUES e DUTRA, 2008).

Em continuação ao exemplo dado em conjunções de probabilidades pelas Tabelas 2 e 3, para os valores de A $P(A) = \langle 0,4; 0,6 \rangle$ e de B $P(B) = \langle 0,4; 0,4; 0,2 \rangle$ e aplicando a regra de Bayes sob a Tabela 2, pode-se

obter a tabela de $P(B|A)$, onde $P(B|A) = \frac{P(B) \cdot P(A|B)}{P(A)}$.

Tabela 4: $P(B|A)$.

	a_1	a_2
b_1	0.4	0.3
b_2	0.3	0.47
b_3	0.3	0.13

3.3

Definição de redes bayesianas

A rede bayesiana é um método representativo baseado nos conhecimentos de probabilidade e são bastante apropriados para modelar processos causais com incertezas e oferecem o potencial de modelar as rupturas de suprimento de forma efetiva. As probabilidades podem ser obtidas com fatos do passado para estimar a condição futura ou ainda com opiniões subjetivas de especialistas (SOBERANIS, 2010).

A rede bayesiana é mais frequentemente construída utilizando as noções de relação de causa e efeito (MADSEN *et al.*, 2005). Uma forma de se compreender uma rede bayesiana é de se imaginar uma situação onde existe o efeito de causalidade e o entendimento sobre a causalidade é incompleto, então é necessário descrever a situação probabilisticamente (CHARNIAK, 1991).

Uma das principais características de redes bayesianas é que podem ser combinadas tanto probabilidades baseadas em dados qualitativos ou subjetivos quanto em quantitativos. Nassar (1998) e Madsen *et al.* (2005) definem os dados qualitativos ou quantitativos como sendo:

- **Dados Qualitativos:** Representam o modelo gráfico, ou seja, as variáveis, também chamadas de nós, e as regras, que são as relações de dependência condicional entre as variáveis representadas pelos os arcos direcionados;
- **Dados Quantitativos:** É o conjunto de probabilidades condicionais associadas aos arcos existentes no modelo gráfico e as probabilidades estimadas a priori das hipóteses diagnosticadas.

Resumidamente, a rede bayesiana é um grafo acíclico direcionado onde os nós representam as variáveis aleatórias e os arcos representam as dependências

condicionais das variáveis. Cada variável possui um conjunto limitado de estados mutuamente exclusivos, ou seja, cada nó tem associados os estados da variável que representa e uma tabela de probabilidades condicionais que quantifica os efeitos que os pais exercem sobre um nó (probabilidade do nó estar num estado específico dado os estados dos seus pais). Seguindo a definição de Jensen (2001), adaptada por Soberanis (2010), uma rede bayesiana consiste dos seguintes pontos:

1. Um conjunto de variáveis $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ é um conjunto de arestas (arcos) entre as variáveis;
2. Cada variável possui um número finito e mutuamente exclusivo de estados;
3. As variáveis e as arestas ou arcos, formam um grafo S acíclico direcionado (DAG);
 - 3.1. Um grafo é acíclico se não existe um caminho direto $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ resultando em $x_1 = x_n$;
4. Para cada variável X com pais $\text{pai}(x_1), \dots, \text{pai}(x_n)$ existe uma tabela de conjunção de probabilidades $P(X | \text{pai}(x_1), \dots, \text{pai}(x_n))$.

Em outras palavras, Zhang e Poole (1994) definem uma rede bayesiana como:

Dada uma rede bayesiana $N(V, A, P)$ onde:

1. V é um conjunto de variáveis
2. A é um conjunto de arcos, que em conjunto com V constituem um grafo acíclico direcionado $G = (V, A)$
3. $P = \{P(v | \pi_v) : v \in V\}$, onde π_v corresponde ao conjunto de pais de v . Colocando em palavras, P é o conjunto de probabilidades condicionais de todas as variáveis, dado seus pais. Notar que, quando v for um nó raiz, π_v será um conjunto vazio. Nestes casos, a expressão $P(v | \pi_v)$ será a probabilidade a priori de v .

Distribuição da conjunção de probabilidades

Uma rede bayesiana tem a habilidade de codificar a distribuição da conjunção de probabilidades de uma gama de variáveis aleatórias X do domínio de um problema (MADSEN *et al.*, 2005). Por sua vez, a distribuição da

conjunção de probabilidades pode ser descrita como os produtos das distribuições das probabilidades condicionais de todos os nós do grafo condicionados às variáveis raiz ou pais. Em termos gerais, para um DAG com X variáveis aleatórias $\mathbf{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ pode-se utilizar repetidamente uma regra fundamental para decompor esta gama de variáveis em produtos das distribuições da probabilidade condicional conforme a regra da cadeia.

Regra da Cadeia

Para a distribuição de probabilidade $P(\mathbf{X})$ tendo em consideração um conjunto de variáveis $\mathbf{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ pode-se utilizar a regra fundamental de repetidamente decompô-la no produto da distribuição da probabilidade condicional (MADSEN *et al.*, 2005).

$$\begin{aligned}
 P(\mathbf{X}) &= P(X_1 | X_2, \dots, X_n) \cdot P(X_2, \dots, X_n) \\
 P(\mathbf{X}) &= P(X_1 | X_2, \dots, X_n) \cdot P(X_2 | X_3, \dots, X_n) \dots P(X_{n-1} | X_n) \cdot P(X_n) \\
 P(\mathbf{X}) &= \prod_{i=1}^n P(X_i | X_{i+1}, \dots, X_n)
 \end{aligned} \tag{9}$$

Adaptando esta regra a Redes Bayesianas, para um DAG com N variáveis aleatórias x a distribuição da conjunção de probabilidades é dada por:

$$P(\mathbf{X}) = \prod_{i=1}^n P(x_i | \text{Pai}(x_i)) \tag{10}$$

Onde $\text{Pai}(x_i)$ denotam os estados dos nós pais i e $\mathbf{X} = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$.

3.3.1

Representação gráfica

A distribuição de probabilidades condicionais de redes são representadas na forma $P(\mathbf{C} | \mathbf{A}, \mathbf{B})$ onde A e B seriam variáveis únicas e C é uma gama de variáveis. A e B são algumas vezes denominados cabeça e C cauda. Esta relação entre A, B e $\mathbf{C} = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ pode ser representada graficamente como um DAG conforme ilustrado na Figura 5.

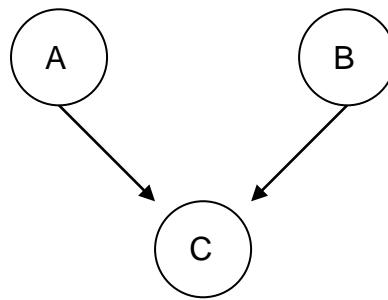


Figura 5: Grafo construído a partir de variáveis e suas relações.

Exemplo 1 (adaptado de SOBERANIS, 2010): Considere a rede bayesiana na Figura 6 onde A , B e C são variáveis aleatórias.

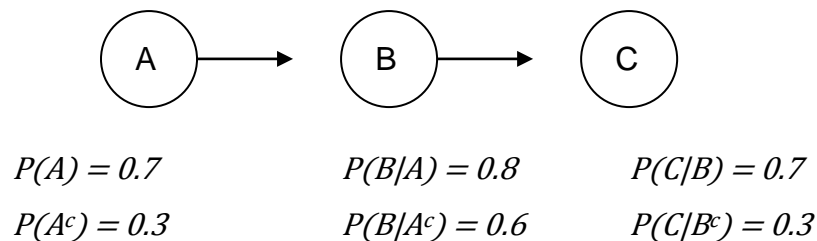


Figura 6: Figura gráfico DAG com suas distribuições de probabilidade condicionais. Adaptado de Soberanis (2010).

Em cada nó calcula-se a probabilidade condicional associada a este nó. Os arcos representam a influência de A em B e de A e B em C . Baseado nas probabilidades associadas a cada nó da figura 6 e repetindo a aplicação da distribuição da conjunção de probabilidades, pode-se calcular as probabilidades de B e C de acordo com a probabilidade de seu pai, o nó A , aplicando o teorema de Bayes:

$$P(B) = P(B|A) P(A) + P(B|A^c) P(A^c) = (0.8)(0.7) + (0.6)(0.3) = 0.74$$

$$P(C) = P(C|B) P(B) + P(C|B^c) P(B^c) = (0.7)(0.74) + (0.3)(0.26) = 0.596$$

As probabilidades de B e C foram calculadas a partir das informações dos pais passadas pela rede considerando-se as probabilidades dos nós pais utilizando o teorema de Bayes. Podemos agora reescrever a rede bayesiana com as probabilidades obtidas:

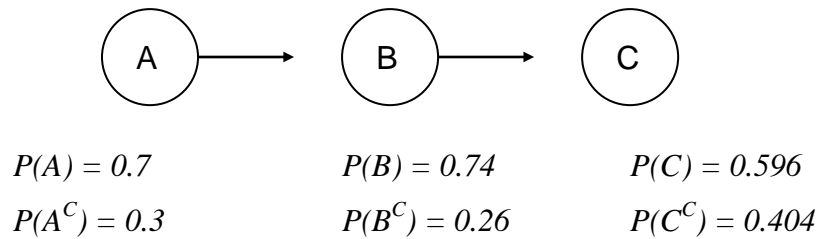


Figura 7: Figura gráfico DAG com suas distribuições de probabilidade a posteriori. Adaptado de Soberanis (2010).

As redes bayesianas nos permitem calcular quase qualquer combinação ou circunstância a partir de um número pequeno de probabilidades, se relacionando apenas com os nós vizinhos (CHARNIAK, 1991).

Os arcos em uma rede bayesiana especificam as relações de independência que devem ser assumidas pelas variáveis aleatórias (CHARNIAK, 1991). Qualquer par de nós não conectados ou não adjacentes, indica a independência entre estes nós (MADSEN *et al.*, 2005). As relações de independência também determinam qual informação sobre probabilidade são requeridas para especificar a distribuição de probabilidade entre as variáveis da rede. O DAG coloca em evidência as relações de independência condicional e para se obter informação sobre determinado nó basta conhecer os nós pais, filhos e os outros pais de seus filhos, se possuírem.

A relação de dependência de uma variável a a uma variável b em uma rede bayesiana dada uma evidência $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ ocorre se existe um caminho d que conecta a a b , dado E .

Uma rede Bayesiana é a representação correta de um domínio caso a condição de Markov seja satisfeita. A condição de Markov é definida por Neapolitan (2003) como:

Suponha a distribuição da conjunção de probabilidade das variáveis aleatórias em um conjunto de nós V em um DAG! $G = (V, E)$. A representação do grafo G satisfaz a condição de Markov se, para cada variável $X \in V$, X for condicionalmente independente dos nós não descendentes dados seus pais. A condição de Markov afirma que as variáveis não-descendentes não fornecem informações adicionais sobre a variável em questão. Desta definição derivam duas propriedades markonianas:

1. Independência Condicional: Um nó é condicionlamente independente de nós não descendentes, dado seus nós pais. Em outras palavras, para dispor de informações de um evento E ocorrer, possuir informações sobre um evento não descentente de E , não modifica a incerteza sobre E .

2. Modularidade: a lei aplicada a um nó, levando-se em consideração todo o modelo, só depende dos pais, dos filhos e de outros pais de filhos.

De forma a bem ilustrar a aplicação das propriedades markonianas serão exemplificadas as duas propriedades.

Exemplo 2 (adaptado de SOBERANIS, 2010): Aplicação das propriedades markovianas.

Considerando os dados do exemplo 1, pode-se descrever a distribuição de probabilidades e as condições de dependência e independência em redes bayesianas conforme aplicação da regra da cadeia. A probabilidade do evento conjunto de A, B, C é dado por $P(A, B, C) = P(C | A, B) \cdot P(A, B)$.

Utilizando-se a fórmula (10) $P(X) = \prod_{i=1}^n P(x_i | \text{Pai}(x_i))$ pode-se reescrever a equação para obtenção da probabilidade conjunta de A, B e C :

$$P(A, B, C) = P(C | A, B) \cdot P(A, B)$$

$$P(A, B, C) = P(C | A, B) \cdot P(B | A) \cdot P(A)$$

Desta forma calculando-se o resultado tem-se que:

$$P(A, B, C) = (0,596) \cdot (0,74) \cdot (0,7) = 0,309$$

Exemplo 3: Aplicação da propriedade de modularidade em relação ao grafo da figura 8 podemos descrever a $P(E)$ em:

$$P(E|A,B,C,D,F,G,H) = P(E|A,B,D,G)$$

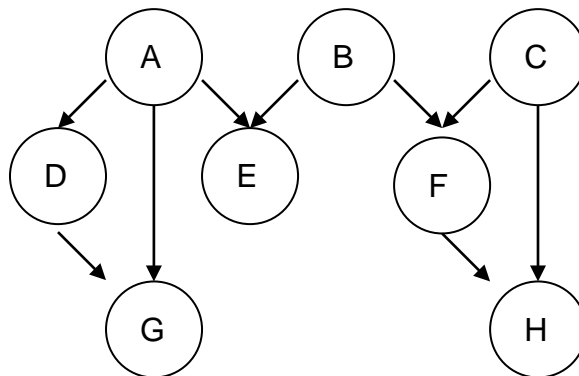


Figura 8: Modularidade de um nó, levando-se em consideração todas as relações do grafo.

As propriedades markonianas denotam que, após assumir as relações de independência, a necessidade de se estabelecer probabilidades fica resumida aos nós raízes (ou pais) e posteriormente, de calcular as probabilidades condicionais a todos os nós que não sejam raiz dadas todas as combinações possíveis de seus predecessores diretos. Desta forma, as redes bayesianas conseguem capturar as propriedades das relações tanto de dependências condicionais como de independências, associadas às variáveis representadas na rede (MADSEN *et al.*, 2005).

Queiroz (2008) expressa em outras palavras as condições que devem ser satisfeitas ao construir DAGs causais. Os cuidados que devem ser tomados para que a condição de Markov seja sempre satisfeita na distribuição conjunta das variáveis do grafo são a ausência de causas comuns ocultas, a ausência de viés de seleção e a ausência de laço de realimentação causal.

Deve-se ter a garantia da não existência de causas comuns ocultas. Por exemplo, se duas variáveis X e Y possuem uma causa comum C , então há uma dependência entre X e Y através de C . Se a causa comum for conhecida, então X e Y tornam-se independentes. Se C for uma causa oculta, ou seja, não estiver presente no grafo com arestas apontando para X e Y , haverá uma dependência entre elas que a condição de Markov identificará como independência. Outra violação da condição de Markov, similar a não incluir uma causa comum, é o caso de viés de seleção, que pode ocorrer quando duas variáveis são causas comuns de outra não observada (oculta). Neste caso, a condição de Markov

identificará independência entre as duas variáveis observadas, que pode não ser verdade para alguma população (onde o efeito é conhecido).

Por fim, deve-se sempre garantir que se uma variável X é a causa de Y então Y não é a causa de X , isto é, não existem laços de realimentação causais, de forma que o grafo associado é realmente direcionado acíclico (QUEIROZ, 2008).

3.3.2

Inferência em redes bayesianas

Uma das tarefas mais importantes das redes Bayesianas consiste em obter estimativas de probabilidades de eventos relacionados aos dados, a medida que novas informações ou evidências sejam conhecidas. Esse processo é denominado inferência em redes bayesianas (LUNA, 2004). Normalmente a construção da rede bayesiana é realizada com um procedimento iterativo onde os nós e seus estados e os arcos que ligam estes nós são atualizados iterativamente (MADSEN *et al.*, 2005).

A representação do grafo mais simples com apenas dois nós, representando a relação de causa e efeito entre os mesmos, pode explicar intuitivamente o conceito de inferência em redes bayesianas. Em um modelo, a direção dos arcos vai dos pais em direção aos nós filhos, onde os nós pais assumem um papel de “causa” e os nós filhos assumem o papel de “efeito”. Para se aprender alguma coisa sobre a “causa”, no caso da representação gráfica da Figura 9, o parâmetro θ significa buscar qual seria a lei condicional de θ levando-se em consideração a observação y . Sob este ponto de vista, o arco que liga a causa e o efeito observável poderia ser invertido.

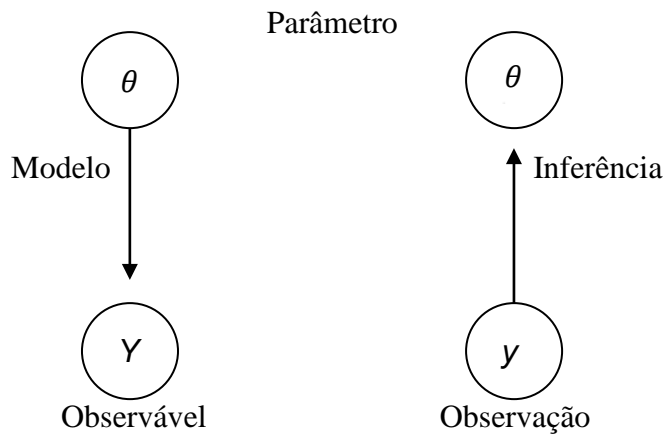


Figura 9: O Grafo mais simples – Representação da inferência.
Adaptado de Boreux *et al.* (2010).

Assim, a inferência bayesiana consiste em inverter a direção do arco, ou seja, apontá-la para os parâmetros (causas) partindo-se das observações (efeitos), levando-se em consideração a experiência (histórico).

Considere duas variáveis aleatórias A e B , o modelo $P(A, B)$ disponível através da fatorização de $P(A|B) \cdot P(B)$ e observação da situação onde $A=a$. O teorema de Bayes poderia ser reescrito na forma:

$$P(B|a) = \frac{P(a|B) \cdot P(B)}{P(a)} \quad (11)$$

Onde $P(B)$ é a probabilidade a priori de B ; $P(B|a)$ é a probabilidade a posteriori de B , isto é a probabilidade de B após conhecer a evidência a ; $P(a|B)$ é a verossimilhança da evidência a dada a hipótese B , e $P(a)$ é um fator de normalização.

Pode-se expressar a fórmula em termos proporcionais, sem o fator de normalização $P(a)$, como na equação abaixo (LUNA, 2004):

Em termos proporcionais,

$$P(B|a) \propto P(a|B) \cdot P(B) \quad (12)$$

ou seja, a *distribuição de probabilidade a posteriori* é proporcional a *distribuição a priori* \times *Verossimilhança*.

A verossimilhança é definida como uma função dos parâmetros desconhecidos, condicionais às informações. No paradigma bayesiano a verossimilhança é a densidade de probabilidade das informações condicionais dos parâmetros desconhecidos. A verossimilhança ou em inglês *likelihood*,

demonstra o papel da nova informação, relacionando-a às incertezas a priori e a posteriori. Ela deve ser interpretada como um peso a ser dado para $P(A = a|B)$ ou como uma escala de suporte comparativo emprestada pelo conhecimento de B para todos os valores possíveis de A. O teorema de Bayes pesa a informação a priori e a informação observada (data) de acordo com as informações disponíveis no modelo para derivar na distribuição a posteriori. Se a informação a priori for vaga e insubstancial, então se chegará a pesos negligíveis na síntese do evento observado e a distribuição a posteriori será resultado exclusivamente do evento observado. Assim a verossimilhança pode ser interpretada como a probabilidade a posteriori que se tem quando há informação disponível (O'HAGAN *et al.*, 2003; SINGPURWALLA, 2006).

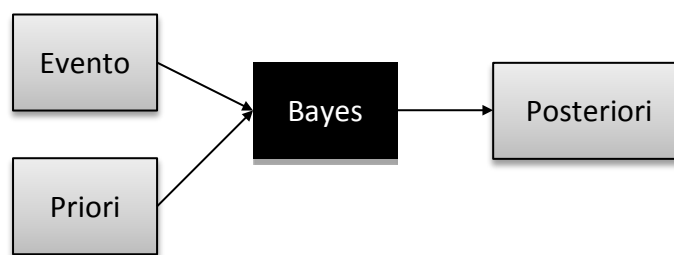


Figura 10: Síntese de informação do teorema de Bayes. Adaptado de O'Hagan *et al.* (2003).

Em relação à distribuição a posteriori, na metodologia bayesiana se interpreta que um dado evento A não é um evento observável com a definição clássica da probabilidade de ocorrência, mas sim um conjunto de parâmetros não observáveis em um modelo estatístico. Neste caso, diz-se que a distribuição a posteriori é proporcional ao índice de verossimilhança multiplicado pela probabilidade a priori.

As probabilidades subjetivas, diferentemente das probabilidades relativas não podem ser obtidas por simples repetição de um experimento. Ela é a medida do nível de “confiança” que se tem sobre a verdade de uma determinada proposição. De acordo com Ferreira e Borenstein (2012), a distribuição de probabilidade a priori reflete a crença do agente avaliador antes que qualquer observação seja feita e a probabilidade a posteriori representa a crença do agente avaliador após a observação ser feita.

A probabilidade a posteriori das redes bayesianas representa a probabilidade da hipótese B_i após considerado o efeito da evidência e da experiência passada A . O termo $P(A|B_i)$ é a probabilidade a priori de A considerando somente o evento B_i . Desta forma a probabilidade a priori pode ser vista como a probabilidade subjetiva de ocorrência da hipótese B_i baseado em conhecimentos históricos (LOCKAMY III, 2011).

O processo de obtenção da probabilidade a posteriori a partir da probabilidade a priori é chamado de Inferência Bayesiana. A inferência em redes bayesianas tem a propriedade de computar a distribuição de probabilidades posterior para um conjunto de variáveis de consulta dada uma evidência (MARQUES e DUTRA, 2008).

Como destacado por (RUSSELL e NORVIG, 2004), inferências podem ser realizadas sobre redes Bayesianas, em quatro maneiras distintas:

1. Diagnósticos: partindo dos efeitos para as causas;
2. Causa: partindo das causas para os efeitos;
3. Intercasual: entre causas de um efeito comum;
4. Mistas: combinação de dois ou mais tipos descritos acima.

Não são encontrados estudos que provem qual técnica de inferência pode ser considerada a melhor para análise de riscos (PAI *et al.*, 2003). As probabilidades condicionais a priori podem ser obtidas com dados históricos ou estimadas por especialistas. A ideia básica de se utilizar as probabilidades a priori é que se assume que o futuro possui padrões de comportamento similar com o passado.

A probabilidade bayesiana é portanto uma revisão das probabilidades á luz das observações atuais do eventos, já que pode ser inserida qualquer observação ou evidência em qualquer nó da rede bayesiana e utilizar-se do conceito de propagação para atualizar as probabilidades marginais de todos as variáveis não observadas ou identificadas. Tal procedimento permite alavancar análises poderosas que não seriam possíveis com outros métodos estatísticos. A aplicação de redes bayesianas permitem modelar com facilidade e refletir sobre as incertezas (BASU *et al.*, 2008).

3.3.3

Modelagem de redes bayesianas

De acordo com Singpurwalla (2006), o uso formal da Lei de Bayes é somente um aspecto do paradigma bayesiano. Uma mera utilização de informações não necessariamente implica na aderência com o paradigma bayesiano. Uma caracterização mais profunda do paradigma bayesiano é o uso sistemático do conceito de probabilidades subjetivas ou pessoais. A aderência a este paradigma elimina a necessidade de consideração de outras formas de se descrever a incerteza, como limites de confiança, níveis de significância e testes de hipótese.

Para a construção de uma rede bayesiana é necessário realizar uma boa representação do problema através da tabela de conjunção de probabilidades. Isto significa que certas condições devem ser satisfeitas e que a especificação das variáveis e seus valores devem ser precisos o suficiente para satisfazer os requerimentos da situação modelada e representar corretamente o domínio do problema. A representação do domínio do problema significa relacionar de forma correta as condições de nós pais e filhos, de forma que o nó pai contenha todas os nós que influenciam um dado nó filho. São as relações de independência condicionais entre as variáveis que devem guiar a construção da topologia da rede (MARQUES e DUTRA, 2008; LUNA, 2004). Estas relações, se não modeladas de forma correta, podem resultar em caminhos incorretos de propagação das probabilidades.

Nadkarni (2004) define duas diferentes abordagens para a construção de redes bayesianas – abordagem baseada em eventos observados e abordagem baseada no conhecimento. A abordagem baseada em eventos utiliza a semântica da independência condicional das redes para induzir nos modelos a partir dos eventos observados. Já a abordagem baseada no conhecimento é útil em situações onde o domínio do conhecimento é crucial e a disponibilidade de eventos é escassa. A elicitación do conhecimento qualitativo dos humanos é crítico para a construção de redes bayesianas, já que o processo de inferência produzido pelas redes bayesianas são mais sensíveis à estrutura qualitativa do que às probabilidades quantitativas associadas à estrutura. Consequentemente, as redes bayesianas mais efetivas são aquelas que combinam uma estrutura

qualitativa baseada no conhecimento de especialistas com as probabilidades quantitativas identificadas nas informações históricas disponíveis.

Para a construção de uma rede bayesiana foram elencadas as etapas realizadas no processo de modelagem de uma situação a fim de obter informações adicionais sobre ela e para isso utiliza-se da inferência bayesiana (NEAPOLITAN, 2003; MARQUES e DUTRA, 2008):

1. Identificação das variáveis aleatórias do modelo, que representaram as características ou causas e efeitos dentro da situação. Isto significa a escolha de variáveis X_i que representem de forma adequada o domínio do problema e a ordem correta das variáveis.
2. Determinação do conjunto mutuamente exclusivo de valores para cada uma das variáveis. Esses valores podem ser obtidos considerando os diferentes estados que a característica pode estar;
3. Decidir as probabilidades de uma variável aleatória, ou seja, calcular a distribuição das probabilidades, o que nem sempre pode ser obtido diretamente;
4. Utilizar os relacionamentos entre variáveis para identificar as dependências e posteriormente calcular as probabilidades condicionais para a obtenção da distribuição das probabilidades para as variáveis.

Logicamente a obtenção da distribuição de probabilidades é uma parte crítica da modelagem de uma rede bayesiana. Em diversas situações, as medidas de verossimilhança e probabilidades a priori podem ser estimadas empiricamente. Contudo, se uma determinada informação for insuficiente ou não estiver disponível, pode-se utilizar estimativas subjetivas baseadas em experiências de especialistas. De acordo com Fox (2010), a especificação das probabilidades a priori são subjetivas, já que representam as ideias e conhecimentos do pesquisador em relação às informações previamente disponíveis. Desta forma, as probabilidades a priori representam muito o conhecimento do pesquisador e não são arbitrárias, diferentes de outros métodos estatísticos.

De acordo com Lunn *et al.* (2012), muitas vezes a necessidade de determinação da probabilidade a priori para os parâmetros do modelo, que acabam trazendo para a ciência um elemento subjetivo, é vista como algo indesejável. Por outro lado, a probabilidade a priori é mais vezes vista como uma

força do que uma fraqueza, já que possibilita examinar o efeito de diferentes assunções em relação aos parâmetros e das próprias distribuições a priori analisando o impacto na distribuição a posteriori, quando conduzidas análises de sensibilidade.

Lunn *et al.* (2012) sugerem também que qualquer modelo estatístico requer um julgamento qualitativo, ao definir-se a estrutura e assunções de distribuições de probabilidades, independente da fonte e grau de confiança das distribuições de probabilidade. A especificação de distribuições de probabilidades a priori que contenham o mínimo de informações necessárias é um velho problema de estatística bayesiana. As probabilidades a priori podem ser baseadas em julgamentos puros, em mistura de informação e julgamento ou apenas informação. No entanto até a seleção de informações relevantes envolve um certo grau de julgamento, de forma que a especificação da distribuição de probabilidades a priori nunca é um procedimento automático.

Algumas questões tornam-se muito relevantes para a modelagem de rede bayesiana. Informações não disponíveis são muito comuns e existe uma vasta literatura de como lidar com este tipo de problema. Em um modelo de rede bayesiano, a falta de informações pode ser tratada como quantidades adicionais não conhecidas para as quais uma distribuição de probabilidade a posteriori pode ser estimada.

Caso se julgue necessário o estabelecimento de um peso dado para as informações subjetivas em relação aos dados históricos, o mesmo pode ser configurado na maioria dos algoritmos, sendo expresso como um tamanho de amostra equivalente, que indica o grau de confiança nas probabilidades condicionais subjetivas. Assim, pode-se entender as informações alimentadas pelo especialista como se tivessem sido obtidas de uma amostra igual ao tamanho de amostra equivalente informado (QUEIROZ, 2008).

Utilizando-se a estrutura de modelos gráficos, o problema fica limitado a especificar no grafo distribuições a priori aos nós que não possuem pais (nós “fundadores”). Com a situação modelada e com as probabilidades calculadas é possível inferir qualquer indagação sobre a situação.

3.3.4

Algoritmos para resolução de inferências

Com a rede Bayesiana definida, pode-se extrair conhecimento nela representado através de um processo de inferência. A atribuição de uma inferência probabilística é computar a distribuição de probabilidades posterior para um conjunto de variáveis de consulta e utilizar as informações existentes na Rede Bayesiana. A atribuição de um sistema de redes bayesianas é computar a distribuição de probabilidade condicional para um conjunto de variáveis de consulta, dado os valores de um conjunto de variáveis de evidência.

Luna (2004) explica o processo de inferência como um conjunto de variáveis $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ associadas a um domínio de dados e uma função de probabilidade $P(X)$ para X . Quando se dispõe de certa evidência, ou seja, quando é conhecido um subconjunto de variáveis $E \subset X$ com valores associados $X_i = e_i$ para $X_i \in E$, o processo de propagação deve considerar esses valores no cálculo das novas probabilidades dos nós. X sofre a influência causal π de seus pais, e a influência diagnóstica λ de seus filhos. Quando uma evidência externa impacta o nó X , este atualiza sua crença $P(X|e)$ e a propaga para cada um de seus pais e para cada um de seus filhos. Quando uma evidência de um pai (mensagem π) chega ao filho X , o filho atualiza sua crença e a propaga a cada um de seus filhos, e a cada um de seus pais, exceto àquele que lhe enviou a mensagem. Quando uma evidência de um filho (mensagem λ) chega ao pai X , X atualiza sua crença e a propaga para cada um de seus pais, e para cada um de seus filhos, exceto àquele que lhe enviou a mensagem.

Em uma rede bayesiana, pode-se utilizar diferentes métodos de inferência: a inferência exata ou aproximada. A decisão sobre utilização do método de inferência mais adequado depende da complexidade da rede. Em uma rede, o número de probabilidades condicionais cresce exponencialmente com o número de nós e estados possíveis dos nós. Quando o número de fatores envolvidos no método de inferência exata tornam a rede muito complexa para ser calculada, recomenda-se a utilização de técnicas de inferência aproximadas. (PAI *et al.*, 2003).

De acordo com Castilho *et al.* (1997), um método de inferência é denominado exato se o mesmo realiza o cálculo das probabilidades a posteriori através de somatórios e combinações de valores, sem que haja outro erro que não seja de arredondamento no cálculo. São relacionados três tipos distintos de algoritmos de inferência exatos: Enumeração, Eliminação de Variáveis e Árvores de Junção.

A ideia básica do algoritmo de Enumeração é percorrer os nós da rede propagando as evidências e extraíndo as probabilidades para que sejam feitos os somatórios e multiplicações necessárias. A complexidade do algoritmo de Enumeração é linear em relação ao número de variáveis.

Para se reduzir este número de probabilidades condicionais na inferência exata, o algoritmo de Eliminação de Variáveis pode ser utilizado. O algoritmo de Enumeração, descrito anteriormente, pode ser substancialmente melhorado eliminando-se cálculos repetidos. A ideia é efetuar os cálculos apenas uma vez e guardar os resultados para uso posterior.

Árvore de Junção é um método geral de propagação que aproveita a estrutura da rede para propagar as evidências. O algoritmo cria uma estrutura intermediária, na forma de uma árvore com características especiais denominada árvore de junção, cujos nós são determinados por subconjuntos das variáveis da rede bayesiana original. A estrutura da árvore de junção associada à rede original é fixa, sendo os cálculos realizados localmente no sentido de que um nó necessita comunicar-se somente com os seus vizinhos.

Já a inferência bayesiana aproximada é o procedimento geral para a construção da distribuição de probabilidades posteriores para os objetos de interesse, dadas as probabilidades a priori utilizando as informações existentes na Rede Bayesiana. Os algoritmos considerados dentro do grupo de métodos aproximados utilizam técnicas distintas de simulação para obter valores aproximados das probabilidades. Estes métodos podem ser classificados em: algoritmos de simulação estocástica, métodos de simplificação de modelos e métodos baseados em busca e propagação de crença em ciclos (CASTILHO *et al.*, 1997).

Segundo Queiroz (2008), somente há duas décadas atrás, com a criação do algoritmo de Monte Carlo conhecido em inglês como MCMC- Markov Chain Monte Carlo, a utilização de modelos bayesianos foi ampliada. O MCMC é um

processo iterativo que gera uma série de valores conhecidos como cadeias para cada parâmetro de um modelo. Em relação aos algoritmos aproximados existentes, os mesmos utilizam um conjunto de técnicas para simular amostras da distribuição de probabilidade a posteriori dado um modelo, uma verossimilhança (likelihood) e um evento (CASTILHO *et al.*, 1997 ; RUSSEL e NORVIG, 2004).

São encontrados diversos algoritmos para a realização de inferências aproximadas. O algoritmo Forward Sampling gera amostras a partir da distribuição a priori especificada pela rede, sorteando as variáveis sem pais, segundo suas probabilidades a priori. Em seguida, sorteia os filhos deles, segundo suas probabilidades condicionadas aos pais, e assim sucessivamente. Essa geração de configurações para as variáveis é repetida várias vezes. Com a introdução de evidências, o algoritmo simplesmente descarta as configurações que não se adequam à evidência. O algoritmo é eficiente em redes menores, porém inútil para problemas complexos devido ao grande número de amostras rejeitadas.

O algoritmo Likelihood Weighting (FUNG & CHANG, 1990) é o método de simulação estocástica mais implementado para inferência em redes bayesianas, em parte por causa da sua fácil implementação e rápido tempo de convergência quando comparado com o algoritmo Forward Sampling. O algoritmo fixa os valores para as variáveis de evidência E e efetua a amostragem apenas das amostragens restantes X e Y , garantindo que cada evento gerado será consistente com a evidência.

O Algoritmo Gibbs Sampling é iniciado a partir de uma configuração inicial válida respeitando as evidências e sorteia o estado das outras variáveis. A estimativa do algoritmo é baseada na probabilidade da variável fazer a transição de um estado para outro denominada probabilidade de transição. □ Algoritmo é o mais poderoso dentre os listados: melhor convergência, considerando o tempo e número de simulações (QUEIROZ, 2008; RUSSEL e NORVIG, 2004).

O Algoritmo Gibbs Weighting analisa a mesma distribuição que o algoritmo Gibbs Sampling e gera amostras da mesma forma que esse algoritmo, porém, atualiza a contagem segundo a função de ponderação, como o algoritmo Likelihood Weighting. As variáveis de evidência não são sorteadas, mas recebem o valor da evidências. Utiliza-se como peso as probabilidades

condicionais para saber o quão provável é a configuração gerada. Desempenho similar aos de seus precursores Gibbs Sampling e Likelihood Weighting e boa convergência considerando o número de simulações, porém requer muito tempo para a convergência. □

3.3.4.1

Programas de simulação

Dos programas de simulação analisados para acomodação do modelo deste trabalho, o WinBUGS (LUNN *et al.*, 2012) é um programa que trata dos mais diversos modelos estatísticos sob a abordagem bayesiana e permite profissionais de diversas áreas a conduzirem suas próprias análises baseadas em redes bayesianas de modelos estatísticos complexos e customizados. Além disso, trata-se do programa para análise bayesiana mais utilizado no mundo (WOODWARD, 2012). Essencialmente, o WinBUGS é uma caixa preta que utiliza algoritmos de cadeia de markov para a construção de modelos baseados em um conjunto de informações para conduzir simulações iterativas. O algoritmo utilizado pelo WinBUGS é o Gibbs Sampling que utiliza os conceitos de cadeias de Markov para produzirem a distribuição a posteriori de um parâmetro.

Apesar do WinBUGS disponibilizar diversas funcionalidades para a grande maioria de análises de dados, a necessidade de se ter conhecimentos suficientes em relação à linguagem de programação do programa dificulta sua utilização, sendo muito difícil transpor a inevitável barreira da curva de aprendizado associada à utilização de novos programas. O que mais dificultou a utilização do WinBugs é o fato da interface do programa não acomodar os modelos gráficos das redes bayesianas, tornando o processo de criação das redes bayesianas mais difícil e pouco intuitivo.

Desta forma, buscou-se um outro programa que acomodasse a modelagem gráfica dos modelos na forma de redes bayesianas. Foram testados dois programas, o HUGIN (Andersen *et al.*, 1989) e o BayesiaLab que é um produto da empresa Bayesia. Os dois programas disponibilizam um programa demonstrativo sem custos, mas com limitações em relação aos modelos gerados e aos prazos de utilização.

O HUGIN por sua vez, não possui limitação de prazo de utilização e está limitado a trabalhar com até 50 “estados” e aprendizagem com mais de 500 casos. O algoritmo utilizado pelo HUGIN para a realização de inferências é exato, tratando-se do algoritmo Árvore de Junção.

3.4

Modelos de redes bayesianas aplicados ao risco de suprimento

Existem infinitas maneiras de se relacionar causa e efeito em uma cadeia de suprimento. Poderia-se, por exemplo, decidir por um modelo onde fossem identificadas as causas raízes associadas a cada indicador de performance conforme ilustrado pela figura 11. No entanto, um modelo com o este poderia ser extremamente complexo e difícil de ser construído devido a dificuldade de se estimar a probabilidade para cada causa raiz, assim como as relações e os efeitos das consequências.

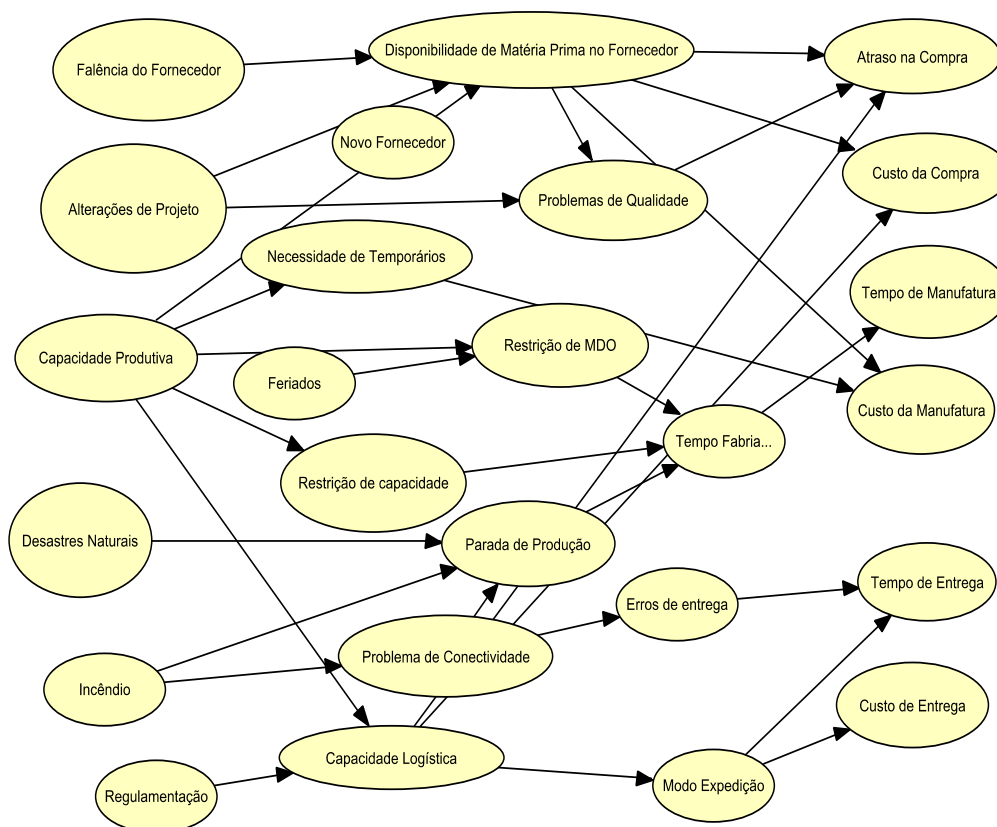


Figura 11: Adaptado de BASU *et al.*, 2008.

Fica claro com o exemplo anterior que, para a construção da rede bayesiana, faz-se necessário o estabelecimento das relações de causa e efeito. Desta forma, serão elencadas as causas possíveis da ocorrência de uma ruptura de fornecimento associada a um fornecedor, definindo para cada uma delas sua probabilidade de ocorrência. A probabilidade de ruptura associada a cada evento servirá conseqüentemente para identificar a probabilidade conjunta de ruptura de cada fornecedor, ou seja, o risco de ruptura gerado pelo fornecedor em uma cadeia de suprimentos.

Dentre as várias abordagens para identificação de risco levantadas no Capítulo 2, será gerada uma abordagem fruto da adaptação das existentes que buscará expressar os riscos de suprimento associados aos fornecedores. O modelo identificará e quantificará o risco de rupturas de suprimento utilizando um cenário (framework) que mapeará os atributos dos fornecedores, o ambiente externo e seus relacionamentos e interações com os agentes externos. Este modelo conceitual pode ser representado pela Figura 12 conforme proposto por Hanfield e McCormack (2008).

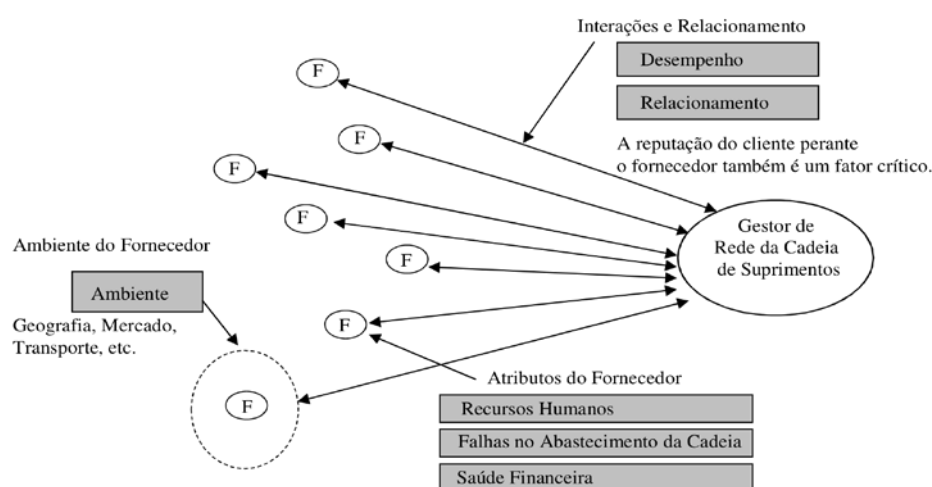


Figura 12: Modelo hipotético para gestão de riscos em cadeias de suprimento.
Fonte: Handfield e McCormack (2008).

Este modelo foi utilizado em diversas abordagens de identificação de riscos utilizando redes bayesianas tendo em vista o referencial do fornecedor em trabalhos de Lockamy III e McCormack (2012), McCormack *et al.* (2010) e Lockamy III (2011). As seis categorias de risco elencadas no modelo de Handfield e McCormack (2008) são:

- Falhas no abastecimento da cadeia ou rupturas de suprimento;

- Desempenho: que trata da qualidade, entregas no prazo, faltas do produto, etc.
- Recursos Humanos: estão relacionados com empregados, relação com o sindicato, experiência e retenção da força de trabalho, etc;
- Ambiente: relacionado a localização geográfica, situação política, distância do local de consumo, métodos de transporte.
- Relacionamento: trata da influência, níveis de cooperação, poder e alinhamento de interesses com clientes e fornecedores.
- Saúde financeira: Questões de Propriedade, saúde financeira, etc

Cada uma das categorias de rupturas podem ser resultantes de um conjunto de evento. O modelo conceitual determina que para cada categoria de risco existem diferentes eventos que podem ser determinados como as causas de rupturas no estoque de um fornecedor, o que, por sua vez, pode gerar rupturas em outros agentes, diretos ou indiretos, vinculados a este fornecedor. Devem ser associados a estes eventos, as respectivas probabilidades de ocorrência, conforme pode ser verificado pela Tabela 5.

Tabela 5: Categorias de Risco, eventos de risco e probabilidades de ocorrência.

	Categorias de Risco	Eventos	Probabilidade
PROBABILIDADE DE RISCO DO FORNECEDOR	Relacionamento	Falta de compartilhamento de dados entre cliente e fornecedor	P(E1)
		Inexperiência do fornecedor	P(E2)
		O cliente não é crítico para o fornecedor	P(E3)
		Interesses conflitantes entre cliente e fornecedor	P(E4)
	Desempenho	Controle ineficaz da qualidade dos processos e dos produtos	P(E5)
		Baixa responsividade no suporte técnico	P(E6)
		Incapacidade de melhoria contínua	P(E7)
		Falta de flexibilidade para lidar com incidentes	P(E8)
		Inabilidade de responder a variações na demanda	P(E9)
		Falhas ou atrasos na entrega	P(E10)
	Recursos Humanos	Erros ou faltas da força de trabalho	P(E11)
		Rompimento de sociedade	P(E12)
		Greve sindical	P(E13)
	Falhas no Abastecimento da Cadeia	Falhas na entrega do fornecedor de segunda ordem	P(E14)
		Mudanças no processo produtivo	P(E15)
		Falta de comunicação entre cliente e fornecedor	P(E16)
		Única fonte de suprimento	P(E17)
		Imprecisão dos dados	P(E18)
	Saúde Financeira	Revés financeiro ou falência do fornecedor	P(E19)
		Falta de compartilhamento de dados financeiros entre cliente e fornecedor	P(E20)
	Ambiente	Incapacidade de acompanhar a dinâmica do mercado	P(E21)
		Reestruturação dos processos causada por fusões ou aquisições	P(E22)
		Mudanças nas regulamentações	P(E23)
		Falhas no transporte	P(E24)
		Desastres políticos ou ambientais	P(E25)

Fonte: Handfield e McCormack (2008).

Já no modelo de LOCKAMY III (2011), são utilizadas as seis categorias de risco elencadas pelo modelo e adicionada mais uma denominada “cadeia” que foram reagrupadas em três categorias maiores de risco tendo em vista o referencial do fornecedor: estrutura da cadeia, riscos operacionais e riscos externos. Além disso, o modelo realiza uma adaptação do modelo proposto por Handfield e McCormack (2008), simplificando o mesmo em 12 eventos principais de risco.

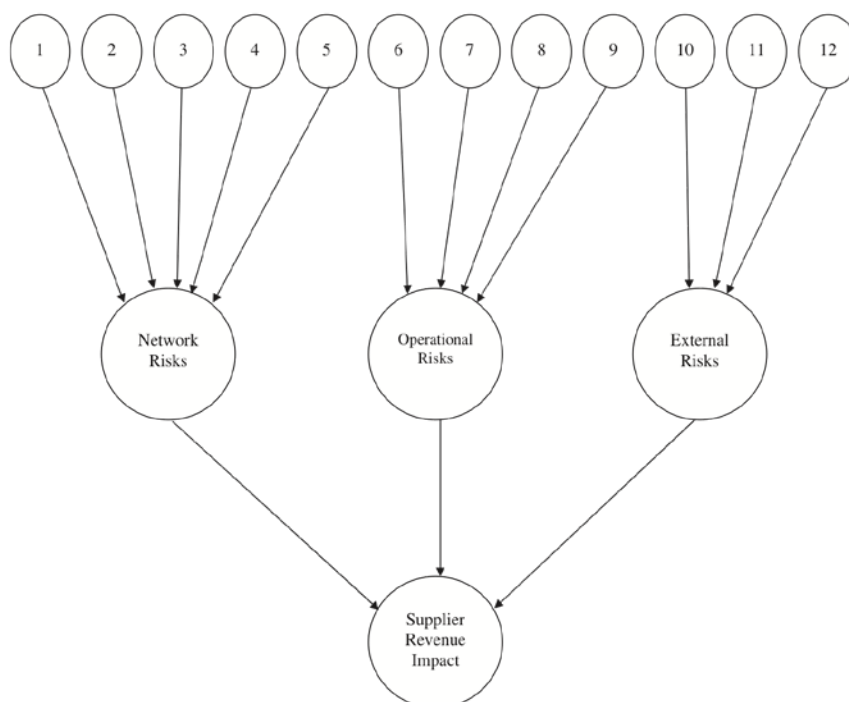


Figura 13: Modelo de rede bayesiana para avaliação de risco de suprimento.

Fonte: Lockamy III (2011). Nota para os índices da figura: 1=desalinhamento de interesses, 2=stress financeiro do fornecedor, 3=liderança para mudanças, 4=Ruptura fornecedor segunda linha, 5=desalinhamento de interesses, 6=Problemas de Qualidade, 7=problemas de entrega, 8=problemas de service, 9=problemas de RH, 10=bloqueio do fornecedor, 11= junção e aquisição.

Nos dois modelos, as probabilidades de ocorrência dos eventos associados às fontes de risco são resultado da média de eventos ainda menores, que são agrupados nas respectivas categorias. Para obtenção destas informações são aplicados questionários nos fornecedores e especialistas de supply chain e coleta de dados de fontes internas e externas à Companhia.

4

Estudo de caso e modelo proposto

Neste capítulo será apresentado o estudo de caso para a avaliação de riscos da cadeia de suprimento de fornecedores da área de Refino na Petrobras fazendo uso da aplicação de redes bayesianas, para determinar o perfil de risco dos fornecedores analisados. O objetivo da rede bayesiana é de representar o que este estudo considera como os pontos mais críticos relacionados a riscos de ruptura e que devem portanto ser gerenciados. Desta forma, serão identificados os elos da cadeia dos fornecedores analisados que estão mais expostos a falhas e que elevam a possibilidade de eventos que ocasionem rupturas de fornecimento.

Um ranking dos fornecedores avaliados é apresentado de duas formas. A primeira, não considerando a criticidade interna à Cia dos fornecimentos e a segunda levando-se em consideração estes critérios. Com a primeira avaliação deseja-se determinar os pontos mais críticos e importantes a serem gerenciados da cadeia de suprimento dos fornecedores avaliados. Com a segunda avaliação, deseja-se obter um ranking interno de fornecedores de acordo com a pontuação da primeira avaliação adicionando a criticidade interna destes fornecimentos de modo a possibilitar uma eventual priorização da gestão dos fornecedores.

O objetivo do modelo é possibilitar o desenvolvimento e adoção de estratégias e diretrizes para o gerenciamento dos riscos identificados. A aplicação da metodologia permitirá que os gestores tomem conhecimento do grau de confiança dos fornecedores analisados, além da habilidade do modelo de demonstrar quais os elos da cadeia são mais críticos e que necessitam de uma atenção e atuação diferenciada, de modo a mitigar os riscos observados.

4.1

Estrutura da Rede

Para o modelo proposto, é necessário traduzir a estratégia de avaliação de riscos em um conjunto de critérios que avaliem os riscos associados aos fornecimentos. Esta tarefa requer uma avaliação muitas vezes subjetiva de

especialistas e de equipes multifuncionais. Para Ferreira e Borenstein (2012), a seleção dos critérios de avaliação, o ponto inicial do problema, e é tido como um dos mais difíceis no processo de tomada de decisão. Neste mesmo assunto para Woodward (2012), quando se existe um número grande de potenciais variáveis de entrada do modelo, a tarefa de escolha de quais variáveis devem ser consideradas, torna-se desafiadora.

Apesar de não existir um método universal para a seleção e estruturação dos critérios, são apontados aspectos relevantes para a seleção dos mesmos, como: os critérios escolhidos devem representar os indicadores de performance, o conjunto de critérios escolhidos devem representar bem todos os aspectos mais críticos do problema e os mesmos devem ser selecionados de uma maneira em que um mesmo aspecto não seja medido por critérios diferentes e independentes na estrutura do modelo. Um ótimo ponto de partida seria então pesquisar trabalhos anteriores na mesma área (FERREIRA e BORESTEIN, 2012).

Pode-se dividir o estudo de caso em duas propostas distintas, de acordo com a aplicação das redes bayesianas. O estudo de caso se propõe em utilizar técnicas de redes bayesianas para realizar um benchmarking de seis fornecedores de materiais de MRO selecionados na área de Refino. O índice obtido é denominado índice de perfil de risco, associado a cada fornecedor avaliado. Este índice também será ponderado pela criticidade do fornecimento e disponibilidade no mercado para configurar um índice de risco global.

A segunda proposta do estudo de caso é de aprofundar ainda mais a aplicação das técnicas de redes bayesianas, alterando-se os dados de entrada do modelo para a variável *entrega*. De modo a representar uma base de dados histórica, os dados serão simulados com uma distribuição que busque representar bem o comportamento da variável *entrega*, de forma a possibilitar uma análise crítica dos resultados das simulações.

No modelo proposto os riscos serão representados através de uma rede bayesiana e serão aplicadas para cada fornecedor separadamente, buscando-se assim identificar o perfil de risco de cada fornecedor, ou seja, quais aspectos da cadeia estão mais expostos a riscos, para então, após o conhecimento dos mesmos, buscar alternativas para mitigá-los.

O modelo propõe-se a realizar um benchmarking dos fornecedores, adaptando e utilizando como referência os 21 indicadores críticos identificados

por Handfield e McCormack (2008), considerando também aspectos dos modelos de Lockamy III (2011) que introduz a categoria denominada Cadeia, e os eventos de risco utilizados por Kao *et al.* (2005) que possibilitam incluir no modelo os componentes de risco associados à realidade operacional do fornecedor avaliado, totalizando 21 indicadores de risco não idênticos aos propostos por Handfield e McCormack (2008).

Para a modelagem causal com Redes Bayesianas é necessário obter para cada variável a distribuição de probabilidade de cada nó condicional aos seus pais. Para vértices de rede que não possuem pais, é necessário estabelecer as probabilidades de cada um dos seus estados possíveis. Para vértices que possuem pais, é necessário estabelecer as probabilidades de cada estado do vértice, estes condicionais a cada uma das combinações dos estados dos pais do vértice (QUEIROZ, 2008).

Quando o número de casos históricos for pequeno e o número de probabilidades condicionais a serem obtidas for grande, algumas combinações dos estados dos pais poderão não ser observadas no passado. Neste caso, as probabilidades condicionais ou serão obrigatoriamente informadas por um especialista ou então serão configuradas distribuições uniformes, este último demonstrando falta de conhecimento a priori.

Para a obtenção das probabilidades, o modelo é alimentado com fontes de informações diversas conforme demonstrado na Tabela 6, sendo elas obtidas a partir dos fornecimentos anteriores, da análise de especialistas de supply chain e das informações cadastrais disponíveis dos fornecedores (análise da situação financeira, certificações etc.). Algumas informações também são obtidas com os próprios fornecedores através de questionários aplicados para a identificação dos riscos relacionados com aspectos de suas cadeias de suprimento. O conjunto de índices avaliados irão gerar uma pontuação de risco para cada fornecedor.

Tabela 6: Indicadores de risco (índice) x fonte de informação. Legenda: E=Especialista de Supply Chain; F=Fornecedor; C=Cadastro.

Índice	Tipo de risco	Fonte de Informação
1	Experiência do fornecedor no segmento	E - F
2	O cliente não é crítico para o fornecedor	F
3	Revés financeiro ou falência do fornecedor	C
4	Falhas de entrega do fornecedor de segunda ordem	F
5	Gerenciamento de riscos - Compartilhamento de dados críticos com fornecedores	F
6	Alterações de programações dos fornecedores	F
7	Única fonte de suprimento	F
8	Dificuldade de mudança de fornecedor	E
9	Atraso na Entrega	E
10	Estoque de Produto acabado	F
11	Falhas no transporte (Produto perigoso ou outras restrições)	E - F
12	Problemas de qualidade na entrega	E
13	Risco de obsolescência ou prazo de validade da matéria prima	F
14	Mudanças no processo produtivo	F
15	Imprecisão dos dados	E - F
16	Variedade de Produtos	F
17	Restrição de capacidade de produção	F
18	Visibilidade de estoques internos	F
19	Erros ou faltas da força de trabalho	F
20	Rotatividade de pessoal	E - F
21	Flexibilidade para lidar com incidentes	E - F

Os índices serão configurados na rede bayesiana para avaliar o perfil de risco dos fornecedores analisados, gerando para cada um deles uma nota que representa os riscos individuais de ocorrência de um evento de ruptura de suprimento. O resultado do modelo de rede bayesiana será expressado em um índice final levando-se em consideração a configuração da rede criada para cada fornecedor, em que quanto maior for a pontuação obtida, mais exposta a riscos de rupturas estará exposta a empresa.

Para uma melhor representação da rede bayesiana, os índices de risco foram agrupados em causas básicas que serão representados pelos nós da rede bayesiana. As causas básicas utilizadas para a configuração da rede foram adaptadas dos modelos propostos por Handfield e McCormack (2008) e Lockamy III (2011) que propunham inicialmente as seguintes categorias de risco:

- Alteração de Propriedade / Rompimento de Sociedade
- Desalinhamento de Interesses
- Falência do Fornecedor
- Ruptura de Fornecimento de fornecedor de segunda linha
- Bloqueio de Fornecedor
- Desastres
- Entrega
- Problemas na Qualidade
- Problemas Operacionais
- Recursos Humanos
- Serviço

O modelo proposto exclui e agrupa algumas categorias constantes no modelo de Lockamy III (2011). O entendimento para a exclusão e agrupamento de índices de risco é que eles já estariam sendo avaliados por outros índices ou cujos riscos são difíceis de serem estimados, extremamente subjetivos, iguais para os fornecedores avaliados, ou ainda, quando possuem uma capacidade de gerenciamento quase nula, como desastres.

Além do agrupamento dos índices em causas básicas, denominadas categorias de risco, é proposta uma divisão das causas básicas em três fontes distintas de riscos, denominados *Tipo de Risco*, conforme propôs Lockamy III (2011): *da cadeia*, *externos* ou *operacionais*. A rede bayesiana é representada pela Tabela 7 relacionando os índices de risco às *Categorias de Risco* e também ao *Tipo de Risco*.

Tabela 7: Modelo de Rede Bayesiana: Tipo de Risco, Categorias de Risco e índices de Risco.

Tipo de Risco	Categoria de Risco	Índice	Índices de risco
Cadeia	Desalinhamento de Interesses	1	Experiência do fornecedor no segmento
		2	O cliente não é crítico para o fornecedor
	Falência do Fornecedor	3	Revés financeiro ou falência do fornecedor
	Ruptura de Fornecimento de fornecedor de 2 linha	4	Falhas de entrega do fornecedor de segunda ordem
		5	Gerenciamento de riscos - Compartilhamento de dados críticos com fornecedores
		6	Alterações de programação dos fornecedores
		7	Única fonte de suprimento
Externo	Bloqueio do Fornecedor	8	Dificuldade de mudança de fornecedor
Operacional	Entrega	9	Atraso na Entrega
		10	Estoque de Produto acabado
		11	Falhas no transporte (Produto perigoso ou outras restrições)
	Problemas na Qualidade	12	Problemas de qualidade na entrega
		13	Risco de obsolescência ou prazo de validade da matéria prima
	Problemas Operacionais	14	Mudanças no processo produtivo
		15	Imprecisão dos dados
		16	Variedade de Produtos
		17	Restrição de capacidade de produção
		18	Visibilidade de estoques internos
	Recursos Humanos/ Serviços	19	Erros ou faltas da força de trabalho
		20	Rotatividade de pessoal
		21	Flexibilidade para lidar com incidentes

O modelo gráfico desta rede bayesiana seguirá a representação de nós da Figura 14. A representação de nós escolhida busca criar uma rede bayesiana com a não existência de causas comuns a nós independentes, por isso é realizada a divisão em fontes distintas de risco.



Figura 14: Representação gráfica do Modelo de Risco de Suprimento para um fornecedor.

No modelo, os nós são conectados com uma seta, denominada arco para representar causalidade, indicando a direção da influência. Quando dois nós são conectados por um arco, o nó causal é denominado como o pai do nó influenciado, denominado de nó filho. Os nós filhos são condicionalmente dependentes dos nós pais. Desta forma, de acordo com a Figura 14, a probabilidade da ocorrência de eventos relacionados a risco de cadeia que podem levar a rupturas de suprimento para um fornecedor avaliado depende das probabilidades a priori associadas com as seguintes variáveis: desalinhamento de interesses, falência do fornecedor e ruptura de fornecimento de fornecedor. As probabilidades a priori associadas a problemas de entrega, problemas na qualidade, problemas operacionais e recursos humanos e serviços influenciam diretamente nos riscos operacionais. Por fim, a probabilidade da ocorrência de eventos relacionados a riscos externos depende das probabilidades a priori associadas com as variáveis bloqueio de fornecedor. As variáveis relacionadas a

bloqueio de fornecedor procuram expressar a dificuldade de alteração de fornecedor do ponto de vista da empresa contratante. A probabilidade conjunta dos nós Risco de Cadeia, Operacional e Externo são então utilizadas para definir a probabilidade associada a um fornecedor avaliado de ocorrência de eventos que podem ocasionar um impacto adverso na Empresa “compradora”.

Em redes bayesianas, todos os nós representam variáveis aleatórias. No modelo proposto, foi considerado que estas variáveis são booleanas, ou seja, podem assumir dois estados, verdadeiro e falso. O estabelecimento das probabilidade a priori e das probabilidades condicionais, significa estabelecer a probabilidades de ocorrência dos eventos relacionados a cada variável nestes dois estados.

Na medida em que segue o caminho na rede bayesiana, cria-se a nota de risco, que é gerada a partir das composições probabilísticas dos nós que fazem parte da rede. A nota do perfil de risco pode ser utilizada como uma ferramenta comparativa de risco da cadeia de suprimento para os fornecedores avaliados, levando-se em consideração o estado de seus nós no momento da avaliação da rede e do nível de serviço da cadeia.

4.2

Levantamento de informações para alimentação do modelo

Todas as probabilidades a priori (incondicionais) e sua relação com as demais variáveis, ou seja, a distribuição de probabilidades condicionais tem que ser levantadas para possibilitar a obtenção de um modelo final totalmente especificado. Assim, o desenho do modelo que fixa 21 indicadores de risco para os quais será necessário o estabelecimento de um valor, deve ser tratado em termos probabilísticos. Para a definição destes riscos, são utilizadas as mais diversas fontes de informação para a definição do modelo de preferências iniciais.

Na modelagem proposta, apenas algumas das informações podem ser obtidas empiricamente, as demais partem do conhecimento subjetivo dos gestores e especialistas.

No entanto, para a maioria dos indicadores, não existem informações disponíveis para se estimar empiricamente as probabilidades a priori e é difícil

associar o comportamento das variáveis a alguma distribuição de probabilidade conhecida. Desta forma é proposta uma metodologia para se estimar as probabilidades utilizando-se do conhecimento e experiência de especialistas de supply chain, aplicando-se questionários para a geração dos índices de risco. Estas probabilidades podem ser entendidas como a probabilidade a priori do modelo. Cabe observar que várias das perguntas são respondidas tanto internamente como externamente, englobando então o ponto de vista do agente comprador, ou seja, da empresa que está levantando seus riscos relacionados a rupturas de fornecedores, e também questões respondidas diretamente pelo fornecedor.

É intuitivo que pessoas diferentes determinem probabilidades diferentes, mas ainda assim coerentes para um mesmo evento, já que atribuição de probabilidades depende do conhecimento do dado evento (WOODWARD, 2012). Desta forma, o modelo de preferências iniciais muitas vezes é denominado subjetivo ou de probabilidades pessoais. O método bayesiano combina estas probabilidades iniciais, ou seja, as probabilidades subjetivas, com as probabilidades que emanam dos eventos observados (ou via verossimilhança do modelo), além disso, como a distribuição de probabilidades é condicional em um modelo e aos parâmetros desconhecidos, estas probabilidades também são subjetivas já que o modelo é em si, uma escolha pessoal. Apesar disso, não significa que se possa dizer que tratam-se de informações enviesadas, prejudicadas ou não científicas.

Para a obtenção das probabilidades a priori, para cada um dos critérios de medição de riscos foi realizada uma medição de preferências iniciais fazendo-se a utilização da escala de Likert contendo cinco níveis linguísticos representados pelos termos “muito baixa”, “baixa”, “média”, “alta” e “muito alta”. As preferências formuladas em termos linguísticos prestam-se naturalmente a determinação através de funções de pertinência. O número de estados possíveis de cada nó correspondem às variáveis linguísticas associadas para expressar o grau de exposição ao risco do fornecedor para cada critério. Ou seja, as possibilidades de nota para cada critério, ou estados de cada nó, são representados por um conjunto de 5 valores discretos identificados por cinco termos linguísticos. Desta forma, em termos gerais, a exposição de risco é avaliada de acordo com os seguintes termos linguísticos:

- 1-Muito Baixa;
- 2-Baixa;
- 3-Média;
- 4-Alta;
- 5-Muito Alta.

Para alguns índices, as notas foram invertidas, de forma a melhor representar o grau de exposição ao risco. As notas foram invertidas para os índices 1, 5, 10, 18 e 21.

Para cada critério e pontuação obtida nos questionários, foram realizadas análises de especialistas de maneira a refinar as pontuações obtidas, englobando nas mesmas aspectos quantitativos e qualitativos obtidos com informações históricas relacionadas a cada um dos critérios e ao relacionamento histórico para cada um dos fornecedores, quando disponíveis. Após o ajuste fino das pontuações com a experiência e informações dos especialistas, foram definidas as probabilidades a priori para cada um dos 21 indicadores de risco. Estas probabilidades a priori são a base fundamental para o modelo de rede bayesiana.

As probabilidade iniciais para os índices de risco obtidas para cada um dos 6 fornecedores distintos pode ser entendida como a probabilidade da ocorrência de evento associada aos respectivos riscos definidos pelo modelo. Desta forma, cada evento de risco pode ter dois estados possíveis relacionados a sua ocorrência, verdadeiro e falso, para os quais são associadas as respectivas probabilidades de ocorrência.

4.2.1

Seleção dos fornecedores

O trabalho de gerenciamento de riscos e de fornecedores pode onerar o processo de seleção e avaliação de fornecedores e deve, portanto, agregar de alguma forma valor ao processo de decisão e de contratação. Desta forma a seleção dos fornecedores para os quais serão avaliados os níveis de risco associados aos mesmos, deve seguir um critério de escolha.

Por se tratar de uma informação reservada à Cia, os fornecedores serão denominados por letras. Para a seleção dos fornecedores que participarão do

projeto, foram listados os fornecimentos para todo o Refino e verificados aqueles que possuem maior valor transacional com a Petrobras e cujas categorias de materiais, conceito que será melhor detalhado no item 4.3, sejam críticas para a continuidade operacional. A Tabela 8 informa os valores transacionados nos anos de 2011 e 2012, para que sejam conhecidas as ordens de grandeza dos fornecimentos associadas a cada fornecedor avaliado.

Um aspecto importante de se estabelecer é que todos os fornecedores selecionados possuem contratos de longo prazo firmados com o Refino. Alguns fornecimentos são contínuos e outros são mais esporádicos, como poderá ser percebido pela quantidade de pedidos emitidos.

Tabela 8: Valores transacionados nos últimos 2 anos por fornecedor.

Fornecedor	Quantidade de Pedidos	Valor dos Pedidos
A	13	≈R\$44 Milhões
B	59	≈R\$37 Milhões
C	366	≈R\$29 Milhões
D	561	≈R\$28 Milhões
E	141	≈R\$16 Milhões
F	173	≈R\$15 Milhões

4.2.2

Estabelecimento das probabilidades, cálculo da rede bayesiana e ranking dos fornecedores

A seguir serão demonstradas as tabelas com os resultados após a coleta de dados das análises internas e dos fornecedores para estabelecimento dos índices.

Tabela 9: Probabilidades para cada índice de risco por fornecedor.

Índice	Tipo de risco	A	B	C	D	E	F
1	Experiência do fornecedor no segmento	0.2	0.2	0.2	0.2	0.5	0.2
2	O cliente não é crítico para o fornecedor	0.8	0.6	0.6	0.4	0.4	0.4
3	Revés financeiro ou falência do fornecedor	0.2	0.2	0.2	0.2	0.6	0.2
4	Falhas de entrega do fornecedor de segunda ordem	0.4	0.6	0.4	0.6	0.8	0.4
5	Gerenciamento de riscos: Compartilhamento de dados críticos com fornecedores	0.4	0.6	0.4	0.6	0.8	0.4
6	Alterações de programação dos fornecedores	0.6	0.6	0.4	0.8	0.8	0.4
7	Única fonte de suprimento – forn 2 linha	0.2	0.4	0.2	0.8	0.6	0.2
8	Dificuldade de mudança de fornecedor	0.4	0.8	0.8	0.8	0.6	0.4
9	Atraso na Entrega	0.4	0.2	0.6	0.4	0.4	0.6
10	Estoque de Produto acabado	0.4	0.2	0.4	0.8	0.2	0.2
11	Falhas no transporte (Produto perigoso ou outras restrições)	0.6	0.9	0.4	0.2	0.8	1
12	Problemas de qualidade na entrega	0.2	0.2	0.4	0.8	0.4	0.2
13	Risco de obsolescência ou prazo de validade da matéria prima	0.2	0.2	0.2	0.2	0.4	0.2
14	Mudanças no processo produtivo	0.2	0.2	0.2	0.4	0.4	0.2
15	Imprecisão dos dados	0.3	0.2	0.2	0.6	0.2	0.3
16	Variedade de Produtos	0.6	0.6	1	1	0.4	0.6
17	Restrição de capacidade de produção	0.6	0.6	0.6	0.6	0.4	0.6
18	Visibilidade de estoques internos	0.4	0.2	0.4	0.6	0.2	0.4
19	Erros ou faltas da força de trabalho	0.2	0.4	0.4	0.6	0.6	0.4
20	Rotatividade de pessoal	0.3	0.4	0.3	0.5	0.7	0.4
21	Flexibilidade para lidar com incidentes	0.3	0.3	0.4	0.5	0.7	0.5

As notas parciais para as perguntas respondidas tanto internamente quanto externamente em termos linguísticos foram transformados para termos probabilísticos de maneira muito simples. Aos termos linguísticos foram associadas as seguintes probabilidades: 1-Muito Baixa=0.2; 2-Baixa=0.4; 3-Média=0.6; 4-Alta=0.8 e 5-Muito Alta=1. Para o caso das perguntas respondidas tanto internamente quanto externamente foi calculada a média das respostas.

A partir das probabilidades a priori, são calculadas para cada fornecedor separadamente as probabilidades condicionais para a rede. As probabilidades a priori propagam suas informações até o nó agrupador na rede denominado de *Risco de Suprimento do Fornecedor*, que pode ser entendido como um índice de risco comparativo para análise de riscos associados aos fornecedores avaliados de acordo com a metodologia de redes bayesianas. Para a obtenção do índice, define-se que os nós da rede assumem o estados de “verdadeiro”, ou seja, configura-se a rede às condições de ocorrência dos eventos de risco mapeados.

Com essa configuração são obtidas as probabilidades da Tabela 10 para cada categoria de risco e fornecedores avaliados.

Tabela 10: Probabilidades para as categorias de risco por fornecedor.

Fornecedor	Desalinhamento de Interesses	Falência do Fornecedor	Ruptura de Fornecimento de fornecedor de 2 linha	Bloqueio de Fornecedor	Entrega	Problemas na Qualidade	Problemas Operacionais	RH/ Serviços
A	0.50	0.20	0.40	0.40	0.47	0.20	0.42	0.27
B	0.40	0.20	0.55	0.80	0.43	0.20	0.36	0.37
C	0.40	0.20	0.35	0.80	0.47	0.30	0.48	0.37
D	0.30	0.20	0.70	0.80	0.47	0.50	0.64	0.53
E	0.45	0.60	0.75	0.60	0.47	0.40	0.32	0.67
F	0.30	0.20	0.35	0.40	0.60	0.20	0.42	0.43

O Cálculo do índice global de Risco por fornecedor será explicitado para o fornecedor A conforme memoria de cálculo abaixo.

1) Risco de Cadeia (RC)

a) Categoria de Risco: Desalinhamento de Interesses

Índices de risco: 1 e 2

$$\frac{((0.2 \times 1) + (0.8 \times 1))}{2} = \mathbf{0.5}$$

b) Categoria de Risco: Falência do Fornecedor

Índice de risco: 3

$$\frac{((0.2 \times 1))}{1} = \mathbf{0.2}$$

c) Categoria de Risco: Ruptura de Fornecimento – forn. de 2a linha

Índices de risco: 4 a 7

$$\frac{((0.4 \times 1) + (0.4 \times 1) + (0.6 \times 1)(0.2 \times 1))}{4} = \mathbf{0.4}$$

$$\mathbf{RC Fornecedor A} = \frac{((0.5 \times 1) + (0.2 \times 1) + (0.4 \times 1))}{3} = \mathbf{0.37}$$

2) Risco Externo (RE)

a) Categoria de Risco: Bloqueio de Fornecedor

Índice de risco: 8

$$RE \text{ Fornecedor } A = 0.4$$

3) Risco Operacional (RO)

a) Categoria de Risco: Entrega

Índices de risco: 9 a 11

$$\frac{((0.4 \times 1) + (0.4 \times 1) + (0.6 \times 1))}{3} = 0.47$$

b) Categoria de Riscos: Problemas de Qualidade

Índices de risco: 12 e 13

$$\frac{((0.2 \times 1) + (0.2 \times 1))}{2} = 0.2$$

c) Categoria de Riscos: Problemas Operacionais

Índices de risco: 14 a 18

$$\frac{((0.2 \times 1) + (0.3 \times 1) + (0.6 \times 1) + (0.6 \times 1) + (0.4 \times 1))}{5} = 0.42$$

d) Categoria de Riscos: RH/Serviços

Índices de risco: 19 a 21

$$RO \text{ Fornecedor } A = \frac{((0.47 \times 1) + (0.2 \times 1) + (0.42 \times 1))}{3}$$

$$RO \text{ Fornecedor } 1 = 0.34$$

4) Índice de Risco Global (IRG)

$$IRG \text{ Fornecedor } A = \frac{((RC \times 1) + (RE \times 1) + (RO \times 1))}{3}$$

$$IRG \text{ Fornecedor } A = \frac{((0.37 \times 1) + (0.4 \times 1) + (0.34 \times 1))}{3}$$

$$IRG \text{ Fornecedor } A = 0.37$$

As probabilidades obtidas para cada tipo de risco, isto é, o Risco interno, Risco Externo e Risco Operacional para todos os fornecedores estão definidos na Tabela 11.

Tabela 11: Probabilidades para os tipo de risco por fornecedor.

Fornecedor	Risco de Cadeia	Risco Externo	Risco Operacional	Índice de perfil de risco
A	0.37	0.40	0.34	0.37
B	0.38	0.80	0.34	0.51
C	0.32	0.80	0.40	0.51
D	0.40	0.80	0.54	0.58
E	0.60	0.60	0.46	0.55
F	0.28	0.40	0.41	0.37

A rede bayesiana também foi modelada alimentando a estrutura da rede e as probabilidades condicionais na ferramenta HUGIN que representa graficamente o modelo com as respectivas probabilidades condicionais conforme Figura 15 determinando a configuração de riscos para o Fornecedor F.

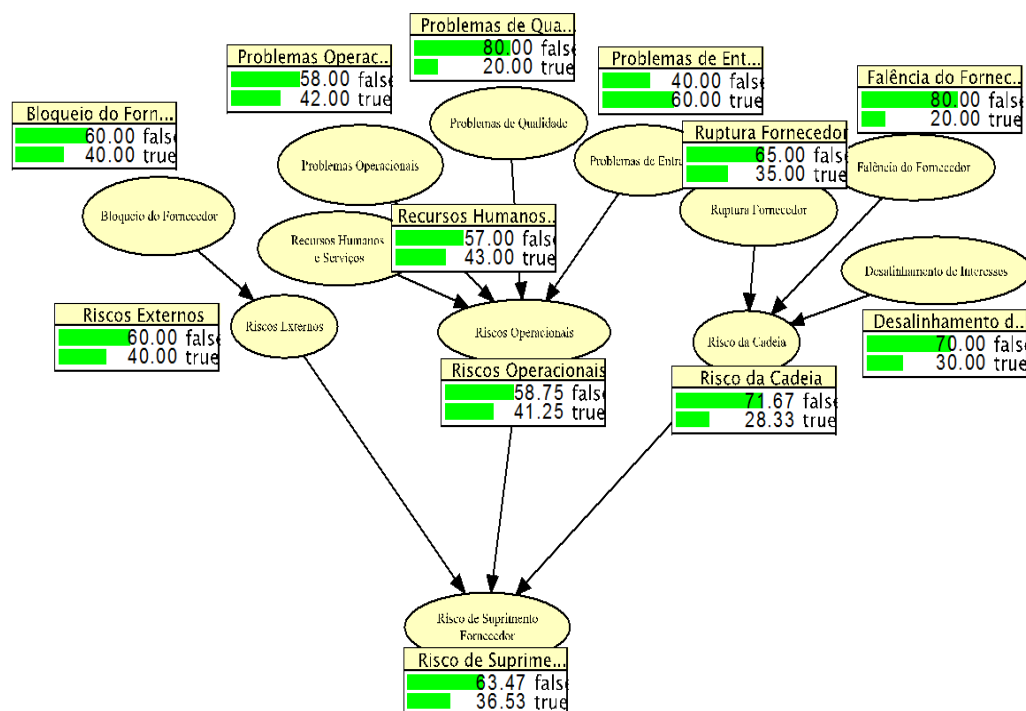


Figura 15: Representação gráfica e respectivas probabilidades na ferramenta HUGIN para o Fornecedor F.

Para a rede configurada para o fornecedor F, pode-se obter a configuração de rede mais provável em função da configuração das probabilidades conjuntas, conforme Tabela 12. A análise exploratória destas configurações pode ser útil para priorizar tratamentos aos riscos observados.

Tabela 12: Configuração da rede mais provável para *Risco de Suprimento do Fornecedor*.

Risco de Suprimento Fornecedor			
Risco Externo	Risco Operacional	Risco de Cadeia	Probabilidade conjunta das configurações mais prováveis
FALSE	FALSE	FALSE	0.252625032
FALSE	TRUE	FALSE	0.177375022
TRUE	FALSE	FALSE	0.168416688
TRUE	TRUE	FALSE	0.118250015
FALSE	FALSE	TRUE	0.099874968
FALSE	TRUE	TRUE	0.070124978
TRUE	FALSE	TRUE	0.066583312
TRUE	TRUE	TRUE	0.046749985

Após o cálculo do *Risco de Suprimento* a partir das redes associadas a cada fornecedor, pode-se então criar um ranking dos mesmos baseados nos resultados obtidos, conforme explicitado na Tabela 13.

Tabela 13: Ranking dos fornecedores baseado no perfil de risco.

Fornecedor	Risco de Cadeia	Risco Externo	Risco Operacional	Índice Global de Risco
A	4	3	5	4
B	3	1	5	3
C	5	1	4	3
D	2	1	1	1
E	1	2	2	2
F	6	3	3	4

Verifica-se que a primeira intenção de se utilizar os resultados obtidos na rede para definirem a probabilidade do fornecedor em ocasionar falhas ou rupturas de suprimento foi alcançada, assim como a criação de um ranking dos fornecedores de acordo com seus perfis de risco. Os fornecedores que apresentaram maiores riscos associados a suas cadeias de suprimento foram os fornecedores D e E em primeiro e segundo lugar respectivamente, o fornecedor B e D empatados em terceiro lugar e os fornecedores A e F em quarto lugar.

A pior combinação de ocorrência de riscos ocorre para o fornecedor D que ficou com os piores índices para o *Risco Externo* e *Risco Operacional* denotando respectivamente uma dificuldade em se substituir o fornecedor e problemas operacionais, como falhas de entregas, problemas de qualidade e serviço. O fornecedor E apresentou o pior índice para o *Risco de Cadeia* que demonstra

problemas ocasionados por subfornecedores, de dependência comercial ou problemas de relacionamento e comunicação. Os fornecedores B, C e D apresentaram os piores índices para o *Risco Externo*, denotando a dificuldade em se substituir o fornecedor. Estes detalhes devem ser aprofundados para possíveis ações gerenciais baseados nos resultados das avaliações.

A seguir na Figura 16 são apresentadas as tabelas de probabilidades condicionais das variáveis para o fornecedor F. Primeiramente são apresentadas as probabilidades condicionais das variáveis da rede, em seguida para os nós agrupadores do *Tipo de Risco* e finalmente para o nó agrupador *Risco de Suprimento do Fornecedor*.

Bloqueio do Fornecedor(Bloqueio_Fornecedor)

false	0.6
true	0.4

Recursos Humanos e Serviços(RH_Servicos)

false	0.57
true	0.43
Experience	0.0

Problemas Operacionais(Problemas_Operacionais)

false	0.58
true	0.42
Experience	0.0

Problemas de Qualidade(Problemas_de_Qualidade)

false	0.8
true	0.2
Experience	0.0

Problemas de Entrega(Problemas_Entrega)

false	0.4
true	0.6
Experience	0.0

Ruptura Fornecedor(Ruptura_Fornecedor)

false	0.65
true	0.35
Experience	0.0

Falência do Fornecedor(Falencia_Fornecedor)

false	0.8
true	0.2
Experience	0.0

Desalinhamento de Interesses(Desalinhamento_Interesses)

false	0.7
true	0.3
Experience	0.0

Riscos Externos(Riscos_Externos)

Bloqueio For	false	true
false	1.0	0.0
true	0.0	1.0
Experience	0.0	0.0

Riscos Operacionais(Riscos_Operacionais)

Problemas C	false								true	
Problemas E	false				true				false	
Problemas d	false		true		false		true		false	
RH Servicos	false	true	false	true	false	true	false	true	false	true
false	1.0	0.75	0.75	0.5	0.75	0.5	0.5	0.25	0.75	0.5
true	0.0	0.25	0.25	0.5	0.25	0.5	0.5	0.75	0.25	0.5
Experience	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Problemas C	true					
Problemas E	false		true		true	
Problemas d	true		false		true	
RH Servicos	false	true	false	true	false	true
false	0.5	0.25	0.5	0.25	0.25	0.0
true	0.5	0.75	0.5	0.75	0.75	1.0
Experience	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Riscos da Cadeia(Riscos_Cadeia)

Desalinhame	false				true			
Falencia For	false		true		false		true	
Ruptura For	false	true	false	true	false	true	false	true
false	1.0	0.666667	0.666667	0.333333	0.666667	0.333333	0.333333	0.0
true	0.0	0.333333	0.333333	0.666667	0.333333	0.666667	0.666667	1.0
Experience	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Risco de Suprimento Fornecedor(Risco_Suprimento_Fornecedor)

Riscos Oper	false				true			
Riscos Cade	false		true		false		true	
Riscos Exter	false	true	false	true	false	true	false	true
false	1.0	0.666667	0.666667	0.333333	0.666667	0.333333	0.333333	0.0
true	0.0	0.333333	0.333333	0.666667	0.333333	0.666667	0.666667	1.0

Figura 16: Tabelas de Probabilidades Condicionais para o fornecedor F.

4.3

Valoração do risco: Significância dos impactos

Conforme definido anteriormente, o risco pode ser mensurado a partir da *probabilidade de ocorrência x significância dos impactos*. A significância dos impactos pode ser mensurada de diversas maneiras. No trabalho de Handfield e McCormack (2008), o impacto é representado pela variação da receita do fornecedor, ou seja, o que ele deixa de vender associado com o evento de ruptura. Estes impactos são multiplicados pelas probabilidades para cada evento, resultando no que ele chama de que ele denomina de Índice da probabilidade de Risco (RPI).

Já Lockamy III e McCormack (2012) utilizaram o conceito de VAR (value at risk) para medir os impactos das rupturas de suprimento. Conforme coloca Lockamy III e McCormack (2012), o Supply Chain Council define o VAR como sendo a soma das probabilidades dos eventos vezes o impacto financeiro dos eventos para processos específicos, fornecedor, produto ou cliente. A utilização dessa métrica possibilita comparações entre fornecedores para facilitar decisões relacionadas ao risco da cadeia de suprimento.

Já Craighead *et al.* (2007) definem três características da cadeia de suprimento como responsáveis pelo grau de severidade das rupturas, sendo uma delas a criticidade do elo. Naturalmente, alguns elos ou fornecedores são mais importantes ou críticos comparados aos demais devido a sua contribuição específica em adicionar valor à cadeia. A severidade das rupturas, ou seja, o impacto das mesmas, também está associada à capacidade de recuperação, que trata da habilidade da cadeia na coordenação de seus recursos para voltarem ao nível normal em relação ao fluxo de produtos. A capacidade de recuperação geradas por eventos de ruptura de suprimento possui diversos atenuantes, sendo o principal deles, a disponibilidade de produto similar no mercado.

No lugar de se incluir no modelo o impacto financeiro que uma ruptura de fornecimento pudesse causar à Cia, cálculo este que seria extremamente complexo devido a natureza da cadeia produtiva de derivados e a necessidade de se estabelecer a aplicação específica dos materiais e as suas relações com o processo produtivo e continuidade operacional, o índice de risco obtido para cada fornecedor a partir da rede bayesiana será ponderado pela criticidade de

seus fornecimentos para a Cia e a situação de disponibilidade do produto do mercado. Esta nota global, avaliará portanto os aspectos associados a cadeia de suprimento do fornecedor, a criticidade interna do fornecedor em função da natureza de seus fornecimentos à Cia e a situação de disponibilidade de produto no mercado. Obviamente alguns produtos possuem uma disponibilidade maior no mercado e são mais fáceis de serem substituídos, outros são mais específicos e podem demandar um maior tempo de substituição de fornecedores. Esta análise adicional tem por objetivo de incluir na análise de riscos três aspectos distintos: os aspectos associados a cadeia de suprimento do fornecedor tratados na rede bayesiana e os aspectos de criticidade interna e os aspectos que retratam a situação de mercado, que não foram abordadas de forma completa no modelo de rede bayesiano.

A análise de criticidade de um dado fornecimento para a Cia é uma informação que vem sendo constantemente trabalhada e atualizada em um trabalho denominado Macroestratégias de Suprimentos. Neste trabalho todos os fornecimentos para a empresa são divididos em categorias de fornecimento conforme exemplificado na tabela 14. A categorização é feita a partir de entrevistas com os usuários, de forma a representar o melhor agrupamento possível das diversas naturezas distintas de fornecimento, que passam a representar então uma categoria comum de fornecimento.

Tabela 14: Categorias de Fornecimentos – Petrobras (2009).

Categorias de Fornecimentos
Aditivos
Alimentos, Bebidas e Tabacaria
Baterias, Pilhas e seus Acessórios
Bombas e Acessórios
Caixas Elétricas e Conexões para Eletrodutos
Canalizações para Vias e Cabos Elétricos
Catalisadores
Centros de Distribuição Elétrica e Controle
Chaves, Controles, Relés e Acessórios
Condutores e Acessórios Elétricos
Conexões Metálicas para Tubos
Containeres e Armazenagem
Corantes e Tinturas
Dispositivos e Acessórios de Proteção de Circuitos Elétricos
Duto Metálico Flexível
Elementos de Fixação Mecânica
Embarcações para Serviços Especiais
Energia Térmica
Equipamentos Condicionadores de Potência Elétrica
Equipamentos de Contenção de Óleo
Equipamentos e Acessórios de Laboratório
Equipamentos e Componentes de TI ou Rádio-Difusão
Equipamentos para END
Equipamentos para Preparo de Alimentação
Equipamentos Pneumáticos
Equipamentos, Partes e Componentes Eletrônicos
Estruturas e Materiais para Construção e Manufatura
Extrusões, Forjados, Moldados e Fundidos
Ferramentas Manuais
Fios e Cabos Elétricos
Fornos e Queimadores
Gases Industriais
Instrumentos de Aferição e Controle de Pressão
Instrumentos de Aferição e Controle de Temperatura
Instrumentos de Medição e Observação de Vazão
Instrumentos de Pesagem
Instrumentos Indicadores e Registradores
Instrumentos Mecânicos
Instrumentos Ópticos
Juntas e Vedações
Mancais, Rolamentos, Buchas, Rodas e Engrenagens
Máquinas e Equipamentos de Mineração e Pedreira
Máquinas e Equipamentos para Construção Pesada
Materiais de Isolamento Térmico
Materiais Explosivos
Misturadores e suas Peças e Acessórios
Permutadores de Calor
Produtos Farmacêuticos e Drogas
Produtos Químicos Diversos
Proteção Contra Incêndios
Publicações
Segurança e Proteção Individual (EPI)
Selos Mecânicos

Sistemas e Instrumentos de Controle
Suprimento para Tratamento de Águas de Esgoto
Suprimentos para Limpeza
Tubos Conformáveis
Tubos de Condução de Aço Liga
Tubos de Condução de Ferro Fundido
Tubos de Condução Não-Metálicos
Tubos de Troca Térmica
Turbina a Vapor
Uniformes e Produtos de Uso Pessoal
Válvulas de Acionamento Automático
Válvulas de Acionamento Manual
Válvulas Especiais
Válvulas Não-Metálicas
Vasos e Tanques de Armazenamento
Veículos
Vigilância e Segurança Patrimonial

Para cada uma destas categorias, são medidos dois aspectos: a criticidade do item e a complexidade do mercado. A criticidade do item está associada à aplicação interna do material na Cia “compradora” e a complexidade do mercado está associada à disponibilidade do item no mercado e à substituição de fornecedores.

Para a pontuação dos dois aspectos são realizados questionários com diversos usuários da empresa com atribuição de notas que podem ir de 1 a 5. Para a medição da criticidade interna do item, são respondidas perguntas relacionadas aos seguintes aspectos: gasto total com os itens, risco do não abastecimento para a produção, risco para a segurança e continuidade operacional oriundo da não conformidade do material e a criticidade da logística de atendimento. Para a medição da complexidade de mercado, são respondidas perguntas relacionadas aos seguintes aspectos: competitividade do mercado fornecedor, atendimento pelo mercado nacional e dificuldade de domínio da tecnologia pelo mercado. Um maior detalhamento do questionário e da atribuição das notas pode ser verificado no Apêndice 1.

Por se tratar de uma informação reservada à Cia o nome das categorias do trabalho serão denominados por números. A Tabela 15 relaciona as categorias utilizadas neste trabalho, as notas obtidas e o peso de cada critério.

Tabela 15: Categorias e notas para cada critério.

	Criticidade do item				Complexidade de Mercado		
Peso do Critério	30%	30%	30%	10%	50%	20%	30%
Categoria do Fornecimento	Gasto Total com os Itens	Risco do não abastecimento	Risco de não conformidade do material	Criticidade de fornecimento e Logística	Competitiv. do Mercado Fornecedor	Mercado Nacional Desenvolvido	Domínio da tecn. para Fornecedor
1	5	5	2	3	4	5	5
2	5	5	4	3	3	3	5
3	4	3	4	4	3	3	4
4	5	2	5	2	2	2	3

As categorias foram relacionadas aos fornecedores avaliados, assim como as notas globais para a criticidade do Item e Complexidade do Mercado, conforme Tabela 16.

Tabela 16: Categorias, notas para a criticidade do Item e Complexidade do Mercado e respectivos fornecedores avaliados.

Categoria	Criticidade do Item	Complexidade do Mercado	Fornecedores Avaliados
1	3.90	4.50	A
2	3.47	3.60	D
3	3.70	3.30	B, F
4	3.8	2.3	C

Estas informações são utilizadas para a mensuração de um índice resultante da combinação do índice obtido na rede bayesiana e dos índices obtidos na macro-estratégia para os fornecedores selecionados e, como resultado, pode-se entender qual é a exposição de risco e relevância de seus fornecimentos para a Cia, dando uma base comparativa de fornecimentos de naturezas, complexidades e criticidades distintas. Assim, os três índices de risco são combinados, resultado do índice global de risco, conforme definido pela tabela 17.

Comparando com o ranking anterior, os fornecedores D e E mantêm suas posições de risco mais elevados para as cadeias de suprimento avaliadas. Os fornecedores A e B tiveram sua classificação de risco aumentadas e os fornecedores B e C, tiveram sua classificação de risco diminuídas.

Tabela 17: Ranking dos fornecedores baseado no índice de risco global.

Fornecedor	Índice Global de Risco	Criticidade do Item	Complexidade do Mercado	Índice de Risco Global	Ranking
A	0.37	3.9	4.5	6.46	3
B	0.51	3.7	3.3	6.20	4
C	0.51	3.8	2.3	4.43	6
D	0.58	3.47	3.6	7.22	1
E	0.55	3.7	3.3	6.77	2
F	0.37	3.7	3.3	4.46	5

Sugere-se assim que se utilize o índice de risco global como o critério para priorizar tratamentos que se façam necessários na gestão dos fornecedores e nos esforços para mitigação dos riscos observados. A inclusão destes critérios possibilita assimilar no modelo a complexidade da análise de riscos associadas à cadeia de suprimento, incluindo os critérios relacionados à cadeia de suprimento do fornecedor, a situação de disponibilidade do bem no mercado e criticidade interna quanto à aplicação do bem no processo produtivo.

4.4

Análise de Sensibilidade e Simulações com a Rede Bayesiana

A elucidação de distribuições de probabilidades subjetivas não é uma tarefa fácil. Dado que não existem únicas distribuições de probabilidades “verdadeiras” ou “corretas”, conduzir análises de sensibilidade para probabilidades a priori alternativas deve ser uma parte integrante do trabalho.

A realização de simulações com a rede bayesiana permite a análise de cenários. É possível observar como se alteram o índice de risco para distribuições de frequências diferentes para os nós causas (os indicadores de risco). As ferramentas de redes bayesianas disponíveis facilitam o cálculo das novas distribuições automaticamente após a entrada de evidências na rede. O

modelo foi alimentado na ferramenta HUGIN de forma a facilitar a análise de sensibilidade.

A análise de sensibilidade é conduzida de diversas formas: com a especificação de pesos para as variáveis de forma a determinar os efeitos do estabelecimento dos mesmos para o resultado final do índice de risco, alterando-se as probabilidades iniciais em função de novas evidências e alterando-se a forma de alimentação do modelo, ou seja, a entrada das variáveis. São realizadas também análises disponíveis no HUGIN: a análise de valor da informação e análise de sensibilidade das evidências.

4.4.1

Alternativa para especificação de pesos para as variáveis utilizando a rede bayesiana

No modelo de rede proposto todos os nós agrupadores, ou seja, os nós que representam os Tipos de Risco possuem pesos iguais. No entanto, é possível especificar nas redes bayesianas pesos diferentes para os nós agrupadores utilizando-se qualquer critério desejado. Para esta demonstração, será determinado um peso para cada tipo de risco em função do número de categorias de risco que os alimenta. Isto significa que se deseja equalizar o peso de cada tipo de risco em função do número de categorias de risco associadas a cada tipo de risco. Estes novos pesos para cada tipo de risco estão definidos na Tabela 18.

Tabela 18: Definição de pesos para as categorias de riscos para definição alternativa da Rede Bayesiana.

Tipo de Risco	Nº Categorias de Risco	Peso
Risco de Cadeia	3	0.38
Risco Externo	1	0.13
Risco Operacional	4	0.50
Total Categorias de Risco	8	1.00

Estes pesos podem ser configurados no nó agrupador *Risco de Suprimento do Fornecedor*, conforme demonstrado nas Tabelas 19 e 20 que informam as probabilidades condicionais associadas aos tipos de risco anteriores a configuração do peso e após configuração dos pesos respectivamente.

Tabela 19: Tabela de probabilidades condicionais anterior a configuração de pesos, onde os tipos de risco possuem pesos iguais.

Riscos Operacionais	false				true			
Riscos Cadeia	false		true		false		true	
Riscos Externos	false	true	false	true	false	true	false	true
false	1.0	0.666667	0.666667	0.333333	0.666667	0.333333	0.333333	0.0
true	0.0	0.333333	0.333333	0.666667	0.333333	0.666667	0.666667	1.0

Tabela 20: Tabela de probabilidades condicionais com a configuração de pesos diferentes.

Riscos Operacionais	false				true			
Riscos Cadeia	false		true		false		true	
Riscos Externos	false	true	false	true	false	true	false	true
false	1.0	0.875	0.625	0.5	0.5	0.375	0.125	0.0
true	0.0	0.125	0.375	0.5	0.5	0.625	0.875	1.0

Com esta nova configuração de rede, para o fornecedor F por exemplo, seria obtido o resultado final para o Risco de Suprimento do fornecedor F conforme Figura 19. O índice de risco global para o fornecedor é muito pouco alterado. No entanto, a utilização de outros critérios para o estabelecimento dos pesos na configuração da rede podem trazer alterações mais significantes.

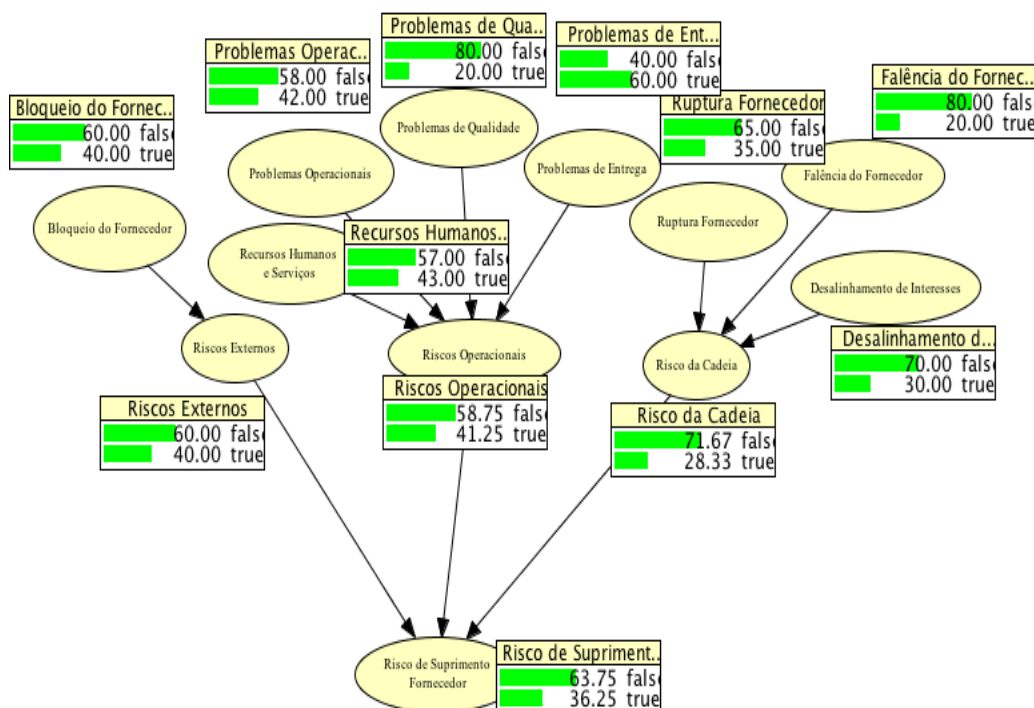


Figura 17: Nova configuração de probabilidades condicionais para o fornecedor F.

4.4.2

Alterações das probabilidades iniciais

A utilização de uma ferramenta facilita o processo de atualização da probabilidades condicionais da rede quando são consideradas novas evidências. Exemplificado na Figura 20, no caso de observada uma evidência de *problemas de fornecimento* do sub-fornecedor, pode-se atualizar o índice de risco de suprimento levando-se em consideração que o índice de risco da variável *problemas de fornecimento* passa a ser 100%, gerando os novos valores para a variável *Risco da Cadeia* e consequentemente para a variável *Risco de Suprimento do Fornecedor*.

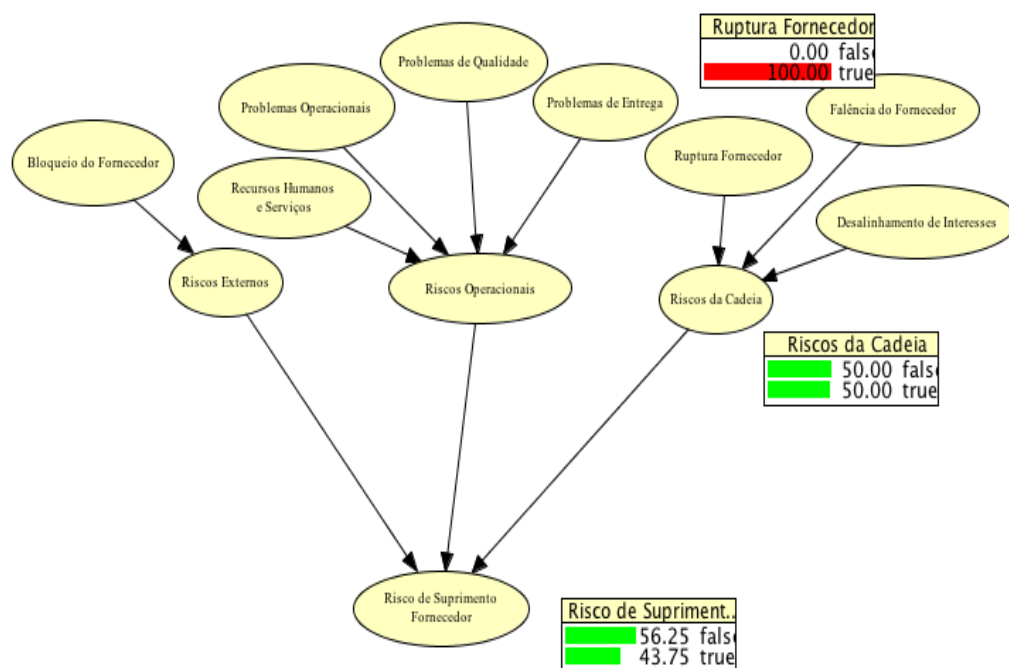


Figura 18: Nova configuração da rede com a inclusão de eventos observados para o fornecedor F.

4.4.3

Alterações nas variáveis de entrada do modelo

Serão apresentadas duas alternativas para entrada no modelo da variável *Problemas de Entrega*. Nas duas propostas todos os índices de risco que compõem a variável são representados por nós, antes não abertos na rede. Com os índices abertos, representando variáveis específicas, pode-se dar um tratamento diferente à forma que as probabilidades são alimentadas no modelo,

possibilitando que o índice *atraso de entrega* seja representado de duas formas alternativas.

A primeira proposta, o índice será de fato o número de casos em que foram observados atrasos. Os dados históricos podem ser alimentados diretamente no modelo, como mostra a Figura 21, seguida pela nova configuração da rede na Figura 22.

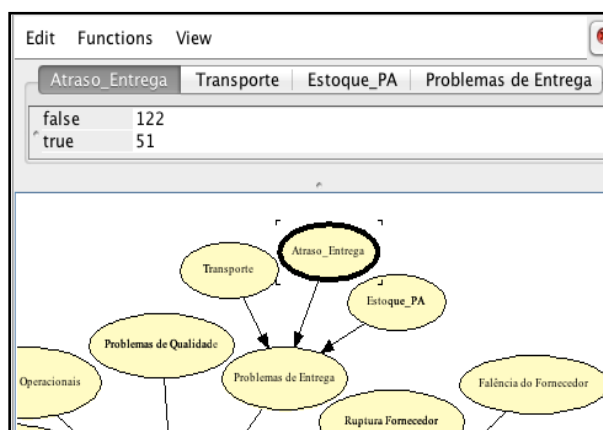


Figura 19: Entrada de casos diretamente no modelo.

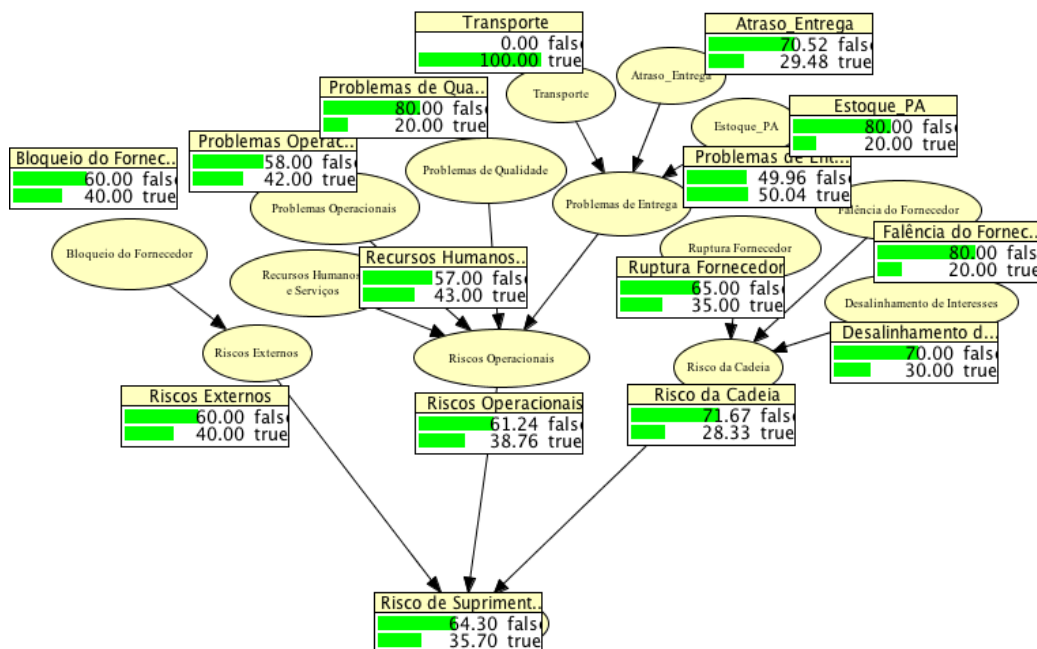


Figura 20: Nova configuração para a entrada da variável *atraso de entrega* para o fornecedor F.

A segunda proposta traz uma opção alternativa para a atribuição da probabilidade a priori para variável *atraso de entrega*. No lugar de se definir

uma variável booleana para mesma, a variável entrega será modela utilizando-se simulações especificadas conforme a distribuição triangular.

A distribuição triangular é uma distribuição contínua definida para um intervalo $x \in [a, b]$ com a seguinte função de densidade de probabilidade:

$$P(x) = \begin{cases} \frac{2(x-a)}{(b-a)(c-a)} & \text{para } a \leq x \leq c \\ \frac{2(b-x)}{(b-a)(b-c)} & \text{para } c < x \leq b \end{cases} \quad (1)$$

E função de distribuição :

$$P(x) = \begin{cases} \frac{(x-a)^2}{(b-a)(c-a)} & \text{para } a \leq x \leq c \\ 1 - \frac{(b-x)^2}{(b-a)(c-a)} & \text{para } c < x \leq b \end{cases} \quad (2)$$

Onde $c \in [a, b]$ é a moda [WEISSTEIN, data desconhecida].

O fornecedor escolhido para esta análise é aquele cuja natureza de seus fornecimentos criam uma necessidade de entregas constantes e com curto prazo de fornecimento em função da limitação da capacidade de estocagem e da criticidade dos fornecimentos para continuidade operacional. O fornecedor selecionado com as características descritas acima também possui o pior índice de atendimento na data requerida, sendo o fornecedor F.

Tabela 21: Indicador de atendimento na data requerida por fornecedor.

Fornecedor	Atendimento na data requerida
A	90%
B	100%
C	74.2%
D	78.5%
E	76.9%
F	70.5%

A princípio, gostaria de especificar diretamente no modelo uma variável contínua que pudesse acomodar a distribuição triangular. No entanto, existe uma impossibilidade de modelar no HUGIN modelos que contenham nós contínuos que sejam pais de um nó discreto. A rede que acomodaria a variável contínua para *atrasos de entrega* possui todos os outros nós discretos e booleanos, assim, a distribuição triangular não pode ser tratada diretamente no modelo proposto utilizando a ferramenta HUGIN. Desta forma, serão simulados eventos seguindo

a distribuição triangular e posteriormente estes eventos serão enquadrados em faixas discretas de atendimento e poderão ser tratado pelo modelo no HUGIN através de nó discreto e não contínuo.

A distribuição triangular será utilizada para estimar as probabilidades em 3 estados específicos para a variável *atraso de entrega*. Após análise da capacidade de estocagem, verifica-se que entregas com intervalos maiores que 14 dias, geram uma situação de necessidade de redução de carga ou paradas operacionais por falta do produto. Desta forma, deseja-se modelar a situação de risco das entregas que forem superiores a 14 dias.

Uma série histórica para o fornecedor F foi utilizada para se chegar a distribuição triangular mais adequada. Com os dados históricos, se obtém uma distribuição triangular utilizando-se o programa *Mathematica* conforme Figura 21, contendo a série histórica e a distribuição triangular equivalente à série histórica.

814, 17, 16, 13, 18, 9, 14, 19, 21, 6, 8, 7, 17, 7, 9, 11, 18, 17, 16, 14, 17, 11, 14, 11, 13, 15, 18, 16, 1, 7, 6, 9, 20, 16, 16, 21, 5, 10, 16, 17, 9, 5, 19, 6, 4, 15, 10, 17, 3, 6, 13, 11, 13, 4, 12, 13, 10, 14, 11, 4, 10, 2, 7, 3, 9, 17, 13, 13, 11, 10, 10, 8, 5, 7, 10, 15, 2, 12, 4, 5, 5, 14, 15, 8, 10, 13, 12, 6, 18, 13, 12, 12, 11, 8, 6, 4, 17, 17, 14, 9, 11, 7, 7, 19, 17, 10, 9, 4, 8, 16, 5, 11, 11, 10, 17, 14, 20, 7, 9, 7, 9, 11, 3, 7, 5, 5, 10, 4, 6, 6, 7, 12, 9, 14, 7, 5, 8, 3, 15, 19, 12, 6, 9, 8, 7, 20, 9, 3, 10, 5, 13, 7, 20, 9, 7, 12, 17, 20, 13, 11, 14, 5, 16, 9, 8, 8, 13, 13, 17, 13, 21, 21, 20, 11, 6, 15, 8, 12, 4, 21, 10, 18, 17, 11, 13, 7, 12, 5, 17, 6, 14, 19, 12, 16, 13, 3, 11, 8, 7, 7, 5, 6, 5, 21, 7, 13, 11, 11, 19, 6, 12, 17, 8, 4, 15, 10, 8, 20, 19, 11, 12, 9, 4, 6, 20, 9, 6, 21, 18, 13, 10, 17, 24, 11, 8, 6, 12, 11, 17, 14, 17, 18, 20, 11, 17, 3, 9, 12, 12, 7, 9, 3, 9, 11, 12, 13, 8, 9, 23, 2, 10, 22, 14, 10, 23, 5, 24, 14, 7, 17, 8, 9, 2, 11, 15, 12, 11, 7, 8, 17, 7, 7, 9, 9, 6, 8, 5, 14, 21, 17, 6, 14, 9, 22, 15, 12, 12, 7, 19, 5, 11, 15, 7, 4, 8, 3, 23, 5, 12, 12, 6, 3, 18, 9, 4, 10, 7, 14, 6, 4, 7, 11, 21<

TriangularDistribution[1, 26<, 7D

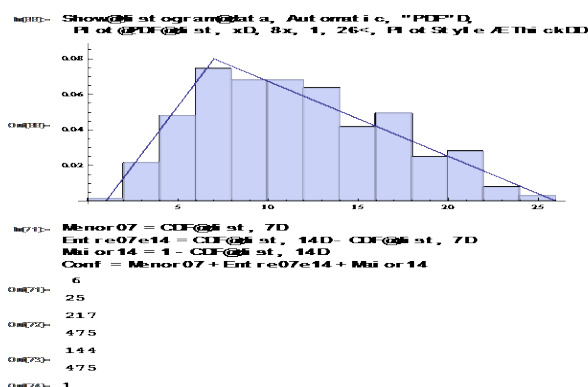


Figura 21: Série histórica- número de dias para entrega, distribuição Triangular e representação gráfica, implementadas no programa *Mathematica*. O eixo x representa o tempo de entrega em dias e o eixo y a distribuição de probabilidade.

Após a obtenção da distribuição triangular se pode conhecer a distribuição de probabilidades relativas as faixas de atendimentos definidas para a variável entrega. Foram definidas três faixas: menor ou igual a 7 dias, de 8 a 14 dias e maior que 14 dias. As probabilidades para cada uma destas três situações foi então calculada para as três faixas respectivamente, conforme Figura 22, verificando-se ainda que o somatório das probabilidades é igual a 1.

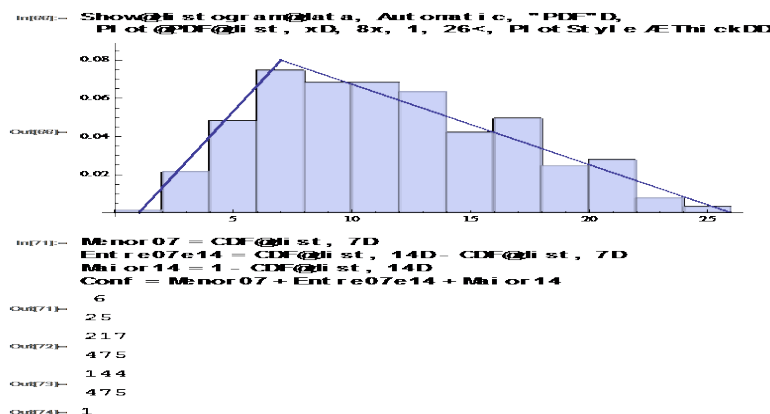


Figura 22: Probabilidades em cada uma das três situações definidas: Out[71]=Menor que sete dias, Out[72]= de 8 a 14 dias e Out[73]=maior que 14 dias, somando 1.

O modelo foi alimentado com as probabilidades nas três faixas definidas pela distribuição triangular para a variável *atraso de entrega*.

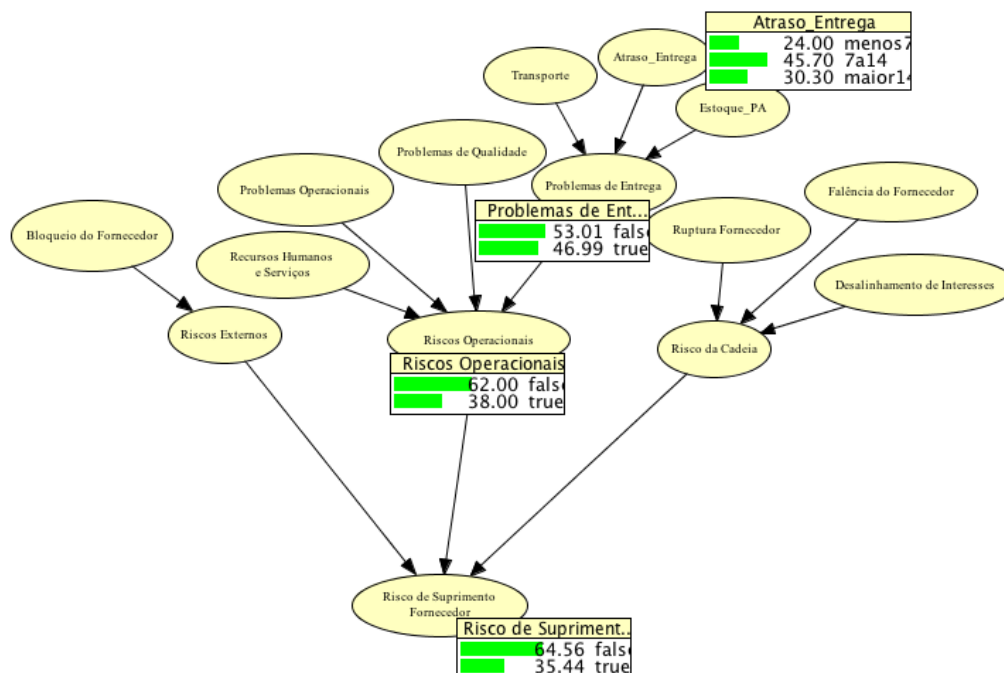


Figura 23: Modelo alimentado com a distribuição triangular para a variável *Atraso de Entrega*.

Obtém-se portanto, novas distribuições para a variável *Problemas de Entrega* e *Riscos Operacionais e Risco de Suprimento do Fornecedor*. A tabela com as probabilidades condicionais para os nós alterados em relação a rede anterior estão estabelecidos na Figura 24.

Atraso_Entrega(Atraso_Entrega)

menos7	0.24
7a14	0.457
maior14	0.303

Problemas de Entrega(Problemas_Entrega)

		false						true		
		false			true			false		
Estoque PA	Transporte	menos7	7a14	maior14	menos7	7a14	maior14	menos7	7a14	maior14
Atraso Entre	false	1.0	1.0	0.697	0.633	0.633	0.364	0.633	0.633	0.364
	true	0.0	0.0	0.303	0.333	0.333	0.636	0.333	0.333	0.636

		true		
		menos7	7a14	maior14
Atraso Entre	false	0.333	0.633	0.0
	true	0.633	0.333	1.0

Figura 24: Tabelas de Probabilidades Condicionais para o fornecedor F com a distribuição triangular para *Atraso de Entrega*.

4.4.4

Valor da Informação

Com a análise do valor da informação disponível no HUGIN, dado um modelo de rede e uma variável de hipótese, pode-se identificar aquela variável que é a mais informativa em relação à variável de hipótese. O resultado desta análise mostra a informação mútua entre a variável de hipótese e as variáveis que foram selecionadas para a análise.

Para esta avaliação, escolhe-se a variável agrupadora *Risco de Suprimento do Fornecedor*, como a variável de hipótese. A informação mais “valiosa” para a variável seria o *bloqueio do fornecedor* conforme Figura 25. Isto é facilmente notado pelo desenho da rede, já que a variável *Bloqueio do Fornecedor* é a única variável a influenciar o *Risco Externo* que por sua vez influencia diretamente a variável *Risco de Suprimento do Fornecedor*. Na Figura 25, há uma barra para cada variável analisada em comparação com a variável de hipótese. O Tamanho da barra é proporcional a razão entre a informação mútua e a entropia do nó de hipótese, também denominado de nó alvo.

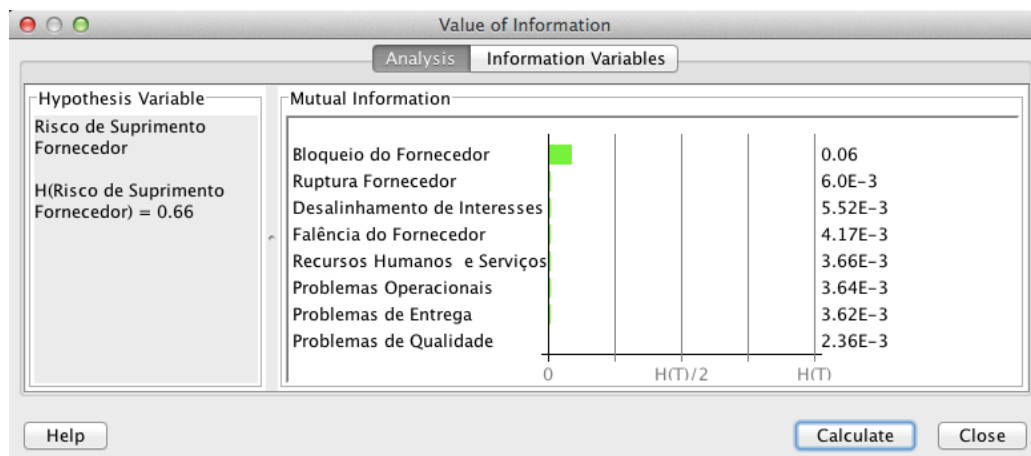


Figura 25: O valor da informação para cada variável da rede.

Para a segunda proposta de rede, onde a variável *atraso de entrega* está aberta, a variável *Bloqueio do Fornecedor* mantém o mesmo valor da informação, conforme Figura 26, sendo também verificável pelo desenho da rede, já que a variável *Bloqueio do Fornecedor* continuou mantendo a importância relativa na rede.

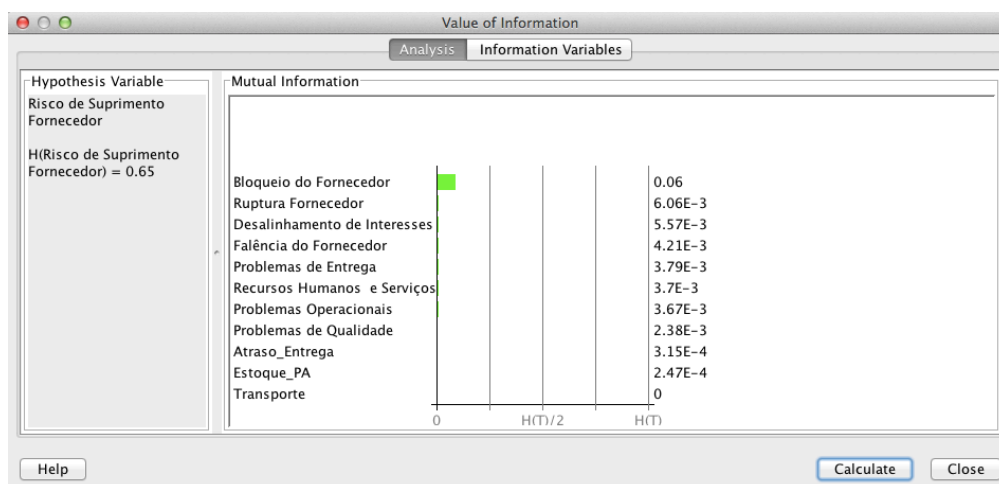


Figura 26: O valor da informação para cada variável da rede alternativa para o fornecedor F.

4.4.5

Análise de sensibilidade da evidência

A análise de sensibilidade da evidência verifica o quão sensível é o resultado da propagação às variações no conjunto de evidências (observações, likelihood, etc.). Com a análise Min-Max disponível no HUGIN é possível

verificar os valores mínimos e máximos para as probabilidades a posteriori em cada estado possível da variável de hipótese, dadas todas as observações da variável de evidência. Os valores mínimos e máximos são obtidos propagando no modelo cada estado da possível da variável de evidência.

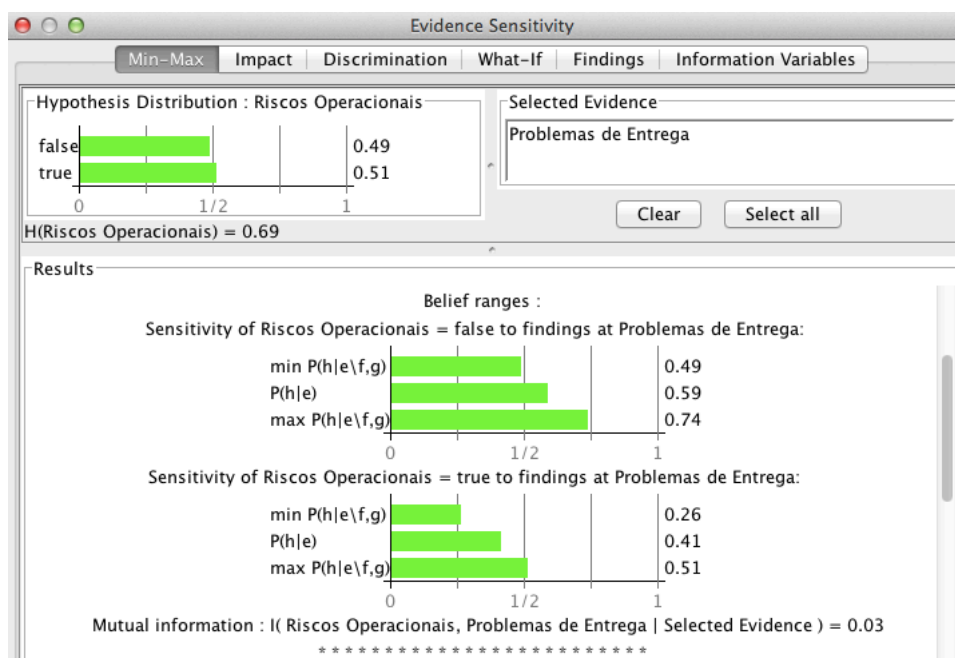


Figura 27: Distribuição de probabilidade a posteriori de *Riscos Operacionais* para a evidência *Problemas de Entrega*.

A Figura 27 mostra a distribuição a posteriori de *Riscos Operacionais* dadas as evidências para *Problemas de Entrega*, determina a entropia H que trata da razão com que a variável é afetada $H(\text{Riscos Operacionais}) = 0,69$. A Figura 27 informa também os valores mínimo, máximo e atuais dada as variações em *Problemas de Entrega*.

Também é possível investigar o impacto das evidências em cada estado da variável de hipótese é um artifício que faz parte da análise de sensibilidade e pode ajudar a determinar as evidências atuando em favor ou contra alguma hipótese. O impacto das evidências em um estado da variável de hipótese é determinado computando-se a verossimilhança normalizada da evidência dada a hipótese. Esta análise requer uma propagação para cada conjunto de evidências.

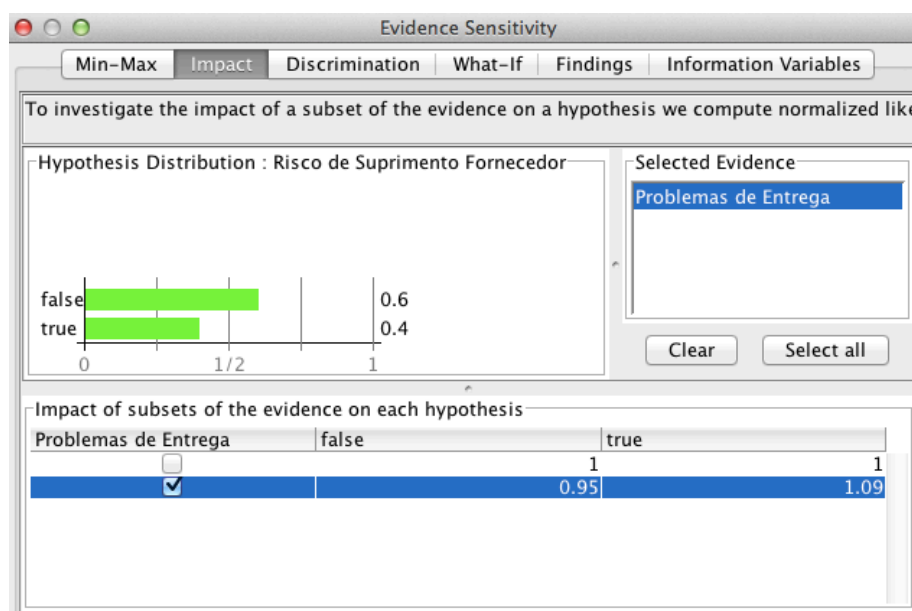


Figura 28: A verossimilhança normalizada para os diferentes conjuntos de evidência dado cada estado da variável de hipótese.

A Figura 28 mostra que a verossimilhança normalizada da evidência *Problemas de Entrega* dado o risco de suprimento do fornecedor é falso = 0.95 e dado que é verdadeiro = 1.09. Isto sugere que a evidência suporta a hipótese Riscos de Suprimento Fornecedor = Verdadeiro, já que a verossimilhança normalizada é maior que 1.

A análise do tipo *What if* considera os efeitos de se observar uma variável em um estado diferente do que foi efetivamente observado. A análise do *What if* é realizada computando-se a distribuição a posteriori da variável de hipótese para cada estado da variável observada.

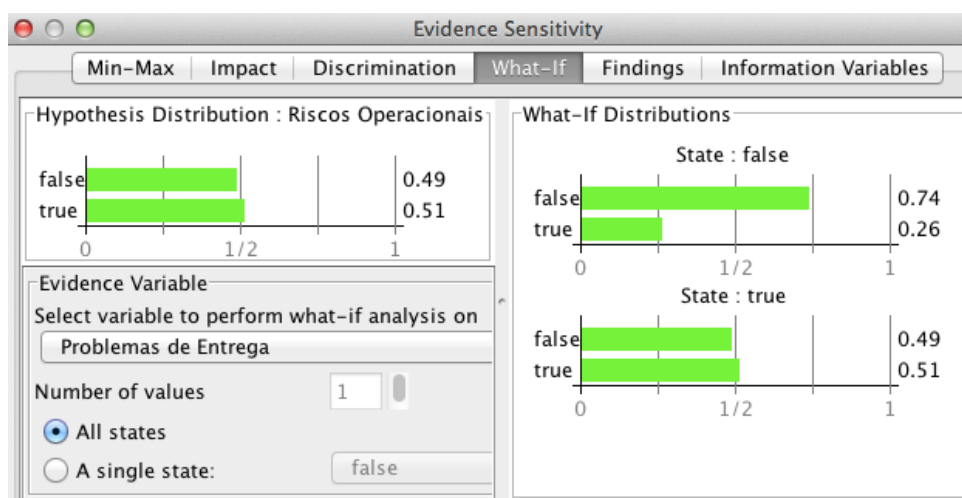


Figura 29: A distribuição a posteriori da variável de hipótese *Riscos Operacionais* em função das observações em *Problemas de Entrega*.

A figura 29 mostra as distribuições de probabilidade para Riscos operacionais caso se escolhesse o estado “falso” e compara-o a situação da evidência que é “verdadeiro”.

Conclusão

Foi desenvolvido neste trabalho um modelo conceitual hipotético que tem como orientação o gerenciamento do risco de rupturas em cadeias de suprimentos. O modelo ilustra a aplicação da metodologia de redes bayesianas à análise de risco de suprimento. Na rede bayesiana proposta, os nós podem ser entendidos como variáveis que medem a probabilidade de risco de ruptura de fornecimento do fornecedor avaliado baseado em estimativas subjetivas de opiniões de especialistas da Cadeia de Suprimento, dos fornecedores e também dos casos históricos que foram mesclados e interpretados como a probabilidades a priori do modelo de rede.

Foi realizada uma vasta pesquisa para a construção do modelo de forma a fundamentar a seleção das variáveis de risco, de entender seus comportamentos e identificar os modelo de rede bayesiana aplicados à análise de risco de suprimento, assim como seus limitantes.

Com a aplicação da metodologia, pode-se criar o perfil de risco dos fornecedores avaliados que ora são tratados individualmente, ora sob perspectiva global para o estabelecimento de priorização de tratamento, levando-se em consideração o impacto das rupturas medidas através dos índices de criticidade interna e da disponibilidade do produto no mercado. A metodologia favorece a investigação e monitoramento dos riscos observados que tratam da oportunidade de que, em se conhecendo melhor os riscos de ruptura, os mesmos possam ser minimizados ao ser trabalhados, ao mesmo tempo em que poderão ser obtidos níveis de serviço superiores em função do maior conhecimento e gerenciamento das probabilidades de rupturas. Estas informações podem ser utilizadas para que se desenvolvam proativamente estratégias de mitigação dos riscos observados para evitar rupturas de suprimento.

Um diferencial positivo observado com a aplicação de Redes Bayesianas é a possibilidade de incluir no modelo conhecimento subjetivo de especialistas para cálculo das probabilidades tratadas sob o aspecto de riscos. Sob o paradigma bayesiano, verifica-se que as probabilidades condicionais não

precisam ser exatas para serem úteis e as redes bayesianas são bastante robustas para tratar o conhecimento imperfeito. O conhecimento subjetivo pode ser mesclado com dados históricos disponíveis, fato que tornam as Redes Bayesianas atrativas no gerenciamento de riscos, visto que em muitas situações os dados históricos são escassos e os especialistas podem incorporar conhecimento ao modelo.

Outro ponto positivo do modelo é a forma gráfica em que Redes Bayesianas apresentam os resultados, tornando seu gerenciamento muito intuitivo e amigável. A modelagem de Redes Bayesianas é feita sob medida, e tem a flexibilidade necessária para que sejam realizados ajustes nas variáveis de entrada de forma a aproveitar as informações disponíveis na Cia que estão ao alcance dos gestores. As Redes Bayesianas possuem um aspecto modular, isto é, é um sistema complexo constituído de partes menores, possibilitando o crescimento da rede na forma de variáveis na medida que se obtém mais conhecimento sobre o assunto.

A utilização de programas de modelagem e simulação podem demandar muito tempo até sua implementação. Alguns dos programas analisados mostraram-se extremamente complexos e não possuem interfaces amigáveis, que dificultam suas utilizações. O modelo proposto foi alimentado no programa HUGIN de forma a facilitar a análise de sensibilidade do modelo e explorar as funcionalidades disponíveis no programa. Foram realizadas análises de sensibilidade para verificar de que maneira novas informações influenciam os resultados das distribuições a posteriori e dos novos índices de risco, assim como para se conhecer a configuração mais provável de uma rede.

Apesar de suas habilidades, existem alguns limitantes que devem ser considerados para a aplicação da metodologia de Redes Bayesianas. Conforme relata Wooldridge (2003), há um potencial para se dar uma ênfase exagerada à opinião de especialistas, tendo em vista a dificuldade em se caracterizar em distribuições conhecidas as probabilidades de ocorrência das variáveis. Relata ainda uma dificuldade da rede em se captar dependências desconhecidas ou que possuam um elemento temporal, por serem rígidas neste aspecto já que não há um mecanismo natural para representar o tempo.

Outra limitação para a utilização do modelo proposto deriva da habilidade em se obter as informações necessárias para se construir o modelo. Algumas

informações são obtidas com os fornecedores e alguns deles podem ficar mais restritivos em relação ao compartilhamento de informações relacionadas a risco com seus clientes. Ainda assim, a rede busca reproduzir os principais riscos relacionados a cadeia de suprimento e é útil para se representar o conhecimento, mesmo que subjetivo, para se organizar as idéias em relação a um assunto e para realizar testes de hipóteses.

Foi verificada também uma certa limitação da aplicação da metodologia de redes bayesianas na análise de risco de suprimento associada a fornecedores. Nos trabalhos avaliados (LOCKAMY III, 2011; HANDFIELD e McCORMACK 2008), FERREIRA e BORENSTEIN, 2012) a elucidação das probabilidades a priori não são aprofundadas, além disso não foram verificadas a utilização de todas as potencialidades das redes bayesianas, como técnicas de aprendizagem e adaptação, que acabaram não sendo exploradas neste trabalho. Outro aspecto que poderia ser explorado são as formas de obtenção da estrutura gráfica da rede e de explorar as técnicas existentes, como mapas conceituais e datamining para inferir na estrutura gráfica a partir do relacionamento das variáveis observados em eventos históricos.

Um dos pontos de maior atenção para a modelagem de uma rede bayesiana é o estabelecimento das probabilidades a priori. Diversas metodologias já foram criadas para se reduzir a imprecisão inerente às preferências iniciais, como o método AHP e Fuzzy. Uma proposta de trabalho futuro seria utilizar a técnica fuzzy como uma metodologia complementar a rede bayesiana para o problema em questão, já que esta pode traduzir em termos linguísticos as preferências iniciais do modelo de acordo com o julgamento subjetivo dos especialistas. Desta forma o próprio modelo já teria a aptidão de trabalhar com aspectos qualitativos dos dados de entrada.

Finalmente, este trabalho alcançou seu objetivo na aplicação de um modelo probabilístico de redes bayesianas como um recurso útil nos assuntos relacionados ao gerenciamento e à modelagem de riscos associados a fornecedores.

Referências bibliográficas

ANDERSEN, S.; OLESEN, K. & JENSEN, F. **HUGIN - A Shell for Building Bayesian Belief Universes for Expert Systems**. In *Proceedings of the Eleventh International Joint Conference on Artificial Intelligence*, p. 1080-1085, 1989.

BASU, G. et al (+10). **Supply Chain Risk Management: A Delicate Balancing Act - A multi-faceted view on managing risk in a globally integrated enterprise**. *White Paper* (Publicação IBM), 2008.

BEAMON, B.M. **Supply Chain design and analysis: models and methods**. *International Journal of Production Economics*, n. 55, p. 281-294, 1998.

BLACKHURST, J.; DUNN, K.S. & CRAIGHEAD, C.W. **An Empirically Derived Framework of Global Supply Resiliency**. *Journal of business Logistics*, vol. 32 (4) p. 374-391, 2011.

BOREUX, J.; PARENT, E. & BERNIER, J. **Pratique du calcul bayésien**. *Collection Statistique et probabilités appliqués*, 2010.

CAMM, J.D.; CHORMAN, T.E.; DILL, F.A.; EVANS, J.R.; SWEENEY, D.J. & WEGRYN, G.W. **Restructuring supply chain Blending OR/MS, judgment, and GIS: Restructuring P&G's supply chain**. *Interfaces* 27(1) p. 128-142, 1997.

CASTILHO, E.; GUTIERREZ, J. & HADI, A. **Expert Systems and Probabilistic Network Models**. *Monographs in Computer Science*. Editora Springer, 1997.

CHARNIAK, E. **Bayesians network without tears**. *IA Magazine*, 12 p. 50-63, 1991.

CHOPRA, S. & SODHI, M.S. **Managing Risk to Avoid Supply-Chain Breakdown**. *MIT Sloan Management Review*, vol. 46, n. 1, p. 53-61, 2004.

COHEN, M. & LEE, H. **Resource deployment analysis of global manufacturing and distribution networks**. *Journal of manufacturing and Operations Management* 2 p.81-104, 1989.

COWELL, R.G.; VERRALL, R.J. & YOON, Y.K. **Modeling Operational Risk With Bayesian Networks**. *The Journal of Risk and Insurance*, vol. 74 (4), p. 795-827, 2007.

Council of Supply Chain Management Professionals. Disponível em: <<http://cscmp.org/about-us/supply-chain-management-definitions>>. Acessado em 04/10/2012.

CRAIGHEAD, C.W.; BLACKHURST, J.; RUNGTUSANATHAM, M.J. & HANDFIELD, R.B. **The Severity of Supply Chain Disruptions: Design Characteristics and Mitigation Capabilities.** *Decision Sciences*, vol. 38(1), p. 131-156, 2007.

CROUHY, M.; GALAI, D. & MARK, R. **Gerenciamento de Risco: Abordagem Conceitual e Prática: Uma Visão Integrada dos Riscos de Crédito, Operacional e de Mercado.** Rio de Janeiro: Qualitymark, São Paulo: SERASA, 2004.

CRUZ, M. **Modeling, Measuring and Hedging Operational Risk.** John Wiley & Sons, 2002.

DEANE, J.K.; CRAIGHEAD, C.W. & RAGSDALE, C.T. **Mitigating environmental and density risk in global sourcing.** *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, vol. 39 (10), p. 861-883, 2009.

DISNEY, S.; LAMBRECHT, M.; TOWILL, D. & VELDE, W. **The value of coordination in a two-echelon supply chain.** *IIE Transactions* 40, p. 341-355, 2008.

DOGAN, I. & AYDIN, N. **Combining Bayesian Networks and Total Cost of Ownership method for supplier selection analysis.** *Computers & Industrial Engineering* 61, p. 1072-1085, 2011.

GLENN, D.; BISI, A. & PUTERMA, M.L. **The Bayesian Newsvendors in Supply Chains with Unobserved Lost Sales.** University of British Columbia, Vancouver, Canada, 2004.

ELKINS, D.; HANDFIELD, R.; BLACKHURST, J. & CRAIGHEAD, C. **18 ways to guard against disruption.** *Supply Chain Management Review*, p. 43-56, 2005.

FERREIRA, L. & BORENSTEIN, D. **A fuzzy-Bayesian model for supplier selection.** *Expert Systems with Applications* 39, p. 7834-7844, 2012.

FOX, J. **Bayesian Item Response Modeling: Theory and Applications, Statistics for Social and Behavioral Science.** Springer Science + Business Media, 2010.

HANDFIELD, R. **Writing the Ideal Paper for JOM: A New Editor's Perspective.** *Decision Line*, 2002.

HANDFIELD, R. & McCORMACK, K. **Supply Chain Risk Management: minimizing disruptions in global sourcing.** *In Series on resource management. Auerbach Publications eBook*, p. 134, 2008.

HENDRICKS, K. & SINGHAL, V. **Association between Supply chain Glitches and Operating Performance.** *Management Science*, vol. 51(5), p. 695-711, 2005a.

HENDRICKS, K. & SINGHAL, V. **An Empirical Analysis of the Effect of Supply Chain Disruptions on Long-Run Stock Price Performance and Equity Risk of the Firm.** *Production and Operations Management*, vol. 14, (1), p. 35-52, 2005b.

IGNÁCIO, B. **Desenvolvimento de um modelo de programação linear para apoio a tomada de decisão em uma cadeia de suprimentos.** São José dos Campos, 2009.

JENSEN, F.V. **A Brief Overview of the Three Main Paradigms of Expert Systems.** Dept. of Computer Science, Aalborg University, Denmark. Disponível em <http://www.hugin.com/technology/getting-started/paradigms>. Acessado em 24/03/2013.

JÜTTNER, U.; PECK, H. & CHRISTOPHER, M. **Supply Chain Risk Management – Outlining an agenda for future Research.** *International Journal of Logistics. Research & Applications*, vol. 6 (4), p. 197-210, 2003.

KAO, H.Y.; HUANG, C.H. & LI, H.L. **Supply Chain Diagnostics with dynamic Bayesian Networks.** *Computers & Industrial Engineering*, vol. 49 p. 339-347, 2005.

KHAN, O. & BURNES, B. **Risk and supply chain management: creating a research agenda.** *International Journal of Logistics Management*, The, vol. 18 Iss: 2, p. 197-216, 2007.

KOHAGURA, T. **Lógica fuzzy e suas aplicações.** Monografia (Graduação em Ciência da Computação) Universidade Estadual de Londrina; Londrina, 2007.

LAMBERT, D. & COOPER, M. **Issues in Supply Chain Management.** *M.C. Industrial Marketing Management*, 29 (1), p. 65-83, 2000.

LEE, H.; BILLINGTON, C. & CARTER, B. **Hewlett-Packard Gains Control of Inventory and Service through Design for Localization.** *Interfaces* 23, p. 1-11, 1993.

LEE, H. & BILLINGTON, C. **The Evolution of Supply-Chain-Management Models and Practice at Hewlett-Packard.** *Interfaces*, vol. 25(5), p. 42-63, 1995.

LEE, A.H.I. **A fuzzy supplier selection model with the consideration of benefits, opportunities, costs and risks.** *Expert Systems with Applications* 36, p. 2879-2893, 2009.

LEE, H.L.; PADMANABHAN, V. & WHANG, S. **The Bullwhip Effect in Supply Chains.** *Sloan Management Review / Spring*, p. 93-102, 1997.

LI, H. & WANG, H. **A multi-agent-based model for a negotiation support system in electronic commerce.** *Enterprise Information Systems*, vol. 1(4), p. 457-472, 2007.

LOCKAMY III, A. **Benchmarking supplier risks using Bayesian networks.** *An international Journal*, vol. 18 (3), p. 409-427, 2011.

LOCKAMY III, A. & McCORMACK, K. **Modeling supplier risks using Bayesian networks.** *Industrial Management and Data Systems*, vol. 112, n. 2, p. 313-333, 2012

LUNA, J.E.U. **Algoritmos EM para Aprendizagem de Redes Bayesianas a partir de Dados Incompletos.** Dissertação de Mestrado, 2004.

LUNN, D.J.; THOMAS, A.; BEST, N. & SPIEGELHALTER, D. **The BUGS Book: A Practical Introduction to Bayesian Analysis.** *Chapman and Hall/CRC*, 399 páginas, Publicado em 2012.

MADSEN, A.L.; JENSEN, F.; KJAERULFF, U.B. & LANG, M. **The HUGIN Tool for Probabilistic Graphical Models.** *International Journal on Artificial Intelligence Tools*, vol. 14, n. 3, p. 507-543, 2005.

MANUJ, I. & MENTZER, J.T. **Global Supply chain risk management strategies.** *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, vol. 38, no. 3, p. 192-223, 2008.

MARQUES, R. & DUTRA, I. **Redes Bayesianas: o que são, para que servem, algoritmos e exemplo de aplicações.** Rio de Janeiro. Disponível em: <[www.cos.ufrj.br/ ines- /courses/cos740/leila/cos740/Bayesianas.pdf](http://www.cos.ufrj.br/ines-/courses/cos740/leila/cos740/Bayesianas.pdf)>, 2008.

McCORMACK, K.; BRONZO, M. e VALADARES, M.P. **Uma abordagem probabilística para a avaliação de riscos em cadeias de suprimento.** *Revista Produção online*, v. 10, n. 3, p. 577-598, 2010.

MITCHELL, V.W. **Organisational risk perception and reduction: a literature review.** *British Journal of Management* 6, p. 115-133, 1995.

NADKARNI, S. & SHENOY, P. **A Causal Mapping Approach to Constructing Bayesian Networks.** *Decision Support Systems*, vol. 38 (2), p. 259-281, 2004.

NEAPOLITAN, R. **Learning Bayesian Networks.** 674 páginas. Editora Prentice Hall, 2003.

NORRMAN, A. & JANSSON, U. **Ericsson's proactive supply chain risk management approach after a serious sub-supplier accident.** *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, vol. 34(5), p. 434-456, 2004.

O'HAGAN, A.; LUCE, B.R. & LONDON, A. **A Primer on Bayesian Statistics in Health Economics and Outcomes Research.** *Centre for Bayesian Statistics in Health Economics*, Sheffield, 2003.

PAI, R.; KALLEPALLI, V.; CAUDILL, R. & MENGCHU, Z. **Methods toward supply chain risk analysis.** *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Proceedings, vol. 5, p. 4560-4565, 2003.

PIDD, M. **Modelagem empresarial: ferramentas para tomada de decisão**. Porto Alegre: Bookman, 1998.

PIRES, S. **Gestão da cadeia de suprimentos e o modelo de consórcio modular**. *Revista de Administração*, São Paulo, vol. 33(3), p. 5-15, 1998.

POHL, E. & MIMAN, M. **Modelling and analysis of risk and reliability for a contingency logistics supply chain** *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part O: Journal of Risk and Reliability* 222, p. 477-494, 2008.

POTTER, A.; TOWILL, D.; BÖHME, T. & DISNEY, S. **The influence of multi-product production strategy on factory induced bullwhip**. *International Journal of Production Research*, vol. 47(20), p. 5739-5759, 2009.

POWER, D. **Glossary of key Decision Support Systems terms**. 1995-2013. Disponível em: <<http://dssresources.com/glossary/>> Acessado em 06/01/2013.

PYKE, D. & COHEN, M. **Performance characteristics of stochastic integrated production-distribution systems**. *European Journal of Operational Research* 68, p. 23-48, 1993.

QUEIROZ, C. **Redes Bayesianas no Gerenciamento de Riscos Operacionais**. Dissertação. São Paulo, 2008.

ROSS, S.M. **Introductory statistics**. Editora Academic Press, 2010.

RUSSELL S.J. & NORVIG, P. **Inteligência Artificial**. Editora Campus, 2004.

SARKIS, J. & TALLURI, S. **A model for performance monitoring of suppliers**. *International Journal of Production Research*, 40(16), p. 4257-4269, 2002.

SAWHNEY, M.; WOLCOTT, R.C. & ARRONIZ, I. **The 12 different ways for companies to innovate**. *Sloan Management Review*, vol. 47(3), p. 75-81, 2006.

SCHWARZ, L.B. **A model for assessing the Value of warehouse Risk Pooling: risk Pooling over outside Supplier Leadtimes**. *Management Science*, vol. 35, n. 7, p. 828-842, 1989.

SINGPURWALLA, N.D. **Reliability and Risk: A Bayesian Perspective**. John Wiley & Sons, LtdEBSCO Publishing: eBook Collection (EBSCOhost), 2006.

SHAFTI, F.; BEDFORD, T.; DELERIS, L.A.; HOSKING, J.; SERBAN, N.; SHEN, H. & WALLS, L. **Service operation classification for risk management**. *IBM Journal of Research & Development*, vol. 54, Issue 3, p. 1-17, 2010.

SHEFFI, Y. **Building a resilient supply chain can help a company survive in the face of a calamitous disruption**. *IIE Manufacturing Engineer*, p. 12-15, 2005.

SOBERANIS, I. **An Extended Bayesian Network Approach for analyzing Supply Chain Disruptions.** *College The University of Iowa, Iowa City*, 2010.

SODHI, M. & LEE, S. **An analysis of sources of risk in the consumer electronics industry.** *Journal of the Operational Research Society*, vol. 58(11), p. 1430-1439, 2007.

SODHI, M. **How to do strategic supply-chain Planning.** *MIT Sloan Management Review*, vol. 45, n. 1, p. 69-75, 2003.

TOMLIN, B. **On the Value of Mitigation and Contingency Strategies for Managing.** *Management Science* 52(5), p. 639-657, 2006.

WEISSTEIN, E. **Triangular Distribution.** MathWorld-A Wolfram Web Resource. Disponível em <http://mathworld.wolfram.com/TriangularDistribution.html> acessado em 20/02/2013.

WOODWARD, P. **Bayesian Analysis Made Simple: An Excel GUI for WinBUGS.** *Editora Chapman & Hall/CRC*, 2012.

WOOLDRIDGE, S. **Bayesian Belief Networks.** *Australian Institute of Marine Science. Prepared for CSIRO Centre for Complex Systems Science* 1, 2003.

WU, D. & OLSON, D.L. **Supply chain risk, simulation, and vendor selection.** *International Journal of Production Economics*, vol. 114(2), p. 646-55, 2008a.

WU, D. & OLSON, D.L. **A comparison of stochastic dominance and stochastic DEA for vendor evaluation.** *International Journal of Production Research*, vol. 46, n. 8, p. 2313-2327, 2008b.

WU, D. & OLSON, D.L. **A review of enterprise risk management in supply chain.** *Kybernetes*, vol. 39, n. 5, p. 694-706, 2010.

WU, T.; BLACKHURST, J. & CHINDAMBARAM, V. **A model for inbound supply risk analysis.** *Computers in Industry*, vol. 57, Issue 4, p. 350-365, 2006.

WU, T.; BLACKHURST, J. & O'GRADY, P. **Methodology for Supply Chain Disruption Analysis.** *International Journal of Production Research*, vol. 45, n. 7, p. 1665-1682, 2007.

YANG, D.; WANG, J.; LI, X. & SAWHNEY, R. **Modeling and mitigating Global Supply Chain Risk.** *Management IIE Annual conference. Proceedings*, p. 1339-1344, 2009.

YANG, L. & IWAMURA, K. **Fuzzy Chance-Constrained Programming with Linear Combination of Possibility Measure and Necessity Measure.** *Applied Mathematical Sciences*, vol. 2, n. 46, p. 2271-2288, 2008.

ZHANG, N. & POOLE, D. **A Simple Approach to Bayesian Computations.** *In Proc. of the Tenth Canadian Conference on Artificial Intelligence*, pp. 171-178. 1994.

ZSIDISIN, G.; PANELLI, A. & UPTON, R. **Purchasing organization involvement in risk assessments, contingency plans and risk management: an exploratory study.** *Supply Chain Management: An International Journal*, vol. 5, n. 4, p. 187-97, 2000.

ZSIDISIN, G. **A Grounded definition of Supply Risk.** *Journal of Purchasing & Supply Management* 9, p. 217-224, 2003.

ZSIDISIN, G. & WAGNER, S. **Do perceptions become reality? The moderating role of supply chain resiliency on disruption occurrence.** *Journal of Business Logistics*, vol. 31, n. 2, p. 1-20, 2010.

Apêndice 1

Questionários de Macro-Estratégias de Contratação.

Para a medição da Criticidade do Item, são respondidas as seguintes perguntas:

- 1) Qual é o impacto na produção (no core business da empresa), caso não haja abastecimento dos itens que compõem essa categoria?
 - Pára a produção ou gera com sua substituição alto impacto econômico (nota 5);
 - Impacta parcialmente a produção ou gera algum impacto econômico (nota 3);
 - Não tem impacto sobre a produção ou não gera impactos econômicos (nota 1).
- 2) Qual o impacto sobre o SMS quando o(s) item(s) for(em) não-conforme(s) (vazamento, contaminação, risco de vida)?
 - Não conformidade dos itens impacta diretamente a qualidade do produto final, segurança e meio ambiente (vazamentos, contaminação, risco de vida para funcionários/terceiros...) (nota 5);
 - Impacta parcialmente (nota 3);
 - Não impacta (nota 1).
- 3) Quanto à complexidade logística, como você classificaria o(s) item(s) desta categoria?
 - Itens de logística difícil (importados, frete especial, atendimento de emergências, crítico...) (nota 5);
 - Itens de logística com alguma dificuldade (nota 3);
 - Itens de logística fácil (nacionais, atendimento fácil em emergências, possíveis compras regionais...) (nota 1).

Para a medição da criticidade do mercado, são respondidas as seguintes perguntas:

- 1) Como é a competitividade do Mercado Fornecedor?
 - Pouquíssimos fornecedores (menos do que 3 empresas), um fornecedor domina o mercado, monopólio (nota 5);
 - Poucos fornecedores, mercado concentrado nos maiores fornecedores, competição restrita (possível organização do mercado, possível prática de cartel) (nota 3);
 - Muitos fornecedores, sem domínio claro de mercado, competição livre (nota 1).
- 2) Quantos fornecedores locais (nacionais) estão aptos a atender a Petrobras?
 - Não existe mercado local (empresas estrangeiras com bases locais) para os serviços, grande parte das contratações com fornecedores estrangeiros (nota 5);
 - Mercado local com poucas opções, apresentando alguma competitividade com o internacional (nota 3);
 - Mercado local totalmente desenvolvido, muitas opções e muito competitivo com o internacional (nota 1).
- 3) Qual é o nível de qualificação dos fornecedores quanto ao domínio da tecnologia?
 - Tecnologia proprietária de pouquíssimos fornecedores, sendo um fator decisivo de diferenciação no mercado, compra baseada na tecnologia (nota 5);
 - Tecnologia dominada por poucos, sendo um fator de diferenciação no mercado, compra baseada na tecnologia e preço (nota 3);
 - Tecnologia disseminada pelos fornecedores, não sendo fator diferenciador para o mercado, compra baseada exclusivamente no preço (nota 1).