

Um modelo de reação para testes de variáveis endógenas utilizadas na análise de situações de risco no controle de máquinas complexas

Isnard Thomas Martins

*Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil – PEC
Núcleo de Segurança do Trabalho – NSHT da
Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, POLI/UPE*

Edgard Thomas Martins

*Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil – PEC
Núcleo de Segurança do Trabalho – NSHT da
Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, POLI/UPE*

Béda Barkokébas Junior

DOI: 10.47573/aya.88580.2.39.2

Resumo

Esta pesquisa demonstra como a influência de situações sistêmicas, enquanto senso comum previsível, transcendem ao cenário de risco na aviação, situando-se tão intimamente inseridas no cenário profissional e pessoal de um piloto que não podem estar dissociadas de seu comportamento operativo. Apresentamos como estas situações sistêmicas podem interagir como vetores de redução nas habilidades ou cognição do piloto, resultando na erosão de sua competência e capacidade de conduzir aeronaves. Neste artigo demonstramos um método para análise e tratamento dos fatores de risco e variáveis correlacionadas com cenários de acidentes aéreos, através da percepção de um modelo matemático para sistemicamente sintetizar a reação das variáveis envolvidas em ambientes críticos na aviação.

Palavras-chave: riscos aeronáuticos. algoritmos de caminho mínimo. ergonomia. pesquisa operacional. grafos.

A história das profissões complexas demonstra que organizadores mentais podem ser afetados por desordens e transtornos, podendo alterar o pleno equilíbrio necessário para o cumprimento das tarefas previstas em suas atividades. Conforme exposto neste artigo, os aeronautas expõem-se cada vez mais ao risco de adoecimento psíquico, principalmente diante das difíceis condições de trabalho e da sobrecarga no setor. Fatores psicológicos podem intervir na atividade laboral do profissional sem que ele tenha o seu discernimento, e isto se torna agravante quando esta percepção se dá de forma retardada principalmente em momentos de maior exigência da atividade desempenhada. No caso dos comandantes, esta exigência pode surgir em diversos momentos durante a jornada e pode gerar situações de desentendimentos na cabine, e entre os tripulantes, o que não significa um descontentamento particular ou pessoal, mas sim fruto de uma sobrecarga contínua oriunda de uma condição desfavorável à redução deste quadro. Os efeitos desta carga psíquica podem, ainda, aparecer como responsáveis por possíveis “falhas” dos comandantes, como em pequenos incidentes e são, em última análise, potenciais provocadores de acidentes aeronáuticos.

Os registros oficiais de acidentes pesquisados (FAA, 2008; CENIPA,2007), apontam para o humano como culpado ou como fator contribuinte nos acidentes numa proporção próxima a oitenta por cento (MARTINS E, 2010). Deve-se considerar que o piloto recebe um artefato que iniciou seu projeto de fabricação alguns anos antes de ser entregue a este profissional e como máquina complexa depende de perfeitas condições de funcionamento. Factualmente neste cenário localizamos o falível ser humano. Entretanto, a história da aviação demonstra que equipamentos aeronáuticos apresentam defeitos e certamente ainda continuarão apresentando problemas. Porém, inserido neste caminho para a busca da perfeição técnica e operacional da aeronave, encontra-se invariavelmente o piloto, sempre presente no artefato quando este se acidenta, sendo a ele frequentemente atribuído o mais alto preço pela ocorrência, por muitas vezes, representando a sua própria vida. Os erros dos pilotos certamente ocorrem, mas é preciso analisar suas origens e que podem ser atribuídas às falhas de projeto, aos erros de manutenção, à falta de capacitação, aos turnos de trabalho mal planejados e negligenciado, ao distúrbio do respectivo ciclo circadiano, à má comunicação das torres de controle, às informações erradas ou desatualizadas de cartas de navegação, aos erros de outros pilotos, às suas próprias falhas e outros relevantes condicionantes. Foi realizado um estudo crítico a partir dos registros oficiais dos acidentes com aeronaves através da releitura de uma amostra selecionada e disponibilizada por órgãos nacionais e internacionais de controle e prevenção de acidentes, preservando e não contestando os seus diagnósticos. Os dados coletados foram correlacionados com fatores críticos condicionantes, prospectando indícios de origens cognitivas e originários de outros fatores ergonômicos que podem contribuir com causalidades de acidentes aéreos (MARTINS E, 2010). O modelo sistêmico envolveu condicionantes de risco e variáveis potencialmente causadoras de distúrbios de saúde física e mental entre aeronautas, onde causalidades podem ocorrer, decorrentes de falhas técnico-psíquicas. As variáveis tratadas no modelo relacionam-se com hábitos de vida, incertezas da tecnologia embarcada nas modernas aeronaves, falta de rotina e horários e o distanciamento da família, condições que contribuem sobremaneira para o aumento da vulnerabilidade e do risco aeronáutico. O Modelo de Reação considerou padrões relacionados ao comportamento profissional do piloto combinado com fatores de vulnerabilidade aplicados à análise acumulativa de riscos. Aplicamos algoritmos de caminho mínimo para cálculos e aproxi-

mação entre variáveis de risco potencialmente envolvidas e redes semânticas, e identificação de padrões de clusterização dos fatores críticos (KOHONEN,1997). O Modelo de Reação investigou eventos e ocorrências na aviação, promovendo monitoração complementar da fase pré-voos. Procuramos oferecer subsídios que possam colaborar na prevenção de desvios de comportamento e situações sistêmicas que ofereçam riscos potenciais e ameaças à segurança aeronáutica. Segundo o CENIPA (2007) A prevenção de acidentes aeronáuticos depende da mobilização e do comprometimento de todos os envolvidos na aviação civil e militar brasileira. Falhas de projeto, adoção de tecnologia pela própria tecnologia, erros de sistemas preventivos de manutenção de aeronaves, tecnologia da informação assíncrona com a ergonomia distribuída humano/computador em modernas aeronaves são componentes de risco potencial, presentes em acidentes aeronáuticos de difícil e demorado diagnóstico, que conjugados com a história das profissões complexas demonstram como as desordens mentais afetam, de modo efetivo os organizadores comportamentais que devem apresentar-se em pleno equilíbrio para cumprimento das tarefas previstas em seu trabalho, onde a falha não é opção aceitável.

No início dos anos 90, a Canadian Air Transport Security Authority definiu, doze fatores considerados críticos, tendo sido denominados “Dirty Dozen”. Estes fatores foram elencados representando os principais fatores humanos causadores de riscos à segurança das atividades (TURI, 2021).

Neste foco, a Federal Aviation Administration (FAA - Agência Reguladora da Aviação dos Estados Unidos) incorporou os conceitos de “DIRTY DOZEN” na aviação, sendo utilizados regularmente em material de ensino (Human Factor,2006; TURI, 2021). A Figura-1 ilustra um mosaico apresentando os fatores identificados no grupo “DIRTY DOZEN”:

Figura 1 – Fatores Críticos “DIRTY DOZEN”



(Fonte: TURY, 2021)

FATORES CRÍTICOS MODELO DE REAÇÃO

Tendo como objetivo a organização e tratamento dos fatores potencialmente críticos identificados em acidentes aéreos focalizamos um estudo para análise de reação das variáveis de riscos envolvidas em cenários específicos, através de um modelo matemático para análise de situações de risco na aviação. Trata-se de um modelo de reação que processa e interpreta a correlação dos vetores integrantes dos fatores de causalidades de acidentes e do comportamento do piloto em situações relacionadas com todas as etapas do voo. Consideramos no estudo de risco o envolvimento de variáveis potencialmente causadoras de distúrbios mentais entre aeronautas, decorrentes de falhas técnico-psíquicas, quando causalidades poderiam ocorrer ao acrescentar gravidade aos fatores críticos do acidente.

Foi preocupação dos autores no processo de engenharia do Modelo de Reação, permitir ampla flexibilidade nas especificações referentes à modelagem das variáveis selecionadas para análise de sinistros, cenários críticos e tratamento do potencial relacionamento entre causalidades de acidentes. O cenário, foco específico do ensaio selecionado para desenvolvimento deste estudo, relaciona-se com os fatores críticos extraídos nas diversas etapas das atividades do transporte aéreo por Martins E (2010). Neste artigo, relacionamos para efeitos desse descritivo, não esgotando, entretanto os fatores exemplificados, alguns dos mais importantes fatores de risco, dentro de cada categoria selecionada para análise de cenários.

Fatores primários de riscos

Relacionam-se com ações e eventos críticos que potencialmente constituem foco para cadeia de falhas, tais como: ações relacionadas a uma fase do voo (padrão internacional), relacionada a uma ação da tripulação no cockpit, relacionada com uma das casualidades de acidentes indicados pelo CENIPA (2007), relacionado com um dos indícios de cadeia de erros indicados pelo FAA (2008), relacionado com o(s) tipo(s) de erro(s) que aponta(m) para indícios de falha etc.

Falhas ergonômicas

Relacionam-se com eventuais erros causados por problemas de usabilidade, emprego equivocado de material, treinamento inapropriado ou insuficiente, aspectos cognitivos ou outros fatores ergonômicos que podem ocorrer dentro ou fora do cockpit cujas falhas eventualmente podem apontar para fatores ergonômicos relacionados com diversos tipos de erros, tais como: problema estrutural (escolha/teste equivocado de materiais), ação/julgamento-toque arremetido, falha de checagem/monitoração, falha de recuperação em perda, mal julgamento condições meteorológicas, mal julgamento, altitude, visibilidade, desorientação, erro de informação/diagnóstico/meta, problema de capacitação/treinamento inapropriado, erro de layout, sobrecarga emocional e / ou cognitiva, distribuição errada da tarefa etc.

Erro no Cockpit

Erros cometidos no cockpit (na cabine de comando da aeronave), quando realizados pelos pilotos, tais como comandos errados, ação/julgamento toque arremetido, falha de checagem/monitoração, falha de recuperação em perda, mal julgamento condições meteorológicas, mal julgamento, altitude, visibilidade, desorientação, erro de informação, erro na avaliação ou ausência

de avaliação, erro de diagnóstico, erro de procedimento, problema aero médico ou psicossocial etc.

Causalidades relacionadas com atividades

Fatores críticos frequentemente estão presentes nas causalidades dos acidentes. São fatores estudados por entidades especializadas, dedicadas à prevenção de acidentes e órgãos responsáveis pelo controle de acidentes aeronáuticos, tais como: controle de tráfego aéreo e problemas de navegação, acidentes com carga/porta de carga/ dispositivos, colisões (colisões no ar e terreno), fatores externos, graves problemas meteorológicos, tripulação drogas, álcool, condição mental, cansaço/fadiga, fogo no hangar/solo, no ar, no interior da aeronave, pouso/ decolagem erro velocidade, comandos travados, configuração, manutenção falha de diretivas, instalação errada componente, resultado do pouso de emergência, perda de controle, segurança sabotagem, sequestro, insanidade a bordo, condições meteorológicas desfavoráveis/má visibilidade/noite, colisão vinda de outra aeronave, problemas corporativos normas não apropriadas etc.

Indício de erro

Indícios de origens cognitivas e outros fatores ergonômicos que podem ter contribuído com as causalidades de um acidente aéreo, tais como: ambiguidade, fixação ou preocupação, insegurança ou confusão, violação dos mínimos, procedimentos irregulares/ mal elaborados, ninguém inspecionando o exterior da aeronave, incapacidade de atingir objetivos, abandono de procedimentos padronizados de operação, insuficiência informações p/ações no cockpit etc.

Fase do voo

Foram classificadas sete fases de um voo, segundo o consenso internacional verificado no meio aeronáutico. Estas definições a seguir foram elaboradas para compreensão de leigos na aviação, representando o significado amplo das etapas do voo, a saber: taxi, decolagem, subida, cruzeiro, descida, aproximação e pouso.

Tipo do avião

Para os efeitos pretendidos neste estudo, refere-se ao porte da aeronave, a saber: tipo helicóptero, tipo pequeno, tipo médio e tipo grande

MÉTODO USADO NA PESQUISA

O método utiliza um Modelo de Reação desenvolvido pelos autores do artigo para tratamento de variáveis que integram um cenário modelado como um mapa vetorial referentes a situações de risco aeronáutico. Os riscos tratados pelo método proposto envolvem situações críticas que favorecem, isolados ou correlacionados, a erosão e o condicionamento da saúde físico/ mental do aeronauta. Os fatores críticos pesquisados para análise são organizados em trilhas de atividades encadeadas, formando uma estrutura contendo características de um Mapa Vetorial, onde os nós representam as atividades e as conexões representam os vértices ou arcos de uma rede, sendo desta forma tratado como um grafo. O Mapa Vetorial envolve variáveis que inter-

pretam o comportamento do piloto e fatores relacionados com aeronave. São geradas matrizes matemáticas para apoio da estrutura de cálculos, resultantes do tratamento do relacionamento entre os elementos que integram o grafo.

A identificação de indicadores associados aos riscos potenciais é obtida através dos cálculos extraídos do algoritmo de caminho mais forte/fraco entre atividades conectadas e presentes no contexto dinâmico do cenário, observando-se os vínculos intermediários entre os nós porventura conectados.

Para rastreamento dos riscos associados aos caminhos presentes no mapa vetorial o algoritmo do Modelo de Reação se utiliza do método definido como trilha reversa (adiante discutido nos itens 5.3.3 e 5.3.4) proposto no algoritmo Dijkstra (1994), que recompõe o caminho mínimo entre os nós de um grafo. A estrutura representada resultará no caminho de máximo êxito entre duas entidades selecionadas para análise. O algoritmo Dijkstra é o método clássico para cálculo do caminho de custo mínimo a partir de um nó fonte para todos os demais nós de um grafo capacitado, pressupondo um grafo contendo arcos não negativos (Xu & Chen, 2004; Boaventura, 1979). O uso de técnicas para análise de conexões em grafos usando algoritmos de caminho mínimo modificados são aplicados à identificação das mais fortes conexões entre entidades de uma rede (Xu e Chen, 2008). Trata-se de uma pesquisa experimental com variáveis controladas. Para a classificação da pesquisa, consideraremos a taxionomia apresentada por Vergara (2007); para investigação, os autores utilizaram informações e indicadores de ocorrências de voo contidos nas bases da FAA (2008) e CENIPA (2007) e que de alguma forma influenciaram os sistemas de avaliação analisados.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DO MODELO DE REAÇÃO

Os princípios básicos aplicados no Modelo de Reação basearam-se nas pesquisas para os respectivos Doutorados publicados pela PUC-Rio (Martins I, 2009) e pelo Instituto Oswaldo Cruz (MARTINS E, 2010). O objetivo da pesquisa de Pós-Doutorado dos autores, contemplou a construção de um ambiente sistêmico para análise e diagnóstico de causalidades de acidentes envolvendo variáveis potencialmente críticas em cenários de atividades aeronáuticos, como distúrbios mentais entre aeronautas, e outros fatores sensíveis a falhas técnico-psíquicas. As variáveis estão relacionadas com hábitos de vida, incertezas da tecnologia embarcada nas modernas aeronaves, sistemas de manutenção preventiva ou corretiva, ausência de rotinas e horários dos aeroviários e distanciamento da família, condições que contribuem sobremaneira para o aumento da vulnerabilidade da segurança e do risco aeronáutico.

O objetivo pretendido para realização da análise do cenário do acidente será a modelagem de uma rede integrada por fatores críticos conectados, formando um mapa vetorial apresentando caminhos lógicos de atividades relacionadas com fases relevantes, entre o ponto de partida do voo e o seu destino.

Uma tarefa importante na modelagem da rede consiste na coleta dos fatores de risco que irão compor o cenário objeto da análise. Devemos estabelecer a cronologia e encadeamento das atividades, eventos, bem como circunstâncias interrelacionadas (Entidades) presentes em um mapa de fatores de risco. A conexão entre as Entidades é genericamente denominada distância (arcos ou vértices), e a sua importância, conforme a sua maior ou menor contribuição na ocorrên-

cia é denominada fator de impacto. A probabilidade desta atividade ocorrer multiplicada pelo seu impacto nos fornecerá a criticidade do evento em uma rede. Um caminho crítico é formado pela maior distância matemática observada pelos eventos que se conectam formando uma sequência de eventos na Rede. Chen e Linch (1992), afirmam que a base de conhecimento é representada pela rede semântica, onde os nós (Eventos) são representados por objetos, conceitos ou atividades (Entidades) e as conexões representam os relacionamentos (associações) entre os nós, onde o peso ou valor das conexões indica a força de sua relevância na rede.

Investigações de acidentes utilizam mapas que integram os atores que participaram e estiveram de alguma forma envolvidos com as circunstâncias da ocorrência. Os cenários devem apresentar possíveis associações entre os fatores críticos potencialmente identificados. Este mapa, ou cenário envolvendo os fatores críticos do acidente pode ser tratado como uma rede ou grafo (MCANDREW, 1999).

Fatos que ocorrem simultaneamente com probabilidade razoável (co-ocorrência), bem como os itens de uma coleção de dados presentes de forma conjunta (correlação) nas circunstâncias do acidente podem colaborar para um modelo de estimativas ou grandezas que permitam estabelecer associações entre entidades em uma cadeia de eventos de uma investigação (Vidal, 2003). O valor das associações entre entidades presentes em um cenário é de grande relevância para a investigação de um acidente. Episódios ocorridos em acidentes no passado podem exemplificar a importância das estimativas, como os casos de congelamento do tubo de Pitot versus capacitação de Pilotos, ocorrido no voo Air France Rio de Janeiro-Paris, acidentado no Atlântico Norte em 2009, analogamente como o acidente ocorrido no voo do Air Florida em Washington, em 1982. Destacamos ainda, o recente caso envolvendo acidentes com o novo produto da Boeing, o modelo 737-Max, que apresentou nítidas falhas de software, resultando na atitude de perplexidade e desconhecimento por parte dos pilotos para lidar com as falhas graves ocorridas no Equipamento. O Boeing 737-Max foi suspenso em março de 2019 após o acidente no voo 302 da Ethiopian Airlines e em outubro de 2018, quando um Lion Air 737 MAX caiu na Indonésia, ambos apresentando as mesmas e graves falhas de correção de voo.

O valor associado ao arco entre entidades em um mapa de inteligência expressa a intensidade, segundo a qual as entidades estão mais próximas ou mais distantes entre si. O valor atribuído aos relacionamentos mapeados auxilia a visibilidade dos vínculos existentes, identifica envolvimento entre as Entidades presentes no cenário e produz conhecimento para gerar conclusões e laudos sobre os fatos das ocorrências analisadas (MARTINS I, 2009). Os conceitos relacionados inseridos em um mapa de ocorrência ou acidentes encontram similaridade com a teoria dos grafos, onde os objetos e eventos representam os nós do grafo e os relacionamentos representam os seus arcos ou vértices. Se obtivermos uma organização topológica formada pelos elementos que integram a investigação, através de uma representação gráfica ordenada em um mapa, teremos um grafo, constituído de todas as suas propriedades inerentes, como conectividade, acessibilidade, representação matricial, arborescência etc. (MARTINS I, 2009). Segundo Evans e Mineka (1992), problemas envolvendo grafos e redes necessitam de uma estrutura comum para representação. Supondo que $G = (X, E)$ seja um grafo não direcionado com m vértices e n arcos. Existem diversas formas de representar G , dentre estas: matriz de adjacências de vértices, matriz de incidência, lista de arcos, lista de adjacências e representação em estrela

Uma conveniente forma de apresentar um grafo será através da sua correspondente

matriz de adjacências, dispensando a apresentação dos vértices ou suas conexões (Evans & Mineka, 1992). A matriz de adjacências é definida da forma seguinte:

Seja A uma matriz $m \times n$, na qual definimos $a_{ij} = 1$ se o vértice i e j são adjacentes, isto é conectados por uma arco, e $a_{ij} = 0$, caso contrário.

Para um grafo direcionado, a matriz $m \times n$, apresenta:

$a_{ij} = 1$ se existe um arco (i,j) conectando o vértice i ao vértice j

$a_{ij} = 0$, caso contrário.

Dados dois vértices $x_i \in X$ e $x_j \in X$, definimos a distância $d(x_i, x_j)$ ou, abreviadamente, $d(i,j)$ como o valor seguinte:

$d(i,j) = 0$ se $i = j$

$d(i,j) = \infty$ se \notin arco (x_i, x_j) , $x_i \neq x_j$.

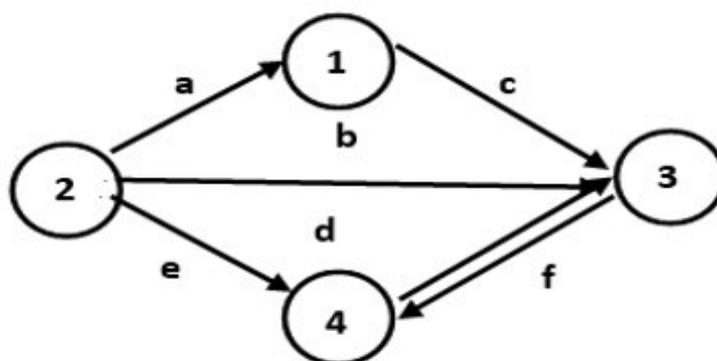
$d(i,j) < \infty$ se \in arco (x_i, x_j) , $x_i \neq x_j$.

Exemplo da matriz de adjacências representada na Figura 2.1 correspondente a um grafo direcionado, conforme ilustrado na Figura 2.2.

Figura 2.1 - Matriz de adjacências de vértices, correspondente ao grafo direcionado [2.2]

	1	2	3	4
1	0	1	1	0
2	1	0	1	1
3	0	0	0	1
4	0	0	1	0

Figura 2.2 - Um exemplo de Grafo direcionado, segundo Evans e Mineka (1992)



O método utilizado para o cálculo do valor do caminho mais forte entre duas entidades conectadas em uma trilha pertencente ao cenário, através dos vínculos intermediários dos nós interconectados em uma rede é baseado na trilha reversa usada pelo algoritmo Dijkstra (1994), que recompõe o caminho mínimo entre os nós de um grafo. A estrutura representada resultará no caminho de máximo êxito entre duas entidades selecionadas. Xu e Chen (2002) propuseram o uso de técnicas para análise de conexões em grafos usando algoritmos de caminho mínimo modificado que são aplicados à identificação das mais fortes conexões entre entidades de uma rede.

O algoritmo Dijkstra é o método clássico para cálculo do caminho de custo mínimo a partir de um nó fonte para todos os demais nós de um grafo capacitado, pressupondo um grafo contendo arcos não negativos (XU e CHEN, 2007; Boaventura, 1979).

No Modelo de Reação aplicamos um algoritmo denominado Chain, adaptado por Martins I (2009), cujos princípios estão baseados no algoritmo Dijkstra (1994), desenvolvido para cálculo das mais fortes conexões entre entidades de um mapa de relacionamentos. O algoritmo Chain calcula o produtório das probabilidades parciais de cada trilha de acesso, entre quaisquer pares de entidades selecionadas, evidenciando a criticidade em cada trilha de acesso, para consecução da sequência de possíveis deslocamentos entre a fonte ou origem (ponto de origem do voo) e o destino do grafo (ponto de destino do voo).

O algoritmo Chain processa as mais fortes conexões entre cada par i, j da matriz bruta de relacionamentos, apresentando o caminho possível entre as entidades e o valor representativo das mais fortes chances de aproximação entre as entidades. Como produto dos cálculos para identificação do melhor caminho é gerada uma matriz secundária (Back Tracking, adiante tratado) que fornece uma trilha de nós antecessores referente ao caminho gerado entre cada par de entidades processadas (EVANS e MINIEKA, 1992).

O algoritmo Chain trabalha diretamente sobre a matriz de relacionamentos, pesquisando as mais fortes conexões entre vértices para cálculo dos caminhos de maior aproximação entre entidades. Desta forma, ao final do processamento o algoritmo apresenta os caminhos das mais fortes conexões entre cada par de entidades do grafo. Para localizarmos a mais forte associação entre um par de nós deveremos localizar o maior produto dos pesos entre os nós (MARTINS I, 2009).

Desde que, o caminho mínimo foi identificado pelo algoritmo, onde foram reconhecidas as menores distâncias entre os nós do grafo (o valor dos arcos indicando o peso das associações), a representação das conexões mais fortes resultante do algoritmo de caminho mínimo não garantirá que as mais fortes associações estejam corretamente identificadas. Xu e Chen (2002) propõem como solução para este problema a aplicação de uma heurística que transforma a busca pelo caminho mínimo na localização das mais fortes conexões em um grafo direcionado, usando a seguinte transformação logarítmica:

$$l = -\ln(w) \quad 0 < w \leq 1$$

onde:

l é o peso da conexão no novo grafo transformado

w é o peso correspondente no grafo original

Com a transformação proposta obtêm-se os axiomas seguintes:

- Todas as conexões no grafo transformado são números não negativos.

Como $0 < w \leq 1$,

então: $\ln(w) \leq 0$,

o que sugere: $-\ln(w) \geq 0$;

- Os menores valores dos arcos no grafo transformado correspondem aos maiores valores no grafo original.

Se $l_1 < l_2$,

Então, $-\ln(w_1) < -\ln(w_2)$,

Assim, $\ln(w_1) > \ln(w_2)$.

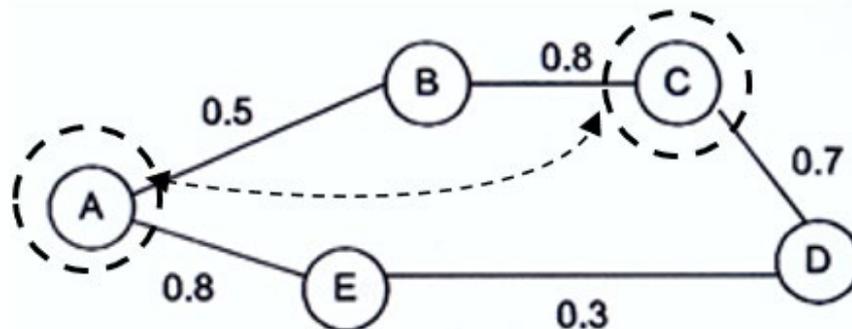
Uma vez que $\ln(w)$ é uma função monotônica crescente, segue-se que

$$w_1 > w_2;$$

- Os menores caminhos usando a soma dos valores dos pesos no grafo transformado corresponde aos maiores produtos dos arcos usando a rede original.

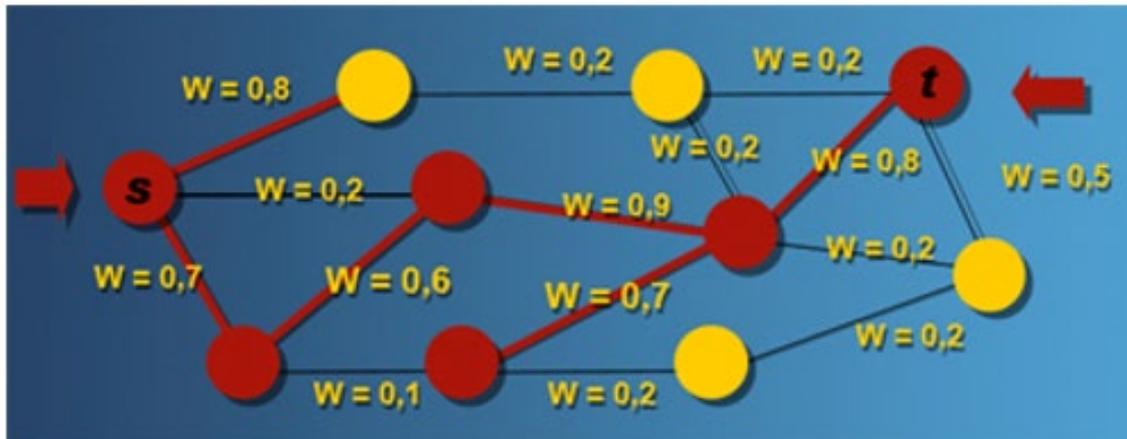
Na Figura-3 observamos que o nó [A] e o nó [C] encontram-se conectados através do nó [B]. O valor das conexões intermediárias entre [A-B] e entre [B-C] são respectivamente 0,5 e 0,8. Desta forma, teremos como valor referente ao caminho [A-B-C] o produto (0,5 x 0,8) que será igual a 0,4.

Figura 3 - Dois nós indiretamente conectados [A e C] (Xu e Chen, 2002)



A Figura-4, apresenta um grafo que tem como origem, o nó [S] e destino o nó [T]. Um algoritmo de caminho mais forte, demonstra através da ilustração ressaltada em vermelho o resultado da sequência máxima obtida para alcance, entre [S] e [T], dentre todas as alternativas existentes (XU e CHEN, 2007)

Figura 4 – Exemplo de grafo apresentando uma pesquisa de Caminho Máximo (Martins I, Visual Grafus, 2018)



DESCRIÇÃO DO MODELO DE REAÇÃO

O desenvolvimento do projeto do Modelo de Reação (Martins I, 2019) compreendeu os seguintes módulos sistêmicos, desenvolvidos em linguagem VisualBasic (ambiente Windows), alimentados por informações aeronáuticas pesquisadas em fontes oficiais especializadas, extraídas de Bancos de informações residentes em Access (MARTINS E, 2005)

Editor do Mapa de Riscos e Modelador dos Fatores Críticos

O Modelo de Reação incluiu um conjunto de recursos específicos para tratamento primário das variáveis, integrado por dois módulos dedicados à edição dos fatores de risco, como passo preliminar para posterior tratamento dos fatores como uma rede de eventos críticos. O módulo-1 inicial destina-se à edição das variáveis que integrarão o cenário, permitindo a modelagem de parâmetros identificados em situações potenciais de riscos em acidentes (MARTINS E, 2010). No módulo-1 os Fatores de risco (Títulos) são segmentados em subtítulos (denominados Entidades), tais como objetos de análise, fatores pessoais, eventos, ocorrências operacionais, equipamentos, eventos ergonômicos, características, fases do voo, pré-requisitos operacionais e outros (MARTINS E, 2010). O Módulo-2, integra-se ao primeiro módulo, parametrizando os riscos referentes a cada subtítulo e suas respectivas probabilidades de ocorrerem com êxito, quando associadas na cadeia de eventos.

A Imagem apresentada no plano superior na Figura-5, ilustra O Editor de Fatores de Risco, que suporta a inclusão de, até 8 Grupos de Fatores de Risco, que por sua vez, pode ser decomposto em, até 6 subtítulos. Os subtítulos inseridos representarão as Entidades na modelagem da Rede Semântica. No plano inferior da Figura-5 observamos na ilustração, o Modelador de Riscos, onde através de sliders (objetos deslizadores de criticidade para cada entidade (nó) presente na rede. Como subproduto desta fase é gerado um arquivo contendo dados do Cenário em estado bruto, não tratado como um grafo.

Figura 5 – Editor de Fatores de Risco e Índices de Criticidade (Modelo de Reação Fase-1)



Exemplificamos a modelagem de um Fator Crítico, conforme ilustrado na Tabela-1. Os resultados foram editados pelos Módulo-1 e Módulo-2 do Modelo de Reação. Selecionamos para este exemplo, um fator crítico definido como MEDICINA, extraído ao acaso de um cenário hipotético de um acidente aéreo.

Tabela 1 - Exemplo de Modelagem de um Fator Crítico

FATOR	SUBGRUPO	IMPACTO	INCIDÊNCIA	CRITICIDADE
Medicina	Problema aero médico ou psicossocial	2	9	1,8
Medicina	Capacitação física	3	7,5	2,25
Medicina	Sobrecarga emocional e / ou cognitiva	5	3	1,5
Medicina	Recuperação enfermidade	2	3	6
Medicina	Insônia	6	1	6

Fonte: Fatores Críticos na Aviação (Martins E, 2010)

STORYBOARD - MODELADOR DE CENÁRIOS

Nesta etapa o arquivo preparado pelo Editor de Fatores críticos é lido por um programa modelador de cenário, dispondo os fatores e subtítulos em uma matriz preparada para receber até 8 fatores críticos x 6 subtítulos decompostos. Após a alimentação dos dados pelo programa, os elementos inicialmente editados serão organizados em colunas por tipo de fator de risco, dispostos em um storyboard (ambiente de planejamento). O resultado desta leitura será um grafo desconectado (Cormen, 1991), conforme ilustrado na Figura-6.1. Nesta estrutura inicial estarão presentes atores, eventos, objetos e atividades que tiveram relacionamento com entidades do cenário editado, desde a origem do voo até o seu destino. A edição preliminar do cenário foi complementada pela inclusão de eventos preparatórios e/ou intermediários importantes na composição do cenário analisado, que deverá ser o mais completo possível, integrando todos os fatores considerados na análise. A estrutura resultante representará um mapa vetorial contendo todas as variáveis identificadas no cenário a ser analisado, plotadas como um grafo, neste

primeiro momento, ainda desconectado, sem determinação de seus caminhos e ainda sem as associações existentes entre os nós. Após o procedimento de leitura do arquivo editado, o analista de riscos, manualmente, inicia o trabalho de modelagem da rede no storyboard, trabalhando sob um grafo totalmente desconectado, que será progressivamente transformado em um mapa vetorial organizado. Deverão estar sendo usados nesta fase de modelagem todas as variáveis relevantes previstas na edição, e que, de alguma forma, possam historicamente ter apresentado alguma relação ou contribuição significativa com o cenário do acidente.

O significado das entidades no mapa vetorial depende do tipo do acidente estudado, sejam estas ações, pessoas, objetos, locais, traduzidos pelos nós do grafo, cujas conexões são representadas por relações de amizade, relações profissionais, relações hierárquicas, comunicações, relações ergonômicas etc. (BOAVENTURA, 1979).

Os nós serão então conectados no mapa vetorial pelo analista de riscos, usando para este fim as ferramentas gráficas de edição disponíveis no programa modelador, onde são aplicadas facilidades do tipo drag-drop para programar as conexões, resultando os vértices do grafo, que exibirá no mapa vetorial uma linha de associação entre os nós. Este procedimento resultará na progressiva construção de caminhos lógicos existentes no grafo. Os eventos, após conectados, passarão a constituir trilhas sequenciadas, formando caminhos lógicos de atividades que produzirão ao final da modelagem uma rede de relacionamentos conectada, tendo como origem, o ponto inicial do voo, estendido até o destino previsto (Figura 6.2).

Figura 6.1- Exemplo de Storyboard - Mapa Vetorial desconectado (Mod. de Reação Fase-2)



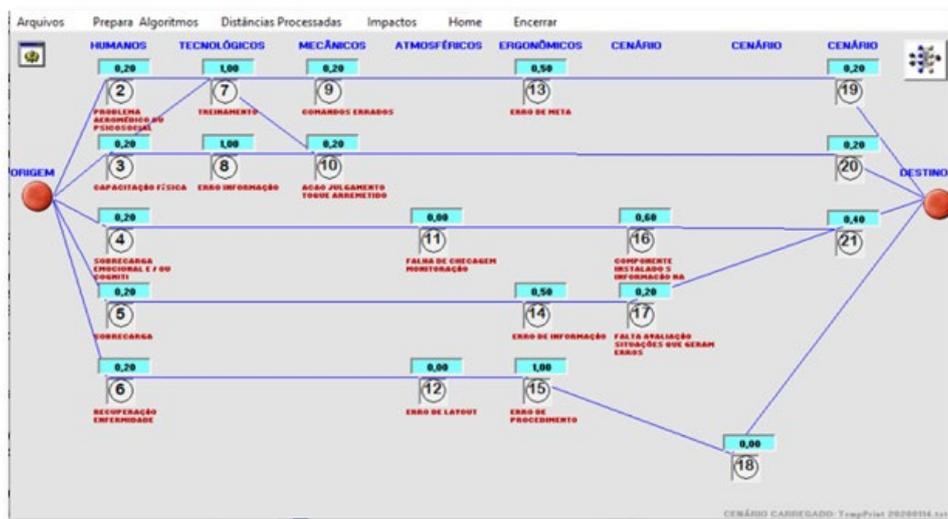
Figura 6.2 - Exemplo de Storyboard após modelagem das conexões dos nós da rede



Modelador do grafo objetivo

Nesta fase, o produto da sequência processada poderia ser denominado de Análise Reversa do Acidente (MARTINS I, 2019). O mapa, ou árvore de relacionamento dos fatores envolvidos poderá ser tratado como uma rede de fatores críticos. Neste mapa os conceitos relacionados produzidos pela investigação encontram similaridade com a teoria dos grafos, onde as Entidades representam os nós do grafo e os relacionamentos representam os seus arcos ou vértices (MARTINS I, 2009). Para cada nó (Fator de Risco) existe um gradiente que expressa a probabilidade de sua ocorrência na dinâmica do cenário, encontrando-se associado a uma medida de gravidade ou impacto de referência do fator, conforme anteriormente parametrizado no caso específico estudado para o acidente. Na estrutura da matriz completa (6 fatores x 8 subtítulos) desenvolvida genericamente para tratamento de cenários de acidentes aéreos, apenas alguns destes fatores críticos selecionados no mapa vetorial foram conectados pela modelagem manual, reduzindo o storyboard graficamente, apenas aos caminhos anteriormente editados pelo analista de riscos. A partir de um comando oferecido no quadro de opções do programa, os subtítulos inativos que compõem cada fator de risco no mapa serão visualmente eliminados do cenário, transformando o mapa vetorial completo em uma árvore objetiva de caminhos válidos para análise, integrada apenas por ENTIDADES (fatores envolvidos) relacionadas efetivamente com o acidente estudado.

Figura 7- Árvore objetiva ou Matriz Compacta de eventos (Modelo de Reação Fase-3)



Para melhor compreensão, podemos observar na Figura 6.2 os parâmetros editados do mapa vetorial representando a incidência associada aos subtítulos na cor azul (índices críticos ativos) e subtítulos na cor branca (índices críticos inativos). Os subtítulos na cor azul compreendem aqueles nós que foram associados entre si pelo analista de riscos a um ou mais nós da rede, formando sequência(s) (caminhos) no grafo direcionado. A transformação sistêmica para o modelo de reação reduzido (Figura-7) é realizada eliminando-se visualmente os elementos do grafo na cor branca, restando para análise apenas os elementos na cor azul, que estarão efetivamente participando de sequências (caminhos) de Entidades encadeadas no grafo. Segundo Martins i (2009), associações entre os nós do mapa vetorial podem evidenciar que determinado grupo de fatores de risco pertencem a mesma cadeia de causalidades, concluindo pela descoberta de linhas de investigação "invisíveis". Tais descobertas fundamentam-se em conceitos tratados como "Link Analysis" por Chen (1992) e Xu e Chen (2002), obtendo-se a preparação

automática de redes integradas por entidades conectadas ferramentas, conforme recomendadas por Goldberg e Wong (1998) e Hauk *et al.* (2002).

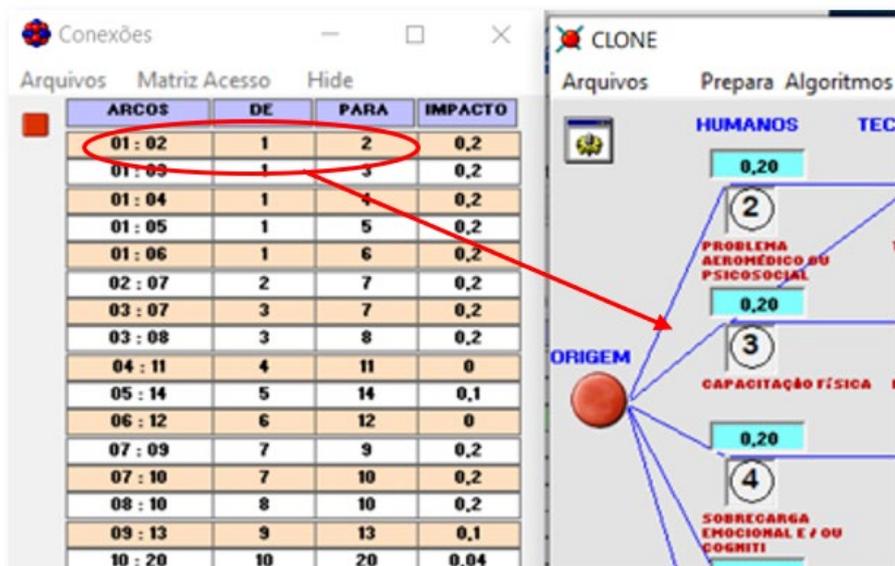
Aplicação de Algoritmos de Caminhos de Mínimos e preparação da Matriz Ponderada de Adjacências

A partir de um comando sistêmico acionado na Fase-3, o Modelo de Reação procede ao tratamento de matrizes preparatórias dos algoritmos para tratamento das associações entre os nós, bem como dos cálculos para identificação dos caminhos mínimos/máximos derivados do mapa vetorial. Segundo Martins I (2009), a utilização de algoritmos usados para busca dos vínculos fortes entre entidades presentes em uma rede tem sido amplamente usada em diversos domínios temáticos, como pesquisas médicas, redes sociais e investigação criminal. Três estruturas preparatórias para processamento dos algoritmos são apresentadas a partir do tratamento matemático no grafo reduzido, a saber:

Lista de Associações (Arcos ou Vértices)

Um algoritmo para tratamento das associações entre os nós da rede identifica e extrai todas as possíveis conexões existentes, registrando o resultado da busca em uma lista numericamente organizada, segundo codificação atribuída aos nós. Nesta estrutura estarão listados cada par existente de conexões na rede, representando cada um dos vértices presentes no mapa vetorial. A Figura-8 ilustra parcialmente uma imagem da rede reduzida (à direita da figura) e à esquerda, uma lista parcial dos vértices correspondentes.

Figura 8 - Árvore objetiva ou Matriz Compacta de eventos (Modelo de Reação Fase-4)



Neste exemplo, a primeira linha da tabela, à esquerda, apresenta o vértice resultante da conexão entre o nó [1] e o nó [2], cuja criticidade assume o valor [0,2]. A segunda linha da tabela apresenta o vértice resultante da conexão entre o nó [1] e o nó [3], cuja criticidade assume o valor [0,2].

A lista de associações apresenta uma coluna que exibe, para cada par de conexões, um valor que expressa a chance de sucesso, no caso de ambos os eventos que estão conectados, ocorrerem sequencialmente, cujo impacto provocará alterações nos índices críticos do cenário do acidente.

Em grande parte dos acidentes aéreos, os elos comuns (conexões) pertencentes a caminhos de atividades formados por fatores críticos estarão presentes, por exemplo, Treinamento x Capacitação do Piloto, Insegurança Institucional x Consciência Situacional, Manutenção x

ANÁLISE DA EDIÇÃO

De	PARA	IMPACTO/ACUMULADO	FATOR DE RISCO	
01	02	+ 00,20	00,20	PROBLEMA AEROMÉDICO OU PSICOSOCIAL
02	07	+ 01,00	01,20	TREINAMENTO
07	10	+ 00,20	01,40	ACAO JULGAMENTO TOQUE ARREMETIDO
10	20	+ 00,20	01,60	COMANDOS ERRADOS

Chances de sucesso nesta sequência = 2,00%

$$\sum_{k=1}^n x_i \cdot p_i = [Nó- 20] 20,0\% \times [Nó- 10] 20,0\% \times [Nó- 7] 50,0\% \times [Nó- 2] 100,0\%$$

Matriz Reversa de Acesso (Matriz de Alcance) – Back Tracking

Usando uma trilha reversa do acesso existente entre entidades do grafo, é possível ao método identificar possíveis vínculos intermediários existentes entre as entidades. As linhas e colunas da matriz de acesso referenciam os antecedentes de cada passo na trilha de acesso entre entidades (DJKSTRA, 1959). O Caminho para o acesso é realizado, considerando o último nó referenciado (destino do caminho), retornando passo a passo até o primeiro nó fonte da sequência examinada. Este método permite investigar o acesso e o valor da chance de aproximação entre entidades em um mapa vetorial auxiliando a descoberta de nós intermediários ocultos no relacionamento entre atividades do cenário (MARTINS I, 2009).

A Matriz Reversa apresenta duas Etiquetas:

- Etiqueta PI - indica qual o antecedente de melhor acesso na rede
- Etiqueta ALFA - indica o somatório dos impactos acumulados da entidade de origem até a entidade proprietária da etiqueta (usada como referência para o algoritmo)

Por convenção e facilidades necessárias ao tratamento dos cálculos usados no algoritmo, o Nó de origem (nó fonte) recebe o antecedente [-1]

A Figura 10 ilustra um modelo de Matriz Reversa obtida como resultado do algoritmo de caminhos mínimos aplicado no exemplo e exibido nas fases anteriores da descrição do Modelo de Reação.

Figura10 - Matriz de alcance – Back Tracking (Modelo de Reação Fase-6)

	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
PI	0	1	1	1	1	1	2	3	7	7	4	6	9	5	12	11	14	15	13	10	16	18
ALFA	-1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	1,2	1,2	1,4	1,4	0,2	0,2	1,9	0,7	1,2	0,8	0,9	1,2	2,1	1,6	1,2	1,2

Quando o algoritmo identifica a existência de mais de uma alternativa de acesso é selecionado para o rastreamento na matriz a maior chance de sucesso da trilha, conectando duas entidades pelo seu mais forte vínculo.

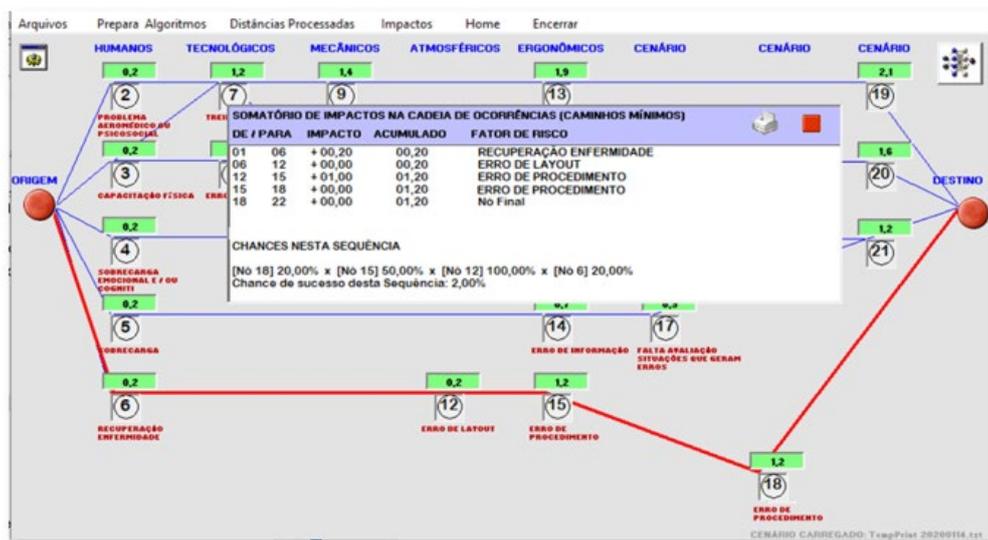
A Matriz Back Tracking servirá de base para identificação dos pontos mais críticos da

rede, propiciando e análise mais aprofundada de riscos que é realizada diretamente sobre o grafo objetivo, obtido na Fase-3 de processamento do Modelo de Reação. Após a apuração da Matriz de Alcance, uma opção de comando é acionada no programa para retorno ao grafo objetivo.

Identificação de caminhos de impactos mínimos / riscos máximos

A partir do processamento concluído das fases anteriores, o grafo objetivo receberá pré-calculados os valores finais das probabilidades de aproximação entre todos os pares de entidades onde foi possível um caminho direto ou intermediado. Devido à sua construção como um grafo conectado, é possível, a partir do ponto de origem (fonte do grafo), alcançar qualquer outro nó da rede e determinar qual o risco acumulado do acesso selecionado, conforme ilustrado na Figura-11.

Figura 11 - Análise – Identificação do caminho crítico (Modelo de Reação Fase-7)



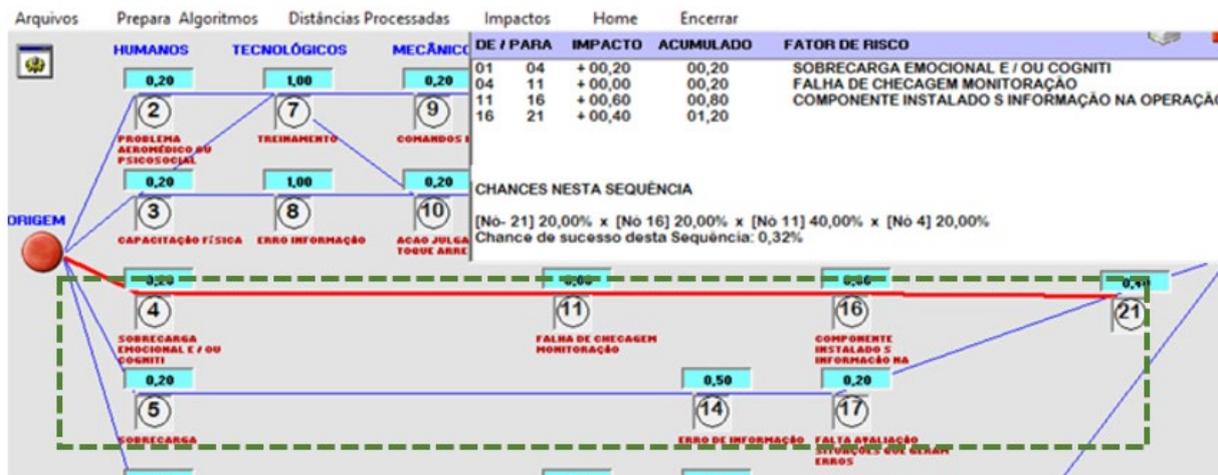
O método utilizado possibilita assim que possa ser investigada a chance de êxito na possível sucessão de atividades da rede, considerando a origem do voo e o acesso à ocorrências nos pontos mais críticos do cenário modelado, apoiando a investigação de suas causalidades no acidente (MARTINS I, 2009).

As etiquetas exibidas abaixo dos subtítulos exibem no momento de acionamento da Fase-7 os impactos de cada respectiva (cor verde) e não as probabilidades de ocorrência (cor azul), conforme anteriormente exibidos na modelagem inicial. Esta nova configuração das etiquetas permite facilitar a leitura das informações que serão recuperadas pelo analista nesta fase, podendo, entretanto, a qualquer momento cambiar o tipo da etiqueta exibida na rede. Ao selecionarmos um nó (clique do mouse) o programa ressaltará em vermelho o caminho possível, a partir do nó origem até nó selecionado, complementando com a emissão em tela de um relatório que descreve o melhor caminho até o nó selecionado, onde são computadas as chances de êxito associadas ao caminho processado. Se selecionarmos o nó final, o Modelo de Reação apresentará graficamente desenhado no grafo o Caminho Crítico que representa o caminho de menor impacto dentre todas as alternativas existentes.

No segundo exemplo, selecionamos o acesso a partir da origem, até o nó [21]. Para esta operação clicamos sobre o nó [21] e o programa calcula o melhor caminho (somatório dos impactos) a partir da origem nó [1].

Podemos observar que havia uma segunda alternativa do acesso entre o nó [1] e o nó [21], cuja sequência poderia ser [5] / [14] / [17] mas que apresentaria uma distância (impactos) maior que aquela selecionada pelo algoritmo de caminhos mínimos, sendo por esta razão descartada, conforme ilustrado na Figura 12. Os dois caminhos alternativos confrontados encontram-se ressaltados pela linha pontilhada, em verde.

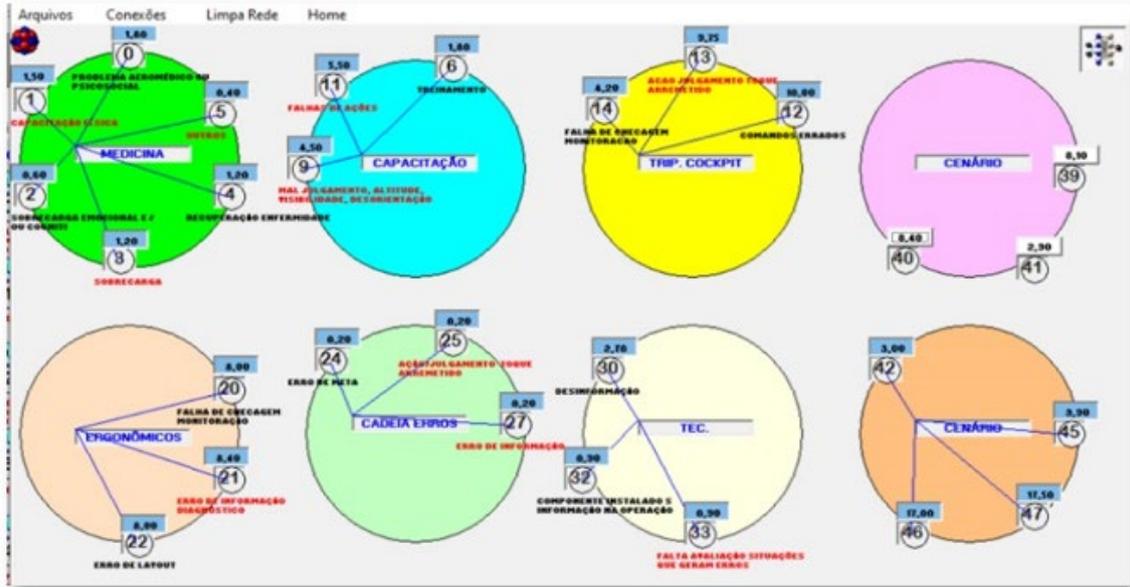
Figura 12 - Análise – Identificação de caminho de menor impacto (Modelo de Reação Fase-7)



Análise de Clusters

A importância da Clusterização em acidentes pode ser aplicada em numerosos casos para descoberta da concentração de falhas sobre Fatores críticos, por exemplo, apontando para Falhas Humanas & Automação de Aeronaves, Manutenção & Treinamento, Aeródromos & Fase do Vôo, Aeródromos & Equipamentos de Apoio e diversas outras combinações de falhas. Tais análises, entretanto, carecem grandes volumes de informações para obter representações significativas e isentas de distorções. Portanto temos aqui duas análises distintas: análise das concentrações (Figura 13) e análise entre concentrações (Figura 14). Estes recursos de análise permitem a descoberta de clusters concentradores de fatores críticos, por exemplo, identificarmos quantas vezes um determinado erro aparece associado a outro tipo de erro em relatórios de acidentes. Tais questões podem ser resolvidas por métodos de extração de dados em relatórios textuais (MARTINS I, 2009), ou ainda, através de algoritmos hierárquicos e partição (VIDAL, 2003). Os grupos ou clusters são identificados por padrões ou representações de configurações, onde certo elemento do grupo apresenta maior similaridade, característica ou propriedade com os demais elementos do mesmo agrupamento, em comparação com outros elementos de outros grupos (MARTINS I, 2009). Aplicamos como distância entre os elementos, o método Ward que compreende a soma dos quadrados sobre todas as variáveis. o método particionado compreende a pesquisa pela procura de n entidades, de modo atender a premissa de isolamento dos grupos (VIDAL, 2003)

Figura 13- Análise dos Clusters no cenário analisado (Modelo de Reação Fase-8)



Análise de Densidade

A análise de densidade permite a identificação de interseções entre pares de fatores críticos selecionados no mapa vetorial. A função calcula também a densidade entre os grupos, identificando as entidades existentes e analisa os vínculos existentes em sua interseção. A Figura 15 apresenta um relatório resumo de densidades que se propõe medir o nível de comunicação entre os grupamentos de fatores críticos. O relatório apresenta as entidades comuns e demais entidades integrantes nos grupos selecionados. São fornecidos indicadores de densidade, traduzindo a interseção existente entre os grupos de fatores críticos editados no mapa Vetorial.

Figura 14- Análise gráfica de Densidade entre dois fatores críticos (Modelo de Reação Fase-9)

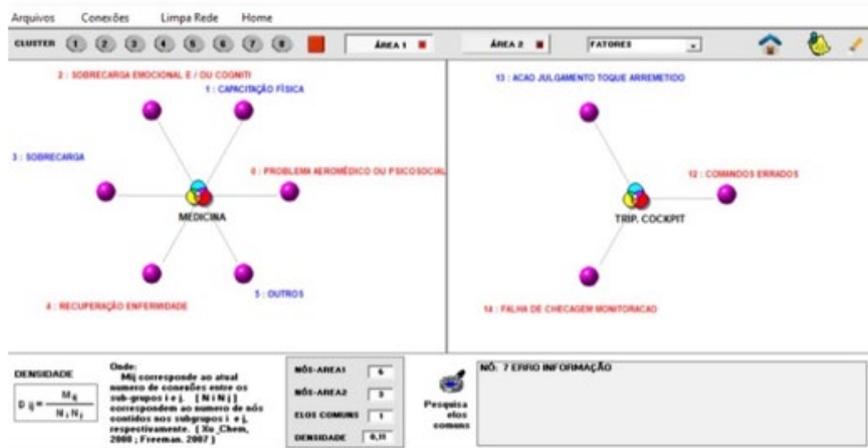


Figura 15- Análise de Densidade na rede -Relatório Consolidado (Modelo de Reação Fase-9)

CONCENTRAÇÃO POR TIPO DE FATOR CRÍTICO			
	FATOR CRÍTICO	IMPACTOS	PARTICIPAÇÕES
CLUSTER 1	MEDICINA	6,7	4,77%
CLUSTER 2	CAPACITAÇÃO	11,8	8,41%
CLUSTER 3	TRIP. COCKPIT	24,75	17,63%
CLUSTER 4	ERGONÔMICOS	25,2	17,96%
CLUSTER 5	CADEIA ERROS	0,6	0,43%
CLUSTER 6	TEC. INFORMAÇÃO	4,5	3,21%
CLUSTER 7	CENÁRIO	19,4	13,82%
CLUSTER 8	CENÁRIO	47,4	33,77%
		TOTAL IMPACTOS	140,35

A função densidade é calculada com base na relação entre as quantidades de entidades identificadas com elos comuns e o total de entidades existentes nos grupos. As entidades comuns entre os grupos são identificadas, computando-se o índice de densidade entre os agrupamentos, (MARTINS I, 2009):

$$D_{ij} = \frac{M_{ij}}{N_i N_j}$$

...onde, M_{ij} traduz às conexões comuns entre os grupos e $N_i N_j$ representa as conexões em cada grupo i e j .

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste artigo procuramos demonstrar como um modelo matemático pode tratar variáveis relacionadas com situações de risco em cenários aeronáuticos.

Apresentamos a importância do Modelo de Reação para análise de fatores críticos ambientais que se relacionam com o piloto e com a aeronave.

Descrevemos o tratamento matemático do algoritmo de caminho mínimo transformado, e sua capacidade de relacionar-se com eventos, onde os sintomas de uma situação-problema encontram-se pouco visíveis. Frequentemente este fenômeno deixa um resíduo negativo na mente do piloto que se acumula a outros agentes negativos, erodindo lentamente a capacidade laboral do profissional aeronauta, até uma quebra da estabilidade dos operandos subsunçores vinculados à pilotagem segura, comprometendo a sua interpretação de condicionantes voltados para o comportamento operativo da aeronave. Os hábitos de vida, as novidades não informadas da tecnologia embarcada nas modernas aeronaves, a quebra de rotina e horários e o distanciamento da família contribuem para o aumento dessa vulnerabilidade. Através da descoberta dos elos mais críticos identificados na cadeia de fraquezas dentre os fatores críticos, presentes em cenários de acidentes, o Modelo de Reação, trabalha seletivamente sobre influências negativas, tais como como agentes orgânico, físicos, químicos, sociais, ergonômicos e profissionais, podem ser observados com maior cautela, acrescentando maior segurança na sequência de eventos combinados que integram ponta a ponta toda cadeia de atividades previstas em um cenário de

um voo. Foram apresentados fatores que agem silenciosamente e destrutivamente no sistema emocional e mental do indivíduo aeronauta, atuando como agentes que podem comprometer ações corretas na pilotagem de aeronaves. Em nossas conclusões ressaltamos que este aspecto degenerativo acontece de forma importante nos estudos do comportamento humano e seus riscos correlatos (Ausubel, 1982). Registramos não ser objetivo do Modelo de Reação, sob nenhuma hipótese, constituir-se ferramenta de substituição do processo pericial aplicado em acidentes, sejam estes de quaisquer porte ou natureza. O Modelo destina-se tão somente complementar estudos e pesquisas sobre causalidades, acrescentando maiores níveis de segurança na operação em ambientes críticos, envolvendo atores, máquinas complexas e respectivo instrumental presente em uma aeronave.

Por fim, destacamos duas importantes recomendações referentes à edição do cenário preparatório para o Modelo de Reação, ambas no tocante à necessária precisão dos parâmetros usados para modelagem dos fatores críticos.

Os indicadores de impacto e probabilidade associados a cada fator crítico selecionado devem refletir com muita acuracidade a sua representação na rede de fatores. Os valores registrados devem medir com máxima precisão, tanto o nível de importância do fator crítico (peso ou impacto) como a probabilidade estatística de êxito do evento.

Na falta ou ausência de históricos ou valores associados aos parâmetros, estes podem ser obtidos por ferramentas de simulação, como Método de Monte Carlo e outros (AALABAF, 2011).

REFERÊNCIAS

AALABAF-Sabaghi, M. Monte Carlo Methods and Models In Finance and Insurance. Journal of the Royal Statistical Society: Series A (Statistics in Society), John Wiley and Sons, 2011

BOAVENTURA Netto. Teoria e Modelos de Grafos. Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 1979.

CENIPA. Relatórios.Finais Recomendações, MAer. Consulta em janeiro de 2007. <https://www2.fab.mil.br/cenipa/index.php/prevencao-de-acidentes>

CORMEN T.H., C.E. Leiserson, R.L. Rivest, Introduction to Algorithms, MIT Press, Cambridge, MA, 1991.

CHEN H., K.J. Lynch, Automatic construction of networks of concepts characterizing document databases, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics 22 (1.5.5) (1992) 885– 902.

CONDON E.; Golden B.; Lele S.; Raghavan S.; Wasil E. A Visualization Model Based on Adjacency Data. Decision Support Systems, Volume 33, Number 4, August 2002

DJKSTRA E., A note on two problems in connection with graphs, Numerische Mathematik 1 (1959) 269–271.

EVANS J, E.Minieka, Optimization Algorithms for Networks and Graphs, Marcel Dekker, New York, 1992.

FAA- Accident & Incident Data. Aircraft Accident and Incident Notification, Investigation, and Reporting.

U.S. Department Of Transportation Federal Aviation Administration, US 2008

GOLDBERG H.G., R.W.H. Wong, Restructuring transactional data for link analysis in the FinCen AI System, Proceedings of 1998 AAAI Fall Symposium on Artificial Intelligence and Link Analysis, AAAI Press, Menlo Park, CA, 1998.

HUMAN FACTOR FAA– From “Dirty Dozen” to “Filthy Fifteen”. Aviation Mx . June 2006. US Vol 4 Issue 2

MARTINS E, Edgard. T, Estudo das implicações na saúde e na Operacionalização do Trabalho do Aeronauta Embarcado em Modernas Aeronaves no Processo Interativo Homem-Máquina. Tese doutorado, Instituto Oswaldo Cruz, CPQAM, Recife, 2010. 990 pg.

MARTINS E, Edgard. T, Ergonomia na Aviação. Um estudo crítico da responsabilidade dos pilotos na causalidade dos acidentes – monografia de Mestrado – UFPE, Depto de Design, Recife, 2005.

MARTINS I Isnard; Construção de um modelo de reação para testes de variáveis endógenas utilizadas para situações de risco no controle de máquinas complexas. Laboratório de Segurança e Higiene do Trabalho – LSHT, Recife PE, 2019

MARTINS I Isnard. Desenvolvimento e Análise de Mapas de Inteligência Aplicando Descoberta de Conhecimento em Bases de Informações Criminais e Algoritmos Híbridos. Tese de Doutorado, PUC-Rio, 2009

MARTINS I, Isnard; Visual Grafus – Modelagem de Redes Software Laboratorial Grafos, Dee, PUC-Rio, 2005/2006/2018

KOHONEN, T., Self-Organization Maps, Springer-Verlag, Berlin. 1997.

McANDREW D, The structural analysis of criminal networks, in: D. Canter, L. Alison (Eds.), The Social Psychology of Crime: Groups, Teams, and Networks, Offender Profiling Series, Aldershot, Dartmouth, 1999

TURI MAGAZINE. 12 fatores humanos que mais causam acidentes na aviação. Consulta em janeiro 2021. <https://www.turimagazine.com/12-fatores-humanos-que-mais-causam-acidentes-na-aviacao/>

VIDAL L. A. Carvalho. DataMining, a mineração de Dados no Marketink, Medicina, Economia e Administração. Editora Ciência Moderna, Rio de Janeiro, 2003.

VERGARA, Sylvia Constant. Projetos e relatórios de pesquisa em administração. 9 ed. São Paulo: Atlas, 2007

Xu J., Chen H. Criminal Network Analysis and Visualization: A Data Mining Perspective. Consulta em março, 2002 http://ai.bpa.arizona.edu/COPLINK/publications/crimenet/Xu_CACM.doc

XU Jennifer, Chen H., Fighting organized crimes: using shortest-path algorithms to identify associations in criminal network. Decision Support System 38 (2004) 473-487 Zio Enrico, An Introduction To The Basics Of Reliability And Risk Analysis. World Scientific, 28 de fev. de 2007.