

## COMPOSIÇÃO DE AVALIAÇÕES DE MÚLTIPLOS ESPECIALISTAS NA COMPARAÇÃO DE MODOS DE FALHAS EM USINA NUCLEAR

### **Annibal Parracho Sant'Anna**

Universidade Federal Fluminense  
Rua Passo da Pátria, 156, bl.E sl. 447 – 24210240 – Niterói-RJ - Brasil  
annibal.parracho@gmail.com

### **Eduardo Ferraz Martins**

Comissão Nacional de Energia Nuclear  
Rua General Severiano, 90 222290-901 Rio de Janeiro-RJ – Brasil  
eduardoferrazuff@yahoo.com.br

### **Gilson Brito Alves Lima**

Universidade Federal Fluminense  
Rua Passo da Pátria, 156, bl.E sl. 447 – 24210240 – Niterói-RJ - Brasil  
glima@iduff.br

### **Renato Alves Fonseca**

Comissão Nacional de Energia Nuclear  
Rua General Severiano, 90 222290-901 Rio de Janeiro-RJ – Brasil  
rfonseca@cnen.gov.br

## **RESUMO**

Dá-se aqui desenvolvimento a uma aplicação do CPP Híbrido (CPP-Hi) em uma usina nuclear como apoio à modelagem do evento Perda de Energia Elétrica Externa (PEEE). O CPP-Hi estabelece uma interface metodológica entre a Análise de Modos e Efeitos de Falhas - *Failure Modes and Effects Analysis (FMEA)* e a Análise de Confiabilidade Humana - *Human Reliability Analysis (HRA)*. A Composição Probabilística de Preferências (CPP) é usada para facilitar essa interação, mediante a transformação das medidas de risco em probabilidades. Uma inovação deste artigo é a aplicação da distribuição beta para lidar com a possibilidade de combinar avaliações produzidas separadamente por múltiplos especialistas.

**PALAVRAS CHAVE.** Composição Probabilística de Preferências. FMEA. Energia Nuclear.

**Área principal:** Apoio à Decisão Multicritério

## **ABSTRACT**

An application of CPP-Hi in a nuclear power plant to support the modeling of the event of Loss of External Electric Power (PEEE) is developed here. CPP-Hi establishes a methodological interface between Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) and Human Reliability Analysis (HRA). Composition of Probabilistic Preferences (CPP) is used to facilitate the interaction between the two by transforming the risk measures into probabilities. An innovation of this paper is the application of the beta distribution to deal with the possibility of combining assessments produced separately by multiple experts.

**KEYWORDS:** Composition of Probabilistic Preferences. FMEA. Nuclear Energy

## 1. Introdução

Martins (2015) desenvolveu o CPP Híbrido (CPP-Hi), um instrumento para considerar os aspectos relativos aos erros humanos em um ambiente de risco e suas possíveis contribuições às falhas em instalações de alta complexidade. Este instrumento tem como foco a investigação da confiabilidade humana e a identificação de parâmetros a serem controlados para reduzir ou detectar a condição de falha. Como resultado final, apresenta, do mesmo modo que a Análise de Modos e Efeitos de Falhas (FMEA), uma avaliação global dos riscos dos modos potenciais de falha, estabelecendo uma ordem para as ações de melhoria. Para isso, desenvolve a avaliação das alternativas e documenta os resultados. Como benefícios em paralelo, facilita análises futuras, consolida e aumenta o conhecimento de todos os envolvidos em relação aos aspectos do processo associados com a qualidade e confiabilidade do produto e estabelece um referencial que auxilia na análise e melhoria de processos similares.

A partir da identificação dos modos de falha e da avaliação dos riscos segundo uma coleção ampliada de critérios, o CPP-Hi emprega a Composição Probabilística de Preferências (CPP) para obter diferentes ordenações e classificações dos riscos. Entre os recursos da CPP empregados incluem-se o cálculo de probabilidades conjuntas de cada modo de falha ser o de maior risco e a classificação em classes de risco segundo critérios mais benevolentes e mais exigentes. Análises de sensibilidade concluem a aplicação do instrumento, verificando a coerência dos resultados encontrados com o uso de diferentes distribuições para identificação da criticidade dos modos de falha.

No presente artigo, se estuda uma aplicação do CPP-Hi à análise da situação de perda de energia externa em uma usina nuclear. Os modos de falha são avaliados por um grupo de especialistas e a informação gerada por essas avaliações é usada na modelagem empregando a distribuição beta.

A Seção seguinte discute o contexto em que se realiza a aplicação aqui estudada, da segurança no setor de produção de energia nuclear. As seções 3 e 4 apresentam as metodologias da FMEA e da CPP. Na Seção 5 é realizada a aplicação prática. A Seção 6 conclui o artigo.

## 2. Segurança no Setor Nuclear e Análise da Confiabilidade Humana

A diversificação da matriz energética é estratégica para o desenvolvimento sustentável e depende da segurança e da confiabilidade dos equipamentos. No setor de energia nuclear, a preocupação com a segurança se intensificou com os acidentes de *Three Mile Island*, em 1979, e *Chernobyl*, em 1986.

Outro acidente marcante ocorreu na usina de Fukushima no Japão em 2011. Nenhuma morte foi atribuída ao acidente na usina, enquanto o tsunami e o terremoto mataram mais de vinte mil pessoas. Porém, ocorreu liberação de materiais radioativos que resultou na contaminação do ambiente e levou a evacuação de milhares de pessoas.

Este acidente gerou um debate internacional e os governos se manifestaram em relação às condições extremas. O relatório do governo japonês sobre o acidente (NERH, 2011) apontou que a avaliação de segurança probabilística na gestão de riscos nem sempre têm sido efetivamente utilizadas nos esforços para a elevação da confiabilidade nas usinas nucleares. No Brasil, por meio do relatório DT-006/11 (ELETRONUCLEAR, 2011), se avaliou a resistência das unidades 1 e 2 da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto a condições extraordinárias além da base do projeto. Neste relatório foi destacada a importância da avaliação probabilística da segurança na avaliação do projeto das usinas.

Em sistemas complexos como os de usinas nucleares, em que se lida com eventos ao mesmo tempo raros e de alta relevância, há necessidade de um acompanhamento mais preciso. Uma estratégia nesse sentido pode-se desenvolver com base na ampliação do conjunto de fatores de risco acompanhado, com a inclusão de aspectos relacionados à avaliação de erros humanos.

A Análise da Confiabilidade Humana (ACH) é um instrumento utilizado para melhorar o desempenho humano e estimar a confiabilidade humana. Os métodos de ACH têm como um dos

objetivos o cálculo e a redução da probabilidade de ocorrência dos erros humanos e de suas consequências. Conforme Hollnagel (2003), a ACH é um ingrediente necessário para o projeto de sistemas interativos e para revisão de práticas de trabalho.

A definição clássica de confiabilidade humana é devida a Meister (1966), que define o termo como a probabilidade de que um trabalho ou tarefa seja completado com sucesso pelos colaboradores, em qualquer fase de operação do sistema dentro de um tempo mínimo requerido (se o requisito de tempo existir). As falhas humanas resultam de processos mentais, tais como, o esquecimento, a desatenção, o baixo nível de motivação, a displicência, a negligência e a imprudência (REASON, 2000).

Os fatores humanos devem ser avaliados em três níveis hierárquicos (ALVARENGA, FRUTUOSO e FONSECA, 2014). O primeiro nível preocupa-se com o comportamento cognitivo do ser humano durante o controle de processos que ocorrem através da interface homem-máquina. O segundo nível tem foco sobre o comportamento cognitivo dos seres humanos quando trabalham em grupos. No terceiro nível é considerada a influência da cultura organizacional.

Para avaliação do erro humano técnicas de confiabilidade humana de primeira, segunda e terceira geração podem ser usadas, como: *THERP* (SWAIN; GUTTMANN, 1983) e *ASEP* (SWAIN, 1987), da primeira geração, *ATHEANA* (USNRC, 1996) e *CREAM* (HOLLNAGEL, 1998), da segunda geração, e *NARA* (KIRWAN et al, 2004), de terceira geração.

### 3. FMEA

A primeira documentação da Análise de Modos e Efeitos de Falhas (FMEA) é encontrada no procedimento MIL-P-1629, divulgado pelo Exército dos Estados Unidos (US Defense Department, 1949). Este procedimento serviu de modelo para a elaboração das normas militares MIL-STD-1629 e MIL-STD-1629A, que detalham a *FMEA*. Pentti e Atte (2002) destacam a aplicação da técnica na indústria aeroespacial na década de 60. Outros autores destacam a utilização da *FMEA* no desenvolvimento do projeto Apollo, a partir de estudos elaborados pela *National Aeronautics and Space Administration (NASA)* (BERTSCHE, 2008; CLARKE, 2005; MCDERMOTT, MIKULAK e BEAUREGARD, 2009).

Na década de 70, a temática sobre a ferramenta passou a ser discutida de forma mais ampla e, em 1978, a *Ford Company* foi pioneira no setor automobilístico ao integrar a *FMEA* em seu conceito de garantia da qualidade. Após a iniciativa da Ford, na década de 80, as empresas automotivas que formam a *Automotive Industry Action Group (AIAG)* incorporaram formalmente a ferramenta em seus processos de desenvolvimento de produtos, por meio da norma QS-9000 (LAURENTI, VILLARI e ROZENFELD, 2012). Ainda segundo estes autores, a indústria alemã, seguindo esse movimento, adotou o uso da ferramenta, conforme definição da *Verband der Automobilindustrie - German Association of the Automotive Industry (VDA)*.

A *FMEA* começa com a identificação de funções e requisitos de um sistema, subsistema, componente ou etapa de um processo. Na sequência são determinados os modos de falhas e os efeitos e causas de cada modo de falha (BERTSCHE, 2008). A etapa seguinte consiste no julgamento de valor de um grupo multidisciplinar que atribui valores à Severidade dos efeitos (S), às probabilidades de Ocorrência (O) e à dificuldade de Detecção (D) (LIU et al., 2013). É calculado, então, o Número de Prioridade de Risco (NPR) - *Risk Priority Number*, como o produto dos valores de S, O e D. Após o julgamento de valor, o grupo deve propor ações para mitigar, eliminar ou detectar os modos de falhas de mais alto NPR (AIAG, 2008).

A *FMEA* foi utilizada inicialmente com escalas de 11 níveis, de 1 a 10 (U.S. Military, 1949, 1980). Com o tempo, as escalas de cinco níveis têm sido mais usadas (PINTO JUNIOR e SANT'ANNA, 2010). Mais informações sobre as escalas de cinco níveis ou de estudos com escalas similares podem ser consultados em *British Standards Institute* (1991), Ben-Daya e Raouf (1993), e Nogueira e Perez (2010).

No intuito de prover melhorias no uso da *FMEA* diferentes estudos têm sido realizados com: lógica nebulosa (GARCIA et al., 2005 ; GUIMARÃES e LAPA, 2004; PILLAY e WANG, 2003; SHARMA, KUMAR D. e KUMAR, 2005), com rede bayesiana (GARCÍA e GILBERT,

2011; YANG, BONSALL e WANG, 2008) e com composição probabilística (SANT'ANNA, 2012), dentre outros.

#### **4. CPP**

A Composição Probabilística de Preferência (CPP) proposta por Sant'Anna (2001) é uma metodologia para composição de múltiplos critérios que leva em conta a imprecisão nas medidas dos atributos ou nas manifestações de preferências. A avaliação final das alternativas resulta da composição das preferências medidas, para cada um dos múltiplos critérios, pelas probabilidades de cada alternativa ser a preferida. Uma vez avaliadas as preferências segundo cada critério por meio de probabilidades, a preferência global pode ser medida por probabilidades conjuntas.

Para cada critério, é calculada a probabilidade de cada alternativa ser a melhor ou pior. O cálculo da probabilidade de atingir o extremo de excelência ou de menor preferência envolve comparação com todas as alternativas, assegurando robustez ao resultado. Além disso, a avaliação segundo cada critério sendo formulada em termos de probabilidades de preferência, a composição dos critérios pode ser feita de modo que uma alternativa, mesmo que não tenha sido a preferida em nenhum critério, possa vir a ser a escolhida.

A avaliação inicial de uma alternativa segundo um critério é usada como estimativa para um parâmetro de localização, como a média, a moda ou a mediana de uma distribuição de probabilidades. A ideia é que essa avaliação constitui uma realização de uma variável aleatória e que em outras realizações se chegaria a valores em torno desse. Deste modo, se leva em conta a influência da subjetividade inerente ao julgamento de valor relacionado ao processo decisório quanto aos modos de falha.

Probabilidades conjuntas são então usadas para medir as preferências globais. Um exemplo de probabilidade conjunta é a probabilidade de a opção ser a preferida segundo todos os critérios. Esta probabilidade conjunta é calculada, supondo independência, simplesmente multiplicando as probabilidades de preferência segundo cada critério.

Pode-se usar, também, a probabilidade de a alternativa ser preferida segundo pelo menos um dos critérios. Ou a probabilidade de não ser a de menor preferência segundo nenhum critério. E assim por diante. Se adotarmos a hipótese de independência entre as avaliações segundo diferentes critérios, cada uma dessas probabilidades conjuntas pode ser calculada efetuando apenas operações de multiplicação e subtração. O fato de levar a usar, no cálculo, todas as avaliações numéricas segundo os diversos critérios de forma simples é uma boa razão para se adotar a hipótese de independência como ponto de partida e assumir outras hipóteses apenas em casos particulares em que se mostrem mais adequadas.

O uso da CPP para obter probabilidades de prioridade do risco (PPR) em vez do NPR da FMEA foi proposto por Sant'Anna (2012). A PPR de um modo de falha é dada pela probabilidade da interseção dos eventos de ser o modo de falha de maior risco segundo cada critério. A hipótese de independência conduz a calcular as PPR como produto dos escores segundo cada fator, da mesma forma que é calculado o NPR. A diferença está na transformação dos escores em probabilidades de o modo de falha ser o de maior risco segundo o fator.

Esta transformação probabilística implica em se atribuir maior importância aos riscos com avaliações iniciais mais altas. Por exemplo, uma passagem de 1 para 2 na avaliação na severidade resulta em dobrar o NPR, enquanto a passagem de 4 para 5 resulta em um aumento muito menor. Por outro lado, se há modos de falha de risco alto segundo o fator considerado, modos de falha com escore 1 ou 2 têm probabilidades de ser o de maior risco muito pequenas e, por isso, muito próximas, enquanto as maiores diferenças aparecem entre as probabilidades dos modos de falha com escores mais altos serem os de maior risco.

##### **4.1. CPP-Tri**

A CPP Tricotômica (CPP-Tri) (Sant'Anna, 2013) é uma variante da abordagem probabilística voltada para a alocação das alternativas em classes pré-determinadas. Tem como

ponto de partida, além da matriz de avaliações de cada alternativa segundo cada critério, uma matriz de perfis representativos das classes.

Cada perfil é determinado por um vetor de valores, um valor para cada critério. Na presente aplicação é usado apenas um perfil para representar cada classe.

Podem-se calcular os perfis a partir dos valores obtidos na avaliação das alternativas. Por exemplo, perfis únicos de cada uma de 5 classes podem ser gerados ordenando as avaliações e selecionando os percentis de 10%, 30%, 50%, 70% e 90%. No caso da FMEA, como a escala orienta a atribuição dos escores pelos especialistas, é natural usar os próprios valores da escala na construção dos perfis.

Sejam  $A_{sk}^+$  e  $A_{sk}^-$  as probabilidades de a alternativa A (no caso, um modo de falha) apresentar avaliação pelo critério k, respectivamente, acima e abaixo dos valores predeterminados para os perfis da classe s. Supondo independência nas avaliações segundo diferentes critérios, a probabilidade de uma alternativa ter avaliação abaixo dos perfis de uma classe segundo todos os critérios é o produto das probabilidades segundo cada critério isoladamente. Procedimento análogo dá a probabilidade de ter a avaliação acima dos perfis.

Obtêm-se, assim, os valores  $A_s^+ = \prod A_{sk}^+$  e  $A_s^- = \prod A_{sk}^-$ .

O valor absoluto  $TM(A_s)$  da diferença  $A_s^+ - A_s^-$  é avaliado para cada s e a alternativa é classificada naquela classe em que é menor esse valor absoluto.

Classificações mais favoráveis e mais desfavoráveis podem ser obtidas comparando as probabilidades obtidas por independência com aquelas obtidas assumindo máxima dependência entre os eventos de a avaliação estar, respectivamente, acima e abaixo da classe. Supondo-se máxima dependência, as probabilidades das interseções são dadas, em vez de pelos produtos, pelos mínimos entre os valores das probabilidades relativas a cada critério  $A_{0s}^+ = \min_k A_{sk}^+$  e  $A_{0s}^- = \min_k A_{sk}^-$ . Uma classificação mais alta é dada pelo valor de s que minimize o valor absoluto da diferença  $A_{0s}^+ - A_{0s}^-$  e uma classificação mais baixa pelo valor de s que minimize o valor absoluto da diferença  $A_s^+ - A_{0s}^-$ .

#### 4.2. CPP-Hi

O CPP-Hi é um instrumento desenvolvida por Martins (2015) com base na FMEA. São considerados os componentes tradicionais da avaliação de risco da FMEA, mas a FMEA é modificada pela adição do foco na investigação das possíveis falhas associadas a erro humano. Desta forma, são considerados, além dos fatores tradicionais da FMEA, o estresse do operador diante da situação abordada e a dificuldade na inteligibilidade da mesma por ele.

No fator estresse são considerados a carga de trabalho e o tempo de execução. E no fator inteligibilidade são considerados a complexidade da tarefa e o tempo disponível para a diagnose. A avaliação da severidade é dividida em três partes, relativas aos impactos nas pessoas, nas instalações e no meio ambiente. Temos, assim, um conjunto de nove avaliações de risco em vez das três da FMEA clássica.

Classificações e ordenações dos modos de falha são produzidas aplicando o CPP e o CPP-Tri. Análises de sensibilidade considerando as divergências entre as indicações obtidas podem ser então efetuadas.

#### 4.3. CPP com múltiplos avaliadores e uso da Distribuição Beta

A etapa fundamental da CPP e da CPP-Tri é a transformação de cada medida de avaliação segundo um critério qualquer da preferência por uma alternativa (ou de risco em um modo de falha) em uma variável aleatória centrada no valor de tal medida. A distribuição de probabilidades dessa variável aleatória tem esse valor como parâmetro de locação e é completamente determinada adicionando-se outros parâmetros que modelam perturbações aleatórias afetando as avaliações.

Supondo perturbações simétricas em torno do zero, podemos assumir distribuição normal e a modelagem se completa fixando um parâmetro de dispersão. Assumindo distribuição triangular, podemos prescindir da hipótese de simetria e determinar as distribuições fixando dois parâmetros: os valores máximo e mínimo admitidos.

No caso da FMEA, em que os especialistas registram suas avaliações em uma escala fixa, pode corresponder melhor à realidade do processo de avaliação modelar as perturbações como assimétricas. Pode-se usar, por exemplo, no caso da escala de avaliações de 1 a 5, distribuições triangulares com extremos 0 e 6. O parâmetro de locação, neste caso, é a moda. Assim, se o risco segundo determinado fator é avaliado, por exemplo, no nível 2, usamos uma distribuição triangular de moda igual a 2, mínimo igual a 0 e máximo igual a 6.

Quando as avaliações segundo cada critério são obtidas a partir de conjuntos de avaliações por diversos especialistas, podemos tratar esses conjuntos de observações como amostras da distribuição da variável aleatória respectiva e usá-las para estimar não só o parâmetro de locação, mas, outros parâmetros suficientes para determinar a distribuição. Assumindo normalidade, pode-se usar a variância amostral para estimar a variância da distribuição.

No modelo assimétrico, a extensão natural da distribuição triangular é a distribuição beta, distribuição com densidade  $f(x) = [(x-L)/(U-L)]^{\alpha-1} [(U-x)/(U-L)]^{\beta-1} / \text{Beta}(\alpha, \beta)$ , para  $x$  variando entre  $L$  e  $U$  e  $\text{Beta}$  denotando a função Beta (GUPTA e NADARAJAH, 2004).

Esta distribuição é unimodal para  $\alpha > 1$  e  $\beta > 1$ , com média dada por  $L + m(U-L)$  para  $m = \alpha / (\alpha + \beta)$  e moda dada por  $L + M(U-L)$  para  $M = (\alpha - 1) / (\alpha + \beta - 2)$ . A variância é decrescente com  $\alpha + \beta$ . Isto dota a modelagem com a distribuição beta de flexibilidade e simplicidade. Podemos estimar esta soma pelo número de especialistas empregado na estimação do parâmetro de locação.

Dados os extremos  $L$  e  $U$ , a partir da moda,  $M$ , e do número de especialistas  $N$ , estimamos os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  da distribuição beta, respectivamente, por  $[(M-L)/(U-L)] * (N-2) + 1$  e  $[(U-M)/(U-L)] * (N-2) + 1$ . Com isto, se preserva a estimação da moda da distribuição pela moda da amostra de avaliações dos especialistas.

Para amostras pequenas, a moda amostral pode desprezar informação relevante. Para evitar isto, em vez da moda, pode-se usar a média. A partir da média  $m$ , os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  são estimados por  $[(m-L)/(U-L)] * N$  e  $[(U-m)/(U-L)] * N$ , respectivamente.

$N$  deve ser maior que 3 e  $(M-L)/(U-L)$  e  $(m-L)/(U-L)$  devem estar entre  $1/(N-2)$  e  $(N-3)/(N-2)$  para se poder usar a distribuição beta. Se isto não acontece, fica a distribuição triangular.

## 5. Aplicação

O CPP-Hi é utilizado aqui na situação de Perda de Energia Elétrica Externa (PEEE) – *Loss of Off-Site Power* em uma usina nuclear. Esta situação se destaca em uma análise de riscos (ELETRONUCLEAR, 2014). O evento iniciador pode ser causado por falhas na subestação, problemas na rede externa ou no sistema da usina.

Um estudo (Martins, 2015) da árvore de eventos da Perda de Energia Elétrica Externa permitiu destacar os modos de falha a serem avaliados, representados no Quadro 1. Foram identificados dez modos de falhas representados por M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8, M9 e M10.

Quadro 1. Modos de falha no evento Perda de Energia Elétrica Externa

Modos de falha	Descrição
M1	Falha em alinhar um gerador diesel de reserva, após falha do gerador diesel alinhado.
M2	Falha em manualmente atuar as bombas de AAA após a falha de partida automática.
M3	Falha em alinhar as bombas de AAA para o sistema de proteção contra o incêndio antes que o tanque de AAA se esvazie.
M4	Falha em estabelecer água de alimentação auxiliar pela partida das bombas motorizadas, após perda de energia elétrica externa com falha dos Geradores Diesel Alinhados.
M5	Falha em iniciar o resfriamento do SRR via <i>Bleed and Feed</i> com perda de energia elétrica externa após falhas dos Geradores Diesel Alinhados.
M6	Falha em isolar o acumulador com ruptura pelo fechamento da válvula de isolamento motorizada.
M7	Falha em isolar a descarga para o tanque de surto de injeção de boro pelo fechamento das válvulas manuais 8971 e 8974.
M8	Falha em estabelecer a injeção de segurança após perda de a energia elétrica externa com falha dos Geradores Diesel Alinhados.
M9	Falha em partir uma bomba de refrigeração de componentes após perda de energia elétrica

	externa com falha dos Geradores Diesel Alinhados.
M10	Falha em alinhar a recirculação de alta pressão com a sucção do poço da contenção.

Na *FMEA* tradicional, o *NPR* é obtido pela multiplicação dos fatores de ocorrência, severidade e indetectabilidade. No CPP-Hi, estresse e inteligibilidade são também considerados e é utilizada a CPP para eliminar as fragilidades do cálculo do *NPR* acima referidas.

Para avaliação dos fatores de risco foi realizada uma pesquisa com especialistas. Para levantamento dos dados foi elaborado um questionário, respondido pelos especialistas. Este questionário foi elaborado com base nos conceitos da FMEA, da ACH, dos materiais estudados e em *feedback* dos especialistas. Foram considerados os julgamentos de valor de um grupo reduzido, de sete especialistas, vista a complexidade e a necessidade de um alto conhecimento para o preenchimento.

As escalas de severidade e inteligibilidade foram divididas em cinco classes: muito baixa, baixa, moderada alta e muito alta. Essas classes estão associadas a valores de um a cinco, sendo que, quanto maior a severidade e quanto menor a inteligibilidade, maior é a pontuação. No fator inteligibilidade foram consideradas separadamente a complexidade da tarefa e o tempo de diagnose. As escalas de ocorrência e detecção seguem o mesmo padrão, de forma crescente variando de 1 a 5, sendo a classificação da ocorrência estabelecida em: muito improvável, improvável, ocasional, provável e muito provável. Para a detecção foram definidas as classes: muito fácil, fácil, moderada, difícil e muito difícil.

A escala do fator estresse foi dividida em: baixo, ideal, moderado, alto e ameaçador. Neste caso não foi utilizada uma escala crescente, visto que um ambiente com uma baixa carga de trabalho e um tempo de execução confortável pode não ser o cenário menos crítico por poder tornar o operador desatento. No fator estresse são analisados separadamente a carga de trabalho e o tempo de execução.

### 5.1. Classificação dos Modos de Falha

Inicialmente foi feita a classificação pelo CPP-Tri, que alocou cada modo de falha em uma classe identificada por um perfil de risco com um valor constante, entre 1 e 5. Para chegar a isto foi calculada inicialmente a probabilidade de cada modo de falha ter uma avaliação acima ou abaixo do perfil de cada classe em cada critério como indicado na seção anterior.

Em uma matriz de entrada, F, são registradas em cada coluna as avaliações iniciais, primeiramente para o critério Severidade (S), que contempla os impactos em relação a Pessoal (P), Instalações (I) e Meio Ambiente (MA), separadamente. Além deste, são registradas as avaliações dos fatores Ocorrência (O), Detecção (D), inteligibilidade representado pela Complexidade (C) e Tempo de Diagnose (TD), e, para finalizar, o critério Estresse (E), que contempla a Carga de Trabalho (CT) e o Tempo de Execução (TE). Cada linha da matriz corresponde a um dos Modos de Falha: M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8, M9 e M10. Na Tabela 1 estão os valores de entrada gerados pelas modas amostrais das avaliações dos sete especialistas. No caso de empate entre dois ou mais valores com frequência máxima, a moda é determinada pelo valor central entre esses, no caso de número ímpar de máximos, e pela média aritmética dos dois valores centrais, em caso de número par de valores com a frequência máxima.

Tabela 1. Modas das Avaliações dos 10 Modos de Falha nos 9 Critérios

	S			O	D	I		E	
	P	I	MA			-	-	C	TD
M1	2	3	1	2	3	3	3	3	4
M2	2	3	1	2	3	2,5	3	2	1
M3	3	4	1	2	3	2,5	3	2	2
M4	2	3	1	2	3	2	2	1	1
M5	3	4	1	2	3	3	4	4	3,5
M6	1	3	1	1,5	3	3	3,5	4	3
M7	2	3	1	2	3	3	4	4	3,5

M8	2	4	1	2	3	3	4	3,5	5
M9	1	4	1	1,5	3	2,5	2	2	1
M10	3	4	1	2	3	2	2	1	2

Por aproveitar mais a informação disponibilizada pelos especialistas, em vez da moda pode ser empregada a média. A Tabela 2 traz a matriz G, que substitui a matriz F, com as médias amostrais no lugar das modas.

Tabela 2. Médias das Avaliações dos 10 Modos de Falha nos 9 Critérios

	S			O	D	I		E	
	P	I	MA	-	-	C	TD	CT	TE
M1	2,2	2,6	1,4	2,2	2,9	2,2	2,2	3,2	2,6
M2	1,6	2,6	1,4	1,6	3,0	2,0	2,0	1,8	1,8
M3	2,8	3,0	2,0	1,6	3,1	2,0	2,0	2,0	1,8
M4	1,8	2,6	1,4	1,8	3,0	2,2	1,8	1,6	1,8
M5	2,0	3,4	2,0	1,6	3,0	2,2	2,0	3,2	2,4
M6	1,8	2,25	1,0	1,4	3,4	3,4	3,6	3,8	3,6
M7	2,2	2,8	1,4	1,6	3,2	3,5	3,4	3,8	3,6
M8	2,0	3,2	2,2	1,8	3,0	2,8	3,0	2,6	3,2
M9	2,0	3,4	2,0	1,4	3,0	2,2	2,4	2,0	1,8
M10	2,4	3,4	2,0	1,6	3,2	2,0	2,2	1,6	2,0

Em uma matriz H informam-se os perfis representativos das classes. Nesta matriz, registram-se em cada coluna os valores hipotéticos para um mesmo critério. As colunas são dispostas de forma similar às das matrizes F e G. Cada linha corresponde a uma classe de risco, representada por um dos perfis: H1, H2, H3, H4 e H5. O nível de criticidade aumenta de H1 para H5. No caso da FMEA na escala de 1 a 5, podemos identificar naturalmente cinco classes com os perfis com valores constantes, todos iguais a 1 para a classe de risco mais baixo e todos iguais a 5 para a classe de risco mais alto.

Com base nestes perfis são calculadas as probabilidades de cada modo de falha na matriz F ou G estar acima ou abaixo de cada classe. Cada modo de falha é classificado em uma classe específica. No EXCEL 2007 em português, colocando a matriz F das modas das avaliações nas primeiras entradas de uma planilha “Dados” e a matriz H, dos perfis, nas primeiras entradas de uma planilha “Classes”, as matrizes de probabilidades de os valores atribuídos a cada modo de falha em cada critério ficarem abaixo dos valores respectivos dos perfis da s-ésima classe, para o k-ésimo critério, com N representando o número de especialistas, têm o elemento genérico

$$=DISTBETA('Classes'!k$;('Dados'!k$)/6)*(N-2)+1;((6-'Dados'!k$)/6)*(N-2)+1;0;6).$$

Se, em vez das modas, partimos das médias amostrais, a função composta é

$$=DISTBETA('Classes'!k$;('Dados'!k$)/6)*N;((6-'Dados'!k$)/6)*N;0;6).$$

Denotando por  $S(M,k)$  o elemento genérico da matriz das probabilidades acima indicada de os modos de falha serem avaliados abaixo do perfil representativo da classe s, a probabilidade de o modo de falha M ser avaliado pelo critério k acima do perfil da classe s é  $1-S(M,k)$ .

Para a matriz F da Tabela 1 acima, assumindo independência entre as perturbações afetando diferentes critérios, as probabilidades conjuntas de avaliação acima e abaixo de cada classe pela distribuição beta são dadas na Tabela 3.

Tabela 3. Probabilidades de Avaliação acima e abaixo de cada Classe

	Classe 1		Classe 2		Classe 3		Classe 4		Classe 5	
	A <sub>1</sub> <sup>+</sup>	A <sub>1</sub> <sup>-</sup>	A <sub>2</sub> <sup>+</sup>	A <sub>2</sub> <sup>-</sup>	A <sub>3</sub> <sup>+</sup>	A <sub>3</sub> <sup>-</sup>	A <sub>4</sub> <sup>+</sup>	A <sub>4</sub> <sup>-</sup>	A <sub>5</sub> <sup>+</sup>	A <sub>5</sub> <sup>-</sup>
M1	2,45E-01	2,78E-12	9,04E-02	4,92E-09	1,74E-02	1,57E-05	3,35E-04	2,59E-03	8,93E-06	2,22E-02
M2	1,49E-01	2,06E-09	4,93E-02	2,62E-06	2,40E-03	4,24E-04	8,87E-06	1,39E-02	6,17E-08	5,58E-02
M3	2,18E-01	2,57E-11	1,05E-01	1,25E-07	9,81E-03	5,75E-05	8,21E-05	3,63E-03	1,33E-06	2,52E-02



M4	9,83E-02	5,20E-08	2,19E-02	2,49E-05	4,73E-04	1,65E-03	6,23E-07	2,59E-02	2,75E-09	8,08E-02
M5	2,83E-01	6,94E-15	1,74E-01	9,36E-11	6,03E-02	1,04E-06	2,95E-03	4,35E-04	1,37E-04	6,53E-03
M6	1,57E-01	2,70E-11	3,29E-02	1,94E-08	4,82E-03	4,83E-05	7,78E-05	6,96E-03	1,13E-06	3,65E-02
M7	2,54E-01	1,86E-13	1,06E-01	6,56E-10	2,86E-02	4,64E-06	9,42E-04	1,36E-03	3,09E-05	1,38E-02
M8	2,60E-01	3,01E-15	1,24E-01	2,11E-11	4,02E-02	3,80E-07	2,12E-03	2,72E-04	1,14E-04	5,05E-03
M9	9,61E-02	7,58E-09	1,90E-02	5,54E-06	9,99E-04	1,04E-03	3,86E-06	3,27E-02	1,11E-08	7,50E-02
M10	1,44E-01	6,49E-10	4,68E-02	1,19E-06	1,93E-03	2,24E-04	5,76E-06	6,79E-03	5,91E-08	3,65E-02

A classificação de cada modo de falha é obtida identificando, na linha respectiva da Tabela 3, a classe em que é mínimo o valor absoluto da diferença  $A_s^+ - A_s^-$ . Uma tabela semelhante à Tabela 3 é obtida a partir das médias amostrais.

A Tabela 4 apresenta as classificações finais obtidas a partir das modas e das médias amostrais e as obtidas por Martins (2015) empregando a distribuição normal. Os resultados obtidos indicam uma capacidade maior de discriminação quando a estimação é baseada na média amostral, com a distribuição dos modos de falhas por três classes, enquanto a classificação baseada na moda conduz a apenas duas. Isto era de esperar, dado o uso de mais informação na determinação do valor da média. De qualquer modo, as divergências entre as três classificações nunca ultrapassam uma classe para cima ou para baixo.

Tabela 4. Classificações dos Modos de Falha

Modos de Falha	Moda Beta	Média Beta	Média Normal
M1	4	3	3
M2	3	2	2
M3	4	3	3
M4	3	2	2
M5	4	3	3
M6	3	4	3
M7	4	4	4
M8	4	4	3
M9	3	3	3
M10	3	3	3

Para avaliar a possibilidade de classificação precisa, podemos usar a classificação intervalar. Se, em vez de independência, é assumida máxima dependência, as probabilidades das interseções são dadas pelo mínimo em vez de pelos produtos das probabilidades segundo os diferentes critérios. Classificações mais altas e mais baixas são obtidas minimizando as diferenças entre produtos e mínimos. Essas duas classificações constituem fronteiras entre as quais se tem uma classificação mais segura das alternativas avaliadas. Esta classificação intervalar para os dez modos de falha derivada do uso da média e da distribuição beta é apresentada na Tabela 5.

Tabela 5. Classificação Intervalar

Modo de Falha	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10
Limite Superior	5	4	4	4	5	5	5	5	4	4
Limite Inferior	2	1	1	1	2	2	3	2	2	2

Sete dos dez intervalos têm amplitude 3 e três deles têm amplitude 2. Destacam-se o modo de falha M7 como o de mais alta classificação e os modos de falha M9 e M10 como os de mais baixa classificação.

## 5.2 CPP

A comparação em termos de probabilidades de apresentar o risco mais alto, efetuada por meio da CPP, é especialmente adequada ao caso da FMEA, dada a importância de valorizar os riscos mais altos.

A distribuição beta também pode ser empregada na determinação dos escores da CPP. As probabilidades conjuntas de maximizar o risco segundo os nove fatores podem ser calculadas pelo seguinte procedimento do software R (R Core Team, 2012), partindo das médias amostrais das avaliações na escala de 1 a 5 armazenadas no arquivo dadosfmea6.txt.

```
A <- as.matrix(read.table("dadosfmea6.txt")) #avaliações iniciais
N<-A; Alfa<-A; Beta<-A; ASAI<-A
for (j in 1:ncol(A))
  { for (i in 1:nrow (A))
    { N[i,j]<- 7 #número de especialistas constante igual a 7
      Alfa[i,j] <- N[i,j]*(A[i,j]/6)
      Beta[i,j] <- 7*(1-(A[i,j]/6))} }
for (j in 1:ncol(A))
  { for (i in 1:nrow (A))
    { ASAI[i,j]<-(integrate(Vectorize(function(x){prod(pbeta(x,Alfa[,j][-i],Beta[,j][-i]))
*dbeta(x,Alfa[,j][[i]],Beta[,j][[i]])),0,1))$value } }
write.table(ASAI, file="saidadedadosbeta.txt")#probabilidades de maximizar
Score<-A[1,]
for (i in 1:nrow (A))
  { Score[i]<-prod(ASAI[i,])}
write.table(Score, file="scorebeta.txt")#probabilidades de maximizar
```

A Tabela 6 apresenta o desenvolvimento da aplicação da CPP. Além das probabilidades de cada modo de falha ser o de maior risco segundo cada fator, são apresentados, nas duas últimas colunas, os resultados finais, constituídos pelas probabilidades de preferência de risco e os postos segundo este escore.

Tabela 6. Probabilidades de preferência de risco

	P	I	MA	-	-	C	TD	CT	TE	PPR	Posto
M1	0,09	0,08	0,08	0,20	0,07	0,06	0,05	0,09	0,09	1,7E-10	5
M2	0,03	0,03	0,03	0,10	0,09	0,05	0,04	0,03	0,03	4,7E-13	10
M3	0,27	0,06	0,08	0,08	0,11	0,05	0,05	0,03	0,02	1,1E-11	8
M4	0,06	0,03	0,03	0,13	0,09	0,05	0,04	0,02	0,03	5,8E-13	9
M5	0,12	0,23	0,16	0,08	0,09	0,08	0,05	0,22	0,09	2,2E-09	4
M6	0,06	0,04	0,04	0,06	0,14	0,19	0,28	0,27	0,26	3,5E-09	3
M7	0,12	0,08	0,08	0,08	0,11	0,25	0,23	0,22	0,21	1,7E-08	1
M8	0,07	0,12	0,19	0,10	0,11	0,16	0,15	0,09	0,21	9,1E-09	2
M9	0,06	0,15	0,16	0,06	0,09	0,05	0,08	0,03	0,02	1,7E-11	7
M10	0,12	0,19	0,16	0,08	0,11	0,06	0,06	0,01	0,04	6,7E-11	6

Em termos práticos, os resultados obtidos coincidem com os da análise de Martins (2015). Há também grande concordância com os resultados da aplicação do CPP-Tri. De fato, os modos 6, 7 e 8, relacionados com a injeção de segurança de alta pressão, são mais afetados pelos fatores de confiabilidade humana e ganham destaque na avaliação pelo CPP-Hi. De outro lado, também, os modos de falha de menor PPR, os modos de falha 2 e 4, são os classificados pelo CPP-Tri em classe mais baixa de risco.

Esses resultados são diferentes dos obtidos pela aplicação da FMEA clássica que apontaria M3, M5 e M10 como os modos de falha de maior risco e M6 como o de menor risco. A extensão da regra de multiplicar as modas das classificações numéricas também conduziria a resultados menos justificáveis, com M5 classificado como o modo de falha de maior risco e M6 situado em um posto mediano.

Assim, a utilização dos fatores Inteligibilidade e Estresse em adição aos fatores clássicos da FMEA (Severidade, Detecção e Ocorrência) e o emprego da CPP permitiu uma avaliação mais completa dos modos de falha.

## 6. Conclusão

A análise aqui desenvolvida demonstrou a importância de se adicionarem os critérios de Inteligibilidade, representada pela Complexidade e Tempo de Diagnose e Estresse, via Carga de Trabalho e Tempo de Execução, aos conceitos clássicos da FMEA. Empregando esses conceitos sugeridos pela ACH, em conjunto com os de Severidade, contemplada de forma tripla através de avaliações separadas dos impactos sobre Pessoal, Instalações e Meio Ambiente, Ocorrência, Detecção, foram obtidos aqui resultados coerentes com os de estudos anteriores sobre os riscos de potenciais modos de falha na situação de perda de energia elétrica externa em uma usina nuclear que seguiram a mesma abordagem e diferentes dos produzidos pela abordagem clássica de três fatores. Confirmou-se, assim, que as adequações realizadas na FMEA com o apoio da ACH viabilizadas pela modelagem com o uso do CPP promoveram alterações importantes na ordenação da criticidade derivada dos fatores clássicos da FMEA.

Após a coleta do julgamento de valor dos especialistas, o instrumento de análise empregado usou a CPP para classificar modos de falha identificados como mais importantes. Além disso, com o uso da CPP, foi calculada a probabilidade de cada modo de falha maximizar o risco. As duas análises permitiram a classificação e a ordenação dos modos de falha, o que estimula o desenvolvimento de uma cultura de segurança e melhoria contínua na confiabilidade em uma usina nuclear.

A distribuição beta foi usada para permitir explorar mais completamente a informação gerada pelas avaliações por múltiplos especialistas. Os vetores de avaliações foram usados não apenas para produzir estimativas sobre as localizações, mas, também, sobre as dispersões das distribuições de probabilidades.

O uso da distribuição beta não só estendeu como também simplificou a modelagem probabilística. Além disso, como os resultados obtidos com esta distribuição foram semelhantes aos obtidos anteriormente com a distribuição normal, constituem uma indicação de robustez da CPP quanto aos efeitos da modelagem adotada para a dispersão.

## Referências

- AIAG** (2008), *Potential Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) - Reference Manual*, 4th Ed.
- Alvarenga, M. A. B., Frutuoso e Melo, P. F. e Fonseca, R. A.** (2014), Critical review of methods and models for evaluating organizational factors in Human Reliability Analysis. *Progress in Nuclear Energy*, 75, 25–41.
- Ben-Daya, M. e Raouf, A.** (1993), A revised failure mode and effect model. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 13, 43-47.
- Bertsche, B.** *Reliability in Automotive and Mechanical Engineering: Determination of Component and System Reliability*. Berlin: Springer, 2008.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTE**, *BS5760: Reliability of Systems, Equipment and Components – Part 5. Guide to Failures Modes, Effects and Criticality Analysis (FMEA and FMECA)*, 1991.
- Clarke, C.** *Automotive Production Systems and Standardisation: From Ford to the Case of Mercedes-Benz*. Heidelberg: Physica-Verlag, 2005.
- Derosier, J., Stalhandske, E., Bagian, J. P. e Nudell, T.** (2002), Using health care Failure Mode and Effect Analysis: the VA National Center for Patient Safety's prospective risk analysis system. *The Joint Commission Journal on Quality Improvement*, 28, 248-267.
- ELETRONUCLEAR**, *Avaliação das Lições Aprendidas com o Acidente nas Usinas da Central de Fukushima no Japão e Suas Implicações sobre as Unidades da CNAEA - DT-006/11*, 2011.
- ELETRONUCLEAR**, *Usina Nuclear Angra 1. Relatório Análise Probabilística de Segurança*. Rio de Janeiro, 2014.
- García, A. e Gilbert, E.** (2011), Mapping FMEA into Bayesian networks. *International Journal of Performance Engineering*, 7, 525-537.
- Garcia, P. A. A., Schirru, R. e Frutuoso e Melo, P. F.** (2005), A fuzzy data envelopment analysis approach for FMEA. *Progress in Nuclear Energy*, 46, 359-373.

- Guimarães, A. C. F. e Lapa, C. M. F.** (2004), Fuzzy FMEA applied to PWR chemical and volume control system. *Progress in Nuclear Energy*, 44, 191-213.
- Gupta, A. K. e Nadarajah, S. *Handbook of Beta distribution and its Applications*. N. York: Marcel Dekker, 2004.
- Hollnagel, E.**, *Cognitive Reliability and Error Analysis Method (CREAM)*. N. York: Elsevier, 1998.
- Hollnagel, E.**, *Handbook of Cognitive Task Design*. Mahwah: Lawrence Erlbaum, 2003.
- Kirwan, B., Gibson H., Kennedy, R., Edmunds, J., Cooksley, G. e Umbers I.** (2004), Nuclear Action Reliability Assessment (NARA): a data based HRA tool. *Probabilistic Safety Assessment and Management*, 1, 1206–1211.
- Laurenti, R., Villari, B. D. e Rozenfeld, H.** (2012), Problemas e melhorias do método FMEA: uma revisão sistemática da literatura. *Pesquisa & Desenvolvimento Engenharia de Produção*, 10, 59-70.
- Liu, H. C.; Liu, L. e Liu, N.** (2013), Risk evaluation in failure mode and effects analysis: a literature review. *Expert Systems with Applications*, 40, 828-838.
- Martins, E. F.**, *Instrumento híbrido aplicado ao estudo da confiabilidade humana em evento de perda de energia elétrica externa em usina nuclear*. Tese de Doutorado em Engenharia de Produção, Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2015.
- Mcdermott, R. E.; Mikulak, R. J.; Beauregard, M. R.**, *The Basics of FMEA*. New York: Productivity Press, 2009.
- Meister, D.**, *Human Factors in Reliability*, in W. G. Ireson (ed), *Reliability Handbook*, New York: McGraw-Hill, 1966.
- NERH**, *Nuclear Emergency Response Headquarters of the Government of Japan. Report of the Japanese Government to the IAEA Ministerial Conference on Nuclear Safety —The accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations—* June 2011.
- Nogueira, A. C. e Peres, A. P.** (2010), Comparação entre duas matrizes FMEA aplicadas em Laticínios de Lavras-MG. *Engenharia Ambiental*, 7, 178-189.
- Pentti, H. e Atte, H., *Failure mode and effects analysis of software - based automation systems*. STUK - Radiation and Nuclear Safety Authority. Helsinki, 2002.
- Pillay, A. e Wang, J.** (2003) Modified failure mode and effects analysis using approximate reasoning. *Reliability Engineering and System Safety*, 79, 69-85.
- Pinto Jr., R. P. S. e Sant'Anna, A. P.** (2010) Composição probabilística no cálculo das prioridades na FMEA. *Sistemas & Gestão*, 05, 179-191.
- R CORE TEAM, R: A language and environment for statistical computing**, 2012. available at <http://www.R-project.org/>
- Reason, J.** (2000) Safety paradoxes and safety culture. *Injury Control and Safety Promotion*, 7, 3-14.
- Sant'Anna, A. P. e Sant'Anna, L. A. F. P.**, *Randomization as a Stage in Criteria Combining*. In Ribeiro, J. L. D., Fogliato, F. S e Guimarães, L. B. M, *Production and Distribution Challenges for the 21th Century*. Porto Alegre: ABEPRO, p. 248-256, 2001.
- Sant'Anna, A. P.** (2012), Probabilistic priority numbers for failure modes and effects analysis. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 29, 349-362.
- Sant'Anna, A. P.** (2013), Detalhamento de uma Metodologia de Classificação baseada na Composição Probabilística de Preferências, *Relatórios de Pesquisa em Engenharia de Produção*, 13 (3), 12-21.
- Sharma, R. K., Kumar, D. e Kumar, P.** (2005) Systematic failure mode effect analysis (FMEA) using fuzzy linguistic modelling. *International Journal of Quality and Reliability Management*, 22, 986-1004.
- Swain, A. D.**, *Accident Sequence Evaluation Program Human Reliability Analysis Procedure*. NUREG/CR-4772/SAND86-1996 Sandia National Laboratories, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, 1987.
- Swain, A. D. e Guttmann, H. E.**, *Handbook of human reliability analysis with emphasis on nuclear power plant applications*. NUREG CR-1278. Washington, DC 1983.

**US MILITARY**, *Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*, United States Military Procedure MIL-P-1629, 1949.

**US MILITARY**, *Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis* United States Military Procedure MIL-P-1629a, 1980.

**USNRC**, *A technique for human error analysis (ATHEANA) - technical basis and method description*. NUREG/CR-6350, Washington DC, 1996.

**Yang, Z., Bonsall, S. e Wang, J.** (2008), Fuzzy rule-based Bayesian reasoning approach for prioritization of failures in FMEA. *IEEE Transactions on Reliability*, 57, 517-528.