

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA
DE PRODUÇÃO

JOHNNATTANN PIMENTA GUEDES

**ANÁLISE DA CONFIABILIDADE HUMANA NA OPERAÇÃO
DE UMA SUBESTAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO DE
POTÊNCIA**

Porto Alegre

2017

JOHNNATTANN PIMENTA GUEDES

**ANÁLISE DA CONFIABILIDADE HUMANA NA OPERAÇÃO
DE UMA SUBESTAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO DE
POTÊNCIA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação
Mestrado Profissional em Engenharia de Produção da
Universidade Federal do Rio Grande do Sul como
requisito parcial à obtenção do título de Mestre em
Engenharia de Produção, modalidade Profissional, na
área de concentração em Qualidade.

ORIENTADOR: Professor Fernando Gonçalves
Amaral, Dr.

Porto Alegre

2017

Johnnattann Pimenta Guedes

**ANÁLISE DA CONFIABILIDADE HUMANA NA OPERAÇÃO
DE UMA SUBESTAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO DE
POTÊNCIA**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Prof. Fernando Gonçalves Amaral, Dr.

Orientador PPGEP/UFRGS

Prof. Ricardo Augusto Cassel, Dr.

Coordenador PPGEP/UFRGS

Banca Examinadora:

Profª. Cláudia de Souza Libânio, Dra. (UFSCPA)

Prof. Luis Renato Balbão Andrade, Dr. (FUNDACENTRO)

Prof. Marcelo Pereira da Silva, Dr. (UFRGS)

Porto Alegre, abril de 2017.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho teve origem com a inquietação em compreender no ambiente de trabalho os motivos pelos quais as pessoas são levadas a cometerem erros no exercício de suas atividades. Com a certeza de que o entendimento dessas razões me ajudaria a contribuir na melhoria da qualidade do serviço prestado e, também, com a redução da probabilidade de ocorrência de falhas e acidentes, na preservação da integridade física de meus colegas de trabalho, sou grato a todos que colaboraram.

Agradeço ao professor Juarez Orsolin e seus sócios do Instituto Business Group, que, com o comprometimento pela disseminação do conhecimento, viabilizaram a realização das aulas presenciais do mestrado em Engenharia de Produção e Qualidade em Rondonópolis-MT.

Aos excelentes professores do programa de pós-graduação em Engenharia de Produção, e em especial ao meu cordial orientador Fernando Gonçalves Amaral, muito obrigado.

Aos colegas do curso, Elisa, Leandro e Otávio, que com ajuda mútua promoveram compartilhamento de informações imprescindíveis, agradeço.

Aos colegas de profissão do setor elétrico, agradeço por compartilharem suas experiências e pelas discussões que ajudaram a reforçar os conceitos estudados.

Aos senhores Wady Charone Júnior, José Martins do Prado, Sebastião Pereira da Rosa e José Rubens Ramalho Urdiales, que me concederam autonomia, confiança e as demais condições necessárias para condução dos estudos.

Agradeço ao Gleides, meu pai, *in memoriam*, por ter deixado em mim o respeito pelas pessoas e a honra pelo compromisso assumido. À minha mãe, Edina, permanente exemplo de persistência, dedicação, arrojo e resiliência, agradeço pelos incentivos e cuidados que propiciaram que eu chegasse até aqui. À minha irmã, Nathálya, que sempre acredita na minha capacidade de realização de feitos, por mais difíceis que se apresentem, muito obrigado.

À minha linda filha, Heloísa, agradeço por ter dado um novo sentido à minha vida após seu nascimento.

À psicóloga Andréia Testa Guedes, minha esposa, amiga e terapeuta, agradeço pelo incentivo e por dispor de seu tempo e paciência para me ajudar a superar minhas angústias e alcançar meus objetivos.

RESUMO

Em virtude da grande proporção das falhas humanas em relação ao número total de falhas, dos gargalos de fornecimento de energia elétrica e do histórico de falhas humanas ocorridas nos últimos anos no sistema elétrico brasileiro, a análise da confiabilidade humana é relevante para o setor elétrico para o aumento da confiabilidade e mitigação da ocorrência de corte de fornecimento de energia aos consumidores. Nesse contexto, esse trabalho objetiva aplicar uma metodologia existente para analisar a probabilidade de ocorrência de falha humana em uma subestação de energia elétrica. Aborda o assunto inicialmente revisando a evolução do cenário de falhas humanas, desde o período da Guerra Fria (1945 a 1989), quando se realizaram os primeiros estudos, até o atual momento, para contextualizar a necessidade de atualização dos conhecimentos sobre confiabilidade humana. No referencial teórico, compilaram-se as conceituações dos diversos métodos utilizados para realização da análise da confiabilidade humana e os fatores que exercem influência sobre o desempenho do operador na execução das tarefas. Elaborou-se uma tabela com o objetivo de propiciar a comparação entre os diversos métodos com suas vantagens e desvantagens. Na sequência, faz-se a apresentação da metodologia para análise da confiabilidade humana, com a definição do cenário crítico, análise dos fatores que exercem influência sobre o desempenho dos operadores e estruturação e análise da árvore de decisão holística com os possíveis valores de probabilidade de ocorrência de erros humanos. Os resultados de sua aplicação em uma subestação do setor elétrico localizada no Estado de Mato Grosso indicaram um valor inicial de probabilidade de ocorrência de erro humano para o cenário analisado. O resultado da pesquisa demonstra qualitativa e quantitativamente quais fatores exerceram mais influência sobre o desempenho humano para esse cenário. Verificou-se que ações para melhoria dos níveis de qualidade dos fatores de desempenho avaliados negativamente, reduzem significativamente a probabilidade de ocorrência de erro humano. Com a determinação da probabilidade de erro humano e dos fatores que exercem influência sobre o operador para sua ocorrência, esta metodologia poderá ser aplicada como ferramenta adicional de gestão do processo de prevenção de falhas humanas e aumento da confiabilidade do setor elétrico.

Palavras-chave: Confiabilidade humana. Operação. Subestação.

ABSTRACT

Due to the large proportion of human failures in relation to the total number of failures, the restrictions in the supply of electric power and the history of human failures in recent years in the Brazilian electricity system, human reliability is relevant for the electric sector to increase the reliability and mitigation of the occurrence of power outages to consumers. In this context, this work aims to apply an existing methodology to analyze a probability of occurrence of human failure in an electric power substation. It addresses the subject initially by reviewing the evolution of the scenario of human failings, from the period of the Cold War (1945 to 1989), when the first studies were carried out, to date, to contextualize the need to update knowledge about human reliability. The theoretical framework supported the compile the concepts of the various methods used to perform the human reliability analysis and the factors that influence the performance of the operator in the execution of the tasks. A table that compares the more relevant methods presents the advantages and disadvantages of each one. Afterwards, the methodology for analysis of human reliability is presented, with the definition of the critical scenario, analysis of the factors that influence the performance of the operators, and the structuring and analysis of the holistic decision tree with the possible probability of occurrence of human errors. The results of its application in a substation of the electric sector located in the State of Mato Grosso indicated an initial probability of occurrence of human error for the analyzed scenario. The results of the research demonstrate qualitatively and quantitatively which are the factors that exerted the most influence on human performance for the scenario. Actions to improve the quality levels of the performance factors evaluated negatively reduce significantly the probability of occurrence of human error. With the determination of the probability of human error and which are the factors that influence the operator for its occurrence, this methodology can be an additional tool to manage the process of human error prevention and increase the reliability of the electric power system.

Keywords: Human Reliability. Operation. Substation.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 O contexto do setor elétrico brasileiro.....	14
1.2 Tema e objetivos	17
1.2.1 Justificativa em relação ao tema e aos objetivos	17
1.3 Procedimentos metodológicos da pesquisa.....	18
1.4 Delimitações da pesquisa	19
1.5 Estrutura da dissertação	20
2 REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1 Métodos para análise da confiabilidade humana	21
2.1.1 Thecnique for Human Error Rate Prediction.....	12
2.1.2 Human Error Assessment and Reduction Technique	26
2.1.3 Absolute Probability Judgements	29
2.1.4 Paired Comparisons.....	30
2.1.5 Holistic Decision Tree.....	32
2.1.6 Redes Bayesianas	34
2.2 Vantagens e desvantagens dos principais métodos para análise da confiabilidade humana	37
2.3 Fatores de desempenho humano	39
2.4 Considerações a respeito da revisão bibliográfica.....	45
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	47
3.1 Visão geral da proposta de pesquisa.....	47
3.2 Revisão dos métodos para análise da confiabilidade humana e fatores de desempenho humano	48
3.3 Levantamento de dados	50
3.4 Seleção e preparação da equipe.....	50
3.5 Aplicação do método <i>Holistic Decison Tree</i>.....	51
4 RESULTADOS	53
4.1 Aplicação da metodologia	53
4.2 Descrição do sistema de atendimento à região metropolitana de Cuiabá.....	53
4.2.1 Descrição da Subestação Rondonópolis	55
4.3 Avaliação do desempenho da concessionária de transmissão de energia elétrica	56
4.4 Definição do cenário crítico de estudo	58
4.5 Identificação dos fatores de desempenho na operação após atuação de discordância de taps	58
4.6 Definição dos critérios de classificação e níveis de qualidade dos fatores de desempenho	62
4.7 Definição do nível de impacto para cada fator de desempenho	63
4.8 Definição dos valores âncoras superior e inferior	64
4.9 Construção da árvore de decisão holística	64
4.10 Análise do ganho de confiabilidade para níveis de qualidade melhores de fatores de desempenho	64
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	67
5.1 Vantagens e desvantagens da metodologia.....	67
5.2 Aplicabilidade do material produzido	68
5.3 Considerações para estudos futuros	69
REFERÊNCIAS	70
APÊNDICES	74

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Acidentes que tiveram suas causas relacionadas a falhas humanas.....	13
Figura 2 - Evolução da carga mensal por região do Sistema Interligado Nacional.....	15
Figura 3 - Evolução do número de perturbações e do impacto sobre o atendimento às cargas do Sistema Interligado Nacional.....	15
Figura 4 – Principais blecautes ocorridos no Brasil com causas relacionadas a erros humanos – 1984 a 2005.....	16
Figura 5 - Fluxo geral com as etapas de trabalho	19
Figura 6 – Métodos selecionados para análise da confiabilidade humana	23
Figura 7 – Categorização das tarefas e valores de probabilidades de erros humanos	27
Figura 8 – Valores das condições promotoras de erros	28
Figura 9 - Exemplo de aplicação da Árvore de Decisão Holística.....	32
Figura 10 - Exemplo de rede bayesiana.....	35
Figura 11 - Método híbrido com redes bayesianas.....	36
Figura 12 - Vantagens e desvantagens dos principais métodos para análise da confiabilidade humana.....	38
Figura 13 - Tipos de ações humanas tomadas durante a operação de uma planta	39
Figura 14 - Evolução das causas de acidentes.....	40
Figura 15 - Perspectivas sobre a atuação do operador na ocorrência de falhas.....	41
Figura 16 - Fatores de desempenho humano	45
Figura 17 - Estrutura metodológica da pesquisa	47
Figura 18 - Conjuntos de métodos de análise da confiabilidade humana	48
Figura 19 - Abordagens sobre o desempenho humano para realização de uma ação	49
Figura 20 - Detalhamento da metodologia	52
Figura 21 - Diagrama unifilar do sistema de atendimento à região metropolitana de Cuiabá ..	54
Figura 24 – Características da equipe de operação da Subestação Rondonópolis	55
Figura 23 - Taxa de falhas humanas por função transmissão.....	57
Figura 24 - Transformadores operando em paralelo com os comutadores de derivação em carga na mesma posição	59
Figura 25 – Disposição dos equipamentos na Subestação Rondonópolis.....	60
Figura 26 – Detalhes do painel do comutador sob carga.....	60
Figura 27 - Análise dos cenários possíveis em caso de discordância de tap.....	61
Figura 28 - Critérios e níveis de qualidade para os fatores de desempenho.....	63
Figura 28 – Lição ponto a ponto para correção da posição de tap pela manivela.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Falhas humanas operacionais	57
Tabela 2 - Impacto dos fatores de desempenho.....	63

LISTA DE ABREVIATURAS

- ACH: Análise da Confiabilidade Humana
- AHP: Analytic Hierarchy Process
- ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica
- APJ: Absolute Probability Judgement
- ASEP: Accident Sequence Evaluation Programme
- ATHEANA: A Technique for Human Error Analysis
- CAHR: Connectionism Assessment of Human Reliability
- CESA: Commission Errors Search and Assessment
- CODA: Conclusions from occurrences by descriptions of actions
- CR: Controle de Reativo
- CREAM: Cognitive Reliability and Error Analysis Method
- EDF: Electricité de France
- EPRI: Electric Power Research Institute
- FD: Fator de Desempenho
- FI: Fator de Influência
- FQ: Fator de Qualidade
- FT: Função Transmissão
- HEART: Human Error Assessment and Reduction Technique
- HRMS: Human Reliability Management System
- IHM: Interface Homem Máquina
- JHEDI: Justified Human Error Data Information
- LT: Linha de Transmissão
- MERMOS: Method d'Evaluation de la Realisation des Missions Operateur pour la
Surete
- MG: Módulo Geral
- NARA: Nuclear Action Reliability Assessment
- ONS: Operador Nacional do Sistema
- OTAN: Organização do Tratado do Atlântico Norte
- PC: Paired Comparisons
- PCH: Pequena Central Hidrelétrica
- PEH: Probabilidade de Erro Humano

RB: Rede Bayesiana

SE: Subestação

SEB: Sistema Elétrico Brasileiro

SEP: Sistema Especial de Proteção

SIN: Sistema Interligado Nacional

SLIM-MAUD: Success Likelihood Index Methodology, Multi-Attribute Utility

Decomposition

SPAR-H: Simplified Plant Analysis Risk Human Reliability Assessment

THERP: Technique for Human Error Rate Prediction

TR: Transformação

UHE: Usina Hidrelétrica

USNRC: United States Nuclear Regulatory Commission

UTE: Usina Termelétrica

1 INTRODUÇÃO

Historicamente as primeiras considerações sobre confiabilidade humana foram realizadas durante o período da Guerra Fria (1945 a 1989), quando os Estados Unidos monitoravam a possibilidade de lançamento de mísseis russos contra os países-membros da Organização do Tratado do Atlântico Norte – OTAN, (SPURGIN, 2010).

Devido às grandes perdas causadas por acidentes provocados por erros humanos, a análise da confiabilidade humana tem despertado mais interesse e tem sido amplamente aplicada em engenharia nuclear, segurança marítima, indústria petrolífera e aviação (ZHOU et al, 2017).

Acidentes que tiveram origem ou aumento dos danos relacionado à ocorrência de falhas humanas, como os listados na Figura 1, justificam a importância de se realizar uma análise sobre a probabilidade de ocorrência de erros humanos.

Acidente	Local	Ano	Erros Humanos	Consequências
Colisão entre Boings 747	Ilhas Canárias, Espanha	1977	Falha no controle de distância entre as duas aeronaves, capacitação deficiente do piloto	Morte de 583 pessoas
Danos no Reator nº 2 da Usina Nuclear de <i>Three Mile Island</i>	Pensilvânia - EUA	1979	Design inadequado do sistema de supervisão e controle, treinamento deficiente das equipes técnicas e manutenção deficiente da planta	Perdas econômicas pela desativação da planta, limpeza após o acidente e perda de produção de energia
Colisão de trens na estação ferroviária de <i>Flaujac</i>	LOT, França	1985	Confusão com o uso de numeração similar para identificar diferentes trens, atraso dos trens, falha de comunicação entre os agentes e falta de experiência do agente substituto	Morte de 31 pessoas e ferimento de outras 91
Destruição do reator nº 4 da Usina Nuclear de <i>Chernobyl</i>	<i>Prypiat</i> , Ucrânia	1986	Riscos subestimados para execução de teste, deficiência de treinamento, não execução de procedimentos de segurança e falta de engajamento da gerência para garantir a segurança do pessoal	Morte de mais de 4000 pessoas com doenças crônicas, completa destruição do reator nº 4, perda de habitações e acesso ao território
Explosão do Ônibus espacial <i>Challenger</i> - NASA	Cabo Canaveral, EUA	1986	Design de componentes inadequado, não priorização da segurança e apresentação de riscos baseada em opiniões e não em fatos	Morte de 7 tripulantes e interrupção do programa espacial por 32 meses
Explosão da plataforma de petróleo <i>Piper Alpha</i>	Escócia, Reino Unido	1988	Controle visual inadequado	Morte de 167 pessoas e perda de US\$ 3,4 bilhões

Liberção de gases tóxicos da fábrica de agrotóxicos da <i>Union Carbide Corporation</i>	<i>Bhopal</i> , Índia	1988	Problemas de relacionamento entre a gerência e outros funcionários da planta, falta de comprometimento da gerência com a manutenção da planta, divergências entre empregados, nenhuma ação efetiva tomada (apesar do alerta da gerência sobre as condições inseguras da planta)	Morte de 8 mil pessoas em três dias, 150 mil sobreviventes com doenças crônicas, geração de crianças com deficiências
Incêndio no metrô de Londres	Londres, Inglaterra	1990	Falta de conhecimento sobre as consequências que um incêndio poderia causar em um ambiente com graxa lubrificante e materiais de fibra, falta de utilização pela gerência de métodos de análise de risco para incêndios potenciais e layout não garantia a evacuação rápida sem grandes riscos dos passageiros	Morte de 31 pessoas, 60 pessoas com queimaduras
Colisão entre <i>Airbus 300</i>	Nova Iorque, EUA	2002	Falta de controle sobre a distância entre as aeronaves e deficiência no treinamento do piloto	Morte de 263 pessoas
Explosão do ônibus espacial <i>Columbia</i> - NASA	Texas, EUA	2004	Erro na tomada de decisão	Morte dos 7 tripulantes
Explosão da unidade de isomerização da refinaria de <i>British Petroleum</i> - BP AMOCO	Cidade do Texas, EUA	2005	Deficiências na inspeção e manutenção da planta, layout inadequado da planta (equipamentos de controle inadequados, válvulas inacessíveis, chaves mal localizadas), riscos subestimados, lacunas entre a gerência local e superior quanto ao respeito à segurança operacional da planta	Ferimento de 100 e morte de 15 pessoas
Vazamento de radiação da Usina Nuclear de Fukushima	Fukushima, Japão	2011	Subestimação da probabilidade de ocorrência de tsunami pela empresa proprietária. Não readequação da instalação às normas de segurança atuais. Metodologia utilizada para calcular os efeitos de tsunami foi definida sem participação das empresas do setor elétrico	Remoção de mais de 150 mil pessoas de suas casas, 180 mortes nos primeiros seis meses após o acidente e contaminação das águas do Oceano Pacífico
Rompimento da barragem do Fundão	Mariana, Brasil	2015	Não priorização da segurança em detrimento de interesses econômicos e financeiros e subestimação dos riscos de rompimento da barragem.	19 mortes, 1200 pessoas desabrigadas, destruição da flora e fauna pelo avanço da lama por 663km de rio até a foz do rio Doce e pelo menos 1.469 hectares de terras destruídas.

Figura 1 - Acidentes que tiveram suas causas relacionadas a falhas humanas

Fonte: Spurgin (2010), *The National Diet of Japan* (2012) e POEMA (2015)

1.1 O contexto do setor elétrico brasileiro

No Setor Elétrico Brasileiro (SEB), as empresas têm demonstrado crescente preocupação com a redução de perdas e custos operacionais para se manterem competitivas, principalmente devido à crescente participação de concorrentes espanhóis e chineses na disputa pelos leilões de transmissão. Segundo Carvalho (2011), no período compreendido entre os anos de 2003 e 2010, os leilões de transmissão obtiveram altos valores médios de deságio: 33% para os lotes que tiveram lances viva voz e 31% para aqueles que tiveram outros tipos de lances.

Em 2005, a Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) estabeleceu, por meio da Resolução Normativa nº 191, o conceito de Função Transmissão (FT) para o setor elétrico. FT é o conjunto de instalações funcionalmente dependentes, considerado de forma solidária para fins de apuração da prestação de serviços de transmissão, compreendendo o equipamento principal e os complementares. São consideradas FT: Linha de Transmissão (LT), Transformação (TR), Controle de Reativo (CR) e Módulo Geral (MG), (ANEEL, 2005).

Em 2007, foi aprovada pela Aneel a Resolução Normativa nº 270/2007, que trata sobre a qualidade do serviço público de transmissão de energia elétrica. Essa resolução estabeleceu uma metodologia para descontos no pagamento-base das empresas transmissoras tomando como referência o tempo, a natureza e o planejamento dos desligamentos de suas funções transmissão, aumentando a preocupação das empresas com o nível de serviço, confiabilidade e disponibilidade de suas FT ao Sistema Interligado Nacional (SIN), (ANEEL, 2007).

Além disso, o crescimento do consumo de energia no Brasil, o baixo nível dos reservatórios de usinas hidrelétricas, os recentes blecautes ocorridos no SEB, aliados ao fato de o Brasil sediar grandes eventos, como a Copa do Mundo 2014 e as Olimpíadas em 2016, têm provocado a preocupação do governo e dos órgãos reguladores nacionais quanto à sua confiabilidade.

Pode ser observado pela Figura 2, que apresenta a evolução da carga mensal média por região do Sistema Interligado Nacional, que a região Norte foi a que apresentou maior crescimento relativo de carga nos últimos meses. Verifica-se um avanço de 147% em fevereiro de 2014 (10.251MW) comparado com fevereiro de 2013 (4.136MW). Para o mesmo

período as regiões Sul, Nordeste e Sudeste/Centro-Oeste apresentaram um aumento de 12%, 5% e 7%, respectivamente.

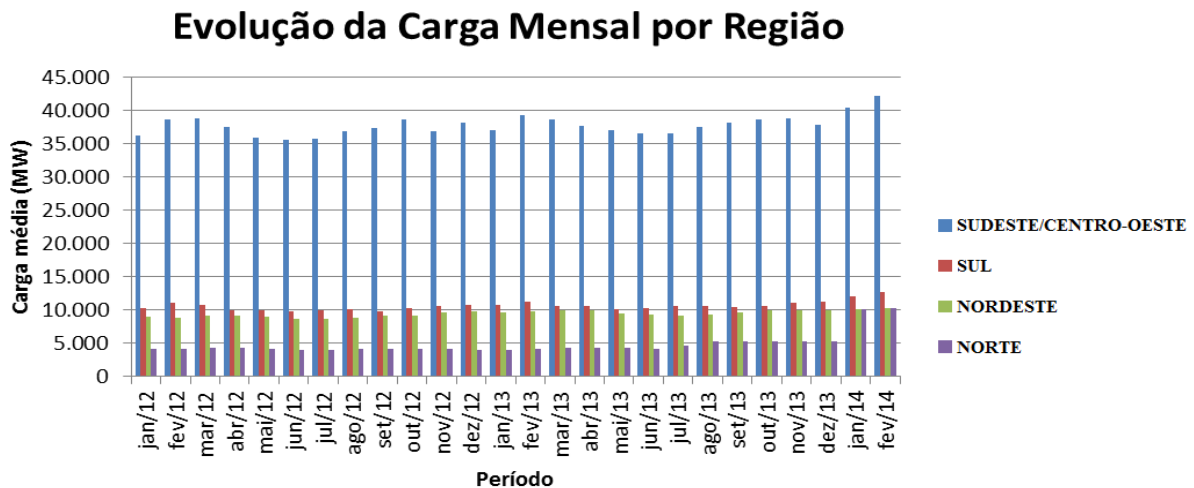


Figura 2 - Evolução da carga mensal por região do Sistema Interligado Nacional

Fonte: ONS (2014)

Na Figura 3 verifica-se que, apesar dos investimentos em segurança e confiabilidade no SIN, seu desempenho no ano de 2012 quanto aos números de perturbações é pior que em 2008 (ONS, 2014a).

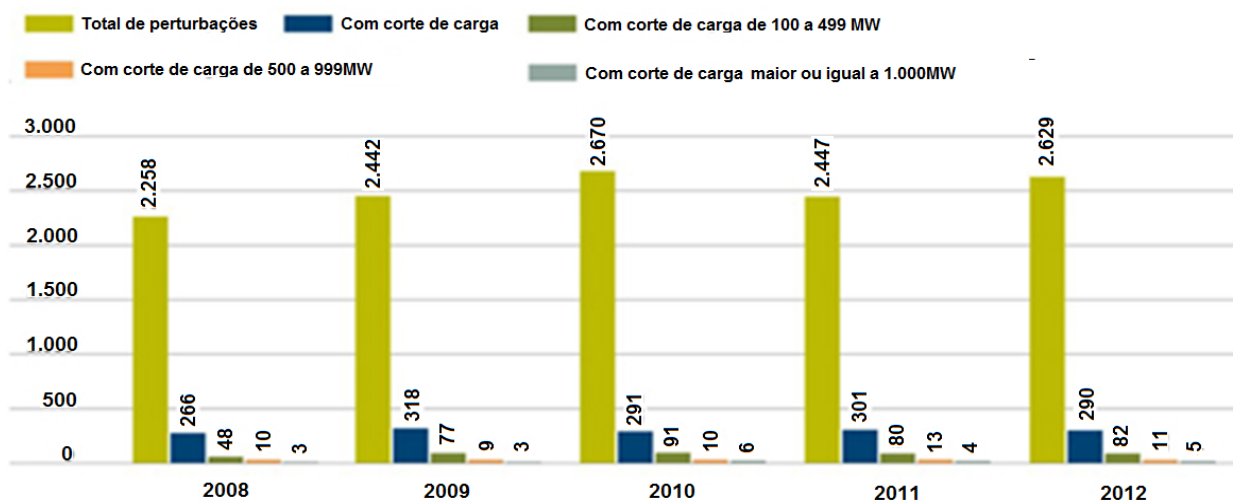


Figura 3 - Evolução do número de perturbações e do impacto sobre o atendimento às cargas do Sistema Interligado Nacional

Fonte: ONS (2014a)

Resta demonstrado na Figura 3 que o número de ocorrências no SIN envolvendo cortes de carga em 2012 é 9% superior ao valor apresentado em 2008, e o número total de perturbações apresentou um acréscimo de 16% em relação ao mesmo ano. Além disso, historicamente, grandes blecautes ocorridos no SIN estão relacionados a erros humanos, como os elencados na Figura 3.

Data	Corte de Carga (MW)	Nº de Estados Afetados	Duração (min)	Erro Humano
1/04/1984	15.762	6	160	Deficiências nas rotinas de manutenção, procedimentos e treinamento das equipes sobre segurança operacional
18/08/1985	7.793	10	74	Ajustes incorretos do sistema especial de rejeição de carga da usina de Marimbondo
13/12/1994	8.630	9	75	Falha na operação do sistema durante a realização de testes na subestação Ibiúna
26/03/1996	5.746	9	100	Erro de manobra na usina de Furnas
11/03/1999	24.900	11	260	Subestimação dos riscos de blecautes no planejamento de manutenção, arranjo físico das subestações de Extra-Alta-Tensão inadequado
16/05/1999	2.000	3	103	Configuração inadequada dos dispositivos de proteção e medidas de precauções insuficientes durante as manobras

Figura 4 – Principais blecautes ocorridos no Brasil com causas relacionadas a erros humanos – 1984 a 2005

Fonte: Gomes (2003)

Com o objetivo de mitigar os efeitos causados por eventuais desligamentos forçados de funções transmissão, o sistema elétrico brasileiro tem sido projetado e operado através do uso de um conjunto de critérios de confiabilidade determinísticos. No planejamento da expansão, por exemplo, o critério determinístico mais utilizado é o n-1. Por esse critério, o sistema deve suportar a indisponibilidade simultânea de um elemento de transmissão que esteja fora de operação por contingência, sem que ocorram violações dos indicadores de desempenho do sistema.

Com relação à aprovação de intervenções programadas na rede básica, o principal critério determinístico adotado pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) é o n-2. Esse critério estabelece que o sistema elétrico deve suportar a indisponibilidade simultânea de um elemento de transmissão que esteja fora de operação para manutenção e de qualquer outro elemento por contingência, sem que ocorram violações dos indicadores de desempenho do sistema (LIMA; LOURENÇO; SCHILLING, 2012).

1.2 Tema e objetivos

Diante do exposto, esta dissertação aborda o tema da confiabilidade humana. Nesse contexto, o objetivo principal é aplicar uma metodologia existente para analisar a probabilidade de ocorrência de falha humana em uma subestação de energia elétrica.

Os objetivos específicos são os seguintes:

- identificar quais são os fatores que exercem mais influência sobre o desempenho dos operadores;
- quantificar a probabilidade de ocorrência de falha humana na execução de procedimentos críticos;
- propor ações que minimizem a probabilidade de ocorrência de falha humana.

1.2.1 Justificativa em relação ao tema e aos objetivos

Atualmente, análises estatísticas demonstram que falhas relacionadas a fatores humanos em um sistema correspondem até 90% do total de falhas (PENG-CHEN et al., 2012). Spurgin (2010) afirma que esses números são decorrentes da utilização atual de materiais com melhor qualidade e aumento da compreensão sobre as contribuições do homem na ocorrência de falhas. Desta maneira, a Análise da Confiabilidade Humana (ACH) tem sido amplamente utilizada para avaliação da operação de plantas sob riscos aceitáveis, visando atender aos interesses econômicos da empresa proprietária; aos níveis de desempenho exigidos pelos consumidores e órgãos reguladores; e à segurança dos trabalhadores no exercício de suas atividades.

A identificação dos fatores que exercem influência sobre o desempenho dos operadores é necessária para identificar áreas ou aspectos problemáticos que aumentam o potencial de ocorrência de erros e necessitam ser analisados (EMBREY, 2000).

A análise probabilística deve ser utilizada para quantificar os perigos e os riscos de um acidente. Conhecendo-se a probabilidade de ocorrência de erros humanos é possível verificar se esse valor está ou não em um nível aceitável (NOROOZI et al., 2013).

A melhoria do nível de segurança de um sistema pode ser alcançada através da implementação de medidas apropriadas que explorem o enorme poder das competências humanas para prevenção ou mitigação de acidentes provocados por erros humanos. Dessa

maneira, embora seja impossível conceber uma instalação totalmente livre de erros humanos, a implementação de medidas adequadas que melhorem o desempenho humano é importante para diminuir a probabilidade de ocorrência de falhas humanas (REASON, 2000).

Quanto ao setor elétrico brasileiro, estimativas indicam que em 2020 o consumo de eletricidade será 61% superior ao de 2010, atingindo 730 TWh (TOLMASQUIM, 2012). Segundo dados do ONS (2014a) a expansão do SIN entre os anos de 2008 e 2012 foi acompanhada de uma queda do seu nível de desempenho, com aumento de 9% do número de ocorrências e 16% dos cortes de carga.

Considerando a grande proporção que as falhas humanas têm alcançado com relação ao número total de falhas; a estimativa de ampliação do SIN e histórico recente de queda do nível de desempenho, com o aumento do número de ocorrências e cortes de carga; e o histórico de falhas humanas ocorridas nos últimos anos no sistema elétrico; a realização da ACH é relevante para o setor elétrico para o aumento da confiabilidade na operação do Sistema Interligado Nacional e mitigação da ocorrência de corte de fornecimento de energia aos consumidores.

1.3 Procedimentos metodológicos da pesquisa

Esta é uma pesquisa de natureza aplicada, com abordagem qualitativa e quantitativa do problema. No que se refere aos objetivos, a pesquisa caracteriza-se como exploratória, devido à necessidade de encontrar um método que permita calcular a probabilidade de ocorrência de falha humana e estudar os fatores que exercem influência sobre a performance do homem na operação de um determinado equipamento, em um certo contexto.

O desenvolvimento deste trabalho foi dividido em quatro etapas. A primeira foi a pesquisa por métodos que fossem capazes de determinar a probabilidade da ocorrência de falhas humanas e os fatores que exercem influência sobre a performance do operador na realização de seu trabalho. A segunda etapa contemplou a seleção de um método de ACH, baseada em estudos anteriores. A terceira etapa consistiu no desenvolvimento de um estudo de caso, com aplicação da metodologia apresentada na segunda etapa, em um cenário considerado consistente e representativo. Finalmente, a última etapa envolveu a análise dos resultados obtidos e as conclusões (Figura 5).

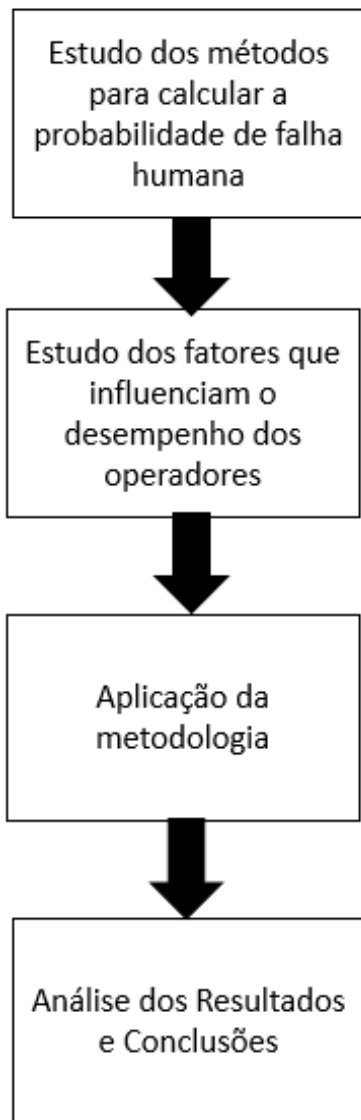


Figura 5 - Fluxo geral com as etapas de trabalho

Fonte: Elaborado pelo autor (2016)

1.4 Delimitações da pesquisa

Esta dissertação está centrada na análise da confiabilidade humana para determinar a probabilidade de ocorrência de uma falha humana na operação de uma subestação de transmissão de energia elétrica e os fatores que exercem influência sobre o desempenho do operador no exercício de suas atividades. Não serão abordados nesse trabalho fatores sociais que possam influenciar no desempenho humano sobre os quais as empresas não possuem controle e formas de interferir para melhorar o desempenho dos empregados.

Na análise dos fatores de desempenho, serão considerados como aspectos ergonômicos somente aqueles que exercem influência direta na execução do procedimento crítico verificado, como a qualidade do sistema de supervisão e controle, quantidade e qualidade das informações disponíveis pela instrumentação e a interação com o equipamento para realização das tarefas (GERTMAN et al., 2004). Não será realizada uma abordagem ergonômica completa de toda a organização do trabalho.

Os procedimentos de manutenção e aspectos sobre confiabilidade de equipamentos não serão tratados, pois isso estenderia o trabalho a outros caminhos conceituais, distantes do objetivo proposto.

Como se trata da aplicação de um método já existente para realização da ACH em uma subestação de transmissão de energia elétrica, foram considerados os métodos que potencialmente poderiam ser aplicados em suas concepções originais e, por isso, não foi considerada a possibilidade de adequações de métodos com aplicação específica em outras áreas.

1.5 Estrutura da dissertação

O presente trabalho está organizado em cinco capítulos. No primeiro, é apresentada a introdução ao tema da análise da confiabilidade humana no mundo e posteriormente, de maneira específica, no setor elétrico brasileiro, resgatando aspectos históricos. Neste capítulo é feita a contextualização da questão principal do estudo, que é a importância em determinar a probabilidade e compreender o mecanismo de surgimento de erros humanos com o objetivo de prevenir essas ocorrências. No segundo capítulo, busca-se referenciar teoricamente os aspectos abordados no trabalho.

O terceiro capítulo trata dos procedimentos metodológicos da pesquisa aplicada, sendo iniciado pela descrição detalhada da metodologia para análise da confiabilidade humana e, na sequência, abordando os preparativos para realização do estudo. No quarto capítulo é apresentada a empresa selecionada para a realização da pesquisa e detalhados os dados utilizados, com demonstração dos resultados obtidos. O capítulo é encerrado com comentários e com a análise dos resultados. O quinto e último capítulo faz uma avaliação do trabalho e apresenta suas vantagens e desvantagens e sugestões para o desenvolvimento de estudos futuros, relacionados com esta dissertação.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo fundamenta, com referências disponíveis nas literaturas nacional e internacional, os conceitos e métodos necessários para que o objetivo do trabalho seja alcançado.

Na subseção 2.1, ‘Métodos para análise da confiabilidade humana’, procura-se fazer através de trabalhos publicados o levantamento dos principais métodos utilizados para realização da ACH e a identificação dos mais relevantes quanto à aplicação para esse estudo.

Na subseção 2.2, ‘Vantagens e desvantagens dos principais métodos para análise da confiabilidade humana’, pretende-se identificar pela análise das vantagens e desvantagens de cada método aquele que seja mais adequado para realizar a ACH na operação de uma subestação de transmissão de energia elétrica.

Na subseção 2.3, ‘Fatores de desempenho humano’, é feita uma revisão sobre a compreensão dos fatores que exercem influência sobre a performance dos operadores no desempenho de suas atividades e como podem contribuir para a ocorrência de erros humanos.

Na subseção 2.4, ‘Considerações a respeito da revisão bibliográfica’, são consolidadas as informações a respeito do método mais adequado para realizar a ACH na operação de uma subestação de transmissão de energia elétrica e os fatores que exercem influência sobre a performance dos operadores.

2.1 Métodos para análise da confiabilidade humana

A confiabilidade humana pode ser definida como a probabilidade de um procedimento ou atividade na operação de um sistema ser concluída com sucesso pelo operador ou equipe, dentro do mínimo tempo exigido, quando a dimensão do tempo for relevante (SWAIN; GUTTMANN, 1983).

A análise da confiabilidade humana objetiva analisar os fatores que contribuem para a ocorrência de erros humanos e determinar a probabilidade de sua ocorrência. O modelo utilizado no estudo deve ser construído e validado por dados empíricos, como, pela experiência operacional e resultado de simuladores (PODOFILLINI; DANG, 2013). Chandler et al (2010) e Kirwan (1994) apresentam bases de dados sobre a ocorrência de erros humanos que podem ser utilizadas como referências para validação de estudos de ACH.

O erro humano pode ser definido como uma ação realizada que não atende um determinado critério (SHERIDAN, 2008). As falhas humanas ocorrem quando os erros são cometidos durante a realização de atividades necessárias para operação do sistema dentro de seus limites de segurança ou na execução de ações desnecessárias que interfiram no desempenho do sistema. Os erros podem ser quantificados em termos de sua probabilidade de ocorrência, chamada de Probabilidade de Erro Humano (PEH), calculada pela Equação 1 (KIRWAN, 1992).

$$PEH = \frac{\text{Número de Erros Observados}}{\text{Número de Oportunidades para Ocorrência de Erros}} \quad (1)$$

O cálculo da probabilidade de ocorrência de erros humanos deve ser acompanhado da compreensão de suas causas. Várias técnicas de quantificação da probabilidade de erro consideram os fatores de influência ou de desempenho para cálculo da PEH (KIRWAN, 1992).

Quanto aos métodos desenvolvidos para a ACH, são classificados pela literatura em métodos de primeira, segunda e terceira geração. A diferença fundamental entre eles é que os métodos de primeira geração, elaborados entre 1970 e 1990, trabalham com a divisão taxonômica das falhas humanas e estão direcionados, principalmente, ao estudo da probabilidade da ocorrência da falha humana. Os métodos de segunda geração, desenvolvidos entre 1990 e 2005, concentram seus esforços em compreender processos cognitivos e como alguns fatores, como carga de trabalho, estresse, questões sociológicas, psicológicas e relacionadas à saúde, exercem influência sobre o desempenho do homem na execução das tarefas. A partir de 2005, foram criados os métodos de terceira geração, caracterizados por estudar as relações entre os fatores de desempenho e suas interdependências (CALIXTO; LIMA; FIRMINO, 2013).

Na revisão da literatura realizada por Bell e Holroyd (2009), foram identificados 72 métodos relacionados à ACH. Deste total, 37 foram excluídos após avaliação das informações disponíveis para determinar a aplicabilidade aos estudos sobre confiabilidade humana. As razões para a exclusão levaram em consideração o fato de que na verdade são ferramentas para gerenciar números de tripulação, técnicas específicas de aviação, métodos de interação

entre o homem e computadores, bases de dados de confiabilidade humana, modelos de avaliação de risco e não um método completo e específico para a ACH.

Após análise do escopo, abordagem, informações sobre modelos subjacentes, suas vantagens e desvantagens, potenciais setores de aplicação, validação e os recursos necessários para utilização dos 35 métodos restantes, foram selecionados os 17 métodos relacionados na Figura 6.

Disponível publicamente	Primeira Geração	Método	Observação	Aplicação
		THERP	Método com abordagem abrangente desenvolvido pela USNRC – <i>United States Nuclear Regulatory Commission</i> (Comissão Reguladora Nuclear dos Estados Unidos)	Genérico, com ampla aplicação em Usinas Nucleares
		ASEP	Uma versão simplificada do THERP desenvolvido pela USNRC	Nuclear
		HEART	Método de relativa fácil aplicação e compreensão por engenheiros e especialistas em ACH	Genérico
		SPAR-H	Abordagem útil para situações em que não é necessária uma avaliação detalhada. Desenvolvido para o USNRC. Baseado no HEART	Nuclear
	Segunda Geração	ATHEANA	Pesquisa intensiva e beneficiaria de um maior desenvolvimento. Desenvolvido pelo USNRC	Nuclear
		CREAM	Requer maior desenvolvimento	Nuclear
	Avaliação por Especialistas	APJ	Requer maior desenvolvimento	Genérico
		PC	Requer maior controle para minimizar tendência, caso contrário a validade pode ser questionável	Genérico
		SLIM-MAUD	Requer maior controle para minimizar tendências, caso contrário a validade pode ser questionável	Nuclear e indústria química
Não disponível publicamente	Primeira Geração	HRMS	Ferramenta computadorizada abrangente. Um método proprietário	Nuclear
		JHEDI	Técnica de triagem mais rápida do que o HRMS, seu precursor	Nuclear
		INTENT	Foco em erros com intenção. Pouca evidência de uso, mas potencialmente útil	Nuclear
	Segunda Geração	CAHR	Um método com base de dados potencialmente útil	Genérico
		CESA	Potencialmente útil	Nuclear
		CODA	Requer maior desenvolvimento	Nuclear
		MERMOS	Desenvolvido e usado pela EdF – <i>Électricité de France</i> (Companhia Elétrica Francesa)	Nuclear
	Terceira Geração	NARA	Uma versão do HEART para aplicação específica em usinas nucleares	Nuclear

Figura 6 – Métodos selecionados para análise da confiabilidade humana

Fonte: Bell e Holroyd (2009)

Pela Figura 6 pode ser observado que, dos 17 métodos relacionados, 11 apresentam aplicação específica para usinas nucleares. Além disso, 8 métodos não possuem referências disponíveis publicamente para aplicação.

Uma avaliação dos principais métodos de ACH quanto à abrangência de aplicabilidade e características (métodos relacionados a tarefas, tempo e contexto) também foi realizada por Spurgin (2010). Em seu estudo comparativo entre os métodos THERP, CBDT¹, HEART, NARA, CREAM, ATHEANA, MERMOS, SLIM, SPAR-H, propôs a aplicação do método HDT – *Holistic Decision Tree* (Árvore de Decisão Holística), por conseguir representar o contexto em que ocorre o erro humano e todas as possibilidades de resposta da equipe, ser de fácil compreensão e indicar claramente quais parâmetros podem ser alterados para melhorar a confiabilidade humana.

Em estudos mais recentes, como o de Podofillini e Dang (2013), tem-se utilizado redes bayesianas para o tratamento de probabilidades obtidas por especialista na construção de modelos de análise da confiabilidade humana. A aplicação de redes bayesianas tem sido empregada para o desenvolvimento de metodologias híbridas, em conjunto com métodos tradicionais, para o refinamento dos resultados utilizando funções de probabilidade e não valores discretos, estabelecer a interação entre os fatores de desempenho humano e expandir o trabalho para um nível de detalhe maior (GROTH; SWILER, 2013).

Como não foram encontrados na literatura a aplicação de métodos específicos ou genéricos em subestações de transmissão de energia elétrica, nos próximos itens serão abordados e avaliados o THERP, HEART, APJ, PC, HDT e redes bayesianas, por serem os métodos identificados com aplicação abrangente e referências disponíveis publicamente.

2.1.1 Thecnique for Human Error Rate Prediction

O THERP - *Thecnique for Human Error Rate Prediction* (Técnica para Previsão de Taxa de Erro Humano), (SWAIN; GUTTMANN, 1983), é amplamente utilizado em avaliações probabilísticas de segurança no campo nuclear, com muitas aplicações a estudos probabilísticos de segurança em outras áreas, como nas indústrias químicas e petrolíferas. O THERP é considerado um método de ACH de primeira geração porque suas tabelas de

¹O CBDT – *Cause-Based Decision Tree* (Árvore de Decisão Baseada em Causa), elaborado por Parry et al. (1992), é um método derivado do THERP.

quantificação de erros humanos não consideram os mecanismos de erro humano e também a caracterização do contexto em que ocorrem (FONSECA et al., 2013).

O THERP apresenta valores estimados de Probabilidades de Erros Humanos (PEH) para permitir que analistas façam avaliações qualitativas de ocorrências de erros humanos em usinas nucleares. No THERP as descrições das tarefas possuem um grau de resolução mais elevado do que em outros métodos. Tem também uma abordagem lógica, com mais ênfase na recuperação de erros do que a maioria das outras técnicas. Essencialmente, o THERP apresenta tabelas com valores de PEH que podem ser alterados de acordo com fatores específicos da planta, utilizando-se de outras tabelas (BELL; HOLROYD, 2009).

O método THERP pode ser desenvolvido em seis etapas. Em primeiro lugar, cada operação deve ser descrita por um procedimento. Então, esses procedimentos devem ser descritos em termos de tarefas. Essas tarefas são descritas por ações elementares, que são associadas com uma probabilidade de falha (ou sucesso), dada por um especialista. O fracasso de uma tarefa é, portanto, o produto das probabilidades de todas as ações. A probabilidade de falha humana na execução de um procedimento é o produto das probabilidades de falhas das tarefas que o compõem.

O THERP pode ser adequado para análises em que tarefas cognitivas e o tempo não são parâmetros relevantes. Tem sido frequentemente utilizado em todo o mundo, porém é alvo de críticas justamente por não permitir considerar tarefas nas quais os processos cognitivos possuem uma forte importância e por nem sempre ser possível simplificar e dividir uma tarefa em ações elementares.

Embora o THERP tenha sido revisado por Swain (1990) com o objetivo de explicar as tarefas cognitivas na realização de diagnósticos, a abordagem de confiabilidade desse método permanece focada em comportamentos e erros individuais e não inclui em seu escopo erros relacionados ao trabalho intelectual: avaliação da situação, diagnóstico e tomada de decisão. Além disso, qualquer erro devido a causas organizacionais está claramente fora do escopo do THERP (ARNAUD, 2010).

2.1.2 Human Error Assessment and Reduction Technique

O método HEART - *Human Error Assessment and Reduction Technique* (Técnica de Avaliação e Redução de Erros Humanos), (WILLIAMS, 1986), pressupõe que qualquer confiabilidade no desempenho de uma tarefa pode ser modificada de acordo com a presença e

a força de condições promotoras de erro ou fatores de desempenho. O método identifica nove tipos genéricos de tarefas e propõe valores nominais de probabilidade de erros humanos correspondentes. Além disso, relaciona dezessete condições promotoras de erros que têm grande influência no desempenho das tarefas.

No método HEART, a probabilidade de erro humano é estimada utilizando a expressão empírica:

$$P = P_0 \left\{ \prod_i [(EPC_i - 1)AP_i + 1] \right\} \quad (2)$$

Onde P_0 é a probabilidade de erro humano, EPC_i é a condição causadora do erro i e AP_i é a avaliação do especialista (de 0 a 1) para cada uma das EPC.

A categorização das tarefas em termos de P_0 é realizada pelo analista usando a Figura 7.

Categoria	Tarefa	P_0
A	Totalmente desconhecida, executada rapidamente sem nenhuma ideia real das possíveis consequências	0,55
B	Recomposição do sistema em uma única tentativa sem supervisão ou procedimentos	0,26
C	Tarefa complexa que requer um alto nível de compreensão e habilidade	0,16
D	Tarefa muito simples executada rapidamente ou com pouca atenção	0,09
E	Tarefa rotineira e rápida envolvendo um nível de habilidade relativamente baixo	0,02
F	Recomposição do sistema seguindo procedimentos, com algumas verificações	0,003
G	Completamente familiarizada, bem concebida, altamente praticada e tarefa de rotina que ocorre várias vezes por hora, realizada com os mais altos padrões possíveis: por pessoas altamente motivadas, altamente treinadas e experientes, totalmente conscientes das implicações da falha e com tempo para corrigir erros potenciais, mas sem auxílio por outros profissionais	0,0004
H	Responder corretamente aos comandos do sistema mesmo quando houver um sistema de supervisão automatizado que forneça uma interpretação correta do seu estado	0,000002
M	Tarefas diversas para as quais não é possível encontrar uma descrição	0,03

Figura 7 – Categorização das tarefas e valores de probabilidades de erros humanos

Fonte: Castiglia e Giardina (2013)

A escolha das EPC para serem utilizadas na Equação 2 baseia-se na avaliação do especialista e dentro de valores definidos, relacionados na Figura 8. O valor correspondente a cada EPC na Figura 8 é baseado em uma extensa análise da literatura sobre desempenho humano (WILLIAMS, 1988). A extensão da influência negativa para cada EPC identificada é realizada utilizando o fator de avaliação AP_i . Há um valor limite pelo qual a PEH original poderia ser multiplicada para representar sua máxima influência sobre a tarefa do operador.

Nº EPC	Condições Promotoras de Erros, EPC	Valor
1	Não possuir familiaridade com uma situação improvável potencialmente importante	17
2	Pouco tempo para detecção do erro e recomposição	11
3	Sinalização barulhenta ou confusa	10
4	Meio de supressão ou substituição de informações ou recursos facilmente acessíveis	9
5	Ausência de um meio de transmitir informações espaciais e funcionais ao operador de forma que possa prontamente assimilar	9
6	IHM deficiente (divergência entre a realidade de trabalho do operador com o que lhe é apresentado pela planta)	8
7	Nenhum meio óbvio de reverter uma ação não intencional	8
8	Excesso de informações	6
9	Desaprendizagem da técnica ou execução de uma técnica que requer a aplicação de uma filosofia oposta às outras	6
10	Transferência de conhecimento de uma tarefa para outra	5
11	Ambiguidade no padrão de desempenho exigido	5
12	Descompasso entre risco percebido e risco real	4
13	<i>Feedbacks</i> ambíguos ou incompatíveis	4
14	Nenhuma confirmação clara e direta de uma ação pretendida da parte do sistema sobre o qual o controle deve ser exercido	4
15	Inexperiência (equipe recém-qualificada, mas sem experiência)	3
16	Instruções ou procedimentos inadequados	3
17	Pouca ou nenhuma verificação da consistência dos procedimentos. Uma qualidade baixa dos procedimentos e das relações interpessoais	3

Figura 8 – Valores das condições promotoras de erros

Fonte: Castiglia e Giardina (2013)

A utilização do HEART tem sido favorecida pela sua simplicidade e facilidade de aplicação. Contudo, permanecem vários problemas. Por exemplo, algumas EPC não são independentes umas das outras. Além disso, o uso do método é extremamente subjetivo e

depende muito da experiência do analista. Finalmente, do ponto de vista qualitativo, as condições de promoção do erro são fatores úteis para orientar os gestores de segurança. Entretanto, os valores numéricos são sensíveis ao contexto e a equação preditiva é empírica.

2.1.3 Absolute Probability Judgements

O APJ - *Absolute Probability Judgements* (Avaliações de Probabilidade Absoluta) é baseado no trabalho de Seaver e Stillwell (1983), com os exemplos e domínio de aplicação delineados pelo trabalho de Kirwan (1988).

A abordagem APJ é conceitualmente a de quantificação de confiabilidade humana mais direta. Ela simplesmente supõe que as pessoas podem estimar diretamente a probabilidade de um evento, neste caso, um erro humano (KIRWAN, 1994).

Existem diferentes abordagens de APJ que podem ser aplicadas para determinar a confiabilidade humana. A abordagem em grupo pode ser realizada de quatro maneiras distintas, de acordo com Calixto, Lima e Firmino (2013, p. 32):

- Método Individual Agregado. Os indivíduos fazem suas estimativas individualmente e, em seguida, calcula-se uma média geométrica delas.
- Método *Delphi*. Para este método, os indivíduos fazem suas estimativas independentemente uns dos outros, mas as avaliações são então compartilhadas, permitindo que os peritos reavaliem suas próprias estimativas com base nas novas informações. Os valores de probabilidade de erro humano são estatisticamente agregados (é calculada a média geométrica).
- Técnica Nominal de Grupo. Este método é semelhante ao método *Delphi*, a diferença é que os especialistas têm a oportunidade de discutir suas estimativas e confidencialmente reavaliar sua avaliação. Estes escores são posteriormente agregados estatisticamente.
- Método do Consenso de Grupo. Com este método os analistas se reúnem e discutem suas estimativas com o objetivo de encontrar uma que represente consenso do grupo. Se isso não for possível, é realizada uma agregação estatística das estimativas individuais.

Grozdanovic (2005) relacionou sete etapas distintas para aplicação do APJ:

- Seleção dos Especialistas. A maioria dos autores considera a participação de seis especialistas suficiente para uma estimativa direta. Na prática, entretanto, por indisponibilidade de recursos geralmente são utilizados um grupo menor,

de 3 ou 4 especialistas. Quando as discussões são necessárias para chegar a um consenso, o número de avaliadores recomendado é de 4 a 6 pessoas;

- Descrição das Tarefas. Quanto mais claras as definições das tarefas, menos elas estarão propensas a interpretações individuais distintas;
- Elaboração dos Questionários. Uma das questões que devem ser consideradas na elaboração dos questionários é a escala com a qual os especialistas indicarão suas avaliações. É importante que a escala escolhida consiga representar com detalhe suficiente o grau de sensibilidade de cada especialista. Os valores de escala também devem representar a faixa real de probabilidade de ocorrência dos erros na execução das tarefas, quando é conhecida. Quando essa faixa é desconhecida, pode ser adotado um intervalo entre 1 e $1,0E-06$;
- Elaboração das Instruções;
- Verificar a Consistência das Avaliações. Os especialistas são convidados a preencher os questionários ou, quando trabalharem em um modo de consenso de grupo, a discutir cada tarefa por sua vez e chegar a uma estimativa de consenso. As estimativas individuais de PEH só devem ser utilizadas se houver um nível razoável de concordância entre os especialistas. Para tornar mais fácil o cálculo subsequente, o conjunto de PEHs obtidas dos peritos é então traduzido para os seus equivalentes logarítmicos;
- Agregação das Estimativas Individuais. Caso não seja utilizado o modo de consenso, e se o nível de concordância entre especialistas for adequado, será necessário agregar as estimativas dos diferentes indivíduos para cada PEH pela média geométrica das estimativas individuais;
- Estimativa da Incerteza. Os limites de incerteza podem ser calculados usando os critérios de Seaver e Stillwell (1983) ou, alternativamente, os especialistas podem estimar os intervalos de confiança, que posteriormente podem ser agregadas estatisticamente.

2.1.4 Paired Comparisons

O método PC - *Paired Comparisons* (Comparação dos Pares) é creditado a várias fontes. Inicialmente assemelhava-se ao THERP. Posteriormente foram propostos métodos de escalonamento psicológico por comparações pareadas (BELL; HOLROYD, 2009).

O método PC (HUNNS, 1982) pertence ao domínio da psicofísica. É um meio de definir preferências entre itens (erros humanos) e solicita aos analistas avaliações relativamente simples. Este método difere do APJ pelas avaliações comparativas serem relativas e não absolutas. Cada analista compara todos os pares possíveis de descrições de erros e decide, em cada caso, qual dos dois erros é mais provável. Para n tarefas, cada especialista faz $n(n-1)/2$ comparações.

Quando comparações feitas por diferentes especialistas são combinadas, pode ser construída uma escala relativa de probabilidade de erro. Essa escala é então calibrada usando uma equação logarítmica, que exige que pelo menos duas probabilidades de erro humano sejam conhecidas dentro do conjunto de tarefas. As comparações dos pares são relativamente fáceis de serem realizadas, e o método determina de forma útil se cada analista tem sido consistente em suas avaliações. Inconsistências em avaliações sugeririam falta de perícia para realização da análise (KIRWAN, 1994).

Baseado na teoria de Kirwan (1994), o procedimento a ser seguido para aplicação do método PC:

- definição das tarefas. As tarefas devem ser definidas de forma simples, inequívoca e abrangente;
- incorporação das tarefas de calibração. Pelo menos duas tarefas, para as quais as probabilidades de erro humano são conhecidas, devem ser incluídas no conjunto de tarefas;
- seleção dos analistas. Os analistas devem ter experiência em análise das tarefas;
- preparação do questionário. Cada par de tarefas deve ser apresentado de forma que o analista analise um par por vez;
- orientação dos analistas. Os analistas devem ser informados sobre a finalidade do estudo e a natureza das tarefas avaliadas;
- comparações dos pares. Quando os analistas realizam as comparações dos pares é útil que elas tenham o apoio do especialista para que possam procurar e receber esclarecimentos;
- calcular os valores de probabilidades de erro humano;
- determinar o nível de consistência das avaliações pelo coeficiente de correlação (SEAYER; STILLWELL, 1983). Coeficientes de correlação elevados e estatisticamente significantes determinam a rejeição dos resultados;
- determinar o nível de consistência entre as avaliações. Assim como o APJ, para determinar os níveis de coerência entre os analistas, pode ser realizada uma análise de variância;
- estimar os limites de incerteza.

2.1.5 Holistic Decision Tree

O método HDT - *Holistic Decision Tree* (Árvore de Decisão Holística), (SPURGIN, 2010), foi desenvolvido após a observação de equipes de sala de controle que responderam a cenários de acidentes em simuladores durante os experimentos de confiabilidade de operadores realizados pelo EPRI - *Electric Power Research Institute* (Instituto de Pesquisas em Energia Elétrica), no período de 1986 a 1990.

Os resultados desses experimentos indicaram que para a ocorrência de acidentes os operadores foram mais influenciados pelo contexto durante as ações que por definições incompletas das tarefas. Para visualizar e registrar os resultados das observações, foi definida uma estrutura que possibilitasse incluir todas as possibilidades de eventos.

O método é direcionado para uma abordagem holística para a estimativa de valores de PEH, embora as tentativas iniciais de modelagem de PEH visassem estimar tipos latentes de falha, como aqueles devidos a operações de manutenção e testes.

Como ilustrado pela Figura 9, o HDT combina uma estrutura em árvore para determinar as PEH para um cenário específico.

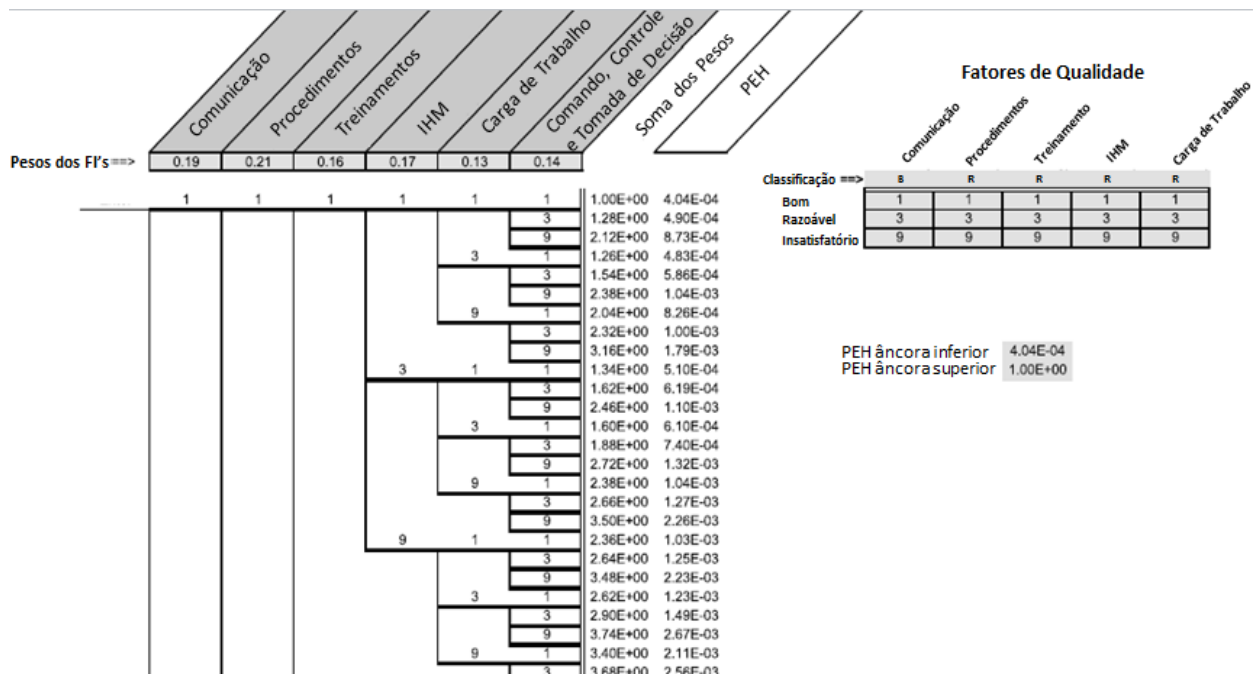


Figura 9 - Exemplo de aplicação da Árvore de Decisão Holística

Fonte: Adaptado de Spurgin (2010)

Na linha superior estão relacionados os Fatores de Influência (FI). Para cada FI é associado um Fator de Qualidade (FQ), mostrados na tabela à direita da figura principal. Na prática, devem ser definidos claramente os critérios para classificação dos fatores de qualidade de cada fator de influência, quais características levam os fatores de influência a serem classificados como bons, razoáveis e insatisfatórios.

Fazendo uma analogia entre métodos, pode ser observado que há uma semelhança entre os fatores de influência e os fatores de qualidade do HDT com os fatores de desempenho e os fatores de ponderação associados ao HEART.

As etapas para aplicação do HDT são as seguintes (SPURGIN, 2010):

- elaboração de uma lista dos potenciais fatores de influência;
- verificação da aplicação dos fatores de influência em todos os cenários ou somente em cenários específicos do estudo;
- classificação dos fatores de influência por ordem de importância e seleção dos mais importantes;
- definição e seleção dos fatores de qualidade a serem utilizados para cada fator de influência e construção da árvore de decisão holística. Para classificação dos fatores de qualidade podem ser utilizados os critérios utilizados por órgãos reguladores governamentais e manuais e guias elaborados por outras organizações de referência, como os estabelecidos por Gertman et al. (2004);
- estimativa dos pesos de importância para os fatores de influência. Para determinação do nível de importância de cada fator pode ser utilizado o método AHP – *Analytic Hierarchy Process* (Processo de Hierarquia Analítica), (SAATY, 1980). O AHP, de maneira semelhante ao método PC, se utiliza de comparações pareadas para determinar os níveis de importância relativos de cada fator e pode ser aplicado com a utilização da ferramenta computacional *BPMSG AHP priority calculator* (BPMSG, 2016);
- estabelecimento dos valores âncora superior e inferior para a PEH. Para o valor âncora superior adota-se 1, assumindo-se que, nesse caso, se todos os fatores de desempenho estão em seus piores níveis de qualidade irá ocorrer um erro humano. Para o valor âncora inferior pode-se adotar os valores recomendados por Spurgin (2010):

“Para a maioria dos cenários percentil 5% do valor âncora inferior é estabelecido em 1,0E-04 e percentil 95% em 1,0E-3. Para casos que não possuam gravidade, percentil 5% é ajustado em 1,0E-3 e percentil 95% em 1,0E-02; e, para casos severos, percentil 5% é ajustado em 1,0E-02 e 0,1 para percentil 95%”

- determinação dos níveis de qualidade de cada FQ para cada fator de influência para cada cenário;
- cálculo dos valores de PEH associadas a cada nível dos fatores de qualidade pelas Equações 3 e 4;

$$\ln(HEP_i) = \ln(HEP_l) - \ln(HEP_h / HEP_l) \left[\frac{S_i - S_l}{S_h - S_l} \right] \quad (3)$$

$$S_i = \sum_{j=1}^n (QV_j) I_j \quad \text{com} \quad \sum_{j=1}^n I_j = 1 \quad (4)$$

Onde HEP_i é a probabilidade de erro humano do termo i da árvore de decisão holística; HEP_l é o valor da probabilidade de erro humano para o valor âncora inferior; HEP_h é o valor da probabilidade de erro humano para o valor âncora superior; S_l é o menor valor possível de S_i ; S_h é o maior possível de S_i ; QV_j é o nível de qualidade correspondente ao fator de influência j ; I_j é o peso do fator de influência j , determinado pela avaliação de especialistas; n é o número de fatores de influência da árvore. O conceito de que o logaritmo da PEH é proporcional à soma dos pesos dos fatores de influência delimitados por dois valores âncora, superior e inferior, foi introduzido primeiramente por Embrey (1984).

2.1.6 Redes Bayesianas

As aplicações de redes bayesianas têm crescido nos últimos 20 anos, com desenvolvimento teórico e computacional em muitas áreas. Durante a década de 1990, as redes bayesianas e os gráficos de decisão atraíram uma grande atenção como estrutura para a inteligência artificial e análise de decisão, não apenas na área acadêmica, mas também na indústria. Um exemplo é o recente interesse forte no campo da análise da confiabilidade (MOHAGLEGH; KAZEMI; MOSLEH, 2009).

Redes bayesianas são estruturas gráficas que permitem representar razões ou argumentos no domínio da incerteza. Uma rede bayesiana tem como estrutura um grafo

acíclico direcionado, ou seja, os arcos não podem formar ciclos. Eles são unidirecionais, de forma que, se partindo de qualquer um dos nós da rede, é impossível que se retorne ao mesmo nó (MOHAGLEGH; KAZEMI; MOSLEH, 2009). A Figura 10 apresenta um exemplo de uma rede bayesiana.

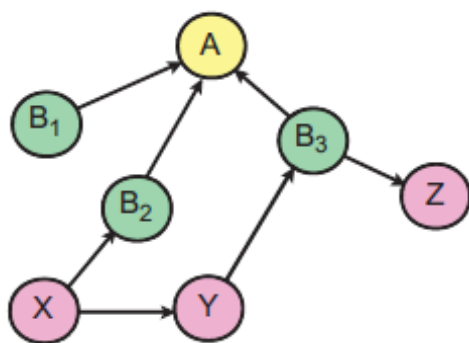


Figura 10 - Exemplo de rede bayesiana

Fonte: Mohagleg, Kazemi e Mosleh (2009)

Os nós nas redes bayesianas representam as variáveis aleatórias (discretas ou contínuas). Os arcos representam as conexões ou dependências diretas entre as variáveis. As conexões direcionadas são sempre conexões causais, ou seja, a direção dos arcos representa a relação de causa e efeito entre as variáveis.

Por exemplo, se houver um arco indo de um nó X para um nó Y, assume-se que o nó X representa uma provável causa de Y e adota-se como nomenclatura que X é um dos pais de Y. Caso o nó não possua pai, ele é chamado de nó raiz. As variáveis aleatórias são quantificadas por uma distribuição de probabilidades condicionais associando cada nó a seus prováveis causadores diretos.

A estrutura ou topologia da rede bayesiana deve capturar a relação qualitativa entre variáveis. Em particular, dois nós deveriam ser conectados se um é efeito ou causa do outro, com um arco indicando a direção do efeito. Uma vez que a topologia da rede foi especificada, o próximo passo é quantificar a relação entre os nós conectados. Isto é feito pela atribuição da distribuição de probabilidades para cada nó. As probabilidades condicionais são representadas pelas ligações entre as causas e seus potenciais efeitos.

As redes bayesianas são fundamentadas no teorema de Bayes que demonstra a relação entre uma probabilidade condicional e a sua inversa e permite calcular a probabilidade de A condicional a B pela Equação 5 (CALIXTO; LIMA; FIRMINO, 2013):

$$P(A | B) = \frac{P(B | A) \cdot P(A)}{P(B)} \quad (5)$$

Onde $P(A)$ e $P(B)$ são as probabilidades de A e B e $P(B|A)$ a probabilidade de B condicionada à ocorrência de A .

Em estudos mais recentes as redes bayesianas têm sido aplicadas para refinar as probabilidades dos fatores de desempenho, ao substituir a utilização de valores discretos de probabilidade por funções de probabilidades (GROTH; SWILER, 2013). Além disso, são utilizadas também para modelar a interdependência entre os fatores de desempenho e adicionar níveis maiores de detalhes aos fatores que exercem influência sobre o operador na execução de tarefas.

No método proposto por Groth e Swiler (2013), uma versão do SPAR-H com a utilização de rede bayesiana, ilustrado pelo Figura 11, o fator de desempenho original do SPAR-H ‘experiência /treinamento’ é decomposto em quatro outros fatores: ‘relevância do treinamento para o cenário’, ‘tempo decorrido após o treinamento’, ‘frequência de treinamento’ e ‘anos de experiência’. Esses quatro novos fatores de desempenho são representados na rede bayesiana como nós pais do nó ‘experiência/treinamento’. Nesse exemplo, também é adicionado ao método original a interdependência entre os fatores de desempenho ‘tempo’ e ‘estresse’.

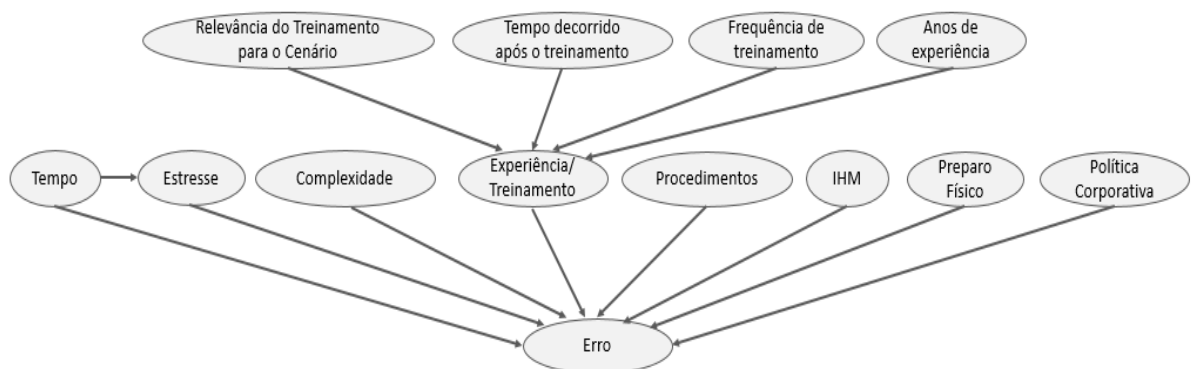


Figura 11 - Método híbrido com redes bayesianas

Fonte: Adaptado de Groth e Swiler (2013)

Embora a adição de informações em redes bayesianas promova um maior detalhamento do estudo sobre confiabilidade, em estudo comparativo entre redes bayesianas e os métodos SLIM e SPAR-H realizado por Calixto, Lima e Firmino (2013) ficou evidenciado que o resultado final alcançado para o valor de probabilidade de erro humano é similar para os três métodos. Ambos os métodos tiveram resultados semelhantes quando analisados os mesmos fatores de desempenho humano, pelo mesmo grupo de especialistas. Apesar dos resultados semelhantes, a rede bayesiana é mais difícil de ser aplicada e obter a resposta confiável do especialista devido à complexidade de tal método. Tanto quanto maior o número de fatores de desempenho, mais difícil será para o especialista realizar a avaliação.

2.2 Vantagens e desvantagens dos principais métodos para análise da confiabilidade humana

A Figura 12 apresenta uma relação com as vantagens e desvantagens quanto à aplicação dos principais métodos genéricos com referências disponíveis para análise da confiabilidade humana.

MÉTODO	VANTAGENS	DESVANTAGENS
THERP	<ol style="list-style-type: none"> 1. Facilidade de aplicação 2. Pode ser usado para tarefas semelhantes à aplicação original 3. Boa documentação de referência 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Dificuldade na definição do número de subtarefas-chave 2. A relevância dos dados para as situações atuais é questionável 3. A questão da tarefa ser considerada a melhor forma de definir a PEH é questionável 4. Dificuldade para relacionar descrições de subtarefas com a aplicação atual
HEART	<ol style="list-style-type: none"> 1. Facilidade na aplicação 2. Experiência adquirida durante estudos no Reino Unido 4. Boa documentação de referência 	<ol style="list-style-type: none"> 1. A seleção de tarefas-chave não é fácil, e as descrições são vagas 2. HEART identifica cerca de 38 condições causadoras de erros. Entretanto, análises mostram que algumas dessas condições não se aplicam ao domínio da confiabilidade humana e análise de riscos, como a condição de número 38, relacionada à idade 3. Os dados para determinação da probabilidade de erros humanos são de origem questionável 4. Os critérios para avaliação por especialistas não são claros 5. A questão da tarefa ser considerada a melhor forma de definir a PEH é questionável

PC	<ol style="list-style-type: none"> 1. O conhecimento subjetivo pode ser proveitosamente extraído de análises comparativas 2. A técnica torna possível determinar se os avaliadores estão ou não qualificados para fazer julgamentos sobre um determinado conjunto de dados 3. Como o método pode trabalhar com até uma quantidade mínima de dois valores empiricamente estimados de PEH, permite estudos até mesmo com escassas quantidades de dados empíricos 4. Mesmo sem calibração, a técnica fornece um meio útil para derivar uma medida da importância relativa de diferentes erros humanos. Essa técnica foi utilizada, por exemplo, para priorizar diferentes tipos de ameaças de colisão de navios em plataformas <i>offshore</i> no Reino Unido 5. Com um pequeno número de tarefas e um conjunto de especialistas, a técnica pode ser aplicada com bastante rapidez, especialmente quando utilizados recursos computacionais 6. Os especialistas podem realizar as avaliações individualmente. Isso elimina problemas logísticos para reunião de especialistas em grupo 	<ol style="list-style-type: none"> 1. As tarefas podem ser complexas para uma comparação simplificada 2. As tarefas podem não ser homogêneas 3. As comparações feitas podem não ser independentes uma da outra 4. Se o número de comparações for grande, a exaustão dos analistas pode levá-los à realização de comparações posteriores de maneira diferente das anteriores
APJ	<ol style="list-style-type: none"> 1. A técnica mostrou fornecer estimativas precisas em várias áreas (por exemplo, previsão do tempo) 2. O método é relativamente rápido de usar, e ainda permite uma discussão tão detalhada quanto os especialistas desejarem 3. A discussão também pode ser voltada para uma consideração de como alcançar reduções de erro. Este desenvolvimento também é benéfico quando os membros do grupo são da área operacional, o que melhora as chances de as recomendações serem aceitas e, em seguida, implementadas 4. Relativamente rápido de aplicar, se o processo de aquisição de dados está bem organizado e os especialistas possuem um alto nível de especialização 	<ol style="list-style-type: none"> 1. A técnica APJ é propensa a certos preconceitos, bem como conflitos em grupo, os quais, se não forem combatidos de forma eficaz (por exemplo, por um "facilitador"), podem minar significativamente a validade da técnica 2. Goza de pouca credibilidade quanto a sua validade 3. A técnica é criticamente dependente da seleção de especialistas apropriados, mas existem poucos critérios úteis para a seleção de "bons" especialistas
HDT	<ol style="list-style-type: none"> 1. O método lida com toda a resposta da equipe a um acidente 2. O método centra-se no contexto do acidente, uma vez que afeta a equipe 3. O método é de fácil compreensão 4. O método indica claramente quais parâmetros podem ser alterados para melhorar a confiabilidade 	<ol style="list-style-type: none"> 1. É necessário um julgamento especializado para determinar o impacto do nível de qualidade dos fatores de influência 2. As inter-relações entre as várias características precisam ser definidas 3. Os valores de âncora devem ser definidos por avaliação de especialistas, que pode impactar na precisão da PEH
Redes Bayesianas	<ol style="list-style-type: none"> 1. Refinamento das probabilidades dos fatores de desempenho, ao se trocarem os valores discretos de probabilidade por funções de probabilidades 2. Possibilitam a modelagem da interdependência entre os fatores de desempenho 3. Possibilitam adicionar níveis maiores de detalhes ao estudo de confiabilidade 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Difícil aplicação para obter resultados similares aos alcançados por métodos mais fáceis de serem aplicados

Figura 12 - Vantagens e desvantagens dos principais métodos para análise da confiabilidade humana

Fonte: Bell e Holroyd (2009), Spurgin (2010), Groth e Swiler (2013), Calixto, Lima e Firmino (2013)

Pelo quadro comparativo mostrado na Figura 12, observa-se que embora os métodos THERP e ATHEANA possuam boa documentação de referência e sejam de fácil aplicação, são métodos baseados em tarefas e por isso não são capazes de representar as condições de contexto em que ocorrem o erro humano. Os métodos PC e APJ são de aplicação rápida, entretanto se baseiam em comparações simplificadas e por isso recebem críticas quanto a validade dos resultados. O HDT e redes bayesianas permitem representar em uma estrutura gráfica as condições de contexto em que ocorrem os erros humanos. Enquanto o HDT indica todos os valores de probabilidade de ocorrência de erros humanos possíveis, as redes bayesianas permitem ainda adicionar níveis maiores de detalhes e representar a interação entre os fatores de desempenho, quando houverem. Entretanto, enquanto o HDT é de fácil aplicação e compreensão, as redes bayesianas possuem um grau de dificuldade maior de utilização para obtenção de resultados similares.

2.3 Fatores de desempenho humano

Segundo Spurgin (2010), existem quatro tipos principais de ações tomadas pelas equipes de operação e manutenção em uma planta: A, B, C e Cr, identificadas na Figura 13.

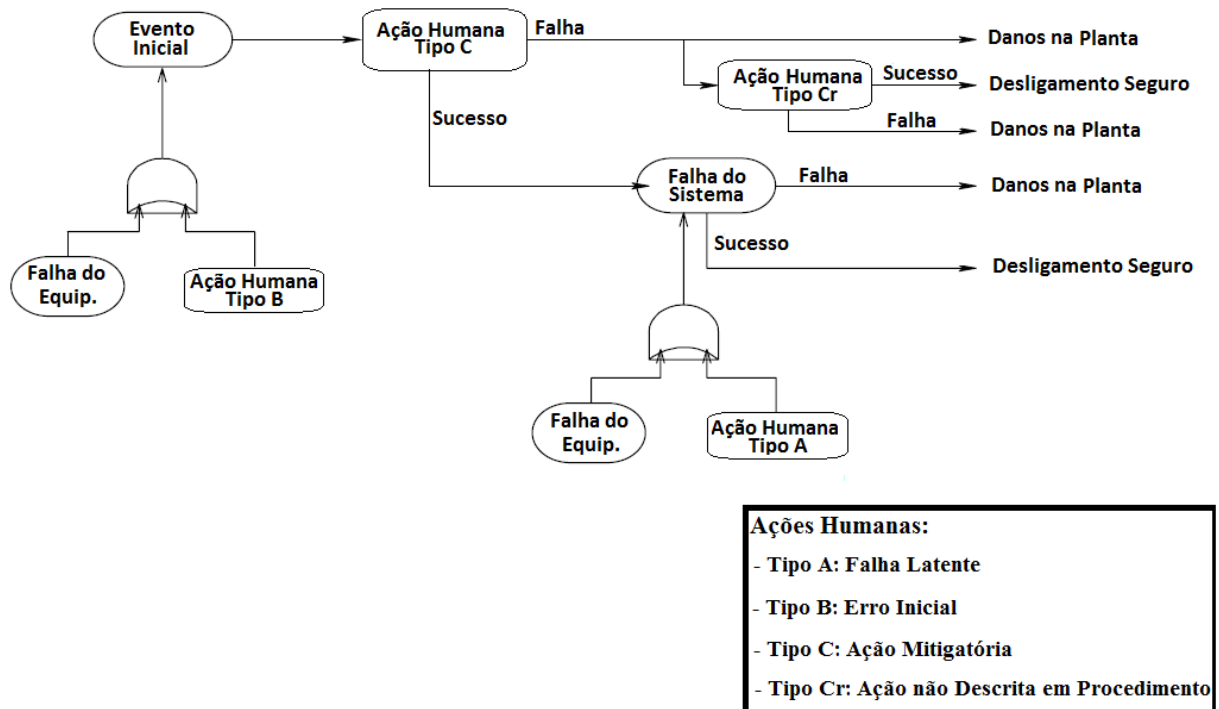


Figura 13 - Tipos de ações humanas tomadas durante a operação de uma planta

Fonte: Adaptado de Spurgin (2010)

As ações do tipo A são aquelas que resultam em erros cometidos durante a realização de testes ou atividades de manutenção, também chamadas de erros latentes. As ações do tipo B são erros que dão início a um acidente e também podem ser oriundas de atividades de manutenção, teste e operação. Ações tomadas após o início de um acidente, com o objetivo de mitigá-lo, são classificadas como do tipo C. Ações do tipo Cr são aquelas realizadas pela equipe de operação no restabelecimento da planta com auxílio de equipes de apoio por não estarem descritas nos procedimentos de emergência.

Acompanhando a evolução tecnológica, a partir dos anos 50, a natureza do trabalho tem passado de atividades predominantemente físicas para atividades cognitivas. A automação de tarefas tem se tornado cada vez mais frequente e, com isso, os operadores estão, por vezes, afastados do processo produtivo e trabalhando graças a uma imagem mental do que está ocorrendo. Os operadores estão lidando com o processamento de mais informações, memorização e diagnósticos. Esta evolução tem consequências, como o aumento da complexidade das atividades e o aumento da segurança dos trabalhadores, já que os operadores não estão mais tão envolvidos na execução direta das atividades do processo, e sim monitorando (ARNAUD, 2010).

Segundo Contini, Amendola e Ziomas (1991), os fatores humanos representam um aspecto muito importante na análise de risco. O histórico de acidentes em instalações que lidam com tecnologias perigosas mostra claramente que os fatores humanos e organizacionais têm uma importância relativamente crescente nas causas dos acidentes, quando comparados com os fatores tecnológicos, como pode ser visto na Figura 14.

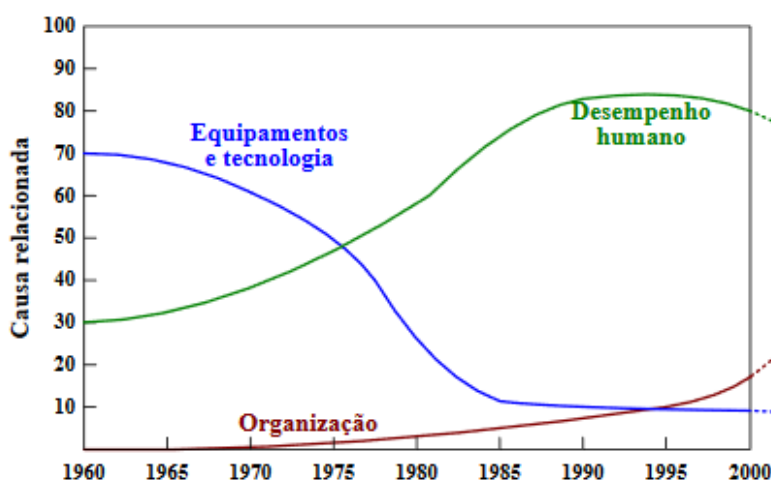


Figura 14 - Evolução das causas de acidentes

Fonte: Ribeiro (2012)

Para Arnaud (2010) há duas maneiras de considerar os operadores no trabalho. A primeira é considerar o operador como uma fonte de erro que deve ser controlada. Assim, para melhorar a segurança, a estratégia então é caracterizar a situação do trabalho, com a definição de cada passo das atividades do operador. Idealmente, a disciplina no cumprimento dos procedimentos garantiria, nesse caso, a não ocorrência de acidentes, já que, se o operador executasse as atividades como especificado, não haveria possibilidade de ocorrência de erros.

A outra maneira de abordar o operador no trabalho é considerá-lo como um recurso que deve ser utilizado com qualidade. Sob essa perspectiva, com uma descrição parcial do trabalho e mesmo com procedimentos incompletos, espera-se que o operador possa tomar algumas decisões sobre a situação e o contexto do sistema. Em caso de acidente, essas duas concepções levam a uma maneira diferente de considerar erros e falhas dos operadores, descritas no Figura 15 (ARNAUD, 2010).

Operador como fonte de erros	Operador como recurso do sistema
<p>As situações são conhecidas e descritas. Caso o operador execute corretamente os procedimentos, se ocorrer algum erro, será devido a:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ algum comportamento inadequado do operador, como negligência; ▪ descrição dos procedimentos não ser efetiva. 	<p>As situações devem ser estudadas. Se houver um erro, consequentemente, será devido a:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ falta de atenção; ▪ o operador estar executando conforme o prescrito; ▪ questões ligadas ao contexto (barulho, iluminação, etc.) criarem uma situação estressante; ▪ problema organizacional com a planta em seu gerenciamento.

Figura 15 - Perspectivas sobre a atuação do operador na ocorrência de falhas

Fonte: Arnaud (2010)

Sob a ótica dessas duas perspectivas, segundo Arnaud (2010, p. 12), os tipos de erros que podem ocorrer são classificados da seguinte maneira:

- Erro humano: corresponde à lacuna entre a ação executada pelo operador e como ela realmente deveria ter sido realizada.
- Erro ativo: ação desejada, ou ação indesejada, que tem consequências negativas imediatas no sistema.
- Erro latente: corresponde a uma ação ou a uma decisão para as quais as consequências são óbvias apenas após um determinado período de tempo. Em um momento posterior podem surgir outras condições que podem provocar esse tipo de erro, com resultados negativos ao sistema.

Considerando essa maneira de tratar o erro e a responsabilidade do homem em sua ocorrência, os primeiros modelos de confiabilidade humana eram bastante simples. A abordagem clássica do erro humano considera o comportamento humano como uma ‘caixa preta’. O operador é visto como um sistema, recebendo entradas e realizando uma determinada ação com uma determinada taxa de falha. Os erros do operador são classificados de acordo com suas características externas. Como a atividade é totalmente descrita por procedimentos, o erro somente poderia acontecer se uma tarefa fosse executada incorretamente.

Conseqüentemente, para melhorar a confiabilidade, o objetivo é trabalhar nas entradas ou nas saídas. Por exemplo, as formas propostas para melhorar a confiabilidade foram algumas ações para melhorar os procedimentos ou a ergonomia. Por outro lado, providências poderiam ser realizadas considerando as saídas ou resultados, como um controle frequente do cumprimento dos procedimentos com sanções, caso os operadores não os respeitassem (ARNAUD, 2010).

O principal interesse desta abordagem é certamente realizar avaliações probabilísticas sobre a frequência de aparecimento de erros. Para isso, é defendida a hipótese de que as ações dos operadores têm o mesmo comportamento que o funcionamento dos demais componentes do sistema: não são considerados sentimentos, nem desejos. Essa abordagem de confiabilidade está voltada para comportamentos e erros individuais e não inclui em seu escopo erros relacionados às atividades intelectuais, como avaliação da situação, diagnóstico do problema e tomada de decisão, e também àqueles provocados por causas organizacionais (ARNAUD, 2010).

Para estudar o operador e compreender suas limitações, Rasmussen (1986) propôs o modelo SRK - *Skill – Rules – Knowledge* (Habilidade – Regras – Conhecimento). O objetivo deste modelo é propor uma metodologia que auxilie na identificação de erros que possam ocorrer em diferentes situações operacionais. Segundo o modelo SRK, os operadores teriam seus comportamentos baseados em habilidades, regras ou conhecimento. O comportamento baseado em habilidades representa o desempenho sensório-motor automático, sem controle consciente: o desempenho do trabalho é baseado em sub-rotinas que estão sujeitas a um maior nível de controle.

O comportamento baseado em regras ocorre em uma situação de trabalho conhecida, onde um procedimento é aplicado de maneira conscientemente controlada. O comportamento

baseado em conhecimento acontece em situações desconhecidas, onde o objetivo é formulado com base em uma análise do ambiente e a formação da pessoa: os meios devem ser encontrados e selecionados de acordo com os requisitos da situação (SALMINEM; TALLBERG, 1996).

Segundo o modelo SRK, de acordo com Salminem e Tallberg (1996, p. 982, 983), os erros podem ser classificados em três grupos:

- Erros baseados em habilidades: erros sensório-motores, por exemplo, erros por deslize ou falta de atenção.
- Erros baseados em regras: execução de um procedimento que não corresponde à situação.
- Erros baseados no conhecimento: realização de uma avaliação equivocada da situação ou subestimação dos riscos decorrentes de uma determinada ação.

Para Rasmussen (1986), o aparecimento de erros ocorre quando as configurações de uma planta mudam de uma situação para outra. Trata-se então de um processo dinâmico. O SRK serviu de fundamento para outros modelos sobre fatores humanos, como em psicologia cognitiva. No entanto, este modelo apresenta algumas limitações, tais como o fato de que é focado no operador e não leva em conta a influência das causas organizacionais na ocorrência de erros humanos (ARNAUD, 2010).

Uma maneira mais recente de considerar o erro humano foi proposta por Reason (2008). Os três tipos de erros são provenientes do modelo SRK de Rasmussen:

- Erros no nível do conhecimento: as ações são governadas pela consciência, dependem de instruções interiores. Ocorrem durante a formulação de um novo plano para executar ações para solucionar uma questão para a qual não há procedimentos.
- Erros no nível da habilidade: nesse nível, o operador realiza comportamentos automáticos e rotineiros, com baixo nível de consciência. Os erros tipicamente envolvem falhas de execução, como lapsos e deslizes.
- Erros no nível das regras: nesse nível, o operador aumenta a consciência para aplicar regras familiares em desvios também familiares das situações rotineiras. Três tipos básicos de falhas podem ocorrer no nível RB: aplicação de uma má regra; aplicação de uma boa regra, mas inadequada ao cenário em questão; não aplicação de uma boa regra.

Uma das mais importantes contribuições de Reason foi caracterizar um tipo de origem de insucesso na execução de uma tarefa distinto de deslizos e enganos, são as violações. Violações são desvios de práticas de operação segura, de procedimentos, padrões ou regras. Violações são classificadas em três grupos:

- Violações Rotineiras: como fazer atalhos sempre que possível.
- Violações de Otimização: entendidas como aquelas que trazem mais benefícios pessoais do que para a tarefa, como brincadeiras ou ações para aliviar a monotonia.
- Violações Necessárias ou Situacionais: que parecem ser a única forma de cumprir a tarefa, e onde regras e procedimentos parecem ser inapropriados para a presente situação.

Enquanto erros vêm de problemas informacionais (esquecimento, desatenção, conhecimento incompleto, etc.), as violações são associadas a problemas motivacionais (baixo moral, exemplos fracos da supervisão, falta de preocupação, etc.). Erros podem ser explicados pelo que passa na mente de um indivíduo, enquanto as violações ocorrem em contextos sociais regulados. Erros podem ser reduzidos pela melhoria da qualidade e da entrega de informações dentro do local de trabalho, enquanto violações requerem melhorias motivacionais e organizacionais (SLAVUTSKI, 2010).

Ao fazer a distinção entre violações e erros, e estabelecer a associação da ocorrência de violações com fatores externos ao indivíduo, Reason introduziu o contexto como parâmetro a ser considerado na avaliação do desempenho humano. O operador é então considerado num sistema social, cultural e técnico que permite considerar todas as dimensões de ocorrência de um acidente.

Em uma concepção mais recente descrita por Calixto, Lima e Firmino (2013, p. 32), os fatores de desempenho humano são classificados em internos e externos. Os fatores de desempenho internos dependem da característica individual de cada operador e são: Psicológicos: estresse, sobrecarga de trabalho, depressão, desmotivação, falta de concentração; Fisiológicos: condições de saúde, preparo físico. Tais fatores podem ser monitorados, a fim de garantir que os funcionários estejam em condições físicas e psicológicas para realização de atividades críticas.

Os fatores de desempenho humano externos dependem da empresa e da sociedade e são: Tecnológicos: procedimentos, equipamentos, condições de trabalho; e Sociais: más

condições sociais, má aceitação no grupo social. Desta forma, há algumas questões sociais sobre as quais a empresa não possui controle e formas de interferir com o objetivo de exercer alguma influência positiva no comportamento das empresas e podem ser alteradas para melhorar o desempenho dos empregados. A Figura 16 mostra os fatores que podem ocasionar erros humanos.

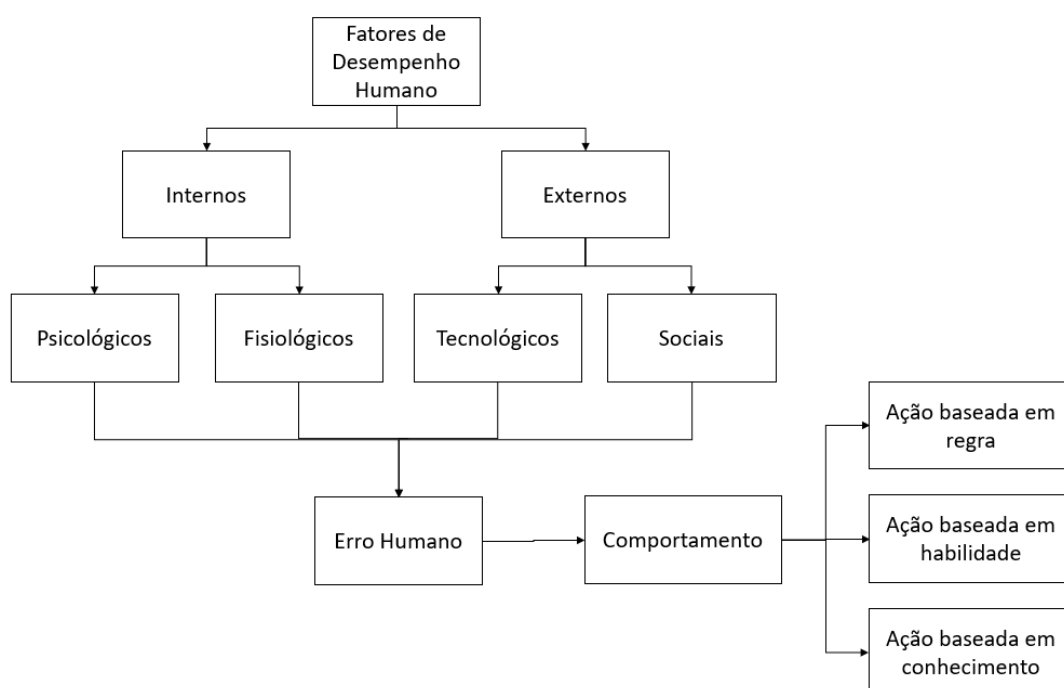


Figura 16 - Fatores de desempenho humano

Fonte: Adaptado de Calixto, Lima e Firmino (2013)

Dependendo do objetivo da ACH, portanto, deve-se adotar o modelo mais apropriado para avaliar os fatores de desempenho humano para obtenção de resultados satisfatórios (CALIXTO; LIMA; FIRMINO, 2013).

2.4 Considerações a respeito da revisão bibliográfica

Considerando a revisão bibliográfica realizada na subseção 2.2, 'Métodos para análise da confiabilidade humana', foi possível verificar que o HDT é um método abrangente, que não se limita à aplicação específica a somente uma determinada área, como nuclear, química ou petrolífera, por exemplo. O método possui referências disponíveis publicamente e, como

pertencente à segunda geração, foi concebido para possibilitar a representação de como as condições de contexto, como carga de trabalho, estresse, questões sociológicas, psicológicas e relacionadas à saúde, exercem influência sobre o desempenho do homem na execução das tarefas.

Além disso, o HDT é de fácil aplicação, o que favorece sua utilização e compreensão pela equipe que realizará o estudo. Outra característica que facilita a interpretação dos resultados apontados pelo método é sua capacidade de representar em uma estrutura gráfica todos os valores de probabilidade de ocorrência de erros humanos possíveis.

Na subseção 2.3, 'Fatores de Desempenho Humano', que apresenta os estudos sobre os fatores que exercem influência sobre a performance do operador na execução de tarefas, constatou-se que as abordagens mais recentes consideram além dos fatores psicológicos e fisiológicos, os fatores tecnológicos e sociais, que estão relacionados ao contexto no qual o homem está inserido.

Dessa forma, para realização da pesquisa serão utilizados os procedimentos metodológicos apresentados no capítulo 3.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A estrutura dos procedimentos metodológicos desenvolvida nesta dissertação está descrita segundo o Figura 17, que indica os passos realizados para atingir os objetivos traçados no capítulo 1.

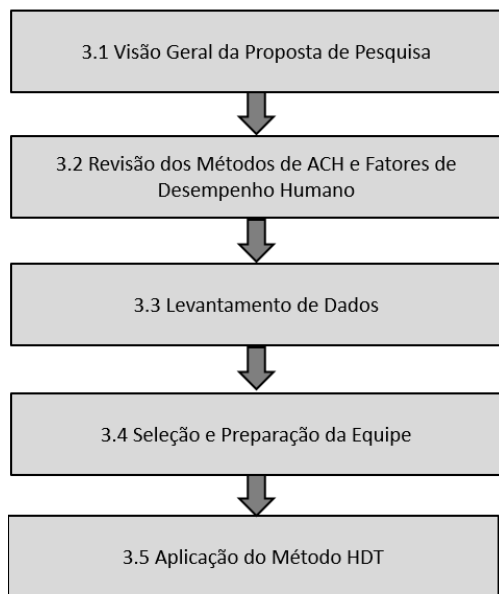


Figura 17 - Estrutura metodológica da pesquisa

Fonte: Elaborado pelo autor (2016)

3.1 Visão geral da proposta de pesquisa

A proposta desta pesquisa é aplicar o método HDT para análise da confiabilidade humana na operação de uma subestação do sistema elétrico de potência, com a avaliação dos fatores de desempenho humano e o cálculo da probabilidade de ocorrência de erros humanos. Dessa maneira, será realizada uma abordagem sistemática sobre o tema para estabelecimento do corpo de regras de direcionamento da pesquisa.

No que se refere à abordagem do sistema, a metodologia segue a linha dos estudos que consideram o contexto como preponderante na determinação do valor de probabilidade de erro humano. Nesse caso as características que definem o contexto são consideradas mais importantes que o tempo ou a natureza da tarefa a ser realizada.

Para avaliação dos fatores que exercem influência sobre o desempenho humano, é levada em consideração a abordagem de Calixto, Lima e Firmino (2013), que considera, além das características psicológicas e fisiológicas individuais dos operadores, os fatores tecnológicos e sociais externos.

A aplicação do método HDT deverá revelar qual a probabilidade de ocorrência de uma falha humana e os fatores que podem provocá-la em uma empresa real do setor elétrico brasileiro. A pesquisa deverá então permitir avaliar quais são os fatores críticos sobre a performance do operador e tomar ações com o objetivo de melhorar seus níveis de qualidade e mitigar a influência desses fatores sobre a ocorrência de falhas humanas.

Espera-se que o resultado desse estudo subsidie análises de confiabilidade humana e tomadas de decisão por parte de outras empresas do setor elétrico nas ações de prevenção de ocorrência de falhas humanas através da compreensão e análise de suas causas.

3.2 Revisão dos métodos para análise da confiabilidade humana e fatores de desempenho humano

Dos 74 métodos potencialmente relacionadas à ACH identificados pela revisão bibliográfica, foram selecionados pela relevância, abrangência de aplicabilidade e referências disponíveis, seis métodos : THERP, HEART, APJ, PC, HDT e Redes Bayesianas, conforme representado pela Figura 18.

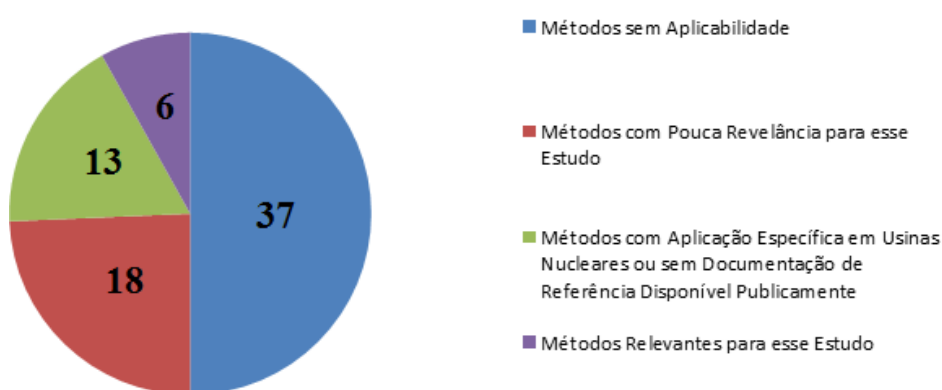


Figura 18 - Conjuntos de métodos de análise da confiabilidade humana

Fonte: Elaborado pelo autor (2016)

Pela revisão dos métodos de ACH, foi possível verificar que o THERP e o HEART são métodos de primeira geração e possuem aplicação voltada para as tarefas, com limitações

para representação da influência das condições de contexto na ocorrência de erros humanos. Os métodos APJ e PC são semelhantes, mas não permitem visualizar completamente todas as possibilidades em uma estrutura gráfica como o HDT.

As redes bayesianas podem ser utilizadas para refinamento dos valores de probabilidade de erros humanos, com a utilização de funções de probabilidade, representação de influência entre os fatores de desempenho e representação dos fatores de desempenho com um nível maior de detalhes, entretanto possui um grau de dificuldade de aplicação maior para obtenção de resultados semelhantes aos de outros métodos.

Por meio da revisão bibliográfica sobre os fatores que exercem influência sobre o desempenho humano, foram identificadas as três abordagens apresentadas pela Figura 19.

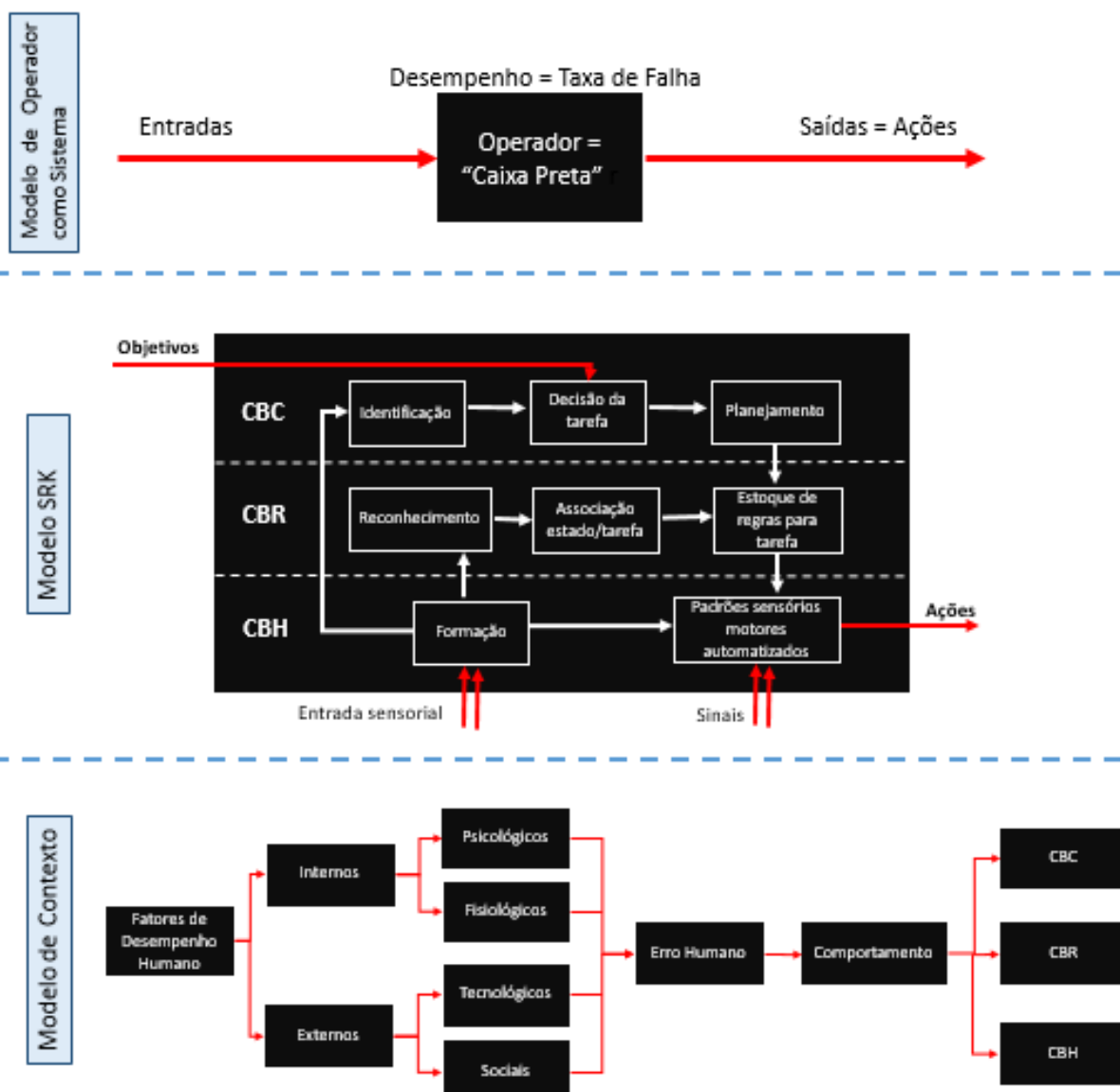


Figura 19 - Abordagens sobre o desempenho humano para realização de uma ação

Fonte: Adaptado de Lima (2003) e Calixto, Lima e Firmino (2013)

Pela Figura 19 é possível verificar que inicialmente o operador era considerado como um sistema, recebendo entradas e fornecendo saídas. Seu desempenho era representado de uma maneira muito simplificada por uma taxa de falhas. Para compreensão das limitações do operador, o modelo SRK considerou o comportamento do operador como baseado em regras, conhecimento e habilidades. Somente em modelos posteriores fatores tecnológicos e sociais foram incorporados, representando a influência do contexto sobre o desempenho humano.

3.3 Levantamento de dados

Para avaliação do cenário de estudo foram utilizados relatórios disponibilizados pelo ONS e diagramas da subestação elaborados pela empresa concessionária. Para verificação do desempenho da concessionária, foram analisados dados históricos da empresa sobre ocorrência de falhas humanas no período de 2007 a 2014. Os dados sobre falhas humanas da empresa foram obtidos através de um sistema próprio da concessionária para registro de ocorrências. Para compreensão dos procedimentos operativos, foram consultadas as instruções de operação e normas de operação vigentes aplicáveis à instalação.

3.4 Seleção e preparação da equipe

Concordaram em participar do experimento cinco empregados da empresa concessionária responsável pela operação da subestação Rondonópolis, sendo três operadores, um coordenador regional de operação e um engenheiro de operação, responsável pela elaboração de normas e procedimentos.

Para relacionar e classificar os fatores de desempenho para o cenário de pesquisa, as pessoas convidadas receberam treinamento, que consistia na apresentação dos objetivos, na revisão dos principais conceitos utilizados na pesquisa e no esclarecimento dos termos empregados na metodologia.

Os participantes do experimento foram capacitados para o trabalho através de instrução apresentada pessoalmente para cada avaliador. A capacitação seguiu o seguinte roteiro:

- informação dos objetivos do trabalho e da necessidade de confidencialidade;

- apresentação dos principais conceitos teóricos utilizados no desenvolvimento da metodologia;
- apresentação da metodologia, com explicação de todas as etapas de aplicação, relacionando-as com os conceitos teóricos;
- estímulo à apresentação de dúvidas e questionamentos;
- disponibilização do resultado final do trabalho.

3.5 Aplicação do método *Holistic Decison Tree*

A análise da confiabilidade humana na operação de uma subestação do SEP inicia-se com a descrição e compreensão do sistema elétrico em estudo e identificação dos equipamentos que se constituem em gargalos segundo o critério de criticidade adotado: risco de desabastecimento, perdas financeiras pela concessionária ou risco de acidente com pessoal, por exemplo.

Em seguida, avalia-se o desempenho da concessionária para verificar os registros de falhas humanas na operação de seus equipamentos. Por esses dados históricos, podem ser calculados os valores de probabilidade de ocorrência de erros humanos para execução de procedimentos críticos.

Após avaliação do desempenho da concessionária, define-se em qual cenário o erro humano será crítico em termos de confiabilidade para o sistema. Definindo claramente o cenário, é necessário relacionar quais são os fatores que exercem influência sobre o desempenho humano na execução da(s) tarefa(s) correspondentes.

Elencados os fatores de desempenho, definiram-se os critérios de classificação e níveis de qualidade para cada um. Para classificação dos fatores de qualidade foram utilizados os critérios estabelecidos para a Comissão Regulatória Nuclear dos Estados Unidos por Gertman et al. (2004). A definição do peso ou nível de impacto de cada fator de desempenho foi realizada em grupo, pelo método de consenso, respeitando-se o limite de seis participantes recomendado por Kirwan (1994). Para cálculo dos pesos, foi empregado o método AHP proposto por Spurgin (2010), com a utilização da ferramenta computacional *BPMSG AHP priority calculator* (BPMSG, 2016).

Para construir a árvore de decisão holística com a calibração dos valores de probabilidade, realizada com a definição dos valores âncoras, adotou-se 1 para o valor âncora superior, considerando que, nesse caso, se todos os fatores de desempenho estão em seus

piores níveis de qualidade, irá ocorrer um erro humano. Para o valor âncora inferior poder-se-ia adotar os valores recomendados por Spurgin (2010), entretanto, a partir de um valor de probabilidade PEH_i conhecido, foi calculado o valor de PEH_i , pela Equação 6, que corresponde à Equação 3 com o termo PEH_i isolado:

$$PEH_i = e^{\frac{(\ln PEF_i - \ln PEH_h) \left[\frac{S_i - S_l}{S_h - S_l} \right]}{\left(1 - \left[\frac{S_i - S_l}{S_h - S_l} \right] \right)}} \quad (\text{Eq. 6})$$

Em seguida, foi construída a estrutura da árvore de decisão holística no software Microsoft Excel® e calculados os valores de probabilidade para todos os níveis de qualidade dos fatores de desempenho, com a utilização da Equação 3.

Finalmente, foram avaliados o impacto e ganhos em termos de confiabilidade humana que a operação da instalação teria caso os níveis de qualidade dos fatores de desempenho fossem melhorados por meio de ações da empresa estudada. A Figura 20 apresenta o detalhamento da metodologia descrita anteriormente.

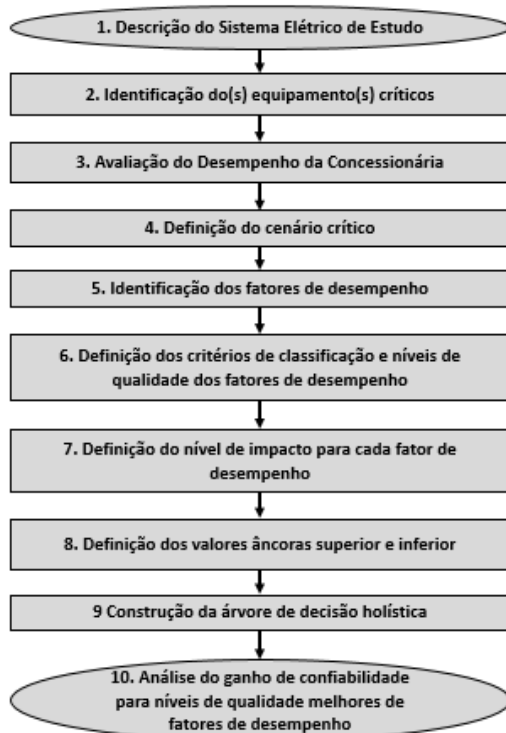


Figura 20 - Detalhamento da metodologia

Fonte: Elaborado pelo autor (2016)

4 RESULTADOS

4.1 Aplicação da metodologia

Neste capítulo são mostrados os detalhes da aplicação do método HDT para análise da confiabilidade humana na operação de uma subestação do sistema elétrico de potência e são comentados os resultados encontrados na pesquisa aplicada. Na sequência, são apresentadas as conclusões do trabalho.

No que se refere à abordagem do sistema, foi utilizado um método de análise da confiabilidade humana que permitisse representar a influência de fatores relacionados ao contexto no desempenho do operador na execução da tarefa.

O resultado obtido pôde subsidiar a tomada de decisão por parte da empresa transmissora de energia elétrica. Ao conhecer os fatores de desempenho que mais impactaram negativamente na performance dos operadores em um cenário crítico, os recursos puderam ser concentrados em medidas que tiveram mais impacto no aumento da confiabilidade humana na operação de suas instalações.

Em campo, a aplicação teve por objetivo avaliar a probabilidade de ocorrência de uma falha humana em uma subestação do sistema elétrico de potência no ano de 2014, utilizando a metodologia proposta, de forma a avaliar como cada fator de desempenho contribui para a ocorrência de uma falha humana e quais são os fatores de desempenho críticos. Além disso, demonstrou o ganho em confiabilidade trazido pela melhoria dos níveis de qualidade dos FD críticos.

4.2 Descrição do sistema de atendimento à região metropolitana de Cuiabá

A escolha do sistema elétrico para aplicação da pesquisa se baseou no fato de ser crítico sob o critério de fornecimento de energia elétrica à região metropolitana de Cuiabá durante o período da Copa do Mundo em 2014.

A região metropolitana de Cuiabá é atendida atualmente pelas subestações em 230 kV de Coxipó, Várzea Grande, Nobres e Rondonópolis, responsáveis pelo suprimento da maioria das cargas das áreas denominadas Anel de Cuiabá, Cuiabá e Oeste. O atendimento a essa região é também complementado por Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH). A Figura 21, a seguir, ilustra o subsistema em questão.

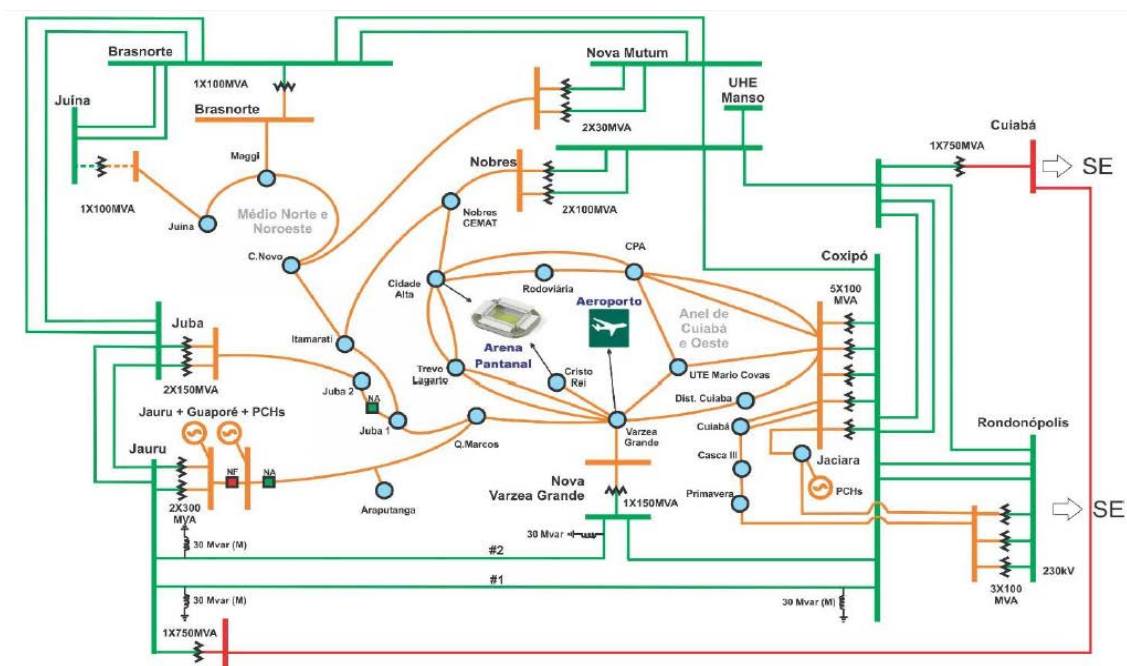


Figura 21 - Diagrama unifilar do sistema de atendimento à região metropolitana de Cuiabá

Fonte: ONS (2014a)

Na região também se encontra instalada a Usina Termelétrica Mario Covas, conectada às subestações Coxipó e Várzea Grande.

Os principais gargalos do sistema de atendimento à região metropolitana de Cuiabá, de acordo com o ONS (2014b, p. 12,13, 23), são:

- a Usina Termelétrica Mário Covas que ficou um longo tempo inativa e contava com restabelecimento recente do contrato de fornecimento de gás;
- a expectativa para os meses de junho e julho de 2014 era de carregamento nas cinco unidades transformadoras da Subestação Coxipó, em regime normal de operação, de cerca de 75% do nominal. Porém, poderiam ocorrer carregamentos próximos ao valor nominal, quando das contingências de um de seus cinco transformadores ou do único transformador da Subestação Várzea Grande.
- em regime normal de operação, nos meses de junho e julho de 2014, poderiam ocorrer sobrecargas em regime normal de operação de cerca de 5% nas duas unidades transformadoras da Subestação Rondonópolis. Em condições de contingência de um dos autotransformadores, deveria ocorrer atuação dos quatro estágios do Sistema Especial de Proteção (SEP) de corte de carga para evitar o desligamento do autotransformador remanescente devido ao elevado carregamento a que ficaria submetido.

Como os transformadores da SE Rondonópolis constituem o principal gargalo para o abastecimento da região metropolitana de Cuiabá por não atenderem o critério de

confiabilidade n-1, a subseção 4.2.1, apresentada na sequência, descreve com detalhes essa subestação.

4.2.1 Descrição da Subestação Rondonópolis

A Subestação Rondonópolis é uma instalação pertencente ao SIN, foi inaugurada no ano de 1983, possui arranjo barra dupla a cinco chaves, recebe energia das UHE Itiquira e Ponte de Pedra e é interligada por linhas de transmissão às subestações Rio Verde-GO, Barra do Peixe-MT, Coxipó-MT e Cuiabá-MT. Possui um banco de autotransformadores monofásicos operando em paralelo com um autotransformador trifásico, com potência total de 200MVA, para atender a subestação de distribuição de energia da região.

Todos os equipamentos manobráveis de alta tensão da subestação têm supervisão e comando remoto, o que permite que eles sejam controlados tanto pela Interface Homem Máquina (IHM) localizada na sala de comando da subestação, quanto pela IHM do Centro de Operação Regional da empresa concessionária, localizado em Cuiabá.

Como a SE Rondonópolis pertence à Rede Básica do SIN, sua receita é calculada com base na disponibilidade de suas FT. Por isso, com exceção das FT de controle de reativo em derivação, que são ligadas e desligadas de acordo com a necessidade do sistema elétrico, as demais FT são desligadas somente para realização de manutenções.

As equipes técnicas que realizam manutenção e operação da SE Rondonópolis são constituídas por 35 empregados. A equipe de manutenção atende também as subestações Barra do Peixe e Couto Magalhães, localizadas, respectivamente, nos municípios de Ribeirãozinho e Alto Araguaia, do Estado de Mato Grosso.

A operação da subestação é feita por uma equipe de sete empregados, seis operadores e um supervisor, com a idade, formação e experiência descritas pela Figura 24.

Empregado	Idade	Formação	Experiência
Operador 1	33 anos	Técnico	5 anos
Operador 2	38 anos	Técnico	12 anos
Operador 3	48 anos	Técnico	12 anos
Operador 4	48 anos	Técnico	28 anos
Operador 5	48 anos	Técnico	28 anos
Operador 6	53 anos	Técnico	28 anos
Supervisor	53 anos	Técnico	28 anos

Figura 24 – Características da equipe de operação da Subestação Rondonópolis

Fonte: Pesquisa de campo (2014)

Quanto ao regime de trabalho, até maio de 2011 um dos operadores e o supervisor trabalhavam em horário comercial e cinco operadores se revezavam em turnos de seis horas, da seguinte maneira: no primeiro dia o turno iniciava-se às 6:00 e encerrava-se às 12:00; após uma folga de 24 horas, no segundo dia, o turno iniciava-se às 12:00 e encerrava-se às 18:00; após uma nova folga de 24 horas, no terceiro dia, o turno iniciava-se às 18:00 e encerrava-se às 24:00; após uma nova folga de 24 horas, no quarto dia, o turno iniciava-se às 00:00 e encerrava-se às 06:00, quando entravam em um período de 72 horas de folga. No novo regime de trabalho, um dos operadores e o supervisor continuam trabalhando em horário comercial, entretanto os cinco operadores se revezam em turnos de oito horas. Os turnos trabalham dois dias consecutivos no horário das 6:00 até as 14:00. Depois de uma folga de 24 horas, no terceiro e quarto dias trabalham das 14:00 às 22:00. Após uma nova folga de 24 horas, no quinto e sexto dias trabalham das 22:00 às 6:00, quando entram em um período de quatro dias de folga.

A partir de janeiro de 2014, em cumprimento ao estabelecido pela Norma Regulamentadora nº 10 (Ministério do Trabalho e Emprego, 2004), que proíbe a execução de serviços individualmente em instalações de alta tensão, foi estabelecido que qualquer intervenção em equipamento deveria ser realizada por no mínimo dois empregados.

A divisão da concessionária responsável pela operação e manutenção da SE Rondonópolis é encarregada também por mais duas instalações, a SE Barra do Peixe e a SE Couto Magalhães.

O processo de transmissão de energia elétrica compreende o transporte de energia dos centros de geração para os centros de consumo. Parte da energia que chega à SE Rondonópolis é consumida na região metropolitana de Cuiabá e outra parte é transportada para as demais regiões de Mato Grosso ou para o Estado de Goiás.

4.3 Avaliação do desempenho da concessionária de transmissão de energia elétrica

A empresa de transmissão de energia elétrica responsável pela operação da Subestação Rondonópolis apresentou oito falhas humanas na operação das dez subestações sob sua concessão no Estado de Mato Grosso, no período compreendido entre os anos de 2007 e 2014. Foram consideradas falhas humanas as ações executadas incorretamente pelos operadores que provocaram o desligamento forçado de funções transmissão. A Tabela 1 apresenta os dados referentes a essas ocorrências fornecidos pela empresa.

Como pode ser observado na Figura 23, a empresa apresentou nos últimos sete anos uma taxa de falhas humanas na operação de 0,14 falhas/equipamento/ano. Os transformadores da SE Rondonópolis são críticos sob o aspecto do risco de desabastecimento da região metropolitana de Cuiabá; assim, destaca-se ainda pela Figura 23 a taxa de falhas de 0,03 falhas/equipamentos/ano na operação de transformadores pela concessionária, que corresponde a 22% do total.

Tabela 1 – Desligamentos provocados por falhas humanas operacionais

Função Transmissão	Data Inicial	Hora Inicial	Data Final	Hora Final	Duração
Linha de Transmissão Coxipó/Nobres Circuito 1	28/08/2007	16:59	28/08/2007	17:05	0000:06
Transformador nº 4 da Subestação Coxipó	14/12/2009	11:00	14/12/2009	11:07	0000:07
Linha de Transmissão Barra do Peixe/Rondonópolis Circuito 2	08/06/2010	17:05	08/06/2010	17:06	0000:01
Linha de Transmissão Nobres/Nova Mutum Circuito 1	13/06/2010	05:41	13/06/2010	06:01	0000:20
Compensação Série nº 2 da Subestação Barra do Peixe	07/09/2010	21:05	07/09/2010	21:06	0000:01
Compensação Série nº 2 da Subestação Barra do Peixe	05/11/2010	20:54	05/11/2010	21:11	0000:17
Transformador nº 3 da Subestação Coxipó	25/08/2011	04:00	25/08/2011	04:01	0000:01
Transformador nº 1 da Subestação Rondonópolis	11/03/2014	10:37	11/03/2014	10:47	0000:10

Fonte: Pesquisa de campo (2014)

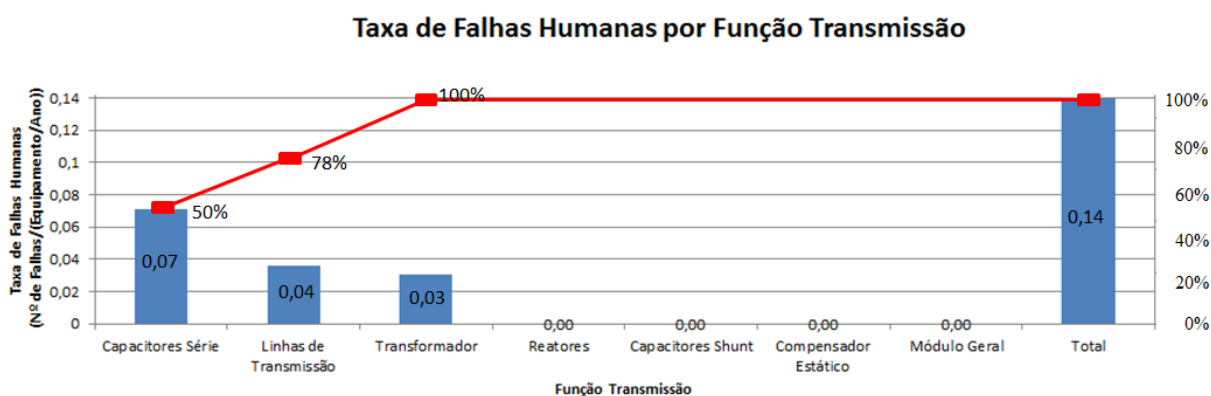


Figura 23 - Taxa de falhas humanas por função transmissão

Fonte: Pesquisa de campo (2014)

As falhas humanas ocorridas na operação de transformadores da concessionária estão relacionadas às ações de correção que o operador realizou sem sucesso após a ocorrência de discordância de *taps* dos transformadores. *Taps* são as derivações de um dos enrolamentos do

transformador que permitem elevar ou reduzir a tensão pela variação de sua relação de transformação.

Para o caso específico da Subestação Rondonópolis, verificou-se pelo sistema de registro de ocorrências da empresa concessionária que em 350 eventos de discordância de taps ocorreu uma falha humana. Portanto, temos para esse caso em particular uma probabilidade de erro humano igual a $2,85E-03$. O valor de probabilidade encontrado é somente 5% menor que o valor de $3,00E-03$ da base de dados de Kirwan (1994) para erros gerais por ações executadas incorretamente. Verificou-se ainda que 37% das comutações de tap ocorreram no horário correspondente aos turnos das 06:00 às 14:00, 37% no turno das 14:00 às 22:00 e 26% no turno entre 22:00 e 06:00.

4.4 Definição do cenário crítico de estudo

Avaliando o sistema em estudo, constatou-se que o cenário crítico em termos de confiabilidade humana é a atuação pelo operador em caso de discordância de *taps* entre os transformadores da SE Rondonópolis. Esse cenário foi escolhido em virtude dos seguintes motivos:

- os transformadores da SE Rondonópolis não atenderem o critério n-1, o que significa que caso ocorra desligamento de uma unidade haverá corte de carga e desabastecimento da região metropolitana de Cuiabá;
- há registros de falhas humanas na operação de transformadores pela empresa concessionária;
- todas as falhas humanas na operação de transformadores correspondem à execução do procedimento de atuação em caso de discordância de *taps*.

4.5 Identificação dos fatores de desempenho na operação após atuação de discordância de taps

Os transformadores da SE Rondonópolis possuem Comutadores de Derivação em Carga (CDC), utilizados para controlar as variações dos valores de tensão e mantê-la em níveis aceitáveis na instalação. Esses comutadores são dotados de 17 *taps*. Em uma situação normal de operação, quando um dos transformadores recebe um comando do operador pelo

sistema remoto de controle e supervisão para aumentar ou diminuir a tensão, a posição do *tap* é alterada respectivamente para baixo ou para cima, em uma lógica inversa. Como os transformadores operam em paralelo, o outro transformador também deve receber e executar o mesmo comando automaticamente, de maneira que todos os CDC alterem as posições dos *taps* simultaneamente e permaneçam na mesma posição, como na Figura 24, quando todos estão na posição 5.

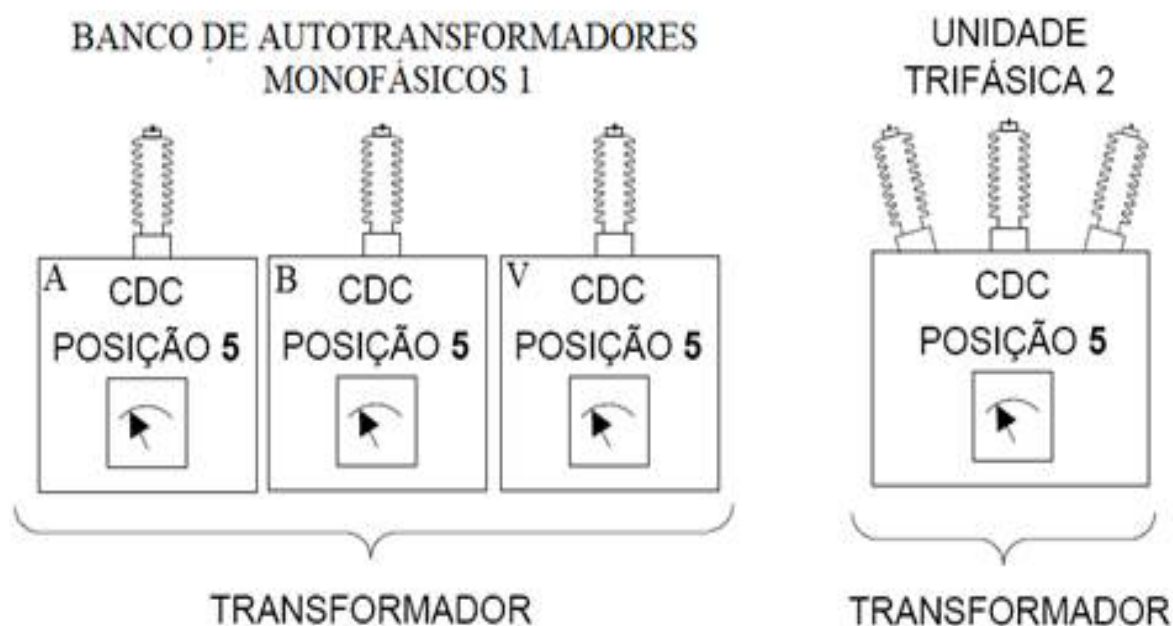


Figura 24 - Transformadores operando em paralelo com os comutadores de derivação em carga na mesma posição

Fonte: Pesquisa de campo (2014)

Quando alguma das unidades monofásicas do banco de autotransformadores não altera sua posição de *tap*, surge no sistema supervisão o alarme de discordância de *taps* acompanhado do bloqueio do comutador pela abertura de seu disjuntor, impedindo qualquer tipo de comando remoto. O operador, nesse caso, deve identificar o porquê do alarme e se deslocar da casa de comando até o pátio da subestação para desbloquear o CDC do transformador e igualar a posição dos *taps* que discordou dos demais. A foto aérea da Subestação Rondonópolis com a disposição dos equipamentos é apresentada na Figura 25.

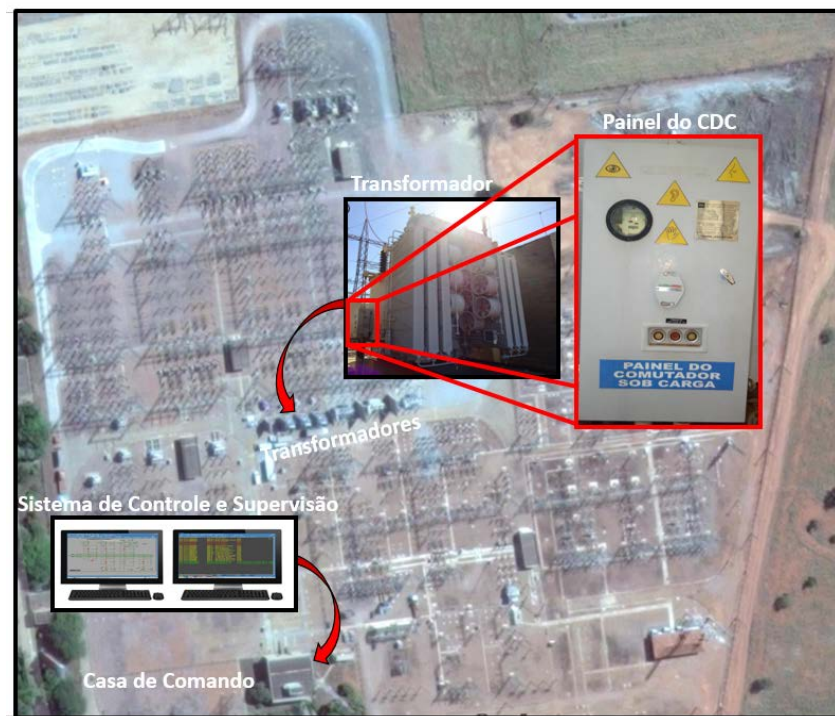


Figura 25 – Disposição dos equipamentos na Subestação Rondonópolis

Fonte: Elaborado pelo autor (2014)

No painel do CDC, o operador possui duas opções para corrigir a posição do *tap* discordante: pressionar uma das botoeiras para aumentar ou diminuir *tap* ou girar a manivela no sentido correspondente à mudança de *tap* desejado. Os detalhes do painel do comutador são mostrados na Figura 26.



Figura 26 – Detalhes do painel do comutador sob carga

Fonte: Pesquisa de campo (2014)

Caso o operador não consiga igualar a posição dos *taps* e provoque a discordância de mais um *tap*, o banco de autotransformadores monofásicos será desligado por atuação do sistema de proteção, ocorrerá atuação dos quatro estágios do Sistema Especial de Proteção (SEP) e haverá interrupção do fornecimento de energia aos consumidores da região metropolitana de Cuiabá.

Considerando as ações que devem ser tomadas pelo operador em caso de atuação de discordância de *taps*, os possíveis erros e também suas consequências, foram elencados na Figura 27 os fatores que podem interferir na performance do operador.

Pessoal Envolvido	Localização do Envolvido	Ação Humana	Fatores de Desempenho	Erro Humano	Consequência
Operador da Subestação	Sala de comando	Diagnosticar a discordância de tap	Experiência/ Treinamento, Ergonomia e Estresse	Não evidenciar a discordância de tap	Atraso no controle de tensão
	Pátio da subestação	Identificar corretamente a fase que discordou	Experiência/ Treinamento, Ergonomia, Procedimentos, Políticas Internas	Considerar erroneamente que foi outra fase que discordou	Desligamento do transformador
	Pátio da subestação	Identificar corretamente a posição dos <i>taps</i> de cada fase	Experiência/ Treinamento, Ergonomia, Procedimentos, Políticas Internas	Considerar que os <i>taps</i> das outras fases estão em outra posição	Desligamento do transformador
	Pátio da subestação	Desabilitar a lógica de paralelismo	Experiência/ Treinamento, Ergonomia, Procedimentos, Políticas Internas	Deixar a lógica de paralelismo ativada	Nova discordância de <i>taps</i> após normalização por comando retido
	Pátio da subestação	Girar a chave ou manivela para aumentar ou diminuir o <i>tap</i> da fase discordante no sentido correto para equalizar os <i>taps</i>	Experiência/ Treinamento, Ergonomia, Procedimentos, Políticas Internas	Girar a chave ou manivela para aumentar ou diminuir o <i>tap</i> no sentido contrário	Desligamento do transformador
	Pátio da subestação	Desbloquear o comutador após a equalização do <i>tap</i>	Experiência/ Treinamento, Ergonomia, Procedimentos, Políticas Internas	Desbloquear o comutador antes da equalização do <i>tap</i>	Desligamento do transformador por comando retido

Figura 27 - Análise dos cenários possíveis em caso de discordância de *tap*

Fonte: Pesquisa de campo (2014)

4.6 Definição dos critérios de classificação e níveis de qualidade dos fatores de desempenho

Para cada fator de desempenho foram atribuídos níveis mínimos, intermediários e máximos e os critérios de classificação de qualidade correspondentes, relacionados na Figura 27. Na Figura 28 também são apresentados os níveis de qualidade de cada fator de desempenho para os cenários analisados pela equipe avaliadora.

Fatores de Desempenho	Crítérios de Qualidade	Nível de Qualidade
Educação e Treinamento	9 - Menos de 6 meses de relevante experiência ou treinamento. Esse nível de experiência/treinamento não provê o nível de conhecimento e compreensão requerido para executar as tarefas adequadamente e não expõe o operador às várias condições anormais possíveis.	1
	3 - Mais de 6 meses de relevante experiência ou treinamento. Esse nível de experiência/treinamento provê uma quantidade adequada de conhecimento para garantir que os operadores sejam proficientes no dia a dia e tenham sido expostos a uma quantidade adequada de situações anormais.	
	1 - Muito conhecimento/experiência. Esse nível de experiência/treinamento permite que o operador esteja preparado para trabalhar em uma grande quantidade de cenários.	
Ergonômicos	9 - O layout da planta impacta negativamente na execução da tarefa. Controle visual insatisfatório, instrumentação necessária não pode ser observada do local onde as ações de controle são executadas ou interfaces inadequadas dos computadores	9
	3 - O layout da planta é adequado para execução das tarefas, mas não torna a execução das tarefas mais fácil do que o normal. Por exemplo, a interface do computador é adequada, entretanto não é tão fácil de ser utilizada	
	1 - O layout da planta impacta positivamente na execução da tarefa, provendo informações necessárias e a possibilidade de executá-las de uma maneira que diminui a probabilidade de erros (facilidade de uso, interfaces compreensíveis, informações dos instrumentos disponíveis no local de controle, com valores em unidades de medidas adequadas	
Estresse	9 - Extremo. Um nível de estresse disruptivo em que a performance da maioria das pessoas se deteriora drasticamente. Isso ocorre quando o estresse tem início repentino e persiste por longos períodos	3
	3 - Alto. Um nível de estresse maior que o normal (devido, por exemplo, ao surgimento de alarmes inesperados, medidas anormais, barulho ou ruídos que podem impactar o foco da atenção na execução da tarefa.	
	1 - Normal. Nível de estresse que conduz a uma boa performance.	

Procedimentos	9 - Indisponível. O procedimento necessário para execução de uma tarefa não está disponível	3
	3 - Inconsistente. Informações necessárias constam nos procedimentos, mas possuem problemas com inconsistências ou ambiguidades	
	1 - Orientados para Diagnóstico/Sintoma. Procedimentos que auxiliam o operador para realizar o correto diagnóstico do evento ou a manter a planta em uma condição de segurança sem a necessidade de diagnosticar exatamente o evento e as medidas necessárias para mitigá-lo	
Políticas Internas	9 - Insatisfatória. A performance é negativamente afetada pelo processo de trabalho da planta (fluxo de informações inadequado sobre as atividades de manutenção na planta, controle inadequado das atividades pelo supervisor, expectativas sobre a performance não são transmitidas de uma maneira clara)	1
	3 - Normal. A performance não é significativamente afetada pelos processos da planta	
	1 - Boa. Os processos implementados objetivam um melhor desempenho da planta do que em outros casos que não são bem implementados e definidos (políticas de boa comunicação e integração entre os empregados, por exemplo)	

Figura 28 - Critérios e níveis de qualidade para os fatores de desempenho

Fonte: Gertman et al. (2005)

4.7 Definição do nível de impacto para cada fator de desempenho

A avaliação do impacto dos fatores de desempenho demonstrou que Educação e Treinamento (34,1%) e Ergonomia (34,1%) exercem maior influência sobre a performance do operador, seguidos dos Procedimentos (18,3%), Políticas Internas (8,3%) e Estresse (5,2%). Os resultados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Impacto dos fatores de desempenho

Fator de Desempenho	Impacto
Educação e Treinamento	34,1%
Ergonomia	34,1%
Procedimentos	18,3%
Políticas Internas	8,3%
Estresse	5,2%
Taxa de Consistência	7.8 %

Fonte: Pesquisa de campo (2014)

4.8 Definição dos valores âncoras superior e inferior

Para o valor âncora superior adotou-se 1, considerando que, nesse caso, se todos os fatores de desempenho estão em seus piores níveis de qualidade, irá ocorrer um erro humano.

Para o valor âncora inferior, a partir do valor de probabilidade $PEH_i = 2.85E - 03$ encontrado na subseção 4.2.2, 'Avaliação do desempenho da concessionária de transmissão de energia elétrica', foi calculado o valor de $PEH_i = 5.75E - 05$ pela aplicação da Equação 6.

4.9 Construção da árvore de decisão holística

Com os cálculos das probabilidades de erro humano pelas Equações 3 e 4 foi construída a árvore de decisão holística constante no Apêndice A.

Cada valor de probabilidade de erro humano constante na última coluna à direita da árvore corresponde a uma determinada combinação de níveis de qualidade dos fatores de desempenho.

O valor de $PEH = 5,75E - 05$, mostrado na primeira linha, corresponde ao valor âncora inferior, quando todos os fatores de desempenho estão com os níveis de qualidade mais elevados e iguais a 1. Na última linha da árvore consta o valor âncora superior, $PEH = 1,00E + 00$, quando todos os fatores de desempenho estão com os níveis de qualidade mais baixos e iguais a 9.

O valor de probabilidade de erro humano de $2,85E-03$, corresponde à situação inicialmente analisada, com os níveis de qualidade 1, 9, 3, 3, 1 para os fatores de desempenho Educação e Treinamento, Ergonomia, Estresse, Procedimentos e Políticas Internas, respectivamente, está localizado na sexagésima sétima linha de PEH.

Os demais valores de PEH correspondem a todas as outras combinações possíveis de fatores de qualidade para os fatores de desempenho relacionados ao cenário estudado.

4.10 Análise do ganho de confiabilidade para níveis de qualidade melhores de fatores de desempenho

Para a Subestação Rondonópolis, foi verificado que sob o aspecto do risco de desabastecimento no fornecimento de energia na região metropolitana de Cuiabá e da

confiabilidade humana na operação da instalação, a ação do operador que deve ser analisada é sua atuação nas situações em que ocorre discordância de *taps* dos transformadores da instalação.

A probabilidade de ocorrência de erro humano calculada para a situação estudada é de 2,85E-03, que corresponde à verificação de 1 erro em 350 tentativas. Pela análise realizada foi possível verificar que os fatores que possuem mais impacto sobre o desempenho do operador na execução da atividade de normalização em caso de discordância de *taps* foram Educação e Treinamento (34,1%) e Ergonomia (34,1%), seguidos por Procedimentos (18,3%), Políticas Internas (8,3%) e Estresse (5,2%). Na determinação dos níveis de qualidade dos fatores de desempenho, as inconsistências em procedimentos e controle visual insatisfatório apontaram oportunidades de melhorias referentes aos fatores de desempenho Procedimentos e Ergonomia.

Com relação aos procedimentos, foi elaborada uma lição específica para correção de *taps* como ilustrado pela Figura 28.

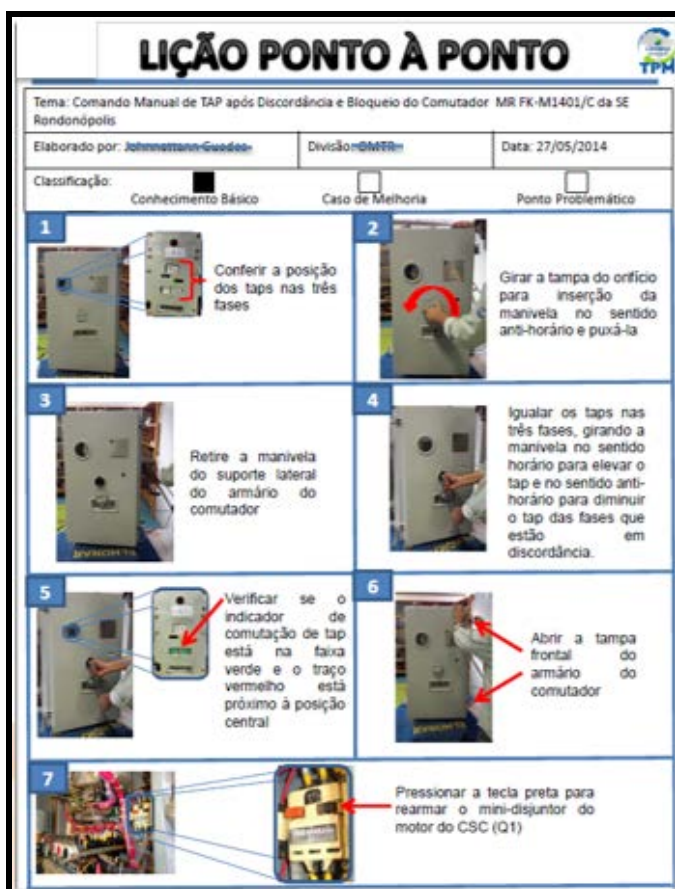


Figura 28 – Lição para correção da posição de tap pela manivela

Fonte: Elaborada pelo autor (2014)

No procedimento descrito pela Figura 28, a alteração da sequência das etapas, deixando o rearme do disjuntor e desbloqueio do comutador para ser realizado após a normalização do *tap*, impede com que ocorra mais uma discordância por comando retido. Além disso, a implementação da obrigatoriedade de que a correção de *tap* seja realizada pela manivela, possibilita que o operador possa conferir, com o seu giro, se a comutação está ocorrendo no sentido correto e interromper a operação caso identifique o contrário. Quando são utilizadas as botoeiras e a incorreta é selecionada, não há a possibilidade de interromper a operação antes que ela seja concluída. Foi disponibilizada ainda uma cópia do procedimento no painel de comutador para consulta pelos operadores.

Quanto aos aspectos ergonômicos, a identificação visual no painel do comutador foi complementada com a sinalização da correspondência dos sentidos de giro da manivela com as alterações de *tap* e tensão.

Adotadas medidas para melhorar os níveis de qualidade dos fatores de desempenho Procedimentos e Ergonomia de 3 para 1 e de 9 para 3, respectivamente, pela árvore de decisão holística, verificou-se uma diminuição do valor de probabilidade de ocorrência de erro humano para $1,50E-04$, ou 1 erro em 6.666 tentativas.

O novo valor de PEH encontrado representa uma considerável redução na probabilidade de desabastecimento de energia elétrica na região metropolitana de Cuiabá por falhas humanas na operação dos transformadores da SE Rondonópolis com implementação de melhorias em Procedimentos e Ergonomia.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste estudo foi aplicar o método HDT para análise da confiabilidade humana na operação de uma subestação do sistema elétrico de potência. O método mostrou-se aplicável, permitindo representar como os fatores de desempenho relacionados ao contexto influenciam na performance do operador na execução de um procedimento crítico, calcular a probabilidade de ocorrência de erro humano e identificar ações que puderam ser implementadas para redução da PEH. As oportunidades de melhorias identificadas durante a aplicação da pesquisa são descritas a seguir.

5.1 Vantagens e desvantagens da metodologia

A facilidade na compreensão e aplicação da metodologia e a participação da equipe de operação na análise dos fatores de desempenho e na determinação de seus pesos e níveis de qualidade promove um maior engajamento dos empregados no alcance dos objetivos propostos por esse trabalho. Por sua vez, a participação dos operadores nesse processo de reconstrução os coloca numa situação de reflexão sobre seu trabalho propiciando comparações entre os diferentes universos de referência adotados e tomada de consciência de vários aspectos de que não se davam conta até então (ALMEIDA, 2004).

A metodologia é uma ferramenta de gerenciamento, pois pela árvore de decisão holística do Apêndice A é apresentada de maneira estruturada todos os valores de probabilidade de erros humanos possíveis, com os níveis de qualidade dos fatores de desempenho correspondentes. Além disso, indica claramente quais parâmetros podem ser alterados para aumento da confiabilidade. Assim, os gestores da empresa podem tomar decisões assertivas, investindo recursos na melhoria dos níveis de qualidade de fatores de desempenho críticos para aumento da confiabilidade humana na execução de determinados procedimentos (NOROOZI et al., 2013).

Para aplicações em empresas novas, ou que não possuam registros de ocorrência de falhas humanas na execução de procedimentos operativos, não será possível obter por meio de dados históricos valores de probabilidade de ocorrência de erros humanos para calcular valores âncoras inferiores. Nesse caso, pode-se adotar os valores recomendados por Spurgin (2010). Entretanto, como se trata de uma avaliação subjetiva realizada por especialistas, essa alternativa pode impactar na precisão dos valores de PEH.

Outra desvantagem da aplicação do HDT é não conseguir representar, como os métodos de terceira geração, interações que podem existir entre os fatores de desempenho. Dessa maneira, em casos em que seja evidenciada uma forte influência de um fator de desempenho sobre outro esse aspecto pode impactar na precisão do valor de probabilidade de erro humano encontrado (CALIXTO; LIMA; FIRMINO, 2013).

5.2 Aplicabilidade do material produzido

A metodologia poderá ser aplicada potencialmente em outras empresas do setor elétrico. A adoção da metodologia de análise da confiabilidade humana na operação de uma subestação do sistema elétrico de potência poderá representar um avanço no processo preventivo das empresas, seja sobre o critério de desabastecimento de energia elétrica ou perdas financeiras por desligamentos forçados de equipamentos. Isto, ao expor aos gestores os números que expressam a real probabilidade de ocorrência de falhas humanas e quais são os fatores que podem ocasioná-las, obtidos a partir de um processo estruturado e com embasamento teórico, portanto, apontando com mais precisão e chance de sucesso os caminhos de correção.

Um dos ganhos que podem ser obtidos pelas empresas, no emprego da presente metodologia, é a otimização da aplicação dos recursos disponíveis para a prevenção de falhas humanas. Ao serem elucidados os fatores que exercem influência sobre a performance dos operadores, a empresa reconhecerá os pontos que verdadeiramente necessitam de algum tipo de investimento em melhoria (NOROOZI et al., 2013).

A partir deste reconhecimento, as empresas poderão deixar de aplicar recursos em ações que causam pouco impacto na confiabilidade humana na operação da planta. Utilizando ainda uma perspectiva de contexto sobre o desempenho humano, com uma visão holística da ocorrência de falhas humanas, o erro deixa de ser tratado também como uma responsabilidade exclusiva do empregado em empresas que utilizam ainda abordagens dessa natureza (ARNAUD, 2010).

Na empresa estudada, a aplicação desta metodologia, no primeiro semestre de 2014, bem como a discussão sistemática dos resultados entre os gestores da empresa, contribuiu para o direcionamento de esforços e tomada de ações ainda no mesmo período. Com isso, houve uma diminuição da probabilidade de erro na operação dos transformadores da

Subestação Rondonópolis e, por consequência, diminuição dos riscos de desabastecimento da região metropolitana de Cuiabá.

5.3 Considerações para estudos futuros

Pelo atual modelo regulatório do setor elétrico brasileiro, caso alguma Função Transmissão de uma subestação de transmissão de energia elétrica seja desligada de maneira forçada, independentemente de haver ou não interrupção do fornecimento de energia aos consumidores, haverá perda de receita para a empresa concessionária.

Como os projetos e equipamentos de subestações possuem entre si muita semelhança, as atividades de operação em subestações distintas também são efetuadas de maneiras muito similares, sugere-se a realização de pesquisas com o objetivo de desenvolver uma metodologia específica que permita realizar uma análise da confiabilidade humana em uma subestação com a finalidade de avaliar e mitigar a ocorrência de desligamentos forçados de todas as FT da planta e consequente perda de receita pela empresa concessionária.

Como nesse trabalho não foram abordados aspectos sobre confiabilidade de equipamentos, pois isso estenderia o trabalho a outros caminhos conceituais, sugere-se realizar um estudo comparativo da tecnologia e desempenho dos transformadores da Subestação Rondonópolis com equipamentos de outras subestações quanto às alterações de *taps* sem a ocorrência de discordância. Além disso, identificar os motivos pelos quais ocorrem as discordâncias de *taps* e a possibilidade de implementar ações de melhoria no equipamento para aumentar sua confiabilidade.

Como o Estresse e Políticas Internas possuíam pouco impacto sobre os valores de probabilidade de erro humano encontrados nesse trabalho, não foram analisadas e tomadas ações que objetivassem melhorar seus níveis de qualidade. Entretanto, pelo fato da empresa ter alterado o regime de turno de trabalho e também implementado a obrigatoriedade da execução dos procedimentos que envolvem intervenção em equipamentos serem realizados por no mínimo dois profissionais, sugere-se analisar a influência dessas ações sobre esses fatores de desempenho.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Normativa nº 191, de 12 de dezembro de 2005. Estabelece os procedimentos para a determinação da capacidade operativa das instalações de transmissão integrantes da Rede Básica e das Demais Instalações de Transmissão, componentes do Sistema Interligado Nacional, bem como define as Funções Transmissão e os respectivos Pagamentos Base. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 19 dez. 2005. Seção 1, n. 242, v. 142, p. 59.

_____. Resolução Normativa nº 270, de 26 de junho de 2007. Estabelece as disposições relativas à qualidade do serviço público de transmissão de energia elétrica, associada à disponibilidade das instalações integrantes da Rede Básica, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 9 jul. 2007. Seção 1, n. 130, v. 144, p. 34.

ALMEIDA, I. M. A Gestão cognitiva da atividade e a análise de acidentes do trabalho. **Revista Brasileira de Medicina do Trabalho**, v. 2, n. 4, p. 275-282, 2004.

ARNAUD, R. C. **Modeling analyses and data in human reliability**. Virgínia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2010.

BELL, J; HOLROYD, J. **Review of human reliability assessment methods**. Prepared by the Health and Safety Laboratory for the Health and Safety Executive. Derbyshire, 2009.

BPMSG. **BPMSG AHP priority calculator**, version 2016-03-10, 2016.

CALIXTO, E; LIMA, G; FIRMINO, P. R. Comparing SLIM, SPAR-H and Bayesian Network Methodologies. **Open Journal of Safety Science and Technology**, n. 3, p. 31-41, 2013.

CARVALHO, R. G. **Análise dos Resultados dos Leilões de Transmissão de Energia Elétrica no Brasil**. Brasília: UnB, 2011.

CASTIGLIA, F; GIARDINA, M. Analysis of operator human errors in hydrogen refueling stations: Comparison between human rate assessment techniques. **International Journal of hydrogen energy**, v. 38, p. 1166-1176, 2013.

CONTINI, S; AMENDOLA, A; ZIOMAS, I. **Benchmark exercise on major hazard analysis**. v. 1. Description of the project, discussion of the results and conclusions. Commission of the European Communities. Luxembourg, 1991.

CHANDLER, F. et al. **NASA Human Error Analysis**. NASA. Washington, 2010.

EMBREY, D. E. et al. **SLIM-MAUD, An Approach to Assessing Human Error Probabilities Using Structured Expert Judgment**. NUREG/CR-3518. U.S. Nuclear Regulatory Commission. Washington DC, 1984.

_____. **Performance Influencing Factors (PIFs)**. Human Reliability Associates LTd, 2000.

FONSECA, R. A. et al. A THERP/ATHEANA Analysis of the Latent Operator Error in Leaving EFW Valves Closed in the TMI-2 Accident. **Science and Technology of Nuclear Installations**, v. 2013, p. 8, 2013.

GERTMAN, D. et al. **The SPAR-H Human Reliability Analysis Method**. NUREG/CR-6883. Prepared by Idaho National Laboratory for the U.S. Nuclear Regulatory Commission. Washington DC, 2004.

GOMES, P. **New Strategies to Improve Bulk Power System Security: lessons learned from Large Blackouts**. Disponível em: <http://ewh.ieee.org/soc/pes/psdpc/documents_blackout_panel/PESGM2004-000994.pdf>. Acesso em: nov. 2013.

GROZDANOVIC, M. Usage of Human Reliability Quantification Methods. **International Journal of Occupational Safety and Ergonomics**, v. 11, n. 2, p. 153-159, 2005.

GROTH, K. M; SWILER, L. P. Bridging the gap between HRA research and HRA practice: A Bayesian network version of SPAR-H. **Reliability Engineering and System Safety**, n. 155, p. 33-42, 2013.

HUNNS, D. M. The method of paired comparisons. In: **High Risk Safety Technology**. Ed. A. E. Green. Chichester, 1982.

KIRWAN, B. A comparative evaluation of five human reliability assessment techniques. In **Human Factors and Decision Making**. Elsevier, p. 87-109, 1988.

_____. Human error identification in human reliability assessment. Part 1: Overview of approaches. **Applied Ergonomics**, n. 23, p. 299-318, 1992.

_____. **A guide to practical human reliability assessment**. Taylor and Francis. London, 1994.

LIMA, J. M; LOURENÇO, E. M; SCHILLING, M. T. Desafios e Vantagens da Utilização de Critérios Probabilísticos no Planejamento de Sistemas Elétricos. **Revista Controle & Automação**, v. 23, n. 4, p. 465-475, 2012.

LIMA, S. L. S. **Ergonomia Cognitiva e a Interação Pessoa - Computador: Análise da Usabilidade da Urna Eletrônica 2002 e do Módulo Impressor Externo**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. Norma Regulamentadora nº 10, de 07 de dezembro de 2004. Estabelece os requisitos e condições mínimas objetivando a implementação de medidas de controle e sistemas preventivos, de forma a garantir a segurança e a saúde dos trabalhadores que, direta ou indiretamente, interajam em instalações elétricas e serviços com eletricidade. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 8 dez. 2004. Seção 1, n. 235, p. 74-77.

NOROOZI, A. et al. The role of human error in risk analysis: Application to pre and post-maintenance procedures of process facilities. **Reliability Engineering and System Safety**, n. 119, p. 251-258, 2013.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA (ONS). **Indicadores de Confiabilidade da Rede Básica**. Disponível em: <<http://www.ons.org.br>>. Acesso em: mar. 2014a.

_____. **NT- 0057/2014 - ATENDIMENTO À REGIÃO METROPOLITANA DE CUIABÁ DURANTE A COPA DO MUNDO FIFA 2014 - REVISÃO 1**. Disponível em: <ftp://ftprio.ons.org.br/gpo1/Copa_do_Mundo/Relatorios/Emitido/Revisao1/>. Acesso em: mai. 2014b.

PENG-CHENG, L. et al. A fuzzy Bayesian network approach to improve the quantification of organizational influences in HRA frameworks. **Safety Science**, n. 50, p. 1569-1583, 2012.

PARRY, G.W., et al. **An Approach to the Analysis of Operator Actions in Probabilistic Risk Assessment**, TR-100259. Palo Alto: Electric Power Research Institute, 1992.

PODOFILLINI, L; DANG, V. A Bayesian approach to treat expert-elicited probabilities in human reliability analysis model construction. **Reliability Engineering System Safety**, n. 117, p. 52-64, 2013.

POEMAS. **Antes fosse mais leve a carga: avaliação dos aspectos econômicos, políticos e sociais do desastre da Samarco/Vale/BHP em Mariana (MG)**. Mimeo. 2015.

RASMUSSEN, J. **Information Processing and Human-machine Interaction**. New York: Elsevier, 1986.

REASON, J. T. **The human contribution: unsafe acts, accidents and heroic recoveries**. United Kingdom: Ashgate Publishing, 2008.

_____. Human error: models and management. **British Medical Journal**, v. 320, n. 7237, p. 768-770, 2000.

RIBEIRO, A. C. O. **Quantificação do Impacto de Fatores Humanos e Organizacionais em Probabilidades de Falha Humana usadas em Análise Probabilística de Segurança**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

SAATY, T. L. **The Analytic Hierarchy Process**. New York: McGraw-Hill, 1980.

SALMINENT, S; TALLBERG, T. Human errors in fatal and serious occupational accidents in Finland. **Ergonomics**, v. 39, n. 7, p. 980-988, 1996.

SEAVER, D. A.; STILLWELL, W. G. **Procedures for using expert judgement to estimate human error probabilities in nuclear power plant operations**. NUREG/CR-2743. U. S. Nuclear Regulatory Commission. Washington DC, 1983

SHERIDAN, T. B. Risk, human error, and system resilience: fundamental ideas. **Human Factors**, v. 50, n. 3, p. 418-426, 2008.

SLAVUTZKI, L. C. **Metodologia para Avaliação e Classificação de Causas de Acidentes do Trabalho**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.

SPURGIN, A. J. **Human Reliability Assessment – Theory and Practice**. New York: CRC Press, 2010.

SWAIN, A. D. Human reliability analysis: Need, status, trends and limitations. **Reliability Engineering and System Safety**, n. 29, p. 301-313, 1990.

SWAIN, A. D.; GUTTMANN, H. E. **Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications**. Washington DC: US Nuclear Regulatory Commissions, 1983.

THE NATIONAL DIET OF JAPAN. **The Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission**. Disponível em: <https://www.nirs.org/wp-content/uploads/fukushima/naaic_report.pdf>. Acesso em: jan. 2014.

TOLMASQUIM, M. T. The energy sector in Brazil: Policy and Perspectives. **Estudos Avançados**, v. 26, n. 74, p. 249-259, 2012.

WILLIAMS, J. C. **A data-based method for assessing and reducing human error to improve operational performance**. In: IEEE FOURTH CONFERENCE ON HUMAN FACTORS AND POWER PLANTS, Monterey, 1988.

_____. **HEART - a proposed method for assessing and reducing human error**. In: NINTH ADVANCES IN RELIABILITY TECHNOLOGY SYMPOSIUM. B3/R. Bradford, 1986.

ZHOU, X. et al. Dependence assessment in human reliability based on D numbers and AHP. **Nuclear Engineering and Design**, n. 313, p. 243-252, 2017.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Árvore de decisão holística da ACH da Subestação Rondonópolis

ET	Ergonomia	Estresse	Procedimentos	Polít. Internas	Soma Produtos	HEP
0,340756	0,340756	0,051749	0,183494	0,083245		
1	1	1	1	1	1	5,75E-05
				3	1,16649	7,05E-05
				9	1,66596	1,30E-04
			3	1	1,366988	9,00E-05
				3	1,533478	1,10E-04
				9	2,032948	2,03E-04
			9	1	2,467952	3,45E-04
				3	2,634442	4,23E-04
				9	3,133912	7,78E-04
		3	1	1	1,103498	6,53E-05
				3	1,269988	8,00E-05
				9	1,769458	1,47E-04
			3	1	1,470486	1,02E-04
				3	1,636976	1,25E-04
				9	2,136446	2,30E-04
			9	1	2,57145	3,92E-04
				3	2,73794	4,80E-04
				9	3,23741	8,83E-04
		9	1	1	1,413992	9,53E-05
				3	1,580482	1,17E-04
				9	2,079952	2,15E-04
			3	1	1,78098	1,49E-04
				3	1,94747	1,83E-04
				9	2,44694	3,36E-04
			9	1	2,881944	5,72E-04
				3	3,048434	7,01E-04
				9	3,547904	1,29E-03
	3	1	1	1	1,681512	1,32E-04
				3	1,848002	1,62E-04
				9	2,347472	2,98E-04

			3	1	2,0485	2,07E-04
				3	2,21499	2,53E-04
				9	2,71446	4,66E-04
			9	1	3,149464	7,93E-04
				3	3,315954	9,71E-04
				9	3,815424	1,79E-03
	3		1	1	1,78501	1,50E-04
				3	1,9515	1,84E-04
				9	2,45097	3,38E-04
			3	1	2,151998	2,35E-04
				3	2,318488	2,88E-04
				9	2,817958	5,29E-04
			9	1	3,252962	8,99E-04
				3	3,419452	1,10E-03
				9	3,918922	2,03E-03
	9		1	1	2,095504	2,19E-04
				3	2,261994	2,68E-04
				9	2,761464	4,94E-04
			3	1	2,462492	3,43E-04
				3	2,628982	4,20E-04
				9	3,128452	7,73E-04
			9	1	3,563456	1,31E-03
				3	3,729946	1,61E-03
				9	4,229416	2,96E-03
	9	1	1	1	3,726048	1,60E-03
				3	3,892538	1,96E-03
				9	4,392008	3,61E-03
			3	1	4,093036	2,51E-03
				3	4,259526	3,07E-03
				9	4,758996	5,65E-03
			9	1	5,194	9,61E-03
				3	5,36049	1,18E-02
				9	5,85996	2,17E-02
	3		1	1	5,194	9,61E-03
				3	3,996036	2,23E-03
				9	4,495506	4,10E-03
			3	1	4,196534	2,85E-03
				3	4,363024	3,49E-03
				9	4,862494	6,41E-03

				9	1	5,297498	1,09E-02
					3	5,463988	1,34E-02
					9	5,963458	2,46E-02
		9		1	1	4,14004	2,66E-03
					3	4,30653	3,25E-03
					9	4,806	5,99E-03
				3	1	4,507028	4,16E-03
					3	4,673518	5,09E-03
					9	5,172988	9,37E-03
				9	1	5,607992	1,59E-02
					3	5,774482	1,95E-02
					9	6,273952	3,59E-02
3		1		1	1	1,681512	1,32E-04
					3	1,848002	1,62E-04
					9	2,347472	2,98E-04
				3	1	2,0485	2,07E-04
					3	2,21499	2,53E-04
					9	2,71446	4,66E-04
				9	1	3,149464	7,93E-04
					3	3,315954	9,71E-04
					9	3,815424	1,79E-03
		3		1	1	1,78501	1,50E-04
					3	1,9515	1,84E-04
					9	2,45097	3,38E-04
				3	1	2,151998	2,35E-04
					3	2,318488	2,88E-04
					9	2,817958	5,29E-04
				9	1	3,252962	8,99E-04
					3	3,419452	1,10E-03
					9	3,918922	2,03E-03
		9		1	1	1,78501	1,50E-04
					3	2,261994	2,68E-04
					9	2,761464	4,94E-04
				3	1	2,462492	3,43E-04
					3	2,628982	4,20E-04
					9	3,128452	7,73E-04
				9	1	3,563456	1,31E-03
					3	3,729946	1,61E-03
					9	4,229416	2,96E-03
	3		1		1	2,095504	2,19E-04
					3	2,529514	3,72E-04

			9	3,028984	6,84E-04
		3	1	2,730012	4,75E-04
			3	2,896502	5,82E-04
			9	3,395972	1,07E-03
		9	1	3,830976	1,82E-03
			3	3,997466	2,23E-03
			9	4,496936	4,10E-03
	3	1	1	2,466522	3,44E-04
			3	2,633012	4,22E-04
			9	3,132482	7,76E-04
		3	1	2,83351	5,39E-04
			3	3	6,61E-04
			9	3,49947	1,22E-03
		9	1	3,934474	2,07E-03
			3	4,100964	2,53E-03
			9	4,600434	4,66E-03
	9	1	1	2,777016	5,03E-04
			3	2,943506	6,17E-04
			9	3,442976	1,13E-03
		3	1	3,144004	7,87E-04
			3	3,310494	9,65E-04
			9	3,809964	1,78E-03
		9	1	4,244968	3,02E-03
			3	4,411458	3,70E-03
			9	4,910928	6,80E-03
	9	1	1	4,40756	3,68E-03
			3	4,57405	4,51E-03
			9	5,07352	8,30E-03
		3	1	4,774548	5,76E-03
			3	4,941038	7,06E-03
			9	5,440508	1,30E-02
		9	1	5,875512	2,21E-02
			3	6,042002	2,71E-02
			9	6,541472	4,98E-02
	3	1	1	5,875512	2,21E-02
			3	4,677548	5,12E-03
			9	5,177018	9,41E-03
		3	1	4,878046	6,54E-03
			3	5,044536	8,01E-03
			9	5,544006	1,47E-02

				9	1	5,97901	2,51E-02
					3	6,1455	3,07E-02
					9	6,64497	5,65E-02
		9		1	1	4,821552	6,10E-03
					3	4,988042	7,47E-03
					9	5,487512	1,38E-02
				3	1	5,18854	9,55E-03
					3	5,35503	1,17E-02
					9	5,8545	2,15E-02
				9	1	6,289504	3,66E-02
					3	6,455994	4,48E-02
					9	6,955464	8,25E-02
9	1	1		1	1	3,726048	1,60E-03
					3	3,892538	1,96E-03
					9	4,392008	3,61E-03
				3	1	4,093036	2,51E-03
					3	4,259526	3,07E-03
					9	4,758996	5,65E-03
				9	1	5,194	9,61E-03
					3	5,36049	1,18E-02
					9	5,85996	2,17E-02
		3		1	1	3,829546	1,82E-03
					3	3,996036	2,23E-03
					9	4,495506	4,10E-03
				3	1	4,196534	2,85E-03
					3	4,363024	3,49E-03
					9	4,862494	6,41E-03
				9	1	5,297498	1,09E-02
					3	5,463988	1,34E-02
					9	5,963458	2,46E-02
		9		1	1	4,14004	2,66E-03
					3	4,30653	3,25E-03
					9	4,806	5,99E-03
				3	1	4,507028	4,16E-03
					3	4,673518	5,09E-03
					9	5,172988	9,37E-03
				9	1	5,607992	1,59E-02
					3	5,774482	1,95E-02
					9	6,273952	3,59E-02
	3	1		1	1	4,40756	3,68E-03
					3	4,57405	4,51E-03

			9	5,07352	8,30E-03
		3	1	4,774548	5,76E-03
			3	4,941038	7,06E-03
			9	5,440508	1,30E-02
		9	1	5,875512	2,21E-02
			3	6,042002	2,71E-02
			9	6,541472	4,98E-02
	3	1	1	4,511058	4,18E-03
			3	4,677548	5,12E-03
			9	5,177018	9,41E-03
		3	1	4,878046	6,54E-03
			3	5,044536	8,01E-03
			9	5,544006	1,47E-02
		9	1	5,97901	2,51E-02
			3	6,1455	3,07E-02
			9	6,64497	5,65E-02
	9	1	1	4,821552	6,10E-03
			3	4,988042	7,47E-03
			9	5,487512	1,38E-02
		3	1	5,18854	9,55E-03
			3	5,35503	1,17E-02
			9	5,8545	2,15E-02
		9	1	6,289504	3,66E-02
			3	6,455994	4,48E-02
			9	6,955464	8,25E-02
	9	1	1	6,452096	4,46E-02
			3	6,618586	5,47E-02
			9	7,118056	1,01E-01
		3	1	6,819084	6,98E-02
			3	6,985574	8,56E-02
			9	7,485044	1,57E-01
		9	1	7,920048	2,68E-01
			3	8,086538	3,28E-01
			9	8,586008	6,03E-01
	3	1	1	6,555594	5,06E-02
			3	6,722084	6,20E-02
			9	7,221554	1,14E-01
		3	1	6,922582	7,92E-02
			3	7,089072	9,71E-02
			9	7,588542	1,79E-01

		9	1	8,023546	3,04E-01
			3	8,190036	3,72E-01
			9	8,689506	6,85E-01
	9	1	1	6,866088	7,40E-02
			3	7,032578	9,06E-02
			9	7,532048	1,67E-01
		3	1	7,233076	1,16E-01
			3	7,399566	1,42E-01
			9	7,899036	2,61E-01
		9	1	8,33404	4,44E-01
			3	8,50053	5,44E-01
			9	9	1,00E+00

Fonte: Elaborado pelo autor