UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

UMA METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE HUMANA EM ATIVIDADES DE SUBSTITUIÇÃO DE CADEIAS DE ISOLADORES EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UFPE

PARA OBTENÇÃO DE GRAU DE MESTRE

POR

REGILDA DA COSTA E SILVA MENÊZES

Orientador: Enrique López Droguett, Ph.D.

RECIFE, Junho / 2005

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA

DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE

MESTRADO ACADÊMICO DE

REGILDA DA COSTA E SILVA MENÊZES

"Uma Metodologia para Avaliação da Confiabilidade Humana em Atividades de Substituição de Cadeias de Isoladores em Linhas de Transmissão".

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PESQUISA OPERACIONAL

A comissão examinadora, composta pelos professores abaixo, sob a presidência do(a) primeiro(a), considera a candidata REGILDA DA COSTA E SILVA MENÊZES **APROVADA.**

Recife, 28 de junho de 2005.

Prof. ENRIQUE ANDRÉS LÓPEZ DROGUETT, PhD (UFPE)

Profa. DAYSE CAVALCANTI DE LEMOS DUARTE, PhD (UFPE)

Prof. ANDRÉ MARQUES CAVALCANTI, Doutor (IDEP)

PÁGINA DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Reginaldo e Maria Thereza, pelo amor que me dedicam e sobretudo pelo exemplo de fé, força e esperança que me estimulam a cada dia.

Ao meu noivo, Eduardo André, pelo amor, dedicação, força e principalmente pela compreensão, incentivo e ajuda sempre presente.

As minhas irmãs, Regimére e Regilma, pelo apoio, amizade e companheirismo.

Aos meus sobrinhos, Mário Neto e Eduardo, pelo carinho e alegria.

AGRADECIMENTOS

A Deus em primeiro lugar, porque Nele deposito a minha confiança, esperança e principalmente a minha vida.

A minha família, pelo amor, confiança e estímulo.

Ao meu noivo, pela paciência e pelas horas de incansáveis ajuda e dedicação.

Ao Professor Enrique López, pela oportunidade que me foi dada, pela confiança, orientação e sobretudo pelo aprendizado e exemplo de profissionalismo.

A Professora Dayse Duarte, pela fundamental importância de sua contribuição na etapa qualitativa deste trabalho.

Ao Professor André Marques, pelas observações valiosas.

A Paulo Renato Firmino, pelo companheirismo e experiência adquirida em etapas de estudo e trabalho vencidas, das quais este trabalho contempla a sua grande contribuição.

A todos os meus amigos do Risctec, pelo convívio, ajuda e amizade.

Aos engenheiros da CHESF, Rômulo Vilela e Denis Augusto de Souza, pela orientação e apoio.

Ao SLLR/CHESF pelo apoio e esclarecimento prestados durante o acompanhamento das intervenções para substituição de cadeias de isoladores.

RESUMO

A análise de confiabilidade humana (ACH) estuda a execução das ações humanas em um determinado sistema, considerando suas limitações e os fatores que influenciam no seu desempenho. A literatura apresenta os métodos de ACH de primeira e segunda geração, onde a maioria foi desenvolvido para indústria nuclear. Esses métodos apresentam algumas deficiências. Dentre elas, destacam-se suposições irreais de independência e simples representação binária de eventos. Estas são conseqüências da utilização de ferramentas como análise de árvore de eventos e de falhas. Diante disso, apresentam uma grande dificuldade na modelagem das ações humanas, bem como na quantificação dos modelos causais.

Portanto, percebe-se que modelar as causalidades existentes nas ações humanas tornou-se um grande desafio para ACH ao longo dos anos. Diante deste contexto, este trabalho mostra que modelar ações humanas por redes Bayesianas proporciona uma maior flexibilidade às variáveis componentes de um determinado sistema, pois além de permitir uma representação mais realista da natureza dinâmica da interface homem-sistema e homem-homem em eventos normais ou anormais de um processo, também representa a relação de dependência entre os eventos e entre os fatores de desempenho.

Neste trabalho, utiliza-se redes Bayesianas para avaliação da confiabilidade humana em atividades de substituição de cadeias de isoladores em linhas de transmissão. Ele apresenta claramente a modelagem das ações humanas, bem como a utilização de métodos para construção de rede, com destaque para os mecanismos de quantificação de redes Bayesianas.

Palavras-chave: Análise de Confiabilidade Humana (ACH), Inferência Bayesiana, Redes Bayesianas, Fatores de desempenho, Opinião de especialistas, Método de educão do conhecimento.

ABSTRACT

Human Reliability Analysis (HRA) has been used to study the execution of human actions, and their interactions with a system, taking into account its limitations and factors influencing the human performance. The HRA models are usually categorized into the first and second generation methods, where most of then has been developed in the context of the nuclear industry. The first generation methods present some shortcomings such as unreal assumptions of independence and simple binary representation of events, which mainly result from the use of event and fault trees. Therefore, they present a significant deficiency in modeling human actions as well as quantifying the causal models.

Therefore, it is clear that modeling of causalities in human actions has become a great challenge for HRA. In this context, in this dissertation it is described a methodology for modeling human actions through Bayesian belief networks (BBN). The methodology provides a greater flexibility as not only allows for a more realistic representation of the dynamic nature of man-system and man-man interface under normal and abnormal process states, but also represents the relationship of dependence among the events and performance shaping factors.

This dissertation uses Bayesian networks for evaluating human reliability in activities of substitution of the insulators' chain in transmission line. It clearly models the human actions, as well as the methods used to build the network, with emphasis in the Bayesian networks' mechanisms of quantification.

Keywords: Human Reliability Analysis (HRA), Bayesian Inference, Bayesian Networks,Performance Shaping Factors, Expert Judgments, Method for Knowledge elicitation.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 1

1.1 JUSTIFICATIVA 2

1.2 OBJETIVOS 2

1.2.1Objetivo Geral 2

1.2.2 Objetivos Específicos 2

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 4

2.1 ERRO HUMANO 4

2.1.1 Taxonomias de erros humanos 5

2.2 CONFIABILIDADE HUMANA 7

2.2.1 Definição 7

2.2.2 Análise de Confiabilidade humana (ACH) 8

2.2.3 Probabilidade de Erro Humano (PEH) 8

2.2.4 Fatores de Desempenho (FDs) 8

2.2.5 Árvores de Eventos de Erros Humanos 9

2.2.6 Probabilistic Risk Assessment (PRA) ou Probabilistic Safety Analysis (PSA) 9

3. TÉCNICAS DE ANÁLISE DE CONFIABILIDADE HUMANA (ACH) 11

3.1 MÉTODO PARA ACH 11

3.2 ESQUEMA DE CLASSIFICAÇÃO PARA ACH 11

3.3 MODELO COGNITIVO PARA ACH 12

3.4 TÉCNICAS DE ACH DE 1ª GERAÇÃO 15

3.4.1 Accident Investigation and Analysis (AIPA) 17

3.4.2 Confusion Matriz (CM) 18

3.4.3 Operator Action Tree (OAT) 19

3.4.4 Sócio -Technical Assessment of Human Reliability (STAHR) 19

3.4.5 Thecniqui for Human Error Prodiction (THERP) 21

3.4.6 Expert Estimation (EE) 23

3.4.7 Success Likelihood Index Method/ Mult-Atribbute Utility Decomposition (SLIM/MAUD) 23

3.4.8 Human Cognitive Reliability (HCR) 25

3.4.9 Maintenance Personnel Performance Simulation (MAPPS) 26

3.4.10 Características gerais das Técnicas de ACH de 1ª geração 26

3.5 TÉCNICAS DE ACH DE 2ª GERAÇÃO 30
3.5.1 Cognitive Environment Simulator (CES) *30*
3.5.2 Intention Event tree System (INTENT) *31*
3.5.3 Cognitive Event Tree System (COGENT) *32*
3.5.4 EPRI Project on Methods for Addressing Human in Safety Analysis *33*
3.5.5 Human Interaction Timeline (HITLINE) *33*
3.5.6 A Technique for Human Error Analysis (ATHEANA) *35*
3.5.7 Cognitive Reliability and Error Analysis Method (CREAM) *36*
3.5.8 Características gerais das técnicas de ACH de 2ª geração *38*
3.6 INFORMATION PERCEPTION, DIAGNOSIS MAKING, AND ACTION TAKING IN CREW PERSPECTIVE (IDAC) 40
3.6.1 Método e modelo cognitivo *40*
3.6.2 Dependências entre os FDs no modelo IDAC *41*
3.6.3 Características gerais do modelo IDAC *44*
4. TÉCNICA DE ANÁLISE DE CONFIABILIDADE HUMANA PROPOSTA 46
4.1 INFERÊNCIA BAYESIANA 46
4.1.1 Teorema de Bayes *47*
4.2 REDES BAYESIANAS 47
4.2.1 Nós e Valores *48*
4.2.2 Estrutura *48*
4.2.3 Probabilidades Condicionais *49*
4.2.4 Condição Markoviana *50*
4.2.5 Independência condicional *51*
4.2.6 d – Separação *52*
4.2.7 Cálculo da distribuição de probabilidades correspondente à rede *52*
4.2.8 Tipos de evidências *54*
4.3 REDES BAYESIANAS NA ACH 55
4.4 QUANTIFICAÇÃO DO CONHECIMENTO PARA A ACH VIA REDES BAYESIANAS 57
4.4.1 Opinião do especialista *57*
4.4.2 Método de edução proposto *59*
4.4.3 Software E&P/CHESF BBN *64*
5. ANÁLISE DE CONFIABILIDADE HUMANA DA EQUIPE DE MANUTENÇÃO DE LTS DA CHESF 66
5.1 DESCRIÇÃO DA TAREFA 67

5.1.1 Torres, linhas e cadeia de isoladores *68*
5.1.2 Acesso, local e equipe *69*
5.1.3 HTAs *71*
5.1.3.1 Intervenção para troca de isoladores em cadeias de suspensão I, 230KV em estrutura metálica 72
5.1.3.2 Chegada da equipe ao local 73
5.1.3.3 Posicionamento dos eletricistas e equipamentos e ferramentas na estrutura 74
5.1.3.4 Montagem do retângulo de forças 75
5.1.3.5 Troca da cadeia de isoladores 76
5.1.3.6 Desmontagem do retângulo de forças 77
5.1.3.7 Finalização 78
5.2 ANÁLISE DA TAREFA 79
5.2.1 Rede Bayesiana da tarefa *80*
5.2.1.1 Descrição dos cenários que compõem a rede Bayesiana (RB) da tarefa 82
5.2.2 Identificação dos prováveis erros humanos e suas conseqüências *84*
5.2.3 Modelo cognitivo *91*
5.2.3.1 Estágio de processamento da informação 93
5.2.3.2 Estágio de memória 95
5.2.3.3 Estágio de seleção de resposta e ação 95
5.2.4 Fatores de desempenho (FDs) *96*
5.2.4.1 Fatores Externos 96
5.2.4.2 Características da tarefa 98
5.2.4.3 Fatores Estressantes 99
5.2.4.4 Fatores Internos 102
5.2.5 Relação de causa e efeito entre os FDs *104*
5.2.6 Redes Bayesianas dos FDs *106*
5.3 QUANTIFICAÇÃO DA REDE BAYESIANA DINÂMICA DA EQUIPE DE MANUTENÇÃO DE LTS DA CHESF 110
5.3.1 Edução de opiniões dos especialistas *110*
5.3.1.1 Utilização da técnica *Divorcing Multiple Parents* (DPM) 111
5.3.1.2 Redes Bayesianas e o modelo *Noisy-or* 114
5.3.1.3 Definição do questionário de edução 116
5.3.1.4 Definição das questões referentes às redes Bayesianas 117
5.3.1.5 Teste piloto/Entrevistas 117

5.3.1.6 Dados obtidos 118
5.3.1.7 Modelagem 127
5.3.2 Avaliação dos dados obtidos através da edução 132
5.3.2.1 Interpretação dos resultados 134
5.3.2.2 Análise de sensibilidade 139

6. CONCLUSÕES 141
6.1 REDES BAYESIANAS NA ACH 141
6.2 ACH DA EQUIPE DE MANUTENÇÃO DE LTS UTILIZANDO REDES BAYESIANAS 142
6.3 EDUÇÃO ATRAVÉS DO MÉTODO PROPOSTO 142
6.4 DESAFIOS FUTUROS 143

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 144
ANEXOS 149
ANEXO 1 149
ANEXO 2 149

APÊNDICES 151
APÊNDICE 1 151
APÊNDICE 2 152

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 PROPORÇÃO DAS CAUSAS DE ACIDENTE NA INDÚSTRIA NUCLEAR 4
FIGURA 2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS ERROS HUMANOS 6
FIGURA 2.3 ÁRVORE DE EVENTOS 9
FIGURA 3.1 GEMS 13
FIGURA 3.2 RELAÇÃO ENTRE MODELO, ESQUEMA DE CLASSIFICAÇÃO E MÉTODO. 14
FIGURA 3.3 DIAGRAMA DE INFLUÊNCIA DO STAHR 20
FIGURA 3.4 MÉTODO ATHEANA 35
FIGURA 3.5 METODOLOGIA IDAC 41
FIGURA 3.6 DIAGRAMA DE INFLUÊNCIA IDAC 42
FIGURA 4.1 REDE BAYESIANA REFERENTE AO PROBLEMA DE CARGA DE TRABALHO EXCESSIVA 50
FIGURA 4.2 CONEXÃO EM SÉRIE 51
FIGURA 4.3 CONEXÃO DO TIPO CAUSA COMUM 51
FIGURA 4.4 CONEXÃO DO TIPO EFEITO COMUM 52
FIGURA 4.5 INCLUSÃO DE UMA EVIDÊNCIA SUBJETIVA NA REDE BAYESIANA DA FIGURA 4.1 54
FIGURA 4.6 OBTENÇÃO DA MODA DE θ A PARTIR DA FUNÇÃO DE MÁXIMO E MÍNIMO. 61
FIGURA 5.1 FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA PROPOSTA 66
FIGURA 5.2 TORRE DE TRANSMISSÃO DE ISOLADORES EM CADEIAS DE SUSPENSÃO EM I, 230KV 69
FIGURA 5.3 ELETRICISTAS NA ESTRUTURA 70
FIGURA 5.4 ELETRICISTAS AUXILIARES 70
FIGURA 5.5 DISPOSIÇÃO DOS ELETRICISTAS DURANTE A TROCA. 71
FIGURA 5.6 MONTAGEM DO RF. 79
FIGURA 5.7 TROCA DA CADEIA DE ISOLADORES 80
FIGURA 5.8 DESTENSIONAMENTO DO RF 80
FIGURA 5.9 REDE BAYESIANA DA TAREFA. 81
FIGURA 5.10 MODELO COGNITIVO PROPOSTO 91
FIGURA 5.11 DIAGRAMA DE INTERDEPENDÊNCIA ENTRE OS FDS DA EQUIPE DE MANUTENÇÃO DA CHESF. 105
FIGURA 5.12 REDE BAYESIANA PARA OS FDS DOS EM E ET 108
FIGURA 5.13 REDE BAYESIANA PARA OS FDS DO EA 108

FIGURA 5.14 REDE BAYESIANA PARA OS FDS DOS EAUX. 109
FIGURA 5.15 REDE BAYESIANA PARA OS FDS DO EE. 110
FIGURA 5.16 CAUSADORES IMEDIATOS DO EA2 ANTES DA UTILIZAÇÃO DA DMP 111
FIGURA 5.17 CAUSADORES IMEDIATOS DO EA2 DEPOIS DA UTILIZAÇÃO DA DMP 112
FIGURA 5.18 REDE BAYESIANA DA TAREFA DEPOIS DA UTILIZAÇÃO DA DMP 113
FIGURA 5.19 INTERFACE PRINCIPAL DO SOFTWARE E&P/CHESF BBN NA MODELAGEM DO CENÁRIO 1. 127
FIGURA 5.20 INTERFACE DE RESULTADOS DO SOFTWARE E&P/CHESF BBN. 129
FIGURA 5.21 CURVA DA UTILIDADE DO ESPECIALISTA A 133
FIGURA 5.22 CURVA DA UTILIDADE DO ESPECIALISTA B 134
FIGURA 5.23 CURVA DA UTILIDADE DO ESPECIALISTA C 134
FIGURA 5.24 PROBABILIDADES DO EE MONITORAR DE FORMA INADEQUADA OS CENÁRIOS DA REDE 135
FIGURA 5.25 PROBABILIDADES DE ERROS DOS ELETRICISTAS NOS CENÁRIOS 136
FIGURA 5.26 PROBABILIDADES DOS FDS ESTAREM DESFAVORÁVEIS DURANTE A TAREFA 138
FIGURA 5.27 PROBABILIDADE DA *FADIGA* ESTAR PRESENTE DURANTE A TAREFA 139

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 TÉCNICAS DE ACH DE 1ª GERAÇÃO 16
TABELA 3.2 SELEÇÃO DE TÉCNICAS DE ACH DE 1ª GERAÇÃO 17
TABELA 3.3 RESUMO DAS TÉCNICAS DE ACH DE 1ª GERAÇÃO 27
TABELA 3.4 TÉCNICAS DE ACH DE 2ª GERAÇÃO 39
TABELA 4.1 PROBABILIDADES CONJUNTAS REFERENTES AO PROBLEMA DE CARGA DE TRABALHO EXCESSIVA 53
TABELA 4.2 PROBABILIDADES POSTERIORES REFERENTES AO PROBLEMA DE CARGA DE TRABALHO EXCESSIVA 53
TABELA 4.3 QUESTIONÁRIO DE EDUÇÃO COM 20 QUESTÕES 62
TABELA 4.4 DISTORÇÃO ENTRE AS REAIS CRENÇAS DO ESPECIALISTA E OS RESULTADOS DA ANÁLISE DO QUESTIONÁRIO DE EDUÇÃO EXIBIDO NA TABELA 4.3 64
TABELA 4.5 QUESTIONÁRIO DE EDUÇÃO COM 26 QUESTOES APÓS A REMOÇÃO DAS DISTORÇÕES. 64
TABELA 5.1 ANÁLISE DO CENÁRIO 0 85
TABELA 5.2 ANÁLISE DO CENÁRIO 1 85
TABELA 5.3 ANÁLISE DO CENÁRIO 2 86
TABELA 5.4 ANÁLISE DO CENÁRIO 3 87
TABELA 5.5 ANÁLISE DO CENÁRIO 4 88
TABELA 5.6 ANÁLISE DO CENÁRIO 5 89
TABELA 5.7 ANÁLISE DO CENÁRIO 6 90
TABELA 5.7 FDS RELEVANTES PARA EQUIPE DE MANUTENÇÃO DE LTS DA CHESF 104
TABELA 5.8 VALORES DOS FDS 107
TABELA 5.9 TPC DE Y 115
TABELA 5.10 TPC DA IES0 SOBRE O ET0 119
TABELA 5.11 TPC DA ATIVIDADE DO ET0 119
TABELA 5.12 TPC DO MONITORAMENTO DO EE0 119
TABELA 5.13 TPC DA INDICAÇÃO DO EM0 119
TABELA 5.14 TPC REFERENTE AOS ERROS COMETIDOS NESTE CENÁRIO 119
TABELA 5.15 TPC DA ATIVIDADE DO EM1 119
TABELA 5.16 TPC DO MONITORAMENTO DO EE1 119
TABELA 5.17 TPC REFERENTE AOS ERROS COMETIDOS NESTE CENÁRIO 120

TABELA 5.18 TPC DA ATIVIDADE DOS E*2 (EM2+ET2) 120
TABELA 5.19 TPC DA IEB2 SOBRE O EA2 120
TABELA 5.20 TPC DA ATIVIDADE DO EA2 120
TABELA 5.21 TPC DA ATIVIDADE DOS EAUX2 120
TABELA 5.22 TPC DO MONITORAMENTO DO EE2 120
TABELA 5.23 TPC REFERENTE AOS ERROS COMETIDOS NESTE CENÁRIO 121
TABELA 5.24 TPC DO MONITORAMENTO DO EE3 121
TABELA 5.25 TPC DA ATIVIDADE EAUX3 121
TABELA 5.26 TPC REFERENTE AOS ERROS COMETIDOS NESTE CENÁRIO 121
TABELA 5.27 TPC DA ATIVIDADE DOS E*4 (EM4+ET4) 121
TABELA 5.28 TPC DA IEB4 SOBRE O EA4 121
TABELA 5.29 TPC DA ATIVIDADE DO EA4 121
TABELA 5.30 TPC DA ATIVIDADE DOS EAUX4 122
TABELA 5.31 TPC DO MONITORAMENTO DO EE4 122
TABELA 5.32 TPC DA ATIVIDADE DO EM4 122
TABELA 5.33 TPC REFERENTE AOS ERROS COMETIDOS NESTE CENÁRIO 122
TABELA 5.34 TPC DA ATIVIDADE DOS C5 (EM5+EA5) 122
TABELA 5.35 TPC DO MONITORAMENTO DO EE5 122
TABELA 5.36 TPC REFERENTE AOS ERROS COMETIDOS NESTE CENÁRIO 122
TABELA 5.37 TPC DO IES0 SOBRE ET6 123
TABELA 5.38 TPC DA ATIVIDADE DO ET6 123
TABELA 5.39TPC DO MONITORAMENTO DO EE6 123
TABELA 5.40 TPC DA INDICAÇÃO DO EM6 123
TABELA 5.41 TPC REFERENTE AOS ERROS COMETIDOS NESTE CENÁRIO 123
TABELA 5.42 TPC DA CAPACIDADE DOS EM E ET 123
TABELA 5.43 TPC DA ATENÇÃO DOS ET E EM 124
TABELA 5.44 TPC DA FADIGA DOS ET E EM 124
TABELA 5.45 TPC DO CONTROLE MOTOR DOS EM E ET 124
TABELA 5.46 TPC DA FADIGA DO EA 124
TABELA 5.47 TPC DA ATENÇÃO DO EA 125
TABELA 5.48 TPC DA FADIGA DOS EAUX 125
TABELA 5.49 TPC DA ATENÇÃO DOS EAUX 125
TABELA 5.50 TPC DA FADIGA DO EE 125
TABELA 5.51 TPC DA ATENÇÃO DO EE 125

TABELA 5.52 TPC DA CARGA DE TRABALHO 126
TABELA 5.53 TPC DO DESIGN DE EQUIPAMENTOS RELACIONADOS AO DESEMPENHO DOS EM E ET 126
TABELA 5.54 TPC DO DESIGN DE EQUIPAMENTOS RELACIONADOS AO DESEMPENHO DO EA 126
TABELA 5.55 TPC DO CONDICIONAMENTO FÍSICO PARA OS EM E ET 126
TABELA 5.56 TPC DO CONDICIONAMENTO FÍSICO PARA O EA 126
TABELA 5.57 TPC DO CONDICIONAMENTO FÍSICO PARA O EAUX 126
TABELA 5.58 TPC DO CONDICIONAMENTO FÍSICO PARA O EE 126
TABELA 5.59 TPC DO ESTADO EMOCIONAL 127
TABELA 5.60 TPC REFERENTE AOS INSETOS 127
TABELA 5.61 TPC DA COMUNICAÇÃO ENTRE O EE E OS OUTROS ELETRICISTAS 127
TABELA 5.62 ANÁLISE DA VARIABILIDADE DO COMPORTAMENTO DO EE1 DIANTE DE CONDIÇÕES ESPECÍFICAS 128
TABELA 5.63 PROBABILIDADES POSTERIORES DO CENÁRIO 0 129
TABELA 5.64 PROBABILIDADES POSTERIORES DO CENÁRIO 1 130
TABELA 5.65 PROBABILIDADES POSTERIORES DO CENÁRIO 2 130
TABELA 5.66 PROBABILIDADES POSTERIORES DO CENÁRIO 3 131
TABELA 5.67 PROBABILIDADES POSTERIORES DO CENÁRIO 4 131
TABELA 5.68 PROBABILIDADES POSTERIORES DO CENÁRIO 5 131
TABELA 5.69 PROBABILIDADES POSTERIORES DO CENÁRIO 6 132
TABELA 5.70 AMOSTRAGEM DA EDUÇÃO DOS NÓS POR ESPECIALISTA 133
TABELA 5.70 VARIÁVEIS QUE SE MOSTRARAM MAIS SENSÍVEIS PARA O EE 139
TABELA 5.71 VARIÁVEIS QUE SE MOSTRARAM MAIS SENSÍVEIS PARA OS ET E EM 140
TABELA 5.72 VARIÁVEIS QUE SE MOSTRARAM MAIS SENSÍVEIS PARA O EA 140
TABELA 5.73 VARIÁVEIS QUE SE MOSTRARAM MAIS SENSÍVEIS PARA OS EAUX 140

LISTA DE ACRÔNIMOS

DG- *Directed Graph* (Grafo Direcionado)

DAG- *Directed Aciclic Graph* (Grafo Acíclico Direcionado)

BBN- *Bayesian Belief Networks* (Rede de Crenças Bayesianas)

DS- D-Separation (*D*-Separação)

IDAC- *Identification, Decision And Action in Crew* (Identificação, Decisão e Ação em Grupo)

BEL- *Bayesian Belief* (Crença Bayesiana)

CREAM- *Cognitive Reliability and Error Analysis Method* (Método de Análise de Erros e Confiabilidade Cognitiva)

CHESF- Companhia Hidro Elétrica do São Francisco

TPC – Tabela de Probabilidades Condicionais

LTs- Linhas de transmissão

FDs- Fatores de desempenho

HTA- *Hierarchical Task analysis*

ACH- Análise de Confiabilidade Humana

DMP- *Divorcing multiple parents* (Separação de múltiplos pais)

EPC- Erros Provenientes do Contexto

EHF- Eventos Humanos Falhos

PRA- *Probabilistic Risk Assessment* (Avaliação do risco probabilístico)

PSA- *Probabilistic Safety Analysis* (Analise da segurança probabilística)

SmoC- Simples Model of Cognition (Modelo simples de cognição)

COCOM- Contextual Control Model (Modelo de controle contextual)

CPCs- Common Performance Conditions (Condições comuns de desempenho)

CFP- Cognitive Failure Probability (Probabilidade de falha cognitiva)

PEH- Probabilidade de erro humano

RB- Rede Bayesiana

1. INTRODUÇÃO

Após a revolução industrial, a energia elétrica assumiu um papel decisivo no mundo moderno e a cada dia, o consumo de energia elétrica vem crescendo.

Atualmente, quase todas as atividades realizadas dependem de energia elétrica. Conseqüentemente, os níveis de intolerância com a descontinuidade dos serviços de fornecimento de energia elétrica estão aumentando cada vez mais.

Diante deste contexto, as linhas de transmissão de energia elétrica desempenham um papel de grande importância no que se refere à qualidade de energia elétrica.

As linhas de transmissão são linhas que operam com tensões mais elevadas do sistema, tendo como função principal o transporte de energia elétrica entre os centros de produção e subestações.

As estruturas ou torres constituem os elementos de sustentação dos cabos das linhas de transmissão. Estes cabos são suportados pelas estruturas através dos isoladores, que os mantém isolados eletricamente das mesmas. Estes isoladores devem resistir às solicitações elétricas e mecânicas que lhes são impostas.

Periodicamente, é necessário substituir estes isoladores, uma vez que estão sujeito a oxidação, o que compromete suas características mecânicas e elétricas. Esta substituição é realizada por uma equipe de manutenção de linhas de transmissão. Essa equipe é composta por sete eletricistas, sendo um deles o encarregado.

Assim como em qualquer outra atividade, a substituição de isoladores está sujeita a erros humanos. Porém, erros cometidos nesta atividade podem comprometer a vida dos eletricistas envolvidos, bem como causar interrupções no fornecimento de energia elétrica.

O erro humano tem sido citado como a causa dominante da maioria dos acidentes industriais da história recente. Um dos fatores responsáveis por este problema foi o grande progresso nos sistemas tecnológicos ocorrido no século XX, que trouxe melhorias dos níveis de confiabilidade e segurança de muitos sistemas de equipamentos. Porém, deixou o elemento humano de fora, não considerando que o mesmo poderia cometer sérios erros devido a vários fatores pertencentes ao contexto, os quais degradam o desempenho humano.

1.1 Justificativa

Com os avanços tecnológicos ocorridos e a busca incessante pelo aumento da eficiência e confiabilidade dos sistemas, vem crescendo consideravelmente o interesse pela confiabilidade humana.

Um dos aspectos fundamentais para o gerenciamento de riscos de acidentes do trabalho na transmissão de energia corresponde à análise de confiabilidade humana, que é o método através do qual a confiabilidade humana é avaliada.

Existem algumas técnicas de Análise de Confiabilidade Humana (ACH) na literatura, onde a maioria delas foi desenvolvida para indústria nuclear. Estas técnicas apresentaram algumas deficiências, tornando-as não suficientemente efetivas e carentes de uma evolução que trouxesse melhorias significativas em relação à interface homem-sistema e homem-homem.

Desta forma, torna-se extremamente necessário o desenvolvimento de uma metodologia para avaliação da confiabilidade humana em atividades de substituição de cadeias de isoladores em sistemas de linhas de transmissão de energia elétrica.

1.2 Objetivos

1.2.1Objetivo Geral

Desenvolvimento de uma metodologia para avaliação da confiabilidade humana em atividades de substituição de cadeias de isoladores em linhas de transmissão (LTs).

A metodologia a ser desenvolvida será aplicada dentro do contexto da Análise de Confiabilidade Humana (ACH) em atividades de substituição de cadeias de isoladores da equipe de manutenção de LTs da Companhia Hidroelétrica do São Francisco – CHESF.

Não serão considerados os erros provenientes de falhas de equipamentos. O objeto de análise considerado será apenas os erros humanos envolvidos na atividade.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Revisão das técnicas de ACH existentes na literatura;
- Descrição da atividade de substituição de cadeia de isoladores de LTs;
- Identificação dos perigos envolvidos durante a atividade de substituição de cadeia de isoladores através da montagem de cenários;

- Desenvolvimento de um novo modelo de análise de confiabilidade humana baseado na utilização de redes Bayesianas para avaliação das ações dos eletricistas durante a substituição de cadeias de isoladores em LTs;
- Obtenção da opinião de especialistas através de um processo de edução;
- Avaliação dos dados obtidos da edução.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nos próximos parágrafos serão feitas abordagens dos principais temas teóricos, cujo conhecimento faz-se necessário para contextualizar o problema apresentado bem como apresentar as devidas soluções.

2.1 Erro humano

Segundo Wickens et al. (1998), erro humano é um comportamento inapropriado que diminui o nível de eficiência ou segurança de um sistema, o qual pode ou não resultar em acidentes ou danos.

Os erros humanos podem ser cometidos pelos projetistas de equipamentos, pelos supervisores, por pessoas responsáveis pelo treinamento, por pessoas responsáveis pela elaboração dos procedimentos e normas exigidas para tarefa e pelos próprios executores da tarefa. A Figura 2.1 mostra o resultado de um estudo realizado pelo *Institute of Nuclear Power Operation* sobre as causas dos acidentes da indústria nuclear (INPO, 1985):

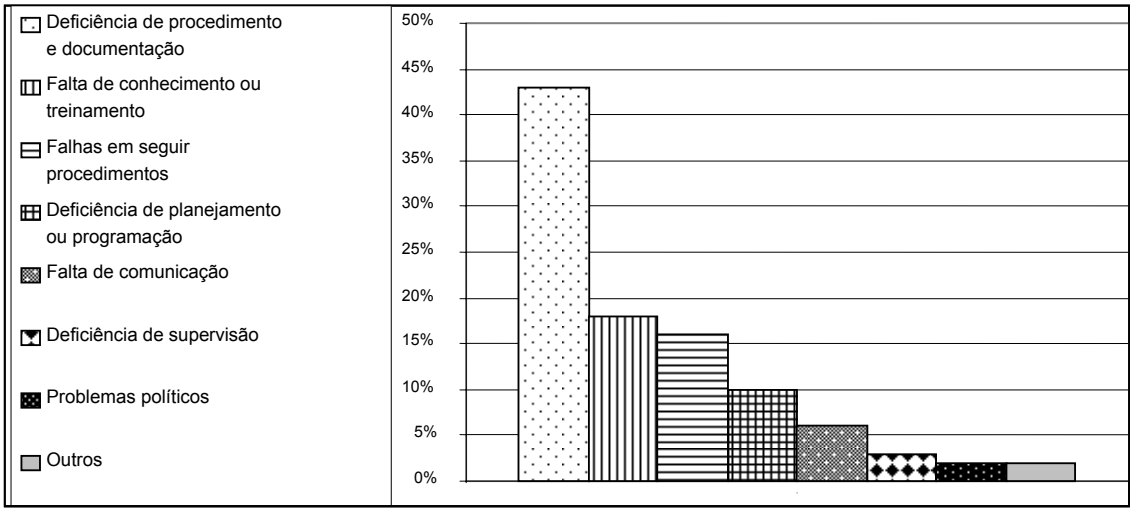


Figura 2.1 Proporção das causas de acidente na indústria nuclear

Uma pequena proporção das causas desses acidentes foi atribuída a falhas em seguir o procedimento, ficando assim a maior proporção para as falhas devido a manutenção e erros na tomada de decisão efetuada pela administração e organização do sistema.

Apesar do estudo citado acima mostrar que o percentual de erros cometidos pelos executores é inferior ao percentual de erros de projetos e falhas na estrutura organizacional de um sistema, o erro aparentemente cometido pelo executor está na linha de frente e, conseqüentemente, todos os erros humanos serão muito mais visíveis neste nível, até que

apareçam verdadeiramente os responsáveis. O termo "erro humano" é mais freqüentemente usado para referir-se ao comportamento inapropriado do executor, pessoa que trabalha diretamente com o sistema, como por exemplo: erro do operador.

O erro humano poderá ter diferentes causas sendo necessárias diferentes medidas para preveni-lo. Para saber o que prevenir ou que tipo de erro deve ser evitado, faz-se necessário identificar a maneira ou modo como estes erros são cometidos para posteriormente aplicar a ACH, pois através dela serão desenvolvidos métodos sistemáticos para identificar o potencial de erro humano e quantificar a probabilidade de erro humano.

Os modos de erros humanos podem ser representados através das taxonomias de erros humanos.

2.1.1 Taxonomias de erros humanos

Segundo Swain & Guttmann (1983), o erro humano é classificado em dois tipos: erros de comissão e erros de omissão. Os erros de comissão são erros cometidos ao executar uma tarefa. Já os erros de omissão são erros cometidos quando se omite um passo da tarefa.

Exemplos de erros de comissão podem ser os erros cometidos ao executar uma seqüência de passos de uma tarefa ou erros ao desempenhar uma tarefa rapidamente ou lentamente, entre outros. Enquanto os erros de omissão podem ser causados por problemas de comunicação, distração ou desvio da atenção. Erros de omissão são particularmente predominantes e quase sempre apresentam sérias conseqüências (Wickens et al. 1998).

Para Reason (1990), os erros humanos são decorrentes de ações intencionais ou ações não intencionais. As ações intencionais provocam erros que são chamados de *mistake.* Estes erros ocorrem quando o executor pretende realizar algumas ações incorretas, acreditando que são corretas. Ele tem boas intenções, mas os efeitos de suas ações no sistema podem ser indesejáveis – Erros de planejamento (Reason, 1990).

O planejamento envolve o processo de identificação da meta e a decisão das etapas da tarefa. Neste estágio ocorre a elaboração de procedimentos, normas, instruções de trabalho e treinamento. Portanto, procedimentos mal elaborados, falta de clareza e objetividade no treinamento provocam erros de planejamento *(mistake).*

As ações não intencionais provocam erros que são chamados de *lapso* ou *slip*. Estes erros são cometidos sem a intenção, ou seja, são cometidos por algum deslize (Reason, 1990). Os erros de *lapso* são erros cometidos devido à falha na memória durante a execução da tarefa, ou seja, o executor pode por esquecimento ou desvio da atenção, omitir um passo da tarefa. Já os

erros *slip*, assim como os erros de comissão, são erros cometidos ao executar a tarefa. Por exemplo, quando o executor realiza uma atividade de forma desordenada.

Os erros provocados pelas ações intencionais e não intencionais estão ilustrados na Figura 2.2, a qual mostra claramente que se a intenção da ação não é correta, então o erro cometido é o *mistake*.Todavia, se a intenção da ação é correta e a execução é incorreta, o erro cometido é o de *lapso* ou *slip*. Para a situação em que ambas forem corretas (i.e. a intenção da ação e a execução), então a ação é realizada corretamente.

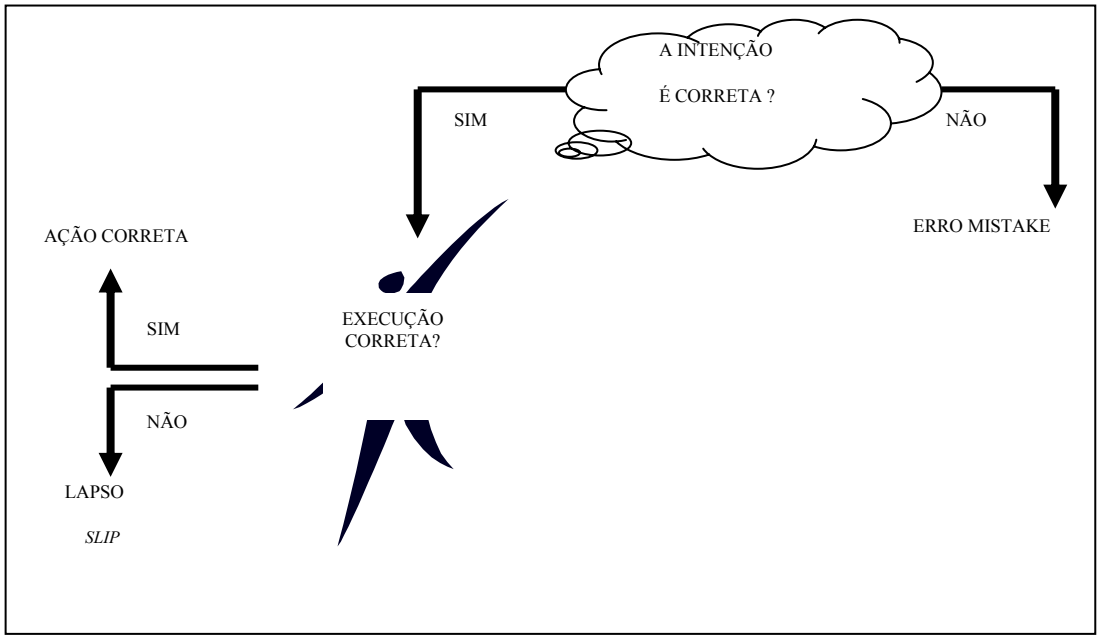


Figura 2.2 Classificação dos erros humanos

Comparando as taxonomias apresentadas por Swain & Guttmann (1983) e Reason (1990), percebe-se que os erros *mistake e lapso* são erros de omissão e os erros *slip* são erros de comissão.

A taxonomia apresentada por Reason (1990), mostra-se mais completa, pois inclui os erros *mistake.* Assim, o autor conseguiu distinguir entre os erros cometidos pelos executores da tarefa (*lapso*-omissão) e os erros provenientes do planejamento (*mistake*-omissão).

Em adição aos erros *slips, lapsos e mistakes*, Reason (1990) também descreve sobre violações, que são erros cometidos deliberadamente ao optar em não seguir procedimentos que são considerados necessários para manter a operação segura, isto é, de acordo com as condições de segurança exigidas para um sistema potencialmente perigoso.

O acidente de Chernobyl, ocorrido em 1986, é um exemplo de erros e violações cometidos durante a realização de testes para avaliar se o sistema de emergência de refrigeração do núcleo do reator podia ser operado durante a redução de produção de um dos turbos geradores

em caso de ocorrência de uma interrupção no fornecimento de energia elétrica. Diante da busca por resultados satisfatórios com os testes, os regulamentos de segurança foram violados, os quais combinados com erros e circunstâncias causaram o acidente (Reason, 1987). Diversas razões provavelmente contribuíram para o desastre. Certamente, o projeto do reator não era novo, pois tinha cerca de 30 anos de idade na época do acidente. Conseqüentemente havia sido concebido antes da época dos sofisticados sistemas de segurança controlados por computadores. Por este motivo, os procedimentos para lidar com emergências do reator dependiam fortemente da habilidade e conhecimento dos operadores.

Segundo Rasmussen (1981), os erros provenientes de ações intencionais (*mistakes* e violações) devem ser prevenidos pela habilidade e conhecimento dos operadores.

Reason (1990), em sua análise sobre os erros humanos envolvidos em acidentes industriais, classificou os erros humanos em dois tipos de erros, são eles:

- Erros de Ação: são erros que causam uma degradação imediata do sistema. Um exemplo deste tipo de erro na industria nuclear são os erros cometidos pelos operadores de uma sala de controle ao acionar um botão errado e imediatamente ouvir um alarme de alerta.

- Erros Latentes: são erros que não causam uma degradação imediata do sistema, porém em combinação com outros eventos ao longo do tempo podem causar uma falha catastrófica. Estes erros normalmente são cometidos por pessoas que têm um alto poder de decisão, como, projetistas, administradores e supervisores de manutenção.

Rasmussen (1980) *apud* Gordon (1998), em seu estudo sobre a indústria nuclear, classificou 200 eventos significantes dentro da seguinte taxonomia de erro humano: omissão de ações isoladas, condições latentes não consideradas, outros tipos de omissões, efeitos colaterais não considerados, baixo grau de alerta, erros de decisão, falta de clareza nos manuais, falta de precisão, falta de orientação e falta de conhecimento em situação não familiar.

Agora que já se sabe como os erros humanos são cometidos, é necessário entender quais as dimensões de seus efeitos e quais as suas prováveis causas.

2.2 Confiabilidade humana

Serão apresentados neste tópico alguns conceitos básicos de confiabilidade humana.

2.2.1 Definição

De acordo com Swain & Guttmann (1983), confiabilidade humana é a probabilidade de um procedimento ou tarefa ser concluído com sucesso pelo operador ou equipe em qualquer estágio na operação de um sistema dentro do mínimo tempo exigido (quando a dimensão do

tempo é relevante).

2.2.2 Análise de Confiabilidade humana (ACH)

ACH é o método através do qual a confiabilidade humana é avaliada, ou seja, a ACH estuda a execução apropriada das ações humanas em um determinado sistema, considerando suas limitações e os fatores que influenciam no seu desempenho Para esta análise, é necessário identificar as ações humanas que são relevantes em uma tarefa, ou seja, identificar quais os passos da tarefa em que o executor apresenta uma probabilidade de erro significante em termos dos níveis de segurança e confiabilidade exigidos. Swain & Guttmann (1983) define "análise da tarefa" como um processo analítico para determinar um comportamento específico exigido do elemento humano na interface homem-sistema.

2.2.3 Probabilidade de Erro Humano (PEH)

De acordo com Swain & Guttmann (1983) e Kumamoto (1996), a maioria dos especialistas responsáveis no desenvolvimento de análise de confiabilidade humana define probabilidade de erro humano (PEH) como:

$$PEH = \frac{Número\ de\ erros}{Número\ de\ oportunidades\ para\ errar} \qquad \textit{Equação 2.1}$$

Esta definição é chamada de freqüentista, pois é necessário saber a freqüência com que um erro ocorre em um determinado intervalo de tempo.

2.2.4 Fatores de Desempenho (FDs)

Os FDs são todos os fatores que de alguma forma afetam a confiabilidade humana e conseqüentemente auxiliam na determinação da PEH (Swain & Guttmann, 1983). Estes fatores evidenciam a incompatibilidade existente entre as limitações humanas e as condições impostas para o trabalho. Exemplos desses fatores incluem restrições de tempo para executar uma atividade, carga de trabalho, treinamento inadequado do operador, procedimentos mal elaborados, complexidade da tarefa, entre outros.

A maioria dos modelos de análise de confiabilidade humana leva em consideração os fatores de desempenho na avaliação das probabilidades de erro humano através da especificação da PEH como uma função de possíveis valores assumidos pelos FDs.

2.2.5 Árvores de Eventos de Erros Humanos

As árvores de eventos de erros humanos constituem a ferramenta básica dentro da metodologia usada por várias técnicas de ACH, as quais serão vistas na próxima seção. A análise da tarefa é inicialmente realizada com o intuito de determinar as formas ou caminhos segundo os quais as ações de um operador podem acarretar em falhas. Estes caminhos são então modelados via árvore de eventos. A Figura 2.3 mostra que uma árvore de eventos é composta por nós que correspondem a uma ação em particular e suas ramificações que representam a falha ou sucesso de um operador em executar esta ação.

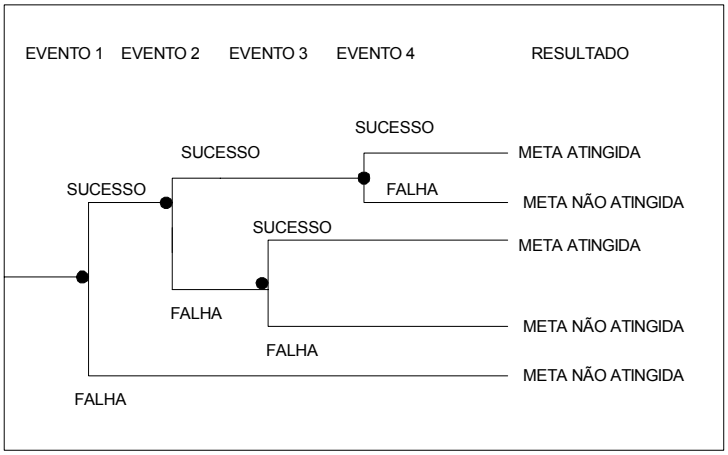


Figura 2.3 Árvore de Eventos

2.2.6 *Probabilistic Risk Assessment* (PRA) *ou Probabilistic Safety Analysis* (PSA)

A PRA ou PSA é um método de análise compreensível, estruturado e lógico, que ajuda a identificar e avaliar o risco em sistemas de tecnologia complexa e ainda contribui para melhorias tanto na segurança quanto no desempenho, baseado em uma análise de custo - beneficio (Stamatelatos, 2002).

A PRA ou PSA possui duas funções gerais importantes, são elas (Reason, 1990):

- Identificar o potencial de risco significante e indicar como poderia ser evitado;
- Quantificar o potencial de risco identificado.

A PRA ou PSA envolve os seguintes passos (Reason, 1990):

- Identificar o potencial de risco do sistema;
- Identificar eventos iniciadores perigosos;
- Estabelecer as possíveis seqüências que poderiam seguir vários eventos iniciantes usando árvore de eventos;

- Quantificar cada seqüência de eventos. Isto envolve dados ou julgamento a respeito de dois aspectos: a freqüência do evento iniciante e a probabilidade de falha ou demanda relevante do sistema de segurança;

- Determinar o risco geral do sistema. Este passo deverá ser em função de todas as possíveis seqüências de acidentes e suas conseqüências.

3. TÉCNICAS DE ANÁLISE DE CONFIABILIDADE HUMANA (ACH)

Estas técnicas serão descritas através de três categorias:

- Método
- Esquema de classificação
- Modelo

3.1 Método para ACH

A finalidade do método é providenciar cada passo que é necessário para análise e como eles podem ser organizados. Em outras palavras, o método determina um caminho sistemático para acompanhar alguma atividade (Hollnagel, 1998).

Em análise de retrospectiva, o método descreve como a análise de seqüência de ações pode detectar possíveis e prováveis causas. Em análise de previsão, o método descreve como as conseqüências de um evento iniciante podem ser obtidas e o que pode afetar a propagação da conseqüência (Hollnagel, 1998).

O método deve referir-se ao esquema de classificação, que é responsável pelas categorias usadas para descrever e representar os aspectos essenciais de um evento, que são as possíveis ou prováveis causas. Quando o esquema de classificação aplicado é consistente e uniforme, o método torna-se claro. Desse modo, limita-se as oportunidades para interpretações subjetivas e certas variações. Reduzindo a variabilidade do método, as incertezas diminuem e conseqüentemente, aumenta-se a confiabilidade do mesmo.

Exemplos de métodos usados em confiabilidade humana são: árvore de eventos, árvore de falhas, HAZOP(*Hazard and Operability Analysis*), entre outros.

3.2 Esquema de classificação para ACH

O esquema de classificação tem a finalidade de descrever os detalhes dos eventos e identificar as possíveis causas (Hollnagel, 1998). Este esquema define os modos de erros humanos, ou seja, como os erros humanos são cometidos.

Os fatores humanos são as causas que foram identificadas através da análise de acidentes, os quais têm o propósito de identificar as causas aceitáveis que podem explicar as conseqüências ou efeitos do erro humano.

Exemplos de esquemas de classificação podem incluir: omissão, comissão, diagnóstico incorreto, *mistake*, entre outros.

3.3 Modelo cognitivo para ACH

Em adição ao método e o Esquema de Classificação, é necessário ter um modelo. O modelo deve referir-se aos princípios que governam a ação humana e a forma do desempenho, ou seja, como uma atividade é desenvolvida em termos de desempenho (Hollnagel, 1998).

Embora a cognição seja a parte essencial da ação humana, o modelo não mostra apenas a cognição, mas a cognição e o contexto (Hollnagel, 1996). O modelo é o caminho conveniente para referir-se aos axiomas, suposições, opinião, fatos sobre cognição humana e particularmente sobre como a cognição humana depende do contexto. O contexto envolve as circunstâncias ou condições sobre as quais os eventos ocorrem.

Exemplos de alguns modelos cognitivos:

- *SRK (Skill-based, Rule-based, Knowledge-based)*
- *GEMS (Generic Error Modelling System)*
- *IDA (Information, Decision, Action)*
- *HIP (Human Information Processing)*

O *SKR* foi proposto por Rasmussen (1986) e classifica o desempenho humano em três níveis :

- *Skill-based performance* (ou Desempenho baseado na habilidade);
- *Rule-based performance* (ou Desempenho baseado em regras);
- *Knowledge-based performance* (ou Desempenho baseado no conhecimento).

- Desempenho baseado na Habilidade: refere-se a ações predeterminadas executadas em uma determinada ordem. Neste nível, o comportamento envolve atividades em que o executor desempenha automaticamente. Este nível exige pouca atenção, reage ao estimulo sem atividade cognitiva e apresenta uma pequena variabilidade no desempenho. Como exemplo de um comportamento neste nível pode-se citar: atividade de um trabalhador com bastante prática. Os erros cometidos neste nível são os erros de *lapso* ou *slip.* Erros durante o desempenho baseado na habilidade correspondem a seleções equivocadas de um instrumento, ativação incorreta de um instrumento, ou ordenação incorreta de atividades.

- Desempenho baseado em Regras: refere-se a ações executadas de acordo com regras bem definidas, como se...então... Neste nível, o comportamento envolve o desempenho de procedimentos de rotinas em um ambiente familiar. Este nível usa uma hierarquia de regras memorizadas ou prontamente definidas. A atenção é moderada e com pouco esforço cognitivo. Como exemplo de um comportamento neste nível, pode-se citar: atividade de um trabalhador após um certo período de prática. Os erros cometidos neste nível são os *mistakes.*

Com o desempenho baseado em regras, os erros podem ocorrer porque o executor não está familiarizado com o procedimento ou porque escolheu uma regra errada.

-Desempenho baseado no Conhecimento: requerido em novas situações nas quais o conhecimento de situações análogas é usado conjuntamente com o conhecimento analítico para a definição e execução de ações a serem seguidas. Neste nível, o comportamento envolve atividades em eventos específicos, ou seja, eventos em que o executor não está habituado. Portanto, exigem do mesmo um maior esforço mental e muita atenção. Como exemplos de comportamentos neste nível pode-se citar: solução de problemas, seleção de metas e planejamento, atividade de trabalhadores principiantes, entre outros. Os erros cometidos neste nível são os *mistakes*. Erros durante o desempenho baseado no conhecimento resultam a partir do conhecimento incompleto ou incorreto.

Inspirado no modelo SRK, Reason (1990) desenvolveu o GEMS. Este modelo consiste de um esquema que mostra as seqüências de comportamentos em situações distintas, ou seja, como o executor muda de nível comportamental devido à ocorrência de um evento (Figura 3.1).

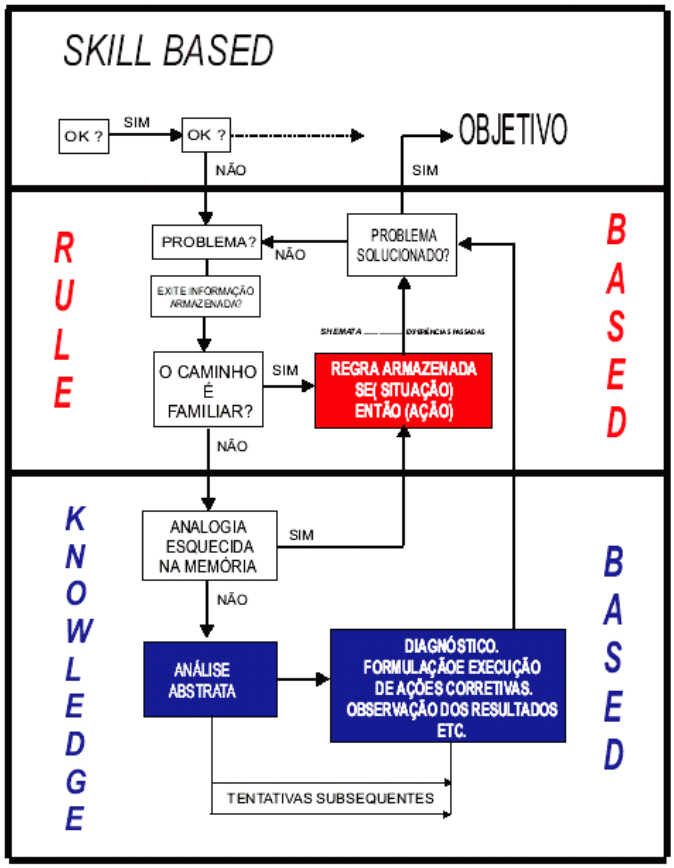


Figura 3.1 GEMS

O modelo I-D-A *(Information-Decision-Action)* foi proposto por Mosleh e Chang em 2003. Este modelo sugere que a informação recebida por um operador, primeiro deve ser percebida pelos sentidos durante a etapa de percepção. Posteriormente, a informação deve passar para o módulo de processamento cognitivo usando a memória de trabalho (informação ativa) e a memória de longo prazo (conhecimento e experiência), os quais levarão o operador a selecionar uma resposta. O modelo é diretamente influenciado por fatores individuais (fatores mentais, fatores fisiológicos…) e fatores externos (fatores de organização, fatores de equipe, entre outros). Finalmente, o feedback permite que o operador verifique se a ação executada como resposta ao estímulo recebido é apropriada ou não, melhor discutido na subseção 3.6.

O modelo *HIP (Human Information Processing)* foi proposto por Wickens em 1992. Este modelo enfatiza que a capacidade de informações é limitada por algumas fontes e restrições, como por exemplo, memória e atenção. Quando os limites são excedidos, as pessoas cometem erros. O tipo de erro vai depender da limitação excedida (memória sensorial, memória perceptiva, memória de trabalho, atenção, seleção de resposta). As fontes e suas capacidades são afetadas pelos FDs, tais como, fadiga, stress, entre outros (Wickens & Hollands, 2000).

Os três elementos essenciais – o modelo, o esquema de classificação e o método estão relacionados como mostra a Figura 3.2.

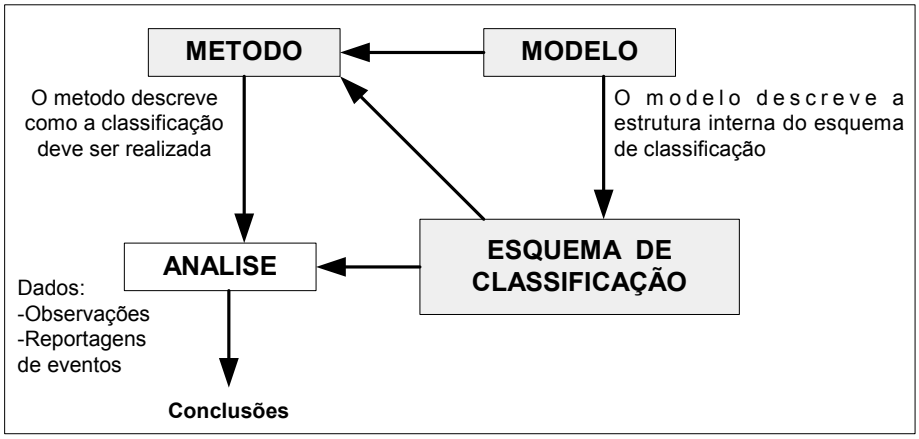


Figura 3.2 Relação entre Modelo, Esquema de Classificação e Método.

O modelo de cognição humana deve fazer o possível para relacionar os modos de erros (Esquema de Classificação – causas ou fatores humanos) com os princípios do modelo relativo ao contexto no qual o comportamento ocorre. O Esquema de Classificação contém as categorias de erros humanos que seguem naturalmente as considerações úteis de um modelo

cognitivo, assim como o entendimento da integração entre sistemas tecnológicos e a organização.

Finalmente o método descreve a relação entre o modelo cognitivo e a classificação das causas.

Os dados (reportagens de eventos e/ou observações), como indicado na Figura 3.2, são os *inputs* para análise. Estes dados não aparecem por acaso, mas devem ser especificados e coletados. Portanto, os dados dependem de suposições inerentes ao esquema de classificação. Em casos, onde o propósito da análise é fazer previsões, cada dado quantitativo ou qualitativo são importantes como bases para previsões (Hollnagel, 1996).

No tópico seguinte será feita uma descrição de algumas técnicas de ACH, e cada uma delas é descrita com referência aos três elementos abordados acima (Método, Esquema de Classificação e Modelo).

3.4 Técnicas de ACH de 1ª geração

As técnicas de ACH de 1ª geração surgiram em 1975. Desde então, várias técnicas foram publicadas. Estas técnicas podem ser vistas na Tabela 3.1 com seus respectivos autores e ano de publicação, bem como outros autores que contribuíram com algumas observações importantes sobre as mesmas. Algumas destas técnicas receberam mais atenção por terem sido as mais citadas na literatura, e com exceção de um delas, a AIPA, que apesar de não ter sido muito citada, foi a primeira a ser desenvolvida e por isso incluiu observações importantes com algumas características fundamentais das técnicas de 1ª geração. A AIPA representa o início de uma tentativa de melhor retratar o comportamento humano. Esta tentativa pode ser encontrada em praticamente todas as outras técnicas desenvolvidas posteriormente. Estas técnicas são apresentadas na Tabela 3.2 (Hollnagel, 1998).

Tabela 3.1 Técnicas de ACH de 1ª geração

	Kirwan(1994)	*Gertman & Blackman (1994)*	*Spurgin & Moieni(1991)*	*Swain (1989)*	*Hane et al.(1989)*	*Lucas (1998)*
Time-dependent accident Sequence Analysis (Apostolakis, 1984)		*		*		
Simulator data (Beare et al., 1983)		*				
Expert estimation (Comer et al.1984)		*		*	*	*
HAP-Human Action Probabilities (Dougherty, 1981)		*				
SHERPA-Systematic Human Error Reduction and Prediction Apprcach (Embrey, 1986)	*					
ORCA-Operator Reliability Calculation and Assessment (Dougherty & Fragola, 1988)					*	
SLIM/MAUD-Success Likelihood Index Method/Mult-Atribbute Utility Decomposition (Embrey et al. 1984)		*	*	*	*	*
AIPA-Accident Investigation and Progression Analysys (Fleming et al. 1975)			*			
Fullwood's method (Fullwood & Giulbert, 1976)		*				
TRC-Time-Reliability Correlation (Hall et al. 1982)				*		
HCR-Human Cognitive Reliability (Hannaman et al. 1984)		*	*	*	*	*
JHEDI-Justification of Human Error Data Information (Kirwan, 1990)						*
SHARP- Systematic Human action Reliability Procedure (Hannaman & Spurgin, 1984)		*	*			
Variation Diagrams (Leplat & Rasmussen, 1987)	*					
Tree of Causes (Meric et al. 1976)	*					
Murphy Diagrams (Pew et al. 1981)	*					
STAHR-Socio-Technical Assessment of Human Reliability (Phillips et al. 1983)		*	*		*	*
CM - Confusion Matrix(Postash et al. 1981)	*	*	*		*	
Human Problem Solving (Rouse, 1983)		*				
MSFM-Multiple-Sequential Failure Model (Santana et al. 1985)		*	*			
MAPPS-Maintenance Personnel Performance Simulation (Siegel et al. 1984)		*	*		*	*
Licensee Event reports (Speaker et al. 1982)		*				
ASEP-Accident Sequence Evaluation Procedure (Swain,1987; Gore et al.1995)			*		*	*
THERP-Technique of Human Error Rate Prediction (Swain & Guttman, 1983)		*	*	*	*	*
SRM-Sandia Recovery Model (Weston et al. 1987)		*		*	*	
HEART-Human Error Assessment and Reduction Technique (Williams, 1988)						*
Speed-Accuracy trade-of (Woods et al. 1984)		*				
SAINT-Systems Analysis of Integrated Networks of Tasks (Wortman et al. 1978)			*			*
OAT-Operator Action Trre (Wreathall, 1982)	*	*	*	*		

Fonte: HOLLNAGEL, E. Cognitive Reliability and Error Analysis Method. Elsevier Science: England, 1988. p. 123

Tabela 3.2 Seleção de técnicas de ACH de 1ª geração

	Kirwan(1994)	*Gertman & Blackman (1994)*	*Spurgin & Moieni(1991)*	*Swain (1989)*	*Hane et al.(1989)*	*Lucas (1998)*
AIPA-Accident Investigation and Progression Analysys (Fleming et al. 1975)			x			
CM- Confusion Matrix(Postash et al. 1981)	x	x	x		x	
OAT-Operator Action Trre (Wreathall, 1982)	x	x	x	x		
STAHR-Socio-Technical Assessment of Human Reliability (Phillips et al. 1983)		x	x		x	x
THERP-Technique of Human Error Rate Prediction (Swain & Guttman, 1983)		x	x	x	x	x
Expert estimation (Comer et al.1984)		x		x	x	x
SLIM/MAUD-Success Likelihood Index Method/Mult-Atribbute Utility Decomposition (Embrey et al. 1984)		x	x	x	x	x
HCR-Human Cognitive Reliability (Hannaman et al. 1984)		x	x	x	x	x
MAPPS-Maintenance Personnel Performance Simulation (Siegel et al. 1984)		x	x		x	x

Fonte: HOLLNAGEL, E. Cognitive Reliability and Error Analysis Method. Elsevier Science: England, 1988. p. 124

As técnicas de ACH de 1ª geração são assim chamadas por abordarem algumas características comuns, as quais serão comentadas a seguir.

3.4.1 *Accident Investigation and Analysis* (AIPA)

Esta técnica foi desenvolvida em 1975 com o objetivo de estimar a probabilidade do operador responder a situações em que os reatores *Gás-Cooled* encontravam-se em altas temperaturas. A finalidade do modelo AIPA era determinar a probabilidade de encontrar o tempo médio de um operador responder a um evento (Hollnagel, 1998).

AIPA inclui as seguintes suposições (Hollnagel, 1998):

- Para um intervalo de tempo entre 0,2 a 4 segundos, o operador tem probabilidade 0 de reagir instantaneamente;
- Dado um tempo suficiente, o operador poderia eventualmente realizar alguma ação;
- Se o operador perceber que as primeiras ações foram insuficientes, ele poderia fazer algumas correções para que a condição ideal fosse atingida.

O esquema de classificação fundamenta-se na distinção entre sucesso e falha.

O modelo do operador é basicamente visto como um *Black-Box,* pois emite uma possibilidade de sucesso, mas o seu mecanismo é completamente desconhecido e não discute explicitamente a questão dos FDs (Hollnagel, 1996).

3.4.2 *Confusion Matriz* (CM)

Confusion Matrix é uma técnica usada para estimar a probabilidade do operador não diagnosticar corretamente um evento iniciante. Este modelo normalmente inclui todas as ações realizadas durante uma seqüência de respostas automáticas, mas exclui ações incorretas que ocorreram externamente à operação, como por exemplo, os erros cometidos nas atividades de teste e manutenção (Hollnagel, 1998).

O método trata de eventos que apresentam características semelhantes. Esta técnica foi criada para evitar que operadores diante de eventos de acidentes realizem diagnósticos errados devido às semelhanças dos mesmos.

A CM é construída listando os eventos similares iniciantes nos eixos verticais e horizontais de uma matriz. A similaridade dos indícios e sua freqüência esperada são analisadas e o resultado é utilizado para classificar cada evento iniciador com relação à probabilidade dele ser confundido com outro evento iniciador. Uma vez que o *rank* é realizado, probabilidades baseadas em dados de simuladores e outras fontes são designadas para cada diagnóstico incorreto, e assim modificado para melhorar a qualidade da operação da sala de controle e também o treinamento do operador.

O Esquema de classificação é constituído de erros cometidos nos diagnósticos (Hollnagel, 1998).

Quanto ao modelo, a estimativa é realizada sem considerar a influência cognitiva do operador, uma vez que a probabilidade de diagnosticar mal um evento é estimada do grupo (Hollnagel, 1998).

Em relação aos FDs, não são explicitamente avaliados. Embora, eles devam ser contabilizados indiretamente quando se considera a probabilidade de confundir dois eventos iniciantes (Hollnagel, 1998).

Este método não providencia um tratamento adequado para tratar ações humanas, já que apenas avalia manifestações decorrentes de diagnósticos incorretos de eventos iniciantes, não avaliando assim outros possíveis e esperados erros decorrentes de outros contextos.

3.4.3 *Operator Action Tree* (OAT)

Esta técnica foi desenvolvida por Jonh Wreathall em 1982. A OAT descreve um evento baseando-se em três estágios: (1) observação do evento, (2) diagnóstico do evento, (3) reação ao evento ou resposta (Hollnagel, 1998).

Assume-se nesta técnica que os erros que podem ocorrer durante a terceira fase não são muitos importantes e que os erros referentes ao segundo estágio são os mais importantes, isso porque neste estágio faz-se o uso de funções cognitivas.

O método está associado com os seguintes passos (Hollnagel, 1998):

1. Identificar as funções de segurança da planta através de árvores de eventos;
2. Identificar as ações específicas de um evento, as quais exigem segurança;
3. Identificar o display que apresenta indicações de alarme relevantes e o tempo disponível para os operadores tomar decisões atenuadoras apropriadas;
4. Representar o erro através de árvore de falhas ou de eventos;
5. Estimar as probabilidades de erro.

A probabilidade de erro é calculada em função do tempo. Portanto, determina-se os intervalos, os quais são definidos através da diferença entre o tempo em que a informação é recebida e o tempo de resposta.

Quanto ao esquema de classificação, a OAT representa as ações do operador através de uma árvore de eventos. (Hollnagel, 1998).

Em relação ao modelo, está baseado no TRC (*Time-Reliability Correlation*), o qual expressa a probabilidade do operador não responder ou de não responder corretamente a um evento em função do tempo.

A metodologia utiliza árvore de eventos ou árvore de falhas para representação de erros. Quanto ao esquema de classificação, ele é definido em termos de sucesso e falha.

3.4.4 *Sócio -Technical Assessment of Human Reliability* (STAHR)

STAHR é uma técnica que difere um pouco das outras técnicas de ACH de 1ª geração, pois consiste de um diagrama de influência que mostra uma estrutura causal, ou seja, ele tenta relacionar os efeitos de uma situação com as suas respectivas causas. Este diagrama está representado na Figura 3.3.

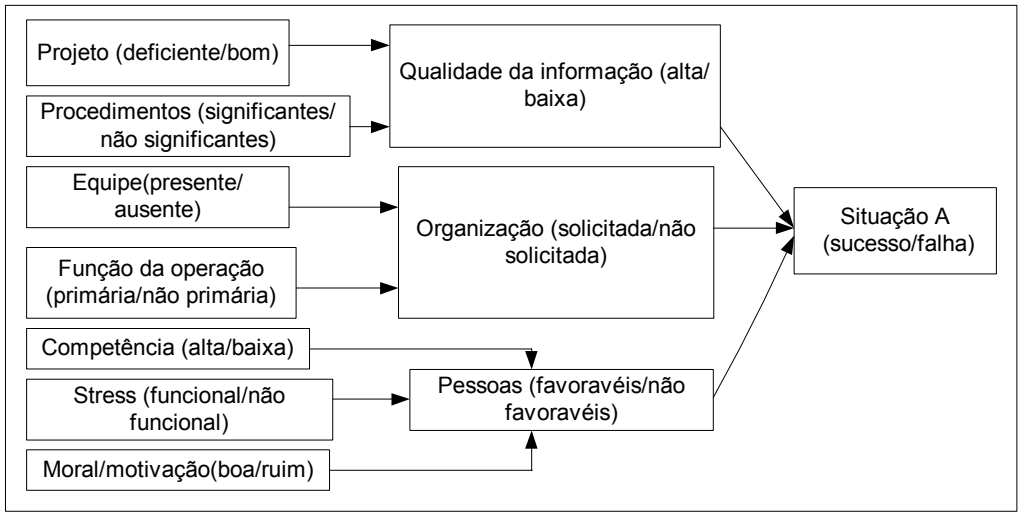


Figura 3.3 Diagrama de influência do STAHR

O método refere-se explicitamente para o diagrama de influência e está resumido nos seguintes passos:

1. Descrição de todos os eventos condicionantes relevantes;
2. Definição do evento objetivo;
3. Escolha do evento de nível intermediário no diagrama de influência e avaliação dos pesos de cada evidencia dos sub-níveis de influência;
4. Avaliação dos pesos para cada nível, considerando a influência condicional;
5. Avaliação das probabilidades do evento topo dada à influência condicional dos outros níveis;
6. Comparação dos resultados com o julgamento holístico dos avaliadores, revisando assim as avaliações quando necessário para reduzir as discrepâncias entre o julgamento holístico e resultado do modelo;
7. Iteração dos passos acima, quando necessário, até que os avaliadores tenham finalizado seus julgamentos;
8. Análise de sensibilidade para algum grupo que permaneceu em desacordo. Se não existe desacordo, então as estimativas são pontuais. Se existe, então, as estimativas são realizadas através de escalas.

Esta técnica não apresenta um esquema de classificação, pois poucos erros são representados neste diagrama em relação aos representados nas outras técnicas de ACH de 1ª geração. Portanto, não depende muito das árvores de eventos do PSA.

Esta técnica não providencia nenhum tratamento explícito para o erro humano, pois não está baseada nos princípios de decomposição. A STAHR não discute a questão dos FDs (Hollnagel, 1998).

3.4.5 *Thecniqui for Human Error Prodiction* (THERP)

A THERP é provavelmente a mais conhecida das técnicas de ACH de 1ª geração. O desenvolvimento da THERP começou em 1961, mas o principal trabalho foi realizado durante a década de 70 resultando assim no *Handbook of Human reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power plant Application*, cuja versão final pertence a Swain & Guttman (1983).

A metodologia THERP é baseada em árvores de eventos. Cada nó na árvore de evento corresponde a uma ação em particular e as ramificações representam a falha ou sucesso do operador em executar essa ação. Através do uso do banco de dados fornecidos pela THERP, é possível estimar as probabilidades de falha e sucesso de cada ação (um nó na árvore de eventos). Posteriormente, as probabilidades são ajustadas com a finalidade de considerar os fatores de desempenho (FDs) relevantes para um contexto específico (Hollnagel, 1998).

As probabilidades de erro humano também são ajustadas para considerar as possíveis dependências entre a ação atual e ações anteriores. Além do mais, a THERP contém um módulo de incerteza para as probabilidades de erro humano e um modelo de diagnóstico para a modelagem de tempo exigido para que o operador realize diagnósticos corretos (Swain & Guttman, 1983).

Quanto ao esquema de classificação utilizado, as causas do erro humano foram descritas em termos de omissão e comissão. O principio do esquema de classificação é estabelecer uma série de escolhas binárias (sucesso ou falha) para a necessidade de cada ação. Porém, o domínio da ACH através da árvore de eventos significa que o esquema de classificação e o modelo ficam limitados, já que a árvore de eventos possibilita apenas escolhas binárias. Portanto, torna-se difícil para este modelo introduzir modos de erros mais complexos.

A THERP em seu processo quantitativo segue os seguintes passos:

1. Decomposição das tarefas em elementos ou ações seqüenciais de uma tarefa;
2. Probabilidade de erro humano (PEH) nominal para cada elemento de tarefa;
3. Determinação dos FDs para cada elemento;
4. Cálculo dos efeitos de dependência entre tarefas;
5. Modelação via árvore de eventos para ACH;
6. Quantificação total da PEH.

No segundo passo, a PEH é determinada através do capitulo 20 do *Handbook of Human reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power plant Application* (Swain & Guttman, 1983). Este capítulo é composto de 27 tabelas, as quais apresentam uma descrição dos erros associados a probabilidades de erros e fatores de erros. O especialista utiliza estas tabelas para determinar a PEH para cada elemento de tarefa. Porém, problemas podem ocorrer quando os elementos de tarefa não estão representados nas tabelas.

Este método usa uma confiabilidade convencional aproximada com modificações apropriadas para melhorar a variabilidade, imprevisibilidade e a interdependência do desempenho humano quando comparado com o desempenho de equipamentos.

A quantificação típica aproximada está baseada na opinião do especialista e no método de análise de decisão. Estes métodos estão baseados em modelos matemáticos, os quais conectam a probabilidade do erro a uma situação especifica com fatores que influenciam esta probabilidade. Estes fatores são tipicamente os FDs. O desenvolvimento do modelo e a quantificação dos parâmetros envolvidos são realizados pelo especialista.

A probabilidade de erro humano (PEH) na THERP pode ser calculada como mostra a equação abaixo (Hollnagel, 1998):

$$P_{EA} = P_{OE} \times \sum_{k=1}^{m} FD_K \times W_K \qquad \textit{Equação 3.1}$$

Onde:

P_{EA} : Probabilidade de erro numa determinada ação especifica;

FD_k : Valor numérico correspondendo aos fatores de desempenho k;

P_{OE} : Probabilidade especifica básica (nominal) do operador errar numa ação específica;

W_K : Peso ou importância dos *FDs* ;

m: número dos FDs

As considerações críticas foram relacionadas com as seguintes suposições :

- Dados empíricos insuficientes;
- Probabilidade nominal ou básica (condições ideais), ou seja, não considera o contexto envolvido;
- Os fatores de desempenho são aditivos, ou seja, não é considerada a influência que um fator tem sobre o outro;
- Falta de conformidade e consistência nos julgamentos de especialistas;
- Dados de simuladores, os quais não produzem o contexto ou situação real e sua veracidade e validação não têm sido convincentemente demonstradas;

- Pouca ênfase nos FDs relacionados à administração, a organização e a cultura.

3.4.6 *Expert Estimation* (EE)

Esta técnica utiliza o julgamento do especialista para estimar a probabilidade de erro humano. Existem vários métodos de estimar o julgamento do especialista.

O método descrito na NUREG/CR-2743 mostra um procedimento para fazer uma estimação numérica do julgamento de especialista. Este método pode ser resumido nos seguintes passos:

1. Reunião dos especialistas que irão participar da estimação;
2. Treinamento dos especialistas quanto ao uso de probabilidade e estatística básica;
3. Validar o modelo de probabilidade de erro humano junto aos especialistas;
4. Definir claramente todos os aspectos dos eventos para a avaliação;
5. Providenciar uma escala de probabilidades detalhada o suficiente para que os especialistas possam indicar diferentes probabilidades entre eventos apresentados durante a discussão;
6. Obter as probabilidades numa escala logarítmica;
7. Agregar o julgamento individual para providenciar simples probabilidades, criando assim uma tabela de probabilidades dos especialistas;
8. Transformar as estimativas dos especialistas em PEH, usando um procedimento pré-definido;
9. Usar um dos vários métodos aceitos para estimar a confiabilidade, como por exemplo: ANOVA.

Esta técnica não utiliza explicitamente um esquema de classificação, uma vez que a probabilidade de erro humano é estimada diretamente para uma ação específica. Quanto ao modelo, não apresenta detalhes claros, assim como também não apresenta um tratamento adequado dos FDs, já que é sugerido apenas quantitativo e está presumivelmente incluído no julgamento do especialista.

3.4.7 *Success Likelihood Index Method/ Mult-Atribbute Utility Decomposition* (SLIM/MAUD)

É uma técnica para estimar a PEH através de um procedimento iterativo computacional baseado no MAUD, cuja função é obter e organizar a avaliação do especialista utilizando uma estrutura SLIM. Esta técnica está baseada na suposição de que a probabilidade de erro está associada aos FDs, os quais incluem, características individuais, características ambientais, características da tarefa, entre outras. Uma outra estimativa é que o especialista pode estimar

taxas de erro ou selecionar valores razoáveis suportáveis que permitam ser estimados através de um *software* (Hollnagel, 1998).

Para a análise, são providenciados limites inferiores e superiores da taxa de erro para uma tarefa particular.

A aproximação SLIM/MAUD utiliza árvore de falhas e de eventos.

O método está sumariamente descrito nos passos abaixo (Hollnagel, 1998):

1. Identificar competentes especialistas para revisar a tarefa, ou seja, especialistas que procuram discutir com detalhes a tarefa e definir o caminho pelo qual o erro pode ocorrer;
2. Identificar os FDs que estão influenciando os modos de erro humano;
3. Documentar as definições para os vários FDs;
4. Determinar os pesos de cada FD;
5. Avaliar cada tarefa por indicar um valor numérico na escala de 0 a 100, ou seja, é a opinião do especialista com relação à chance de ocorrência;
6. Calcular o *Success Likelihood Index (*SLI) através da soma do produto de cada taxa associada a seu peso;
7. Utilizar uma equação de calibração para transformar valores ancorados de especialistas;
8. Estabelecer limites de incerteza para estimativas diretas de limite inferior e superior dos especialistas.

A classificação dos modos de erros é realizada pela opinião do especialista. Portanto, não está explicitamente descrita na aproximação. Assim, o SLIM/MAUD não apresenta um esquema de classificação além dos que podem ser encontrados em outras técnicas de ACH de 1º geração. Quanto ao modelo do operador, esta técnica é similar às técnicas CM e EE por confiar num modelo implícito idealizado por especialistas ao executarem seus julgamentos. O fato dos especialistas avaliarem as características de uma situação superficialmente, ou seja, emitirem uma probabilidade de sucesso para uma determinada tarefa, não constituem evidências de que existe um entendimento adequado dos fatores de desempenho que influenciam as ações, tão pouco da relação causal entre eles.

Esta técnica considera a influência dos FDs apenas de maneira quantitativa. Como não existe um modelo para as ações do operador, claramente não se pode descrever explicitamente como os FDs exercem suas influências. A PEH no SLIM/MAUD pode ser calculada como mostram as equações abaixo (Kumamoto, 1996):

O SLI é calculado pela equação 3.2.

$$SLI = \sum_i W_i \times R_i$$ *Equação 3.2*

Onde:

W_i : Peso atribuído a cada FD;

R_i : Probabilidade de cada FD.

Para um dado SLI, a probabilidade de erro humano (PEH) é estimada pela equação 3.3.

$$PEH = 10^{(a \times SLI)+b}$$ *Equação 3.3*

Onde:

a e b são constantes determinadas para duas ou mais tarefas para as quais as PEHs são conhecidas.

3.4.8 *Human Cognitive Reliability* (HCR)

A técnica HCR tem o propósito de quantificar a probabilidade de resposta dos operadores em função do tempo, onde este é determinado de acordo com a instabilidade do sistema, ou seja, quando o sistema se encontra em meio a uma situação de acidente (Hollnagel, 1998).

Esta aproximação refere-se a diferentes tipos de processamentos cognitivos, os quais estão baseados no SRK (tópico 3.3). HCR assume que os três tipos de processamento cognitivo possuem diferentes tempos médios de resposta.

O método consiste dos seguintes passos:

1. Identificar as ações que devem ser analisadas pela ACH, usando um método de análise da tarefa;
2. Classificar os tipos de processamentos cognitivos exigidos por cada ação;
3. Determinar o tempo médio de resposta para um grupo desempenhar uma determinada tarefa;
4. Ajustar o tempo médio de resposta ($T_{1/2}$) para contabilizar os fatores que estão influenciando no desempenho;
5. Determinar o tempo médio nominal de resposta para cada ação ($\overline{T}_{1/2}$), o qual é definido como o tempo correspondente à probabilidade de 50% da tarefa ser realizada com sucesso sob condições nominais.

O $\overline{T}_{1/2}$ é obtido através de um simulador, análise da tarefa ou julgamento de um especialista. Para contabilizar os efeitos dos fatores de desempenho, tais como: stress, experiência do operador, arranjo dos equipamentos na sala de controle, entre outros, o $T_{1/2}$ é ajustado de acordo com o coeficiente (K_i) correspondente a cada fator.

O $T_{1/2}$ é calculado de acordo com a equação 3.4 (Kumamoto,1996).

$$T_{1/2} = (1+K_1)\,(1+K_2)....(1+K_n)\overline{T}_{1/2}$$ *Equação 3.4*

A técnica HCR utiliza um esquema de classificação estendido por adicionar à arvore de ações binárias uma outra categoria, que é a categoria de "não responder" a uma determinada solicitação do sistema. Esta categoria pode ser interpretada como resultado de baixa cognição, ou seja, incapacidade de responder em um determinado tempo definido.

Como a HCR foi criada em 1984, quando a estrutura SRK ainda estava em desenvolvimento, foi muito cedo para HCR detalhar o seu esquema de classificação, enriquecendo os modos de erros de forma qualitativa. Portanto, o tratamento das ações apresenta o mesmo nível de detalhamento usado nas outras técnicas de ACH de 1ª geração.

O modelo consiste em classificar o tipo de processamento cognitivo e distinguir entre três curvas *time-reability,* as quais providenciam diferentes valores para a probabilidade de "não responder" a cada tipo de processamento cognitivo (Hollnagel, 1998). A HCR é provavelmente a técnica de ACH de 1ª geração que mais se referiu ao modelo cognitivo.

Quanto aos FDs, não é explicado como eles exercem sua influência no desempenho, pois eles são ajustados de forma totalmente quantitativa, sem considerar a relação ente eles e os possíveis mecanismos de processamento da informação que a estrutura SRK pode implicar.

3.4.9 *Maintenance Personnel Performance Simulation* (MAPPS)

Esta técnica foi desenvolvida para providenciar uma ferramenta para análise da atividade de manutenção em plantas nucleares (Hollnagel, 1988).

O objetivo do método é reunir todas as informações necessárias sobre os dados de confiabilidade humana no desempenho da manutenção para servirem como *inputs* da simulação. Estes *inputs* incluem: a definição da sub-tarefa, seleção da lista de sub-tarefas genéricas e especificação de sub-tarefas genéricas.

Quanto ao esquema de classificação, não é utilizado explicitamente.

Em relação ao modelo cognitivo, esta é única técnica capaz de simular o desempenho do grupo. Portanto, para modelagem do MAPPS é necessário relatar o desempenho do grupo, em vez do desempenho individual. Basicamente, o desempenho está baseado no cálculo das exigências intelectuais e motoras da tarefa e da habilidade do grupo em executar a tarefa, incluindo os efeitos do stress. O modelo é estocástico e pode não ser considerado como um modelo do operador no sentido usual.

3.4.10 Características gerais das Técnicas de ACH de 1ª geração

Hollnagel (1998) resumiu as principais técnicas de ACH de 1ª geração segundo os seguintes critérios de análise:

- Se a técnica inclui um esquema de classificação para os erros humanos;
- Se o esquema de classificação foi baseado em um modelo de identificação da ação e cognição do operador;
- Se a técnica inclui como os FDs influenciam no desempenho;
- Se a técnica inclui explicitamente uma metodologia e se esta faz referências ao esquema de classificação.

A tabela 3.3 mostra um resumo das técnicas de ACH de 1ª geração em relação ao método, modelo cognitivo e esquema de classificação, comentados no tópico 3.4.

Tabela 3.3 Resumo das técnicas de ACH de 1ª geração

TÉCNICA ACH	*DESCRIÇÃO DO MÉTODO*	*ESQUEMA DE CLASSIFICAÇÃO*	*MODELO DO OPERADOR*	*EFEITO DOS FDs*
AIPA	*Não foi muito detalhado*	*Sucesso/Falha*	*Black Box*	*Não discute*
OAT	*Procedimento detalhado*	*Diagnósticos Incorretos (sucesso/Falha)*	*Modelo de Estágio Simples*	*Não discute*
CM	*Princípios básicos descritos*	*Diagnósticos Incorretos*	*Nenhum*	*Não discute*
STAHR	*Princípios básicos descritos*	*Nenhum*	*Nenhum*	*Sugerido por um diagrama de influencia*
THERP	*Procedimento detalhado*	*Omissão, Comissão e outras versões*	*Versões antigas referentes ao SRK*	*Sugerido apenas Quantitativamente*
EE	*Princípios básicos Descritos*	*Não explicitamente Definido*	*Nenhum*	*Sugerido implicitamente e quantitativamente*
SLIM / MAUD	*Procedimento detalhado*	*Não explicitamente Definida*	*Nenhum*	*Sugerido apenas Quantitativamente*
HCR	*Procedimento detalhado*	*Sucesso/Falha/não responde*	*SRK*	*Sugerido apenas Quantitativamente*
MAPPS	*Não explícito, embutido em simulação*	*Não explicitamente definido*	*Não explicitamente definido.Possível-mente um modelo para desempenho de grupo*	*Não explicitamente descrito*

As características mais notáveis das técnicas de ACH de 1ª geração estão enumeradas e comentadas a seguir:

1) Em algumas técnicas, a confiabilidade humana é similarmente descrita como confiabilidade de *hardware*, pois a mesma metodologia de confiabilidade convencional é também empregada em ACH, com exceção de que em ACH, os equipamentos são substituídos por seres humanos (Kim, 2000).

A aproximação THERP usou uma tecnologia de confiabilidade convencional modificada para obter uma maior variabilidade e interdependência do desempenho humano quando comparada com desempenho de equipamentos (tópico 3.4.5).

A suposição de que a confiabilidade humana pode ser similarmente descrita como confiabilidade de equipamentos não é mais aplicada, especialmente devido à exigência de uma atividade cognitiva de um modelo avançado em interface homem-sistema.

2) As técnicas de ACH de 1ª geração foram tipicamente desempenhadas com o envolvimento da PRA. Devido a essa dependência, a ACH ficou limitada para ações humanas que estão incluídas na arvore de eventos da PRA.

Kim (2000) comenta que a qualidade da ACH nas técnicas de 1ª geração depende da competência e previsão das PRAs.

3) Representação binária da ação humana: como os equipamentos de *hardware* são representados como sucesso ou falha para desempenhar a função exigida. Similarmente as técnicas de ACH de 1ª geração representam para cada ação humana uma probabilidade de sucesso ou falha.

A representação binária através de árvore de eventos, cuja lógica está baseada numa seqüência de eventos e como eles evoluem no tempo. Desta forma, a árvore de eventos oferece um melhor entendimento do sistema como um todo, além de ajudar na identificação das falhas, erros e tarefas, as quais podem ter um grande impacto sobre a falha ou sucesso do operador. Porém, a árvore de eventos apresenta algumas desvantagens, principalmente na modelagem de erros humanos, tais como, pode se tornar rapidamente inviável para uma seqüência longa, raramente modela a complexidade da conduta humana e freqüentemente fornece somente uma simplificação grosseira. Cada passo na árvore de eventos é tratado como escolhas binárias, onde cada nó apenas pode representar sucesso ou falha. Diante deste contexto, Hollnagel (1998) comenta que uma árvore de eventos binária não pode representar um "comportamento ineficiente", o qual é definido como aquele comportamento que não é completamente incorreto nem completamente adequado. Esta é uma limitação obvia para o esquema de classificação desenvolvido com o propósito de avaliar a confiabilidade humana.

4) Erros de omissão e comissão: assim como a TSP ou PRA foi realizada pela descrição de como os equipamentos respondem em situações anormais em analise de confiabilidade convencional, as técnicas de ACH de 1ª geração também foram descritas pela variedade de ações humanas executadas incorretamente, comumente referida por erros humanos. Segundo Kim (2000), estas técnicas enfatizaram os erros de omissão e comissão porque estes erros poderiam ser observados, porém outros tipos de erros não foram comentados.

Existe uma grande necessidade de um maior detalhamento destes erros, pois os erros de omissão, por exemplo, apresentam uma ampla abrangência em relação as suas causas. Estes erros podem ser cometidos pelos próprios executores ou pelos responsáveis pelo planejamento (tópico 2.1.1).

5) Pouca informação dos aspectos cognitivos das ações humanas: ações humanas de uma ou outra maneira são todas de valor cognitivo (Kim, 2000).

Portanto as ações humanas nas técnicas de ACH de 1ª geração não podem ser bem entendidas ou analisadas sem fazer referências às características cognitivas humanas.

6) Ênfase na quantificação: foi dada ênfase para quantificar as probabilidades de erros humanos (PEHs) identificadas pela árvore de eventos da TSP ou PRA. Esta quantificação é realizada através dos dados para cálculos das PEHs.

Exemplos de dados considerados na THERP são os seguintes (Hollnagel, 1996):

-Erros de omissão: omissão de um item de uma instrução do procedimento.

-Erros de comissão: leitura incorreta de uma informação.

-Erros de comissão: seleção errada de um comando no painel de controle.

Segundo Kim (2000), alguns desses dados podem ser efetivamente usados apenas em situações onde as ações humanas podem ser relativamente de fácil descrição, ou seja, realizando tarefas simples e diante de um ambiente em operação normal; mas em situações mais complexas, os dados podem não ser viáveis. Isto justifica a escassez de dados em determinadas circunstâncias. Diante desta dificuldade, a maioria das técnicas de ACH de 1ª geração utilizou o julgamento de especialistas e simuladores, os quais apresentaram problemas, tais como: falta de conformidade e consistência no julgamento de especialistas e falta de veracidade e validação, com também aproximação inadequada da situação real nos dados de simuladores.

7) Tratamento indireto do contexto: as ações humanas que necessitam ser analisadas são identificadas na arvore de eventos da TSP ou PRA e a tarefa de interesse é então decomposta em sub-tarefas, sobre as quais são discutidas as probabilidades de erros humanos. A análise da tarefa é finalizada através do acréscimo dos FDs. A atribuição numérica ao fator depende do grau de importância que o mesmo apresenta para uma determinada tarefa específica.

Este tratamento, entretanto, não trata da relação existente ente os fatores de desempenho, como por exemplo, a influência que a carga de trabalho e a pressão no tempo para realização de uma tarefa têm na fadiga.

As técnicas de ACH de 1ª geração apresentadas podem ser desenvolvidas com relativa facilidade para sistemas tecnológicos, porém para modelar o comportamento humano são

extremamente difíceis, apresentando assim vários problemas como os que foram expostos nos parágrafos antecedentes. Diante deste contexto, surgiu a grande necessidade de outras aproximações do comportamento humano para a ACH. Então, surgiram as técnicas de ACH de 2ª geração.

3.5 Técnicas de ACH de 2ª geração

Com o objetivo de superar os problemas apresentados no tópico 3.4, várias técnicas de ACH surgiram após 1990, as quais constituíram as técnicas de ACH de 2ª geração.

A seguir será feita uma descrição das principais técnicas de ACH encontradas na literatura.

3.5.1 *Cognitive Environment Simulator* (CES)

CES é uma ferramenta desenvolvida para simulação computacional analítica. Esta ferramenta foi utilizada para explorar a formação intencional humana, ou seja, utilizada para determinar como o operador responde em uma dada situação (Hollnagel, 1998).

Os *inputs* para o CES são uma série de intervalos de valores que descrevem o estado ou comportamento do sistema. Estes valores são gerados por processo de simulação e providenciados via display. Os valores lidos no display são utilizados para produzir a intenção para ação em uma dada situação. Esta intenção retorna para o processo do simulador, o qual gera novos valores para o CES.

Woods et al. (1998) *apud* Hollnagel (1998) comenta que o CES desempenha três tipos de atividades durante uma seção, são elas:

1) O estado do sistema é monitorado via display;

2) As explanações são geradas para contabilizar as observações, particularmente quando algum evento acontece. Estas explanações fazem uso de um conhecimento detalhado baseado no processo;

3) O CES finalmente seleciona respostas apropriadas (intenções para ação). Cada ação tem o objetivo de corrigir alguma anormalidade do sistema, adaptar respostas pré-planejadas para circunstâncias incomuns.

Como CES gera intenção na ação em lugar das próprias ações, ele não tem uma classificação de erros ou ações errôneas explicitas. Ele obviamente pode gerar intenções que são erradas, mas a classificação é mais sutil que a classificação binária normalmente usada nos modelos de ACH 1ª geração. O CES não providencia estimativas de probabilidades de ações especificas e não existe a necessidade de classificar ações como falhas ou sucessos. O CES gera várias maneiras de ações que o operador provavelmente desempenhará sob

diferentes condições de operação. A classificação das ações é melhor em termos de possíveis estratégias para solução de problemas.

A qualidade da intenção depende de estratégias usadas pelo modelo. Portanto, o modelo e o esquema de classificação são inseparáveis.

Segundo Hollnagel (1998), o modelo do operador usado no CES é bem detalhado e é adaptado de um modelo de inteligência artificial. Este modelo pode usar várias estratégias para solucionar problemas.

O CES pode ser visto como uma tentativa de desenvolver uma alternativa para um modelo de ACH. Infelizmente, ele difere muito das práticas estabelecidas na sua época e, portanto não foi facilmente usado. Foi feita uma tentativa para reconciliar o CES com a necessidade do PSA ou PRA, porém esta aplicação demandava consideráveis esforços. Além do mais, o CES também dependia fortemente de recursos computacionais, os quais naquela época não estavam disponíveis para práticas de ACH.

3.5.2 *Intention Event tree System* (INTENT)

O surgimento do INTENT deve-se ao reconhecimento de que a THERP trata poucos "erros de comissão", nomeados: erros de seleção e erros de execução, e da necessidade de introduzir outros tipos de erros, particularmente, "erros de intenção". Segundo Hollnagel (1998), a metodologia da INTENT é basicamente a mesma aplicada na THERP e descreve apenas os passos necessários para determinar e quantificar as probabilidades para erros de intenção, os quais são:

1) Compilar os erros de intenção;

Os erros de intenção foram obtidos de duas fontes de dados: *Nuclear Computerised Librar for Assessing Reactor Reliability* (NUCLARR) e *Licensee Event Reports* (LER). O INTENT utiliza 20 tipos de erros diferentes de intenção agrupados em 4 categorias: ações de conseqüências, jogo de respostas, atitudes e dependências de recursos.

2) Quantificar os erros de intenção;

A quantificação foi realizada por um método de estimação direto, o qual incluem a determinação de limites inferiores e superiores da PEH, assim como os FDs e seus pesos associados. Especialistas estimaram a influência de cada FD nos 20 tipos de erros de intenção.

3) Determinar a composição dos FDs;

Cada FD foi analisado para um cenário específico e sob uma escala de importância de 0 a 5. A composição de cada tipo de erro e seus FDs de influência foi baseada em princípios comuns de multiplicação e soma (tópico 3.4.5, equação 3.1)

4) Determinar a PEH para intenção (tópico 3.4.5, equação 3.1).

O INTENT não apresenta um esquema de classificação para suportar estes erros. Em particular, os erros de intenção não aparecem em outros tipos de classificação, embora, eles incluem "erros", tais como: diagnósticos incorretos, comunicação inadequada e vários tipos de violação. A noção de erros de intenção representa uma perspectiva, em vez de representar completamente causas/modos de erros.

Quanto ao modelo de cognição utilizado, ele faz referências para o modelo GEMS, porém não utiliza consistentemente. Até porque como o INTENT é considerado uma extensão da THERP, ele presumivelmente usa o mesmo modelo de cognição básico.

O INTENT surgiu propositadamente para melhorar a THERP através das providências tomadas para tratar os erros de intenção como um tipo adicional de erros de comissão, porém usando a mesma metodologia. Desta forma, ele não providencia respostas às criticas feitas aos modelos de ACH de 1ª geração.

3.5.3 *Cognitive Event Tree System* (COGENT)

Assim como o INTENT, o COGENT também foi desenvolvido como extensão dos modelos de ACH de 1ª geração. Neste caso, o propósito foi melhorar a árvore de eventos de ACH, já usada na THERP, com o intuito de mostrar vários tipos de "erros cognitivos".

As árvores de eventos nos modelos de ACH de 1ª geração limitavam-se em representar resultados binários de eventos (sucesso ou falha), onde as falhas eram do tipo, omissão e comissão.

Segundo Hollnagel (1998), o COGENT basicamente segue os mesmos princípios da THERP para a construção da árvore de eventos. A inovação é que os nós e ramos da árvore são caracterizados pelo significado de pequenos tipos de erros cognitivos. Porém, o método não descreve como isto pode ser feito.

Gertman (1992*) apud* Hollnagel (1998) comenta que a determinação apropriada da categoria cognitiva exige que a ACH tenha familiaridade com equipamentos da sala de controle, procedimentos, conhecimento do grupo, experiência e entendimento de como o operador se comporta diante do sistema tanto em situações de emergências como também diante da ocorrência de um cenário particular. Percebe-se diante deste comentário que a técnica COGENT depende praticamente do exame do analista.

O esquema de classificação utilizado é uma combinação da estrutura SRK com a distinção entre *slips*, *lapsos* e *mistakes.* Esta combinação resulta em 8 tipos de erros, são eles:

skill-based slip, skill-based lapse, skill-based simple mistake, rule-based slip, rule-based lapse, rule-based mistake, knowledge-based lapse e knowledge-based mistake.

Segundo Hollnagel (1998), o modelo do operador não está explícito, apenas algumas insinuações são feitas em relação aos trabalhos de Rasmussen, Reason, e Norman. Porém considerando que o COGENT é uma extensão da árvore de eventos da THERP, o modelo do operador é similar ao da THERP.

3.5.4 EPRI *Project on Methods for Addressing Human in Safety Analysis*

A estrutura do método é similar àqueles aplicadas nas técnicas de ACH de 1ª geração. Hollnagel (1998) comenta que a diferença está na ênfase dada aos seguintes pontos específicos:

Identificação de expressões de erros:

Esta técnica reconheceu a necessidade de utilizar uma combinação entre os modos de erros, tornando-os mais completos em vez de utilizar apenas os erros de omissão e comissão tradicionais. Assim, várias diferentes expressões surgiram de um mesmo modo de erro. Os erros de diagnósticos, por exemplo, geram diferentes conseqüências, as quais constituem diferentes expressões de erros na árvore de eventos PSA.

Caracterização dos FDs:

Esta técnica também reconheceu claramente que os FDs deveriam ser descritos em um nível relevante para os modos de erros. Assim, os seus efeitos poderiam ser diretamente incluídos na análise qualitativa.

O esquema de classificação apresentou com detalhes os modos de erros e também suas possíveis causas. Os modos de erros foram agrupados de acordo com a estrutura do modelo do operador. Portanto, o esquema de classificação está baseado no modelo do operador.

O modelo cognitivo do operador utilizado na EPRI foi um simples modelo de processamento composto de três módulos: Informação, Decisão e Ação. Foi estabelecida uma notação gráfica usada para explicar as possíveis combinações de processamento de informações que podem corresponder a cada modo de erro.

Segundo Hollnagel (1998), a metodologia da EPRI não foi suficientemente detalhada porque o seu desenvolvimento aponta para uma ferramenta de simulação dinâmica.

3.5.5 Human Interaction Timeline (HITLINE)

Macwan & Mosleh (1994) *apud* Hollnagel (1998) comenta que a técnica HITLINE está baseada em análise simulação para saber como o sistema está operando em determinado

momento. O propósito da análise é gerar automaticamente uma árvore de eventos, providenciando a incorporação de erros de comissão.

Segundo Hollnagel (1998), a metodologia usada, apresenta três passos importantes:

1) Filtragem

O propósito da filtragem é identificar as condições iniciais que estão por trás da árvore de eventos do PSA da HITLINE. As condições iniciais referem-se às expectativas de falhas de *hardware*, instrumentação e operadores.

2) Análise de interação entre operador e o sistema

A interação entre o operador e o sistema é considerada em termos de modos de erros e FDs. Um ponto importante na HITLINE, é que nem todos os modos de erros são igualmente prováveis, mas eles dependem de certas condições. O fato de identificar os prováveis modos de erros dada a ocorrência de algumas condições pré-estabelecidas é uma vantagem em relação às técnicas de ACH de 1ª geração.

3) Incorporação da interação no modelo lógico do sistema

O último passo é incluir a interação e os modos de erros no modelo lógico do sistema. Nos casos, onde o resultado de falhas está além da representação binária da árvore de eventos, vários HITLINES podem ser construídos.

Macwan et al. (1996) *apud* Hollnagel (1998) acrescenta que a simulação pode ser realizada utilizando várias ferramentas disponíveis, como por exemplo, DYLAM.

O propósito da análise é gerar automaticamente uma árvore de eventos atual usando probabilidades pré-definidas para vários eventos, em vez de fazer manualmente.

Macwan et al. (1996) *apud* Hollnagel (1998) comenta que o esquema de classificação usa uma descrição estendida de erros de comissão. Alguns tipos de erros adicionais baseados em estudos empíricos também são propostos.

Está técnica é uma proposta interessante para as técnicas de ACH de 2ª geração, principalmente por melhorar a complexidade na modelação da árvore de eventos através da sua extensão dos modos de erros, como também do uso de múltiplas árvores e eventos correspondentes a diferentes condições iniciais.

Segundo Hollnagel (1998), o esquema de classificação está mais detalhado do que nas técnicas de ACH de 1ª geração, porém não apresenta bases sistemáticas para sua extensão.O HITLINE não faz referências específicas ao modelo do operador, apenas o esquema de classificação sugere que existe implicitamente um modelo de processamento da informação.

3.5.6 *A Technique for Human Error Analysis* (ATHEANA)

O propósito da ATHEANA foi desenvolver um modelo de ACH que poderia melhorar a habilidade da PRA/PSA para identificar interações importantes entre o homem e o sistema. O método utilizado pela ATHEANA está claramente descrito, e pode ser representado graficamente pela Figura 3.4 , que se resume nos seguintes passos:

O método inicia identificando os possíveis Eventos Humanos Falhos (EHF), os quais são descritos pela árvore de eventos PRA/PSA;

Estes eventos são caracterizados em termos de ações inseguras (*slips, lapsos e mistakes*);

Nesta etapa, considera-se os Erros Provenientes do Contexto (EPC) no sistema, os quais são definidos pela combinação dos efeitos dos FDs e das condições que provocam erros humanos.

O método ATHEANA apresenta dois *loops* importantes. O 1° *loop* é a caracterização dos EPCs para identificação dos EHFs. Este *loop* reconhece que uma descrição aperfeiçoada do contexto pode ser suficiente para melhor identificação dos EHFs e que pode corrigir as falhas de um contexto inapropriado. O 2º *loop* é a caracterização dos EPCs para o modelo da PRA/PSA. Este *loop* sugere que o resultado qualitativo da ACH pode ser usado para modificar as bases do modelo, melhorando assim as condições da interação entre homem-sistema.

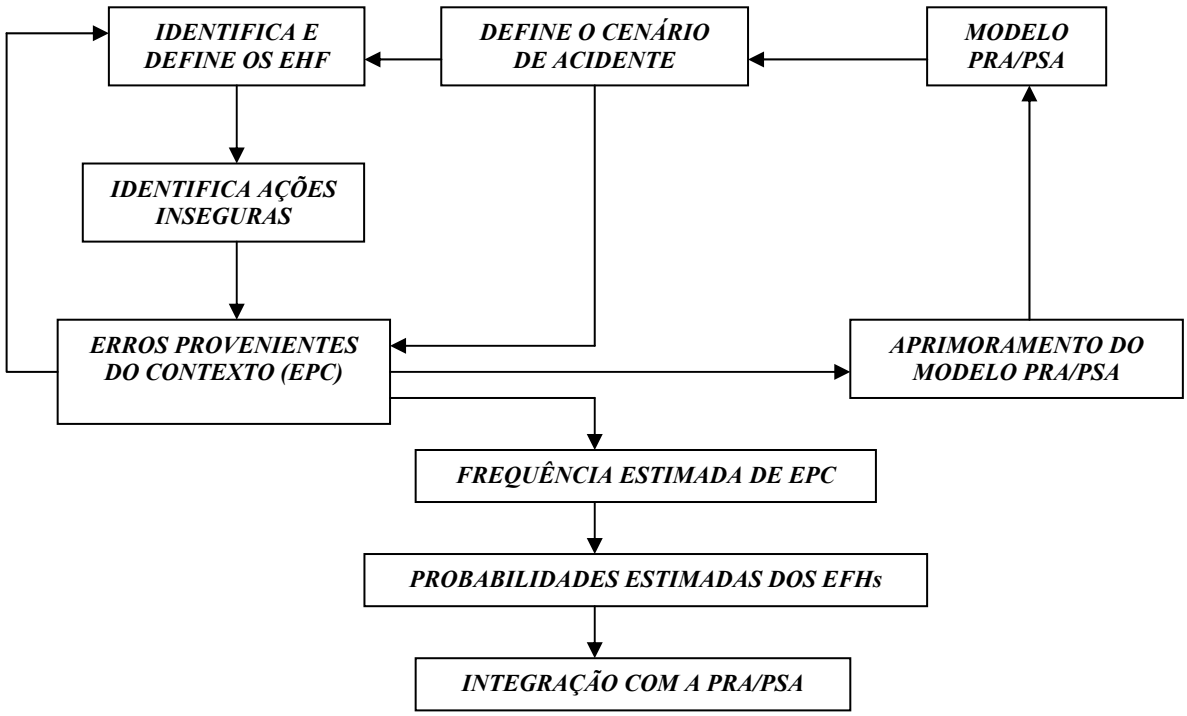


Figura 3.4 Método ATHEANA

A probabilidade de ocorrer EHFs é dada pela equação 3.5:

$$P(EHF_{irj}) = P(EPC_i) \times P(UA_j \mid EPC_i) \times P(\overline{EPC_i} \mid UA_j \cap E_{ij}) \qquad \textit{Equação 3.5}$$

onde:

$P(EPC_i)$: é a probabilidade de ocorrer eventos provenientes do contexto.

$P(UA_j \mid EPC_i)$: é a probabilidade de ocorrer uma ação insegura dado que um evento proveniente do contexto ocorreu.

$P(\overline{EPC_i} \mid UA_j \cap E_{ij})$: é a probabilidade de não recuperar um evento proveniente do contexto dada a ocorrência de uma ação insegura e a existência de uma evidência adicional seguida de E_{ij} uma ação insegura.

ATHEANA usa o esquema de classificação em duas diferentes maneiras. A primeira está em conformidade com a PRA/PSA tradicional, distinguindo entre omissões e comissões como EHFs básicos. A segunda está relacionada com a caracterização de Reason (1990) para ações inseguras com a finalidade de obter um aprimoramento das EHFs básicas. Embora a ATHEANA reconheça vários desenvolvimentos recentes na psicologia cognitiva e na engenharia cognitiva, esta técnica não vai muito longe em termos de esquema de classificação.

Quanto ao modelo do operador, a ATHEANA faz um link entre os EHFs e os EPCs, fazendo referências ao modelo de processamento de informações com os seguintes estágios:

- Detecção;
- Avaliação da situação;
- Planejamento da resposta;
- Implementação da resposta.

3.5.7 Cognitive Reliability and Error Analysis Method (CREAM)

Esta técnica foi desenvolvida por Hollnagel em 1993 com a finalidade de superar algumas limitações das técnicas de ACH, isto é, a representação binária das ações humanas e dependência do contexto nas ações. Portanto, o método é uma tentativa de generalizar árvores de eventos através de uma categorização policotômica para quantificar mais explicitamente a influência de fatores sobre o desempenho dos operários.

O esquema de classificação descreve as relações entre causas e manifestações. As causas representam a descrição da ocorrência dos efeitos e as manifestações referem-se a tudo aquilo que é observado. Em relação às causas, o esquema de classificação e descrito em três níveis:

1) Individual: consiste de causas que estão associadas com as características pessoais, psicológicas e fisiológicas dos operadores.

2) Tecnológico: inclui os fatores ergonômicos e tudo aquilo que representa o estado dos componentes.

3) Organizacional: consiste de causas que caracterizam a organização, o ambiente de trabalho, a interação entre pessoas e as condições ambientais.

Estes três níveis podem ser expandidos para representar uma análise mais detalhada

O modelo no CREAM possui dois princípios básicos:

- Competência : descreve o que o operador é capaz de realizar;
- Controle: descreve a capacidade do operador em termos do nível de controle que ele possui em determinadas situações.

Percebe-se que o nível de controle de um operador depende claramente da situação, ou seja, do contexto em que os eventos ocorrem. Este modelo é constituído do Simples *Model of Cognition* (SMoC) e *Contextual Control Model* (COCOM). O SMoC possui as seguintes características fundamentais:

- Distinção entre observação e inferência: enfatiza a necessidade de distinguir claramente entre o que pode ser observado e o que pode ser deduzido da observação;
- Natureza cíclica da ação cognitiva: significa que as funções cognitivas tanto se estendem a um contexto de eventos passados quanto se antecipam a eventos futuros.

O COCOM possui quatro modos de controle:

1) Scrambled control: situação de perigo, onde existe uma pequena ou nenhuma correspondência entre a situação e a ação. As ações são escolhidas aleatoriamente com pequena ou nenhuma reflexão cognitiva envolvida.

2) Opportunistic control: escolha de ações ineficiente, onde o operador consegue dominar um pouco a situação devido a sua habilidade e experiência.

3) Tactical control: o desempenho do operador está baseado em regras, onde o mesmo possui um conhecimento razoável.

4) Strategic control: controle ideal, onde o operador possui o mais robusto e eficiente desempenho baseado no seu conhecimento e na sua habilidade.

Através dos quatro níveis do COCOM é possível questionar se o operador mantém ou perde o controle em determinadas situações e prever o nível esperado de confiabilidade no desempenho.

O CREAM em uma análise preditiva do desempenho humano possui os seguintes passos (Kim, 2001):

1. Utiliza um método sistemático para descrever a tarefa;
2. Através dos CPCs (*Common Performance Conditions*) avalia as condições de trabalho, tais como: disponibilidade de procedimento, tempo disponível, preparação e treinamento adequados, entre outros;
3. Constrói a demanda cognitiva para identificar as funções cognitivas, isto é, observação, interpretação, planejamento e execução;
4. Determina a probabilidade do modo de controle para cada elemento de tarefa integrado aos CPCs;
5. Determina a probabilidade de falha das funções cognitivas;
6. Determina a probabilidade nominal de falha cognitiva (*Cognitive Failure Probability* – CFP) para cada um dos prováveis valores de falha da função cognitiva;
7. Corrige os valores CFPs com o CPCs;
8. Incorpora o valor ajustado do CFP na arvore de eventos.

As características principais desta técnica são as seguintes:

- Utiliza árvores de eventos através de uma categorização policotômica;
- Possui raízes teóricas baseadas na psicologia cognitiva e engenharia cognitiva;
- Método bidirecional, pois possui princípios para uma análise preditiva ou retrospectiva;
- Em parte, é um método essencialmente qualitativo;
- Não foi desenvolvido especificamente para indústria nuclear;
- Não incorpora explicitamente como tratar contextos dinâmicos.

3.5.8 Características gerais das técnicas de ACH de 2ª geração

Hollnagel (1998) resumiu as principais técnicas de ACH de 2ª geração segundo os seguintes critérios de análise:

- O método apresenta melhoria na árvore de eventos do PSA;
- O esquema de classificação apresenta modos de erros diversificados;
- O modelo do operador apresenta alguma melhoria;
- Tratamento dos FDs.

A Tabela 3.4 mostra um resumo das características das técnicas de ACH de 2ª geração.

Tabela 3.4 Técnicas de ACH de 2ª geração

TÉCNICA ACH	*DESCRIÇÃO DO MÉTODO*	*ESQUEMA DE CLASSIFICAÇÃO*	*MODELO DO OPERADOR*	*EFEITO DOS FDs*
CES	*Ferramenta de simulação altamente desenvolvida*	*Intenções, estratégicas na solução de problemas.*	*Modelo detalhado (EAGOL)*	*Implícito como parte do modelo*
INTENT	*Extensão da THERP*	*Erros de intenções, mas não completamente consistentes.*	*Mesmo da THERP com algumas referências para o GEMS, porém não utiliza consistentemente.*	*Mesmo da THERP*
COGENT	*Depende da opinião do especialista*	*Erros cognitivos (SRK + mistakes/slips/lapses)*	*Modelo de processamento da informação geral*	*Mesmo da THERP*
EPRI project	*Exige algumas especificações que não são detalhadas*	*Elaboração de modos de erros + causas*	*Modelo de processamento da informação básico (3 estágios)*	*Integrado via modelo do operador*
HITLINE	*Bem descrito*	*Classificação estendida dos erros de comissão, mas não sistematicamente.*	*Modelo não explícito*	*Integrado via esquema de classificação*
ATHEANA	*Bem descrito*	*Duas maneiras de esquemas básicos*	*Modelo de processamento da informação básico (4 estágios)*	*Integrado com a classificação dos erros provenientes do contexto*
CREAM	*Bem descrito*	*Causas e efeitos*	*SMoC e COCOM*	*integrado com a classificação dos erros provenientes do contexto.*

Algumas características notáveis nas técnicas de ACH de 2ª geração:

- O modelo do operador é mais significante em termos de representação cognitiva do que nas técnicas de 1ª geração;
- Introdução de outros tipos de erros, além dos erros de omissão e comissão;
- Não incorpora explicitamente uma metodologia para tratar contextos dinâmicos;
- Quanto aos FDs, a maior parte deles, tratam como a THERP, ou seja, não considera a interdependência entre os FDs.

Diante da dificuldade encontrada em utilizar árvores de eventos para modelagem dinâmica do sistema, não é considerada a influência de um evento no outro.

As técnicas de ACH de 1ª e 2ª geração apresentaram deficiências tornando-as não suficientemente efetivas e carentes de uma evolução que trouxesse melhorias significativas em relação à interface homem – sistema. Obedecendo a cronologia, será apresentada a seguir a metodologia IDAC, a qual surgiu em 1999.

3.6 Information Perception, Diagnosis Making, and Action Taking in Crew Perspective (IDAC)

3.6.1 Método e modelo cognitivo

Com o objetivo de modelar as causalidades que regem o sucesso ou a falha de um operador em uma sala de controle de uma planta de energia nuclear, Chang & Mosleh (1999) tentam descrever fatores que influenciam a resposta deste operador quando submetido a condições anormais de um sistema complexo.

Esta metodologia consiste no acoplamento do modelo IDAC (*Information Perception, Diagnosis Making, and Action Taking in Crew Perspective*) a árvores de eventos. A partir de um evento iniciador, tenta-se modelar o comportamento do operador em um sistema dinâmico. Através da árvore de eventos é possível visualizar os diferentes estágios do modelo cognitivo IDAC e as alternativas de escolha que o operador possui em cada estágio (Figura 3.5). Cada alternativa do modelo é influenciada pelos FDs, os quais recebem um peso definido por especialistas ou por uma equação que reflete as dependências entre os fatores e os diferentes tipos de influências (diretas ou indiretas). Em cada estágio do modelo, os fatores são atualizados, ou seja, os fatores do estágio da percepção não serão os mesmos da ação. Uma vez definidos os pesos de cada alternativa, a probabilidade de uma alternativa é calculada através da divisão do peso desta alternativa pela o somatório dos pesos de todas as alternativas do estágio considerado.

Finalmente, através da multiplicação de todas as probabilidades que pertencem a um mesmo caminho da árvore é possível encontrar a probabilidade de uma determinada seqüência da árvore (Equação 3.6).

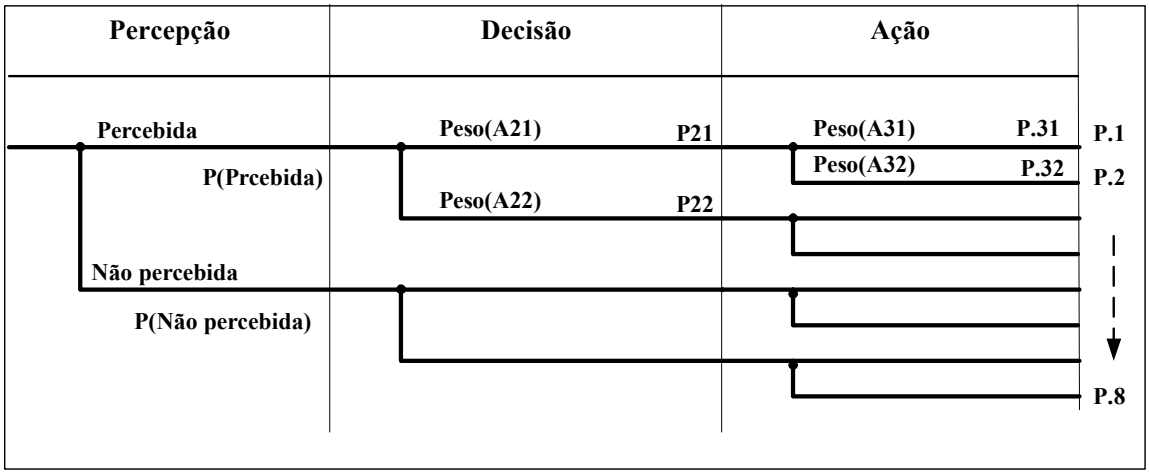


Figura 3.5 Metodologia IDAC

$$P1 = P(Percebida) \times P21 \times P31 \qquad \textit{Equação 3.6}$$

Essa nova técnica, vista como um avanço das técnicas de 2ª geração, procura detalhar todos os fatores que influenciam o desempenho humano durante da realização de tarefas em um sistema de controle, como também quantificar suas relações de causa e efeito. Esta técnica está baseada em descobertas relevantes das áreas de psicologia cognitiva, ciências comportamentais, neurociência, fatores humanos, entre outras.

3.6.2 Dependências entre os FDs no modelo IDAC

Segundo Chang & Mosleh (1999), na ocorrência de um evento anormal, a reação natural de um indivíduo geralmente inclui conseqüências físicas (fadiga, náusea, tremores musculares, entre outras), conseqüências cognitivas (deterioração da memória, dificuldade na tomada de decisão, confusão mental, entre outras) e conseqüências emocionais (ansiedade, frustração, inutilidade, entre outras). Estas reações são interdependentes e afetam o comportamento do operador.

O diagrama de influência apresentado na Figura 3.6, proposto pelo modelo IDAC, mostra relação de causa e efeito entre os fatores. Este diagrama apresenta uma tendência para uma relação muito mais estocástica do que determinística, pois os modelos estocásticos possuem uma ou mais variáveis aleatórias como entrada; essas entradas levam a saídas aleatórias, as quais podem apenas ser consideradas como estimativas das verdadeiras características de um modelo, enquanto os modelos determinísticos possuem um conjunto conhecido de entrada que resultarão em um único conjunto de saídas. Além do mais, o diagrama possui um conjunto de variáveis aleatórias que descrevem a evolução de um processo no tempo (estado mental), o que constitui a definição de um processo estocástico. Segundo Chang & Mosleh (1999), a

relação assumida neste diagrama está baseada no desenvolvimento de modelos empíricos e teóricos disponíveis, análises de eventos, simulações, assim como em opiniões de outros pesquisadores e médicos expressas na literatura de ACH.

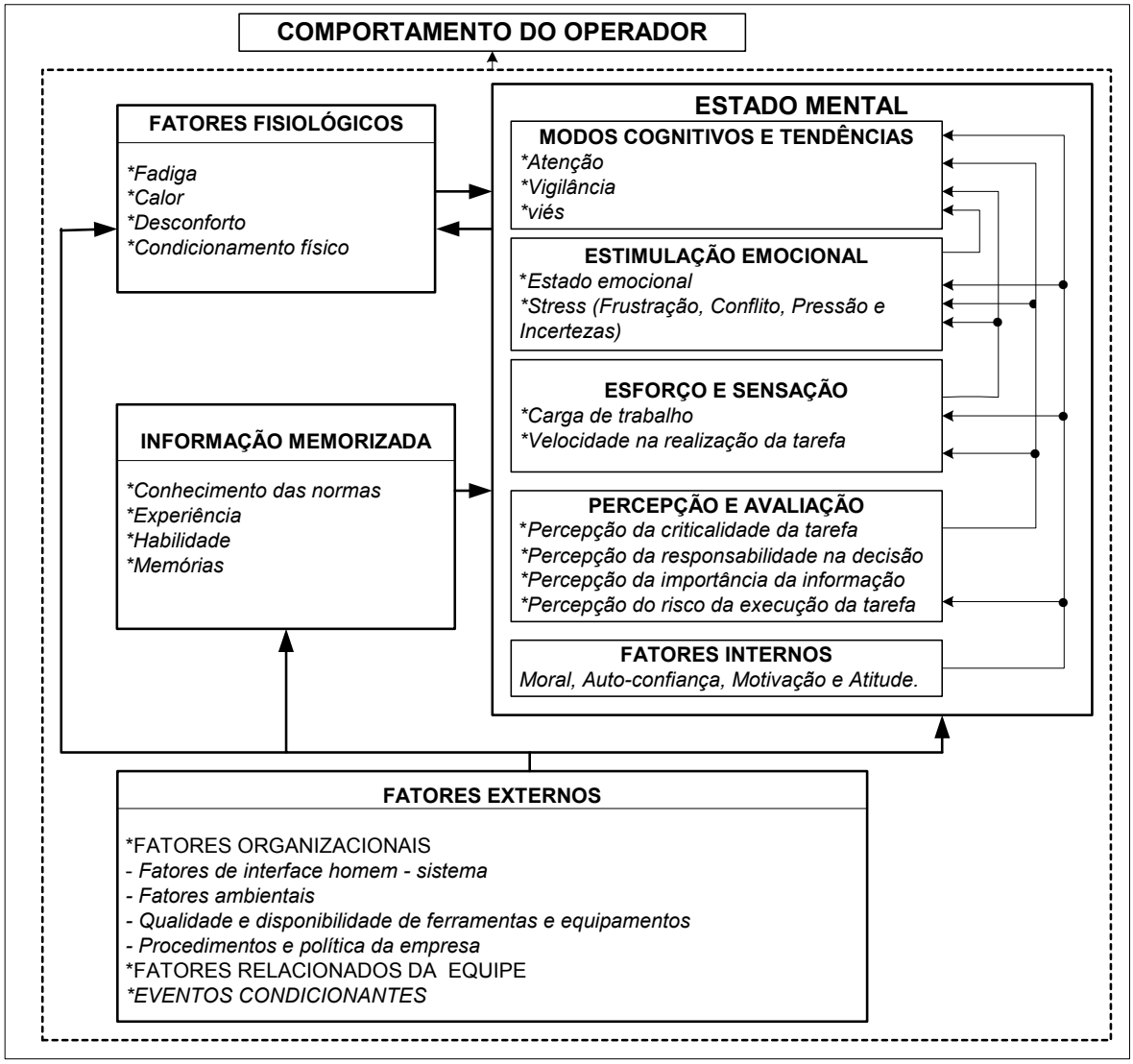


Figura 3.6 Diagrama de influência IDAC

O estado mental registra a evolução psicológica e mental de um operador durante o curso de um evento. Hansen (1989) *apud* Chang & Mosleh (1999), comenta que o estado mental representa a combinação da cognição e da emoção, e estes são dois processos contínuos, paralelos e interdependentes.

O estado mental está dividido em cinco níveis agrupados hierarquicamente para representar o processo mental e psicológico. Estes cinco níveis representam diferentes fases dos estados mental e psicológico Chang & Mosleh (1999).

A seguinte descrição relata estas fases:

Quando o operador recebe um estímulo ou informação do mundo externo, a sua atividade mental é acionada para "Avaliação da situação". Porém, esta avaliação pode variar de pessoa para pessoa devido às diferenças individuais. O grupo "Fatores internos" representa alguns aspectos de tais diferenças, as quais poderão afetar a qualidade da percepção. A personalidade envolve: moral, motivação, atitude, autoconfiança, entre outras características intrínsecas ao indivíduo. A percepção e avaliação resultam na consciência da situação. Esta consciência provoca sensações específicas não declaradas representadas pelo "Esforço e sensações". Os FDs nesta fase representam as sensações específicas e internas relacionadas a uma situação. Esta fase envolve, por exemplo, sensação de uma excessiva carga de trabalho, sensação de tempo insuficiente para realização da tarefa, entre outras sensações. A fase de "Esforço e sensações" ativa alguns efeitos declarados representados pela fase: "Estimulação emocional". Os FDs nesta fase representam os efeitos agregados às sensações de uma situação, os quais são revelados e podem ser sentidos por outros operadores. Esta fase envolve, por exemplo, *stress* proveniente de frustração, pressão, conflito e incertezas. Finalmente, os FDs nos modos cognitivos e tendências representam os padrões cognitivos dos operadores resultantes do estado das outras fases. Um exemplo prático das fases do estado mental pode ser dado quando o operador percebe, por exemplo, a quantidade, intensidade e importância da tarefa e conseqüentemente sente que o tempo disponível é insuficiente para realizá-la. Esta sensação provoca um estímulo emocional revelado por stress, o qual pode ser proveniente de pressão. Dependendo do nível de stress recebido, o operador poderá estar ou não com seu nível de atenção adequado.

O estado mental também recebe influências dos fatores fisiológicos e da informação memorizada. Os fatores fisiológicos são todos os fatores de desempenho relacionados à compatibilidade ergonômica e resistência física dos operadores. Estes fatores envolvem: fadiga, limitações físicas, entre outros. A informação memorizada refere-se a qualidade da informação e habilidade motora do operador, como por exemplo: conhecimento das normas, experiência, habilidade e memórias de curta e longa duração (tópico 5.2.3).

Em relação ao exemplo prático dado, a experiência e a habilidade do operador pode fazer uma grande diferença, pois uma vez presentes, é possível que o nível de stress sentido pelo operador seja irrelevante, não comprometendo seu nível de atenção. Portanto, a informação memorizada poderá afetar a avaliação que o operador faz da situação após ter percebido um novo *input* ou informação.

Os estados psicológicos (representados no estado mental) e os fisiológicos são interdependentes. Por exemplo, a fadiga pode ocasionar perda de vigilância. Por outro lado, ausência de motivação pode aumentar o nível de fadiga (Chang & Mosleh, 1999).

É importante perceber que os fatores externos afetam todos os fatores relacionados ao indivíduo (fatores fisiológicos, estado mental e informação memorizada).

Os fatores externos envolvem os fatores ambientais (acesso físico, desconforto do ambiente), eventos condicionantes (*softwares, hardwares*), fatores organizacionais (ambiente de trabalho, disponibilidade de ferramentas), fatores da equipe de trabalho (liderança, união, entre outros).

Os fatores apresentados na Figura 3.6 podem ser classificados como estáticos ou dinâmicos, a depender do contexto e das aplicações. Se a tarefa é realizada em um período relativamente pequeno, pode-se considerar que os fatores fisiológicos, ambientais, condicionantes, organizacionais e do grupo são estáticos, enquanto que os fatores internos ao indivíduo são sensíveis a mudanças em, inclusive, pequenos intervalos de tempo.

3.6.3 Características gerais do modelo IDAC

As características mais notáveis desta técnica são as seguintes:

- Descobertas relevantes das áreas de psicologia cognitiva, ciências comportamentais, neurociência, fatores humanos, entre outras;
- Considera a relação de dependência entre a maioria dos FDs, com exceção da relação de interdependência entre os fatores externos, os quais também possuem uma relação de causa e efeito, como por exemplo, a organização pode influenciar na qualidade da comunicação da equipe, bem como no design de equipamentos. Da mesma maneira, os fatores fisiológicos também possuem uma relação de interdependência, que foi desconsiderada neste modelo;
- Não permite quantificar a influência entre dois operadores, não considerando a interação entre eles;
- Diante da dificuldade em utilizar árvores de eventos para modelagem dinâmica do sistema, não é considerada a influência de um evento no outro.

As técnicas de ACH de 1ª e 2ª geração, bem como modelo IDAC apresentaram deficiências tornando-os não suficientemente efetivos e carentes de uma evolução que trouxesse melhorias significativas em relação à interface homem-sistema. Portanto, percebe-se que modelar as causalidades existentes nas ações humanas tornou-se um grande desafio para ACH ao longo dos anos e conseqüentemente, torna-se extremamente necessário o

desenvolvimento de uma metodologia para avaliação da confiabilidade humana. Diante deste contexto, demonstra-se a seguir que modelar ações humanas por redes Bayesianas podem suprir as maiores deficiências dos métodos de ACH tradicionais, proporcionando uma maior flexibilidade às variáveis componentes de um determinado sistema.

4. TÉCNICA DE ANÁLISE DE CONFIABILIDADE HUMANA PROPOSTA

Existe uma grande necessidade prática de entender como o erro humano por se manifestar, como ele pode ser explicado, e como ele pode ser previsto. No entanto, para responder a estes questionamentos, é necessário entender a relação entre causa e efeito.

Os efeitos são as conseqüências observadas provenientes do erro humano. As causas são as explicações que foram encontradas para aquilo que foi observado.

Em análise de retrospecção, inicia-se com a avaliação dos efeitos e depois procura-se identificar as causas, ou seja, as causas são descritas depois do fato ocorrido. Em análise de previsão, as causas são eventos iniciantes e os efeitos são possíveis resultados.

Fazer previsão significa combinar as causas e efeitos para antecipar prováveis erros.

As manifestações (ou efeitos) podem ser observadas, enquanto as causas somente podem ser deduzidas diante de uma introspecção, ou seja, mediante a identificação de características funcionais da atividade cognitiva e dos fatores relacionados ao desempenho humano que contribuíram para o erro (Hollnagel,1998).

Diante deste contexto, as relações de causa e efeito devem ser aplicadas para fazer o reconhecimento do erro humano. Estas relações providenciam caminhos mais consistentes para descrever e contabilizar os erros humanos.

Modelar as causalidades existentes nas ações humanas tornou-se um grande desafio para ACH ao longo dos anos. Apesar do grande esforço, as técnicas de ACH de 1ª e 2ª geração não conseguiram modelar estas causalidades. Porém, de maneira qualitativa, algumas trouxeram contribuições importantes para ACH. Através da metodologia de ACH proposta aqui e comentada a seguir, é possível solucionar a grande maioria dos problemas apresentados no capítulo 3.

4.1 Inferência Bayesiana

A filosofia Bayesiana ou subjetiva atribui ao valor da probabilidade o grau de confiança ou crença de um individuo.

O grau de confiança é uma medida do conhecimento de uma pessoa sobre uma determinada proposição ou evento (Martz & Waller, 1982).

Para ACH, a inferência Bayesiana mostra-se mais funcional que a empírica, pois para inferir sobre o verdadeiro valor da probabilidade de erro humano de maneira empírica, isto é, freqüentista, é necessário encontrar o "número de oportunidades para errar" (tópico 2.3.3).

Entretanto, esse processo de identificação é difícil para indivíduos, uma vez que os eventos não ocorrem sob as mesmas condições. Diferentemente de equipamentos, pessoas podem aprender com seus erros. Conseqüentemente, mesmo que o ambiente externo pudesse ser mantido constante, é impossível que uma pessoa depare-se com a mesma situação duas vezes com o mesmo grau de experiência.

De uma forma geral, fazer inferência sobre o "verdadeiro valor" da probabilidade dos eventos de maneira subjetiva apresenta vantagem em relação à maneira freqüentista, pois além de utilizar as informações provenientes de experimentos, quantificam-se as experiências dos indivíduos.

A probabilidade subjetiva é chamada de Bayesiana por fazer uso do teorema de Bayes.

4.1.1 Teorema de Bayes

Sejam dois eventos A e E, tais que $P(A) > 0$ *e* $P(E) > 0$:

$$P(A \mid E) = \frac{P(E \mid A)P(A)}{P(E)} \qquad \textit{Equação 4.1}$$

onde:

$P(A)$ é a probabilidade a priori do evento A;

$\frac{P(E \setminus A)}{P(E)}$ é a verossimilhança relativa da evidência E, assumindo a ocorrência do evento A;

$P(A \setminus E)$ é a probabilidade a posteriori de A dada a evidência E.

A inferência Bayesiana é relativamente simples quando envolve apenas duas variáveis. Porém, quando a quantidade de variáveis se eleva, tal inferência torna-se complexa e sem valor prático (Neapolitan, 2003). Diante desta dificuldade, as redes Bayesianas são recomendadas para tratar sistemas complexos.

4.2 Redes Bayesianas

Redes Bayesianas são estruturas gráficas que permitem representar razões ou argumentos no domínio da incerteza (Korb & Nicholson, 2003).

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 relações de causa e efeito entre as variáveis. Por exemplo, se houver um arco indo de um nó A para um nó B, assume-se que o nó A representa uma provável causa de B e adota-se como nomenclatura que A é um dos pais de B. De maneira mais genérica, A é ancestral de B e B é descendente de A, se existe um caminho de A para B. Caso o nó não possua pais, 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.

Uma rede Bayesiana tem como estrutura um Grafo Acíclico Direcionado (DAG), ou seja, os arcos não podem formar ciclos. Eles são unidirecionais, de forma que partindo-se de qualquer um dos nós da rede, é impossível que se retorne ao mesmo nó.

Os tópicos seguintes são necessários para construção de uma rede, como também para melhor entendimento da estrutura Bayesiana.

4.2.1 Nós e Valores

O primeiro passo para construção de uma rede Bayesiana está relacionado à identificação das variáveis de interesse e depois, em representá-las através dos nós da rede.

Korb & Nicholson (2003) comentam que neste passo, é necessário responder as perguntas: *O que os nós representam? E que valores eles podem assumir?*

Para variáveis discretas, os valores das variáveis devem ser mutuamente exclusivos. Alguns tipos de nós discretos são:

- Nós Booleanos: São proposições que assumem valores binários, isto é, verdadeiro e falso;

- Valores ordenados: Um exemplo deste tipo de nó é a variável conseqüência, pois ela pode assumir valores do tipo: baixa, media e alta.

4.2.2 Estrutura

A estrutura ou topologia da rede Bayesiana deve capturar a relação qualitativa entre variáveis. Em particular, dois nós deveriam ser conectados direcionados se um é efeito ou causa do outro com um arco indicando a direção do efeito.

A única restrição existente na estrutura Bayesiana, como já foi comentado anteriormente, é que ela não pode ser cíclica.

Matematicamente, a rede Bayesiana é um par N= {(V, E), P} onde (V, E) é um grafo direcionado representando os nós (ou vértices) e as arestas (ou arcos) respectivamente, e P é a distribuição de probabilidades a respeito de V. Variáveis aleatórias discretas $V=\{X_1, X_{2,\ldots,}X_n\}$

são distribuídas para os nós, enquanto os arcos (E) representam a relação causal probabilística entre os nós.

4.2.3 Probabilidades Condicionais

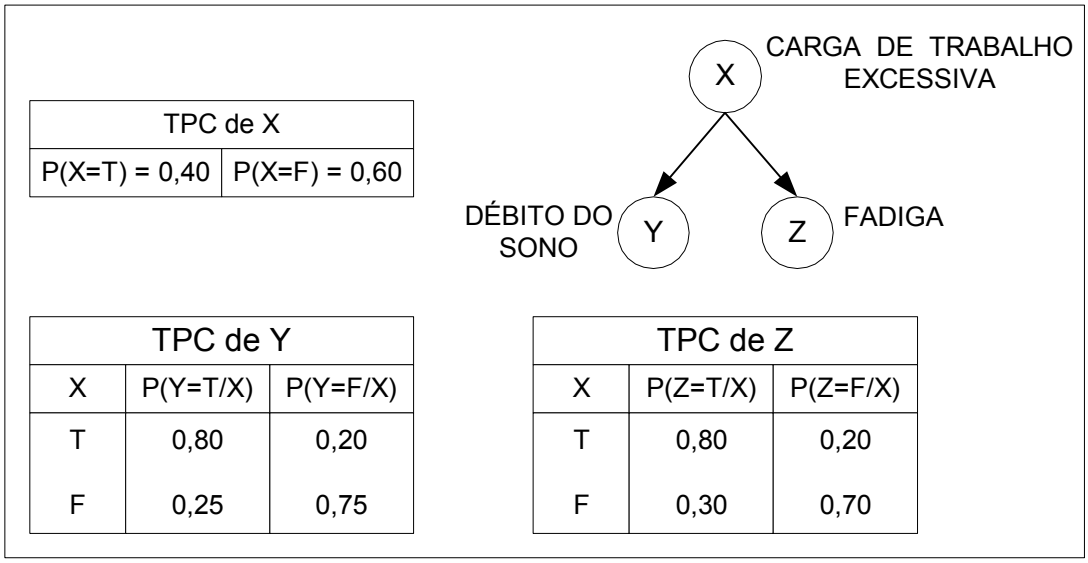
Uma vez que a topologia da rede foi especificada, o próximo passo é quantificar a relação entre os nós conectados. Isto é feito pela atribuição da distribuição de probabilidades para cada nó, construindo assim, uma Tabela de Probabilidades Condicionais (TPC). Quando se trata de variáveis discretas, para cada nó é necessário identificar todas as possíveis combinações dos seus nós pais. É necessário também, identificar os possíveis valores, os quais as variáveis podem assumir. A Figura 4.1 mostra uma rede Bayesiana e as TPCs de cada variável. Esta rede mostra que a variável X (Carga de trabalho excessiva) apresenta como conseqüências: as variáveis Y (Débito do sono) e Z (Fadiga), ou seja, uma carga de trabalho pode ter como conseqüência um sono insuficiente e fadiga. Cada variável nesta rede assume dois possíveis valores: T(*True*) e F(*False*). Portanto, o valor 0.25, exposto na 2ª linha da TPC associada a variável Y representa a probabilidade de uma determinada pessoa estar com débito do sono (Y) dado que ela não estar sob uma carga de trabalho excessiva (X).

O tamanho das TPCs depende da quantidade de pais que cada variável possui e do nº de valores que ela pode assumir. Portanto, em se tratando de variáveis dicotômicas, cada nó de uma rede (X_i) possui:

$$N^{o}\ de\ elementos\ de\ uma\ TPC = 2^{n} \qquad \textit{Equação 4.2}$$

Onde: n é o número de pais que a variável possui.

A Figura 4.1 mostra que Y assim como Z possui apenas X como pai e que são variáveis que assumem dois valores: T e F. Portanto Y e Z possuem 2 probabilidades condicionais e X possui 1 probabilidade condicional. Porém, considerando o complementar de cada probabilidade condicional, Y e Z apresentam 4 probabilidades condicionais e X apresenta 2 probabilidades condicionais como mostram as suas TPCs.



TPC de X	
P(X=T) = 0,40	P(X=F) = 0,60

TPC de Y		
X	P(Y=T/X)	P(Y=F/X)
T	0,80	0,20
F	0,25	0,75

TPC de Z		
X	P(Z=T/X)	P(Z=F/X)
T	0,80	0,20
F	0,30	0,70

Figura 4.1 Rede Bayesiana referente ao problema de carga de trabalho excessiva

O grau de crença acerca das variáveis Y e Z é calculado através da regra de Bayes diretamente (Tópico 4.1.1).

$$P(z \mid x) = P(z \cap x) / P(x) \Rightarrow P(z \cap x) = P(x)P(z \mid x) \Rightarrow P(z) = \sum_x P(x)P(z \mid x)$$

Assim, *P(Z=F)=(0,4) (0,2)+(0,6) (0,7)=0,50*

$$P(y \mid x) = P(y \cap x) / P(x) \Rightarrow P(y \cap x) = P(x)P(y \mid x) \Rightarrow P(y) = \sum_x P(x)P(y \mid x)$$

Assim, *P(Y=F)=(0,4) (0,2)+(0,6) (0,75)=0,53*

4.2.4 Condição Markoviana

Uma das grandes características de processos markovianos diz respeito à suposição de falta de memória. Isto significa que se o atual estado do processo é conhecido, informações passadas são irrelevantes nas inferências sobre os seus estados futuros. Este é o conceito da condição Markoviana.

4.1 Definição (Condição Markoviana) Seja P a distribuição de probabilidade conjunta das variáveis aleatórias de um conjunto V e seja (V, E) um DAG. É dito que N= {(V, E), P} satisfaz à condição Markoviana se para cada V, onde X $\in$ V, X é condicionalmente independente de todas as variáveis que compõem o conjunto dos seus não descendentes, dados os valores das variáveis que compõem seu conjunto de pais. Ou, em notação probabilística, {X} ind ND(X)|PA(X), onde ND(X) refere-se ao conjunto de não descendentes de X e PA(X) ao seu conjunto de pais.

Portanto, de acordo com a definição 4.1, as redes Bayesianas utilizam a condição Markoviana para considerar um nó raiz independente dos seus não descendentes. Isto significa

que não existe uma relação de dependência direta entre quaisquer dois nós, a não ser que exista um arco entre eles na rede.

4.2.5 Independência condicional

Considerando uma rede com três nós como na Figura 4.2, onde A provavelmente causa B e B provavelmente causa C, pode-se dizer que baseado na condição Markoviana, a probabilidade de C\B é exatamente a mesma probabilidade de C\(B∩ A), ou seja, o fato de saber que A ocorreu não faz nenhuma diferença na crença sobre C se já se sabe que B ocorreu. Então C é condicionalmente independente de A, dado que B ocorreu. Ou, em notação probabilística, {C} *ind* {A}\{B}.

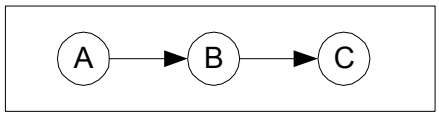


Figura 4.2 Conexão em série

A Figura 4.3 mostra que quando duas variáveis A e C têm causa comum B e não existe evidências sobre B, então o fato de um dos efeitos estar presente, C por exemplo, altera a probabilidade de B ocorrer, o que conseqüentemente também altera a probabilidade do efeito A estar presente. Porém, se já se sabe sobre B, então o fato do efeito C estar presente não diz nada sobre a probabilidade de se ter também o efeito A. Então C é condicionalmente independente de A, dado que B ocorreu. Ou, em notação probabilística, {C} *ind* {A}\{B}.

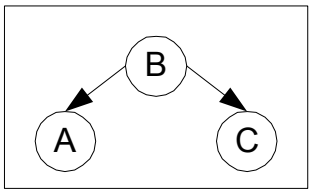


Figura 4.3 Conexão do tipo causa comum

Facilmente, percebe-se que se o par N= {(V, E), P} satisfaz a condição Markoviana, então duas variáveis são condicionalmente independentes dado que se sabe sobre uma outra variável que se encontre entre as duas variáveis no fluxo de dependências.

A Figura 4.4 mostra que A e C têm efeito comum B, ou seja, A e C provavelmente causam B. Neste caso, os pais são marginalmente independentes, mas o resultado do efeito comum B, depende de ambas informações. Uma vez que se sabe da ocorrência de B e que C não explica a provável causa de B, a probabilidade de C dado B é condicionalmente dependente de A.

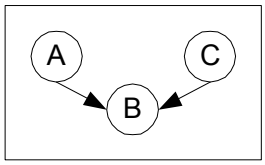


Figura 4.4 Conexão do tipo efeito comum

Na conexão do tipo efeito comum, a condição Markoviana é violada, pois a independência condicional apresentada nas Figuras 4.2 e 4.3 deixa de existir se é conhecido o valor de uma variável que seja efeito comum de ao menos duas variáveis não descendentes entre si. Este fenômeno é bastante conhecido como *explaining away* ou ativação de dependências. Uma variável descendente é um efeito comum de um conjunto de variáveis não descendentes entre si quando existem caminhos entre as variáveis de tal conjunto e esta.

4.2.6 d – Separação

A independência condicional em {C} *ind* {A}\{B} significa que o conhecimento sobre B bloqueia a relevância de A para C ou no caso da Figura 4.4, a falta da informação sobre B bloqueia a relevância de C para A. Todavia, o conhecimento de B ativa a relação entre C e A. O termo bloquear significa interromper o fluxo de dependências.

Estas independências condicionais são propriedades dos DAGs conhecidas como d-separação, onde d se refere a *direction-dependent.* A presença da d-separação será denotada aqui por ds. No DAG da figura 4.2, tem-se que {C} *ds* {A}\{B}.

4.2.7 Cálculo da distribuição de probabilidades correspondente à rede

A distribuição de probabilidade correspondente à rede é calculada a partir das probabilidades condicionais, como mostra a equação 4.3.

$$P(U) = P(X_1, X_2, ..., X_n) = \prod_{i=1}^{n} P(X_i \mid pa(X_i)) \qquad \textit{Equação 4.3}$$

Onde:

$P(U)$: probabilidade conjunta para a rede;

$P(X_i \mid pa(X_i))$: probabilidades condicionais de X em relação aos seus pais.

Utilizando a probabilidade conjunta, pode-se obter as probabilidades posteriores, somando-se, para cada resultado, todas as probabilidades que uma variável pode assumir numa rede. Posteriormente, normalizam-se as probabilidades obtidas, obtendo assim, as probabilidades posteriores de cada nó ou variável.

Segue-se como exemplo, um processo de inferência relacionado à rede apresentada na Figura 4.1.

A partir das TPCs de X, Y e Z, obtém-se as probabilidades P(X,Y, Z) para cada resultado. Portanto, conforme a equação 4.3 apresentada acima, temos:

$$P(X,Y,Z) = P(X) \times P(Y \mid X) \times P(Z \mid X) \qquad \textit{Equação 4.4}$$

A Tabela 4.1 mostra o cálculo destas probabilidades conjuntas. Nestes cálculos, considera-se que o resultado T(*True*) está representado pelo número 0 e o resultado F(*False*) está representado pelo número 1.

Tabela 4.1 Probabilidades conjuntas referentes ao problema de carga de trabalho excessiva

$P(x_0, y_0, z_0) = 0{,}256$	$P(x_0, y_1, z_0) = 0{,}064$	$P(x_1, y_0, z_0) = 0{,}045$	$P(x_1, y_1, z_0) = 0{,}135$
$P(x_0, y_0, z_1) = 0{,}064$	$P(x_0, y_1, z_1) = 0{,}016$	$P(x_1, y_0, z_1) = 0{,}105$	$P(x_1, y_1, z_1) = 0{,}315$

Suponha agora que o nó Y é observado como *True* (Y= y_0), o que constitui uma evidência, significando que foi constatado que uma pessoa apresenta débito do sono. Então, um processo de inferência é realizado para os nós X e Z para o cálculo das probabilidades posteriores de cada resultado destas variáveis.

A partir das probabilidades conjuntas da Tabela 4.1 e da utilização da equação 4.1, obtém-se as probabilidades posteriores: $\{P(x_0 \mid y_0), P(x_1 \mid y_0), P(z_0 \mid y_0), P(z_1 \mid y_0)\}$. Para $P(x_0 \mid y_0)$, por exemplo, realiza-se o seguinte cálculo:

$$P(x_0 \mid y_0) = \frac{P(x_0, y_0, z_0) + P(x_0, y_0, z_1)}{P(x_0, y_0, z_0) + P(x_0, y_0, z_1) + P(x_1, y_0, z_0) + P(x_1, y_0, z_1)} \qquad \textit{Equação 4.5}$$

Percebe-se na equação 4.5 que o resultado y_1 por razões obvias não aparece nos cálculos, uma vez que já se sabe que o resultado da variável é y_0.

A Tabela 4.2 mostra as probabilidades posteriores referentes a observação do resultado y_0.

Tabela 4.2 Probabilidades posteriores referentes ao problema de carga de trabalho excessiva

$P(x_0) = 0.681$	$P(z_0) = 0.640$
$P(x_1) = 0.319$	$P(z_1) = 0.360$

Devido a evidencia sobre Y, os graus de crenças das demais variáveis foram atualizados e pode-se concluir que uma vez que o débito do sono está presente, as chances de se ter uma carga de trabalho excessiva e fadiga são elevadas.

4.2.8 Tipos de evidências

A evidência comentada no tópico 4.2.7 trata de uma evidência empírica ou específica, pois de fato foi observado que (Y= y_0). Porém, outro tipo de evidência pode ser utilizado. Esta é chamada de subjetiva, pois traduz a incerteza de um indivíduo sobre a ocorrência de um determinado evento. Esta incerteza é evidenciada através de uma taxa. Na rede apresentada na Figura 4.1, uma evidência subjetiva poderia ser, por exemplo, acreditar que uma pessoa apresenta uma razão de 2 contra 1 a favor de ter débito do sono diante de uma análise mais específica, *A=0*. Diante desta evidência, pode-se dizer que *P(A=0|Y) = β(2, 1)*, onde *β* é um fator de normalização. Isto implica que *P(A=0|Y=0) = 0,667* e *P(A=0|Y=1) = 0,333*. A Figura 4.5 mostra a inclusão de A no problema.

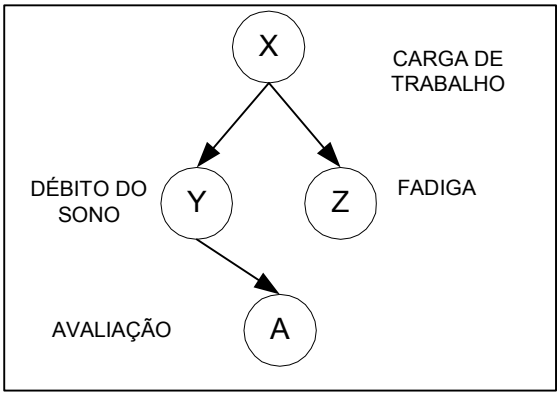


Figura 4.5 Inclusão de uma evidência subjetiva na rede Bayesiana da figura 4.1

Uma vez que o resultado da avaliação foi favorável ao débito do sono (A=0), a atualização das probabilidades condicionais da rede é realizada da seguinte maneira:

$$P(A=0) = P(A=0 \mid Y=0)P(Y=0) + P(A=0 \mid Y=1))P(Y=1) =$$

$$=(0{,}667)(0{,}47) + (0{,}333)(0{,}53)=0{,}49$$

$$P(Y=0 \mid A=0) = \frac{P(A=0 \mid Y=0)P(Y=0)}{P(A=0)} = \frac{(0{,}667)(0{,}47)}{0{,}49} = 0{,}64$$

$$P(Y=1 \mid A=0) = \frac{P(A=0 \mid Y=1)P(Y=1)}{P(A=0)} = \frac{(0{,}333)(0{,}53)}{0{,}49} = 0{,}36$$

$$P(x \mid Y=0) = \frac{P(Y=0 \mid x)P(x)}{P(Y=0)} = (0{,}68;\ 0{,}32)$$

$$P(x \mid Y=1) = \frac{P(Y=1 \mid x)P(x)}{P(Y=1)} = (0{,}15;\ 0{,}85)$$

$$P(x \mid A=0) = \sum_{y} P(y \mid A=0)P(x \mid y)$$

$$P(X=0 \mid A=0) = [(0{,}64)\ (0{,}68) + (0{,}36)\ (0{,}15)] = 0{,}49$$

$$P(X=1 \mid A=0) = [(0{,}64)\ (0{,}32) + (0{,}36)\ (0{,}85)] = 0{,}51$$

$$P(z \mid A=0) = \sum_{x} P(x \mid A=0)P(z \setminus x)$$

$$P(Z=0 \mid A=0) = [(0{,}49)\ (0{,}80) + (0{,}51)\ (0{,}30)] = 0{,}545$$

$$P(Z=1 \mid A=0) = [(0{,}49)\ (0{,}20) + (0{,}51)\ (0{,}70)] = 0{,}455$$

Facilmente verifica-se que quando as taxas de verossimilhança apresentam valores extremamente favoráveis a um valor específico, a evidência subjetiva se aproxima de uma evidencia empírica. No exemplo acima, percebe-se que se razão a favor de ter débito do sono diante de uma análise mais especifica (*A=0)* fosse de 1000 contra 1, então P(A=0|y) = (0,999; 0,001). Este fato constitui a principal diferença entre as duas evidências, uma vez que os cálculos para atualização das probabilidades são semelhantes.

O processo de inferência realizado acima constitui a base da utilidade das redes Bayesianas.

Evidentemente, o esforço empreendido nos cálculos de uma rede Bayesiana torna-se necessário a utilização de *softwares*. Para tratar da modelagem das causalidades através de redes Bayesianas, Firmino & Droguett (2004) desenvolveram o *software* E&P/CHESF BBN. Este será utilizado na ACH do problema aqui apresentado (tópico 4.4.3).

4.3 Redes Bayesianas na ACH

Como pôde ser observado no capítulo 3, a ACH baseia-se em ferramentas como a análise de árvores de eventos e de falhas. Como conseqüência não conseguem modelar de forma satisfatória as causalidades existentes nas ações humanas. Diante das críticas surgem as expectativas quanto a métodos futuros. Estas podem ser encontradas em Mosleh & Chang (2004). A seguir apresenta-se algumas das expectativas desses autores e como a utilização de redes Bayesianas pode suprir cada uma delas:

1) Identificação de erros de maneira contextual e estimação de probabilidades: redes Bayesianas contextualizam o erro, tanto qualitativamente através dos causadores presentes

vistos através da estrutura gráfica quanto, quantitativamente através do cálculo das probabilidades condicionais da rede;

2) Melhores modelos causais: redes Bayesianas são, por definição, estruturas gráficas que representam as relações de causa e efeito entre variáveis;

3) Uso mais formal do conhecimento acumulado nas ciências comportamentais: as distribuições de probabilidades condicionais podem representar e quantificar todo e qualquer conhecimento;

4) Representação mais realista da natureza dinâmica das interações homem-sistema: uma vez que todas as relações de causa e efeito relevantes estão presentes na rede Bayesiana e expressas por probabilidades condicionais, para cada resposta do sistema existe um correspondente conjunto de probabilidades condicionais que expressa o comportamento do operador. Da mesma forma atualiza-se o comportamento do sistema sob as ações do operador;

5) Capaz de ser aplicada em contextos diferentes: redes Bayesianas são uma grande ferramenta para analisar diferentes contextos. Por exemplo, monitorar problemas operacionais através de diagnósticos e prognósticos realizados de forma eficaz e eficiente e solucionar problemas gerenciais através do conhecimento a respeito de fatores relevantes para o sistema;

6) Melhor calibração com eventos operacionais atuais: através de redes Bayesianas é possível atualizar o sistema realizando inferências subjetivas e empíricas;

7) Consistência: a consistência de uma rede Bayesiana representa todo e qualquer conhecimento sobre um determinado sistema. Desta forma, sua consistência para um processo específico será no mínimo tão satisfatória quanto a de qualquer outro método;

8) Flexibilidade para representar novos conhecimentos: a inclusão de uma nova causa sobre um dado efeito, por exemplo, altera apenas a distribuição de probabilidades condicionais de tal efeito. Por outro lado, a alteração de um conjunto de efeitos não leva a qualquer modificação no seu conjunto de causas. Isto ocorre também tratando-se de exclusões;

9) Sensibilidade à variabilidade do comportamento humano: através de redes Bayesianas é possível tratar pequenos desvios no comportamento do operador, desde que estes estejam representados na rede. Neste caso, é importante que o supervisor ou pessoa que vai monitorar o sistema através de redes Bayesianas esteja devidamente capacitada e treinada para captar estes desvios e a partir deles realizar atualizações no sistema.

Percebe-se que as características de redes Bayesianas parecem suprir muitas das expectativas em relação a métodos de ACH futuros, demonstrando, assim, ser uma boa aproximação na modelagem de erros humanos.

4.4 Quantificação do conhecimento para a ACH via Redes Bayesianas

4.4.1 Opinião do especialista

Um dos maiores problemas para ACH é a escassez de dados para estimar a probabilidade de erro humano, uma vez que erros humanos são raramente coletados e colecionados em um banco de dados. Diante deste contexto, vários campos de estudo utilizam a opinião do especialista para obter dados necessários em uma análise quantitativa.

Ayyub (2001) definiu especialista como uma pessoa muito hábil que teve treinamento e tem um conhecimento em um campo especial. De fato, um especialista deve ter além de um conhecimento aprofundado, vivência e experiência em um determinado assunto.

Extrair do especialista este conhecimento tem sido um grande desafio para muitos psicólogos e pesquisadores da área ao longo dos anos. Atribui-se esta dificuldade às incertezas associadas à probabilidade subjetiva e ao protocolo utilizado para obter tal conhecimento.

Por definição, a probabilidade subjetiva traduz o grau de crença que um indivíduo tem nas chances de ocorrência de algum evento. Diante desta, alguns questionamentos podem ser feitos, como por exemplo: *O que determina tais crenças? Como as pessoas avaliam a probabilidade de um evento incerto?* Estas perguntas encontram fundamentação teórica na psicologia cognitiva. Estudos nesta área mostram que as pessoas contam com princípios heurísticos para reduzir tarefas muito complexas de avaliação de valores e probabilidades a operações mais simples de comparação e julgamento (Campello, 2002). Segundo Hammond et al. (1999), princípios heurísticos são mecanismos inconsistentes que as pessoas utilizam para lidar com a complexidade da vida. Porém, estes mecanismos apesar de muito úteis, podem conduzir pessoas a erros graves e sistemáticos. Os pesquisadores e psicólogos identificaram uma série de falhas associadas à maneira como as pessoas pensam.

O pensamento algumas vezes seguindo uma determinada rotina heurística, se manifesta em julgamentos tendenciosos, anomalias irracionais do próprio pensamento e desvio na percepção sensorial (Hammond et al. 1999).

Obviamente, quando se tenta eduzir o conhecimento a priori de um especialista, problemas associados a fenômenos psicológicos aparecem. Dentre eles, Cooke (1991) e Forester et al. (2004) destacam:

Efeitos de representatividade

As pessoas avaliam probabilidades pelo grau de similaridade entre eventos, ou seja, avaliam uma proposição nova como representação de uma proposição conhecida. Isso ocorre porque estereótipo e julgamentos rápidos influenciam na avaliação.

Efeitos de disponibilidade

As pessoas avaliam a probabilidade de um evento pela facilidade de poder relembrar exemplos. Esta disponibilidade de informação é confundida com taxa de ocorrência. Vários efeitos de imaginabilidade, recuperabilidade e efetividade têm sido observados.

Efeitos de ancoragem

As pessoas atribuem demasiada relevância a primeira informação recebida. Impressões, idéias, estimativas ou dados iniciais funcionam como âncoras para reflexão subseqüente. As âncoras podem assumir vários disfarces. Muitas vezes um simples e inocente comentário, uma estatística publicada no jornal, ou até mesmo a forma como se define um problema pode trazer âncoras às pessoas. Exemplos de âncoras mais habituais são: fatos passados ou uma tendência.

Além dos vieses apresentados acima, os quais são provenientes da confiança nos mecanismos heurísticos para simplificar o processo de avaliação da distribuição de probabilidades, outros problemas também podem ocorrer na edução do conhecimento a priori do especialista, tais como:

- Falta de entendimento sobre o conceito de probabilidade;

-Falta de entendimento dos questionários de edução;

- Falta de entendimento em relação ao impacto das incertezas. Especialistas normalmente atribuem muito mais crédito a suas experiências do que elas realmente merecem.

Os fenômenos psicológicos (Representatividade, Disponibilidade e Ancoragem) estão solidamente embutidos na mente do especialista e geralmente não tem como evitá-los. Porém, é imprescindível compreender e aprender sobre eles, pois apenas assim é possível compensar sua existência. Daí a importância da elaboração de um protocolo de edução que tente minimizar os efeitos que estes vieses e imprecisões podem causar.

Vários métodos para eduzir a opinião do especialista foram desenvolvidos ao longo dos anos. Estes podem ser encontrados em Swain, & Guttmann (1983), Cooke (1991) e Ayyub (2001).

Muitos destes métodos foram criticados por não serem sistemáticos e por não desenvolverem diretrizes para assegurar a consistência e confiabilidades dos seus resultados, não tratando assim as incertezas de forma adequada (Hokstad et al. 1998).

No entanto, um novo método para eduzir o conhecimento a priori tem-se destacado por ser sistemático, pela maneira natural de combinar evidências e principalmente pelos conceitos introduzidos, os quais permitem uma avaliação mais abrangente do procedimento de inferência. Este método será abordado no tópico a seguir.

4.4.2 Método de edução proposto

O método de edução utilizado para quantificar as redes Bayesianas (RBs) a serem apresentadas nos tópicos 5.2.1 e 5.2.6 foi proposto por Nadler & Campello (2001). Eles elaboraram um protocolo de edução utilizando modelos estatísticos apropriados para serem aplicados ao especialista. As respostas deste protocolo são tratadas dentro de uma lógica matemática estatística para que assim construtos de interesse possam ser estimados. Este método baseia-se num modelo de programação linear.

Nadler & Campello (2001) supõem que o especialista dispõe de um conhecimento vago a respeito da distribuição de probabilidades sobre θ e assumem que ele pode fazer apenas um número finito de asserções probabilísticas comparativas quando responde a perguntas sobre a verossimilhança de θ pertencer a um de dois intervalos.

Um protocolo ou questionário foi desenvolvido para fundamentar tal suposição. Este questionário deve ser elaborado considerando um valor mínimo e máximo para θ, construindo assim o intervalo $[\theta_{min},\theta_{max}]$. Como em se tratando de RBs o parâmetro de interesse é uma probabilidade condicional, adota-se aqui $\theta_{min}=0$ e $\theta_{max}=1$.

Dentro deste intervalo, θ é distribuído de acordo com uma distribuição desconhecida $\pi(\theta)$. Este intervalo é particionado em *2n* partições de subintervalos de igual medida de Lebesgue (não se consideram impulsos, isto é, deltas de Dirac), $[\theta_{j-1},\theta_j), j=1,2,...,2n-1;[\theta_{2n-1},\theta_{2n}]$. A probabilidade de θ pertencer ao intervalo $[\theta_{j,}\theta_{j+k})$ é $\sum_{i=0}^{k}\pi_{j+i}$, onde π_j é a probabilidade de θ pertencer ao j-ésimo subintervalo. As questões devem ser do tipo: Qual das duas é maior $P\{\theta\in[\theta_{i-1},\theta_i)\,\mathrm{Y}\,[\theta_i,\theta_{i+1})\,\mathrm{Y}\,..\,\mathrm{Y}\,[\theta_{i+k},\theta_{i+k+1})\}$ *ou* $P\{\theta\in[\theta_{s-1},\theta_s)\,\mathrm{Y}\,[\theta_s,\theta_{s+1})\,\mathrm{Y}\,..\,\mathrm{Y}\,[\theta_{s+m},\theta_{s+m+1})\}$? (Campello, 2002).

Dentro desse contexto, o especialista pode optar pela 1ª, pela 2ª ou por nenhuma das alternativas (caso seu conhecimento seja limitado para opinar). Recomenda-se evitar a superposição de intervalos nas questões para evitar maiores dificuldades de resposta. Portanto, as questões devem ser tais que: $i+k+1\le s-1 \text{ e } i<s$.

Além do que foi exposto acima, para construção do questionário, é necessário seguir as orientações encontradas em Campello (2002):

- Os intervalos devem ser progressivamente refinados para que haja uma evolução gradativa do grau de dificuldade entre as questões;
- As questões não devem ser repetidas para evitar os efeitos da ancoragem;

- Questões envolvendo intervalos diferentes devem ser introduzidas: isto permitirá uma maior precisão na estimação da função densidade de probabilidade;
- Os intervalos refinados devem se sobrepor minimamente com os imediatamente menos refinados: isto contribuirá para uma melhor definição da curva;
- As questões devem ser simétricas para garantir a uniformidade dos subintervalos;
- Apresentação dos intervalos elementares deve ser eqüitativa para evitar a introdução de vieses;
- O número de questões não deve ser muito grande para não cansar o especialista.

Após respondidas, as questões são usadas como restrições para um problema de programação linear cuja intenção é determinar os valores dos parâmetros π_j's do modelo estudado de forma a maximizar ou minimizar o resultado final de sua função objetivo (a função de distribuição acumulada de θ). Assim, ao final tem-se o seguinte problema de programação linear:

$$\underset{\pi_j}{Max(Min)} \sum_{j=1}^{2n} c_j \pi_j \qquad \textit{Equação 4.6}$$

sujeito as seguintes restrições:

$$\sum_{j=i}^{k} \pi_j - \sum_{j=l}^{m} \pi_j \leq 0 \qquad \textit{Equação 4.7}$$

$$\pi_j \geq 0,\ j = 1,2,...., 2n \qquad \textit{Equação 4.8}$$

$$\sum_{j=1}^{2n} \pi_j = 1 \qquad \textit{Equação 4.9}$$

Uma vez que os parâmetros que maximizam e minimizam a função objetivo do problema são encontrados, tem-se uma função de distribuição de máximo e outra de mínimo, respectivamente. A Figura 4.6 mostra que a partir da função distribuição de máximo e de mínimo, tem-se a família de distribuições de probabilidade admissíveis relacionadas as respostas eduzidas, a qual será consistente com as respostas dos especialistas. A partir desta família de distribuições, obtém-se a função densidade de probabilidade e conseqüentemente a moda, valor mais freqüente encontrado nas respostas do questionário de edução.

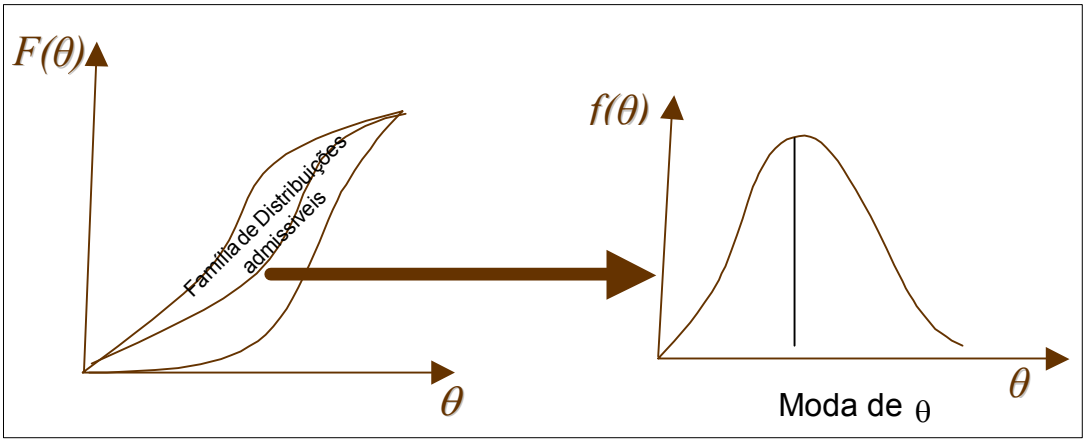


Figura 4.6 Obtenção da moda de θ a partir da função de máximo e mínimo.

Para o questionário de edução, Nadler & Campello (2001) estabeleceram dois objetivos, os quais constituem as vantagens do questionário.

Primeiro, o questionário deve permitir e garantir que o especialista tenha uma percepção progressiva, gradual e suave do parâmetro, à medida que ele vai respondendo as questões. Este objetivo é alcançado através de um indicador de detalhamento da questão, D_{P_i}, o qual garantirá a receptividade local, isto é, para cada questão.

Segundo, o questionário deve permitir e garantir uma uniformidade de apresentação dos intervalos elementares distribuídos ao longo do questionário, de tal maneira a prover a mesma chance de escolha para todo intervalo elementar (ε_j). Este objetivo é alcançado através de um indicador de detalhamento de intervalo elementar, D_{ε_j}, o qual garantirá a receptividade global, isto é, para cada questionário, ou parte de um questionário.

Estes indicadores estão definidos nas equações abaixo:

$$D_{P_i} = \frac{n^2 - (m-k+1)(u-s+1)}{n^2-1} \qquad \textit{Equação 4.11}$$

onde *m* e *k* são respectivamente os índices superior e inferior do 1º intervalo do questionário, ocorrendo o mesmo para *u* e *s* sobre o 2º intervalo.

$$D_{\varepsilon_j} = \sum_{i=1}^{q} (d_{i,j} \times D_{P_i}) \qquad \textit{Equação 4.12}$$

onde q é o número de questões e $d_{i,j}$=1 se o subintervalo ε_j fizer parte da questão i ou $d_{i,j}$= 0 caso contrário.

A abordagem detalhada destes indicadores encontra-se em Campello (2002).

O protocolo de edução proposto por Nadler & Campello (2001) apresenta índices relacionados tanto à qualidade do questionário quanto à qualidade das respostas dadas. Em

relação a qualidade do questionário, considera-se os índices D_{P_i} e D_{ε_j}, apresentados anteriormente. Lembrando que o primeiro mede o grau de refinamento entre as questões (D_{P_i}) e o segundo permite avaliar a uniformidade dos subintervalos ao longo das questões (D_{ε_j}). Assim, considerando *i* como o índice da questão, quanto maior o coeficiente de correlação linear entre os pares (i, D_{P_i}) melhor apresenta-se o índice de refinamento entre as questões e quanto maior a uniformidade de $D_\varepsilon = \{D_{\varepsilon_1}, D_{\varepsilon_2}, ..., D_{\varepsilon_{2n}}\}$ melhor a simetria do questionário. Em se tratando da qualidade das respostas, é possível através de construtos avaliar as incertezas associadas às opiniões de dois especialistas identificando assim, alguma inadequação específica no conhecimento do especialista ou na sua dificuldade de expressá-lo. É necessário apenas computá-los numa região pré-definida do espaço do parâmetro. Através da análise das curvas que representam as famílias de distribuição de probabilidades de dois especialistas é possível pesquisar regiões problemáticas no que diz respeito aos construtos: Vagueza, Precisão, Concordância, Vagueza global, Conflito, Decidabilidade, Harmonia, Qualidade da inferência e Qualidade da informação.

Segundo Nadler & Campello (2001) pode-se montar um bom questionário baseando-se nestes índices. Os autores exibem um questionário baseado em 42 questões e 20 subintervalos limitados entre 0 e 100. Tal questionário aponta um coeficiente de correlação de 0,98 entre os pares (i, D_{P_i}) e uma uniformidade próxima da ideal para D_ε. Apesar deste questionário apresentar bons indicadores de qualidade, a grande quantidade de questões o torna inviável para a quantificação do conhecimento em análises de confiabilidade por redes Bayesianas.

Portanto, seguindo as orientações propostas, procurou-se construir um questionário que atendesse a necessidade citada. Assim, o intervalo total (de 0% a 100%) foi particionado em 10 intervalos elementares e 20 questões foram especificadas.

Tabela 4.3 Questionário de edução com 20 questões

Questão	***I1***					***I2***		
1	( )	*Menor*	*que*	*50*	*ou*	*50*	*Acima*	( )
2	( )	*Menor*	*que*	*60*	*ou*	*60*	*Acima*	( )
3	( )	*Menor*	*que*	*40*	*ou*	*40*	*Acima*	( )
4	( )	*Menor*	*que*	*70*	*ou*	*70*	*Acima*	( )
5	( )	*Menor*	*que*	*30*	*ou*	*30*	*Acima*	( )
6	( )	*Menor*	*que*	*40*	*ou*	*50*	*Acima*	( )
7	( )	*Menor*	*que*	*50*	*ou*	*60*	*Acima*	( )
8	( )	*Menor*	*que*	*40*	*ou*	*70*	*Acima*	( )

9	( )	*Menor*	*que*	*30*	*ou*	*60*	*Acima*	( )
10	( )	*30*	*a*	*70*	*ou*	*70*	*Acima*	( )
11	( )	*Menor*	*que*	*30*	*ou*	*30*	*a 70*	( )
12	( )	*40*	*a*	*70*	*ou*	*70*	*Acima*	( )
13	( )	*Menor*	*que*	*30*	*ou*	*30*	*a 60*	( )
14	( )	*Menor*	*que*	*20*	*ou*	*60*	*Acima*	( )
15	( )	*20*	*a*	*50*	*ou*	*60*	*a 80*	( )
16	( )	*20*	*a*	*40*	*ou*	*50*	*a 80*	( )
17	( )	*20*	*a*	*40*	*ou*	*70*	*a 90*	( )
18	( )	*30*	*a*	*50*	*ou*	*80*	*Acima*	( )
19	( )	*40*	*a*	*60*	*ou*	*80*	*Acima*	( )
20	( )	*Menor*	*que*	*20*	*ou*	*40*	*a 60*	( )

Nesse caso, o coeficiente de correlação entre os pares (i, D_{P_i}) é igual a 0,95 e D_ε é estatisticamente uniforme (a estatística calculada equivale a 0,7, enquanto que a tabelada com 0,01 de significância e 9 graus de liberdade é igual a 2). Assim, o questionário elaborado pode ser classificado como adequado ao processo de edução correspondente. Porém, Firmino et al. (2006) observaram experimentalmente que o questionário exibido na Tabela 4.3 não garante a captura do conhecimento do especialista quando suas reais crenças apontam para 4 dos 10 subintervalos predefinidos, apresentando assim distorções (Tabela 4.4), mesmo tendo o questionário bons indicadores de qualidade, segundo Nadler & Campello (2001). À observação da não captura do conhecimento do especialista deu-se o nome de *indicador de aderência*, o qual constitui uma nova métrica de qualidade que deve ser adicionada às métricas do questionário de edução aqui proposto.

Buscando contornar as distorções e ainda satisfazer a uniformidade de $D\varepsilon$ mantendo um bom coeficiente de correlação entre os pares (i, D_{P_i}), Firmino et al. (2006) introduziram gradativamente pares simétricos de questões até que não houvessem mais distorções do questionário de edução. Eles adicionaram ao questionário de edução exibido na Tabela 4.3 seis questões, as quais correspondem aos intervalos apresentados na Tabela 4.4. Com isso todos subintervalos são "alcançáveis", ainda que haja uma queda de qualidade segundo os índices propostos por Nadler & Campello (2001). Agora, o coeficiente de correlação entre os pares $(i,\ D_{P_i})$ é reduzido a 0,92 e a estatística de teste de aderência de D_ε aumenta para 1,4 . O questionário proposto aqui está exibido na Tabela 4.5.

Tabela 4.4 Distorção entre as reais crenças do especialista e os resultados da análise do questionário de edução exibido na Tabela 4.3

Reais crenças do especialista	Crenças obtidas pelo questionário
[10, 20)	[0, 10)
[20, 30)	[0, 10)
[70, 80)	[90, 100)
[80, 90)	[90, 100)

Tabela 4.5 Questionário de edução com 26 questoes após a remoção das distorções.

Questão	Interv. 1				Interv. 2		
1	0	a	50	ou	50	a	100
2	0	a	60	ou	60	a	100
3	0	a	40	ou	40	a	100
...	...	...	...	...	...	...	...
21	10	a	20	ou	20	a	30
22	70	a	80	ou	80	a	90
23	0	a	20	ou	20	a	40
24	60	a	80	ou	80	a	100
25	80	a	90	ou	90	a	100
26	0	a	10	ou	10	a	20

Com um número reduzido de perguntas, pode-se ter uma distribuição de probabilidades sobre os subintervalos π_j's onde a grande maioria deles possui massa probabilística nula e conseqüentemente grandes massas probabilísticas encontram-se nos poucos restantes. Diante deste comportamento, Firmino et al. (2006) propõem que mediante poucas perguntas a responder busque-se trabalhar mais explicitamente medidas estatísticas de posição menos sensíveis à variância do modelo, tais como a moda. Estas medidas poderão representar mais fielmente tanto a opinião do especialista quanto os objetivos de um questionário reduzido.

O tópico 5.3.1.3 abordará maiores detalhes sobre como o questionário foi construído e os custos envolvidos em utilizar o questionário proposto por Nadler & Campello (2001) quando comparado com o questionário proposto aqui.

4.4.3 Software E&P/CHESF BBN

Este *software* foi desenvolvido por Firmino & Droguett (2004) com o objetivo de quantificar métricas de confiabilidade. A linguagem Java foi utilizada para implementação do mesmo.

Para utilização do *software* E&P/CHESF BBN é necessário construir a rede Bayesiana, preencher as TPCs como dados de entrada necessários para o cálculo e informar o número de iterações para as inferências. Após a modelagem, as probabilidades posteriores de cada nó

da rede são apresentadas.

Este *software* possibilita a atualização da rede através de evidências subjetivas ou empíricas, além de apresentar a vantagem de utilizar um algoritmo otimizado para a realização de pesquisas nas tabelas de probabilidades condicionais de uma variável aleatória discreta de uma rede cujos pais são, também, variáveis aleatórias discretas. Tal algoritmo apresenta-se como um diferencial do programa E&P/CHESF BBN devido à sua eficiência e desempenho sensivelmente superiores aos métodos de busca geralmente adotados (Firmino & Droguett, 2004).

O capítulo seguinte abordará a aplicação de redes Bayesianas à equipe de manutenção de linhas de transmissão.

5. ANÁLISE DE CONFIABILIDADE HUMANA DA EQUIPE DE MANUTENÇÃO DE LTS DA CHESF

Este capítulo apresenta a ACH da equipe de manutenção de linhas de transmissão (LTs) utilizando redes Bayesianas, conforme capítulo 4. O fluxograma da Figura 5.1 expõe de maneira sistemática a metodologia para ACH proposta neste trabalho, a qual terá como aplicação o estudo de caso citado.

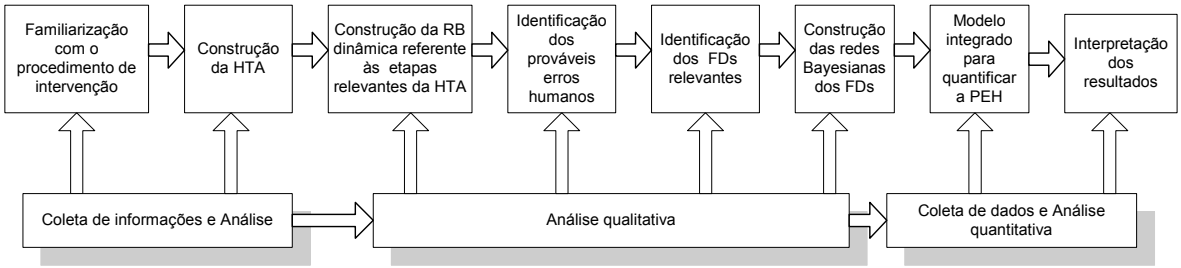


Figura 5.1 Fluxograma da metodologia proposta

Familiarização com o procedimento de intervenção: esta etapa corresponde à obtenção do conhecimento necessário sobre o procedimento de intervenção de manutenção em LTs, isto é, substituição de cadeias de isoladores em LTs para descrição da tarefa (próxima etapa do fluxograma). Este conhecimento foi adquirido através da leitura de normas disponibilizadas pela CHESF e principalmente através de observações do procedimento na prática. Nesta etapa também foi observado o contexto, ou seja, as condições ou circunstâncias em que o procedimento de intervenção ocorre. Do contexto extrai-se os fatores que de alguma forma alteram o desempenho dos eletricistas envolvidos na intervenção, isto é, FDs.

Construção da HTA: as informações adquiridas na etapa anterior, relacionadas ao procedimento de intervenção, serão descritas e organizadas através da HTA (*Hierarchical Task Analysis*), que é uma metodologia que descreve tarefas sistematicamente.

As etapas mencionadas acima compõem a fase inicial deste estudo, isto é, coleta de informações e análise. As próximas etapas correspondem à análise qualitativa das informações recebidas através da modelagem das ações humanas via redes Bayesianas (RB).

Construção da RB dinâmica referente às etapas relevantes da HTA: nesta etapa serão identificadas as etapas críticas da HTA em termos de perigo para os eletricistas envolvidos. A partir dessas etapas, será construída a rede Bayesiana dinâmica da tarefa, a qual representa as ações dos eletricistas através de cenários distintos e seqüenciais, permitindo também uma visualização da interação existente entre eles.

Identificação dos prováveis erros humanos: através dos cenários constituintes da rede Bayesiana da tarefa e do conhecimento adquirido na fase inicial é possível identificar os prováveis erros de cada eletricista, bem como, as conseqüências associadas. Esta identificação possibilita um melhor entendimento do comportamento dos eletricistas, permitindo que pelos prováveis erros humanos relatados sejam conhecidas as suas prováveis causas.

Identificação dos FDs relevantes: uma vez identificados os prováveis erros humanos é possível identificar os prováveis fatores responsáveis por tais erros. Nesta etapa, serão identificados os FDs relevantes para cada eletricista envolvido.

Construção das redes Bayesianas dos FDs: nesta etapa serão identificadas as relações de causa e efeito existentes entre os fatores selecionados na etapa anterior. Posteriormente, é construída uma rede Bayesiana para cada função específica assumida pelos eletricistas na intervenção.

As próximas etapas correspondem à coleta de dados para análise quantitativa através da modelagem das ações humanas via redes Bayesianas (RB).

Modelo integrado para quantificar a probabilidade de erro humano (PEH): nesta etapa, será realizada a integração das redes Bayesianas dos FDs à rede Bayesiana da tarefa. Então, cada eletricista representado através de um nó na RB da tarefa terá a sua rede Bayesiana referente aos seus FDs relevantes. Posteriormente será realizado o processo de edução proposto neste trabalho para obtenção das probabilidades condicionais necessárias à alimentação da rede referente ao modelo integrado.

Interpretação dos resultados: os dados obtidos do processo de edução serão modelados para obtenção das PEHs, as quais serão nesta etapa interpretadas.

5.1 Descrição da tarefa

A descrição da tarefa foi realizada através da HTA (*Hierarchical Task analysis*), que é um método sistemático usado para descrever e organizar as tarefas que deverão ser executadas no decorrer da realização de um trabalho (Kirwan & Ainsworth, 1992). Este método foi selecionado entre tantos outros por ser capaz de organizar a tarefa em uma escala de atividades, tratando cada uma delas com o nível de detalhamento desejado e também por possibilitar uma melhor visualização de como as atividades interagem com o trabalho como um todo.

As intervenções observadas foram descritas em termos de tarefas e de planos, os quais governam as condições para realização das mesmas. A análise realizada foi desenvolvida

segundo a percepção de uma equipe estabelecida para acompanhar e observar várias intervenções.

A HTA realizada deixou evidente que algumas das informações contidas nas instruções de manutenção e procedimentos de intervenção em LTs disponibilizadas pela CHESF não correspondem ao que é executado em campo. Daí a importância desta descrição, pois passos importantes do procedimento podem ter sido omitidos, bem como, outros também podem ser descobertos no decorrer da análise.

A descrição da tarefa através da HTA além de ter possibilitado uma melhor análise da tarefa também possibilita a atualização das instruções e procedimentos de intervenção beneficiando futuros treinamentos.

5.1.1 Torres, linhas e cadeia de isoladores

Foram observadas intervenções em linhas de transmissão de 230 KV e de 500 KV. Durante a descrição da tarefa, pôde-se observar que estas intervenções se assemelham em muitos detalhes e que suas maiores diferenças estão no peso e tamanho dos equipamentos como também no tipo de estrutura das torres.

As intervenções associadas à substituição de isoladores em cadeias de suspensão em I, 230kV, estruturas metálicas foram as mais observadas. Portanto, o detalhamento da tarefa foi realizado neste âmbito. A Figura 5.2 apresenta este tipo de torre de transmissão. A troca de cadeia de isoladores é realizada a uma altura mínima de 19 m e máxima de 40 m, em linha energizada, utilizando o método à distância, conforme procedimentos da CHESF. Esta intervenção tem por finalidade a substituição de isoladores que, após certo período de exposição a intempéries, apresentem níveis de oxidação, o que comprometem as suas características mecânicas e elétricas e conseqüentemente a integridade da linha.

Atualmente, a CHESF possui 46.457 torres de transmissão de energia espalhadas por quase toda a extensão do rio São Francisco. Esta empresa tem se preocupado com as trocas dos isoladores de suas linhas de transmissão de 230 KV devido à grande importância de tal operação. Elas representam 31.985 torres, cerca de 68,5% do total (CHESF, 2005).

Figura 5.2 Torre de transmissão de isoladores em cadeias de suspensão em I, 230kV

5.1.2 Acesso, local e equipe

A maioria das estruturas se encontra em locais ermos, longe dos centros urbanos, uma vez que têm a função de sustentar linhas que transportam energia elétrica entre os centros de produção e subestações. Geralmente, são locais de difícil acesso.

Foi percebido que um caminhão baú transporta tanto os eletricistas quanto os equipamentos e ferramentas. Portanto, problemas de acomodação aliados à precariedade das estradas de acesso podem causar *stress* nos eletricistas (tópico 5.2.4).

As estruturas estão instaladas nas faixas de servidão. Esta faixa acompanha todo o percurso da linha de transmissão. A conservação da faixa de servidão é de responsabilidade da CHESF, ou seja, a limpeza e o desmatamento. A devida manutenção desta faixa contribui para a segurança e confiabilidade da equipe que realiza a troca da cadeia de isoladores.

Esta equipe é composta por sete eletricistas, sendo um deles o encarregado. Este tem a função de liderar e monitorar a equipe. Para a troca da cadeia, os eletricistas assumem funções diferentes. Três eletricistas, geralmente os mais experientes, sobem na estrutura para realizarem a troca. A Figura 5.3 mostra como estes três eletricistas estão dispostos na estrutura. Os outros três eletricistas ficam na faixa servidão, próximos à estrutura. Estes dão suporte aos eletricistas que estão na estrutura, isto é, seguram a linha de mão, artifício utilizado para içamento de equipamentos, ferramentas e isoladores à estrutura, ou ainda podem substituí-los quando necessário. Atribui-se a estes, a função de eletricistas auxiliares. A Figura 5.4 mostra estes eletricistas segurando a linha de mão.

Figura 5.3 Eletricistas na estrutura

Figura 5.4 Eletricistas auxiliares

Para contemplar todos os eletricistas envolvidos na atividade, a Figura 5.5 mostra a disposição destes eletricistas durante a troca, onde:

EE - Eletricista Encarregado,

ET- Eletricista de Topo,

EM- Eletricista de Montagem,

EA- Eletricista de Apoio,

EAUX- Eletricistas Auxiliares.

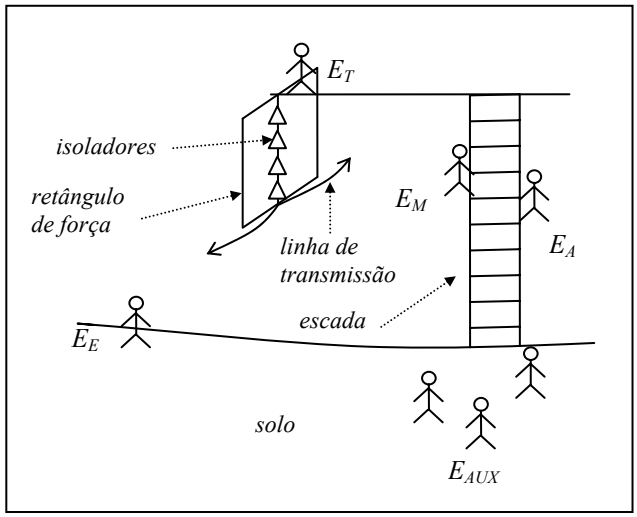


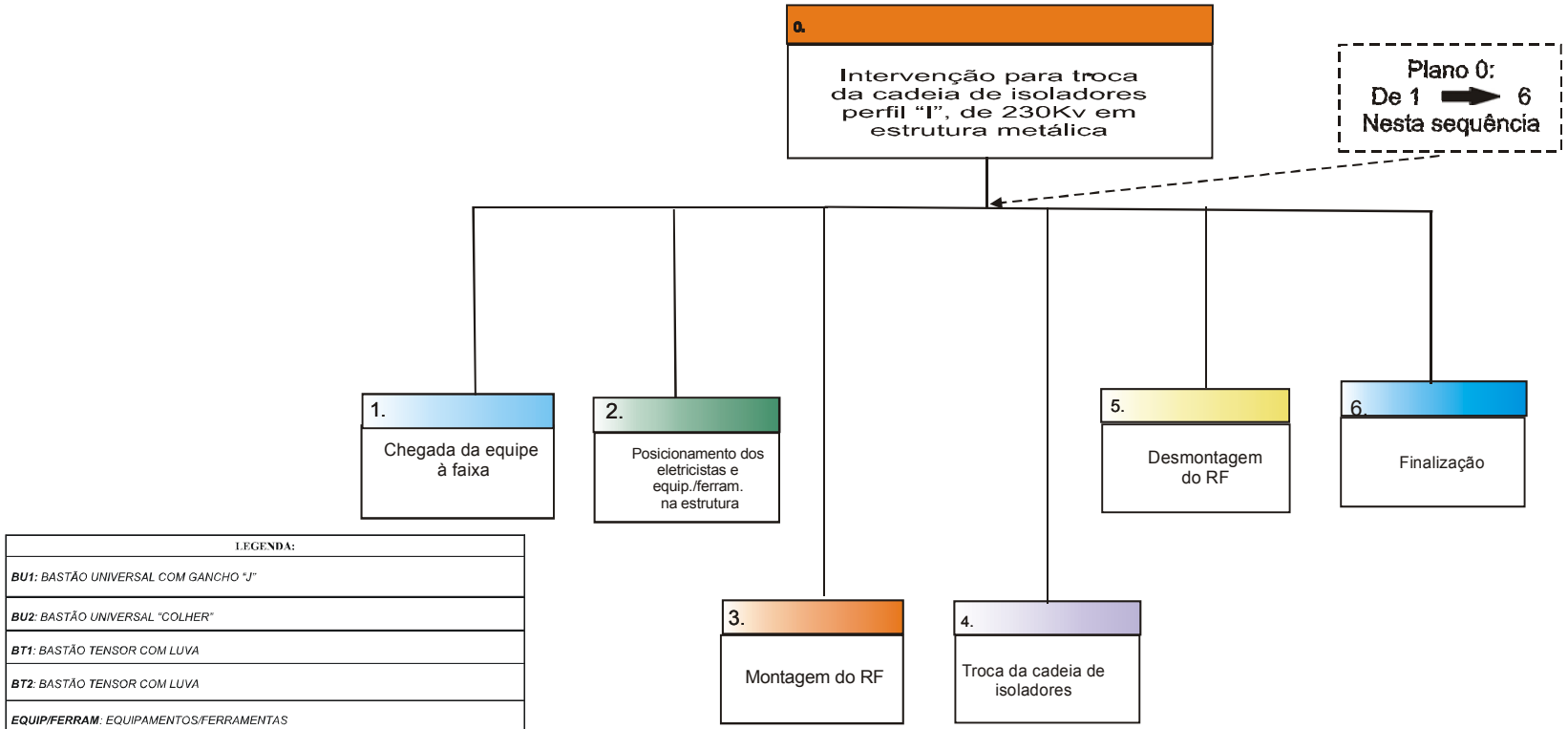
Figura 5.5 Disposição dos eletricistas durante a troca.

5.1.3 HTAs

A HTA é iniciada pelo analista com determinação da meta a ser atingida. Esta meta é a conclusão da troca de cadeia de isoladores. A partir daí são definidos os planos ou etapas, que são as principais tarefas seqüenciadas para atingir a meta. Para cada tarefa são definidas as sub-tarefas seqüenciadas, indicando quando as sub-tarefas são simultâneas. A depender do detalhamento desejado, a HTA pode ter vários níveis.

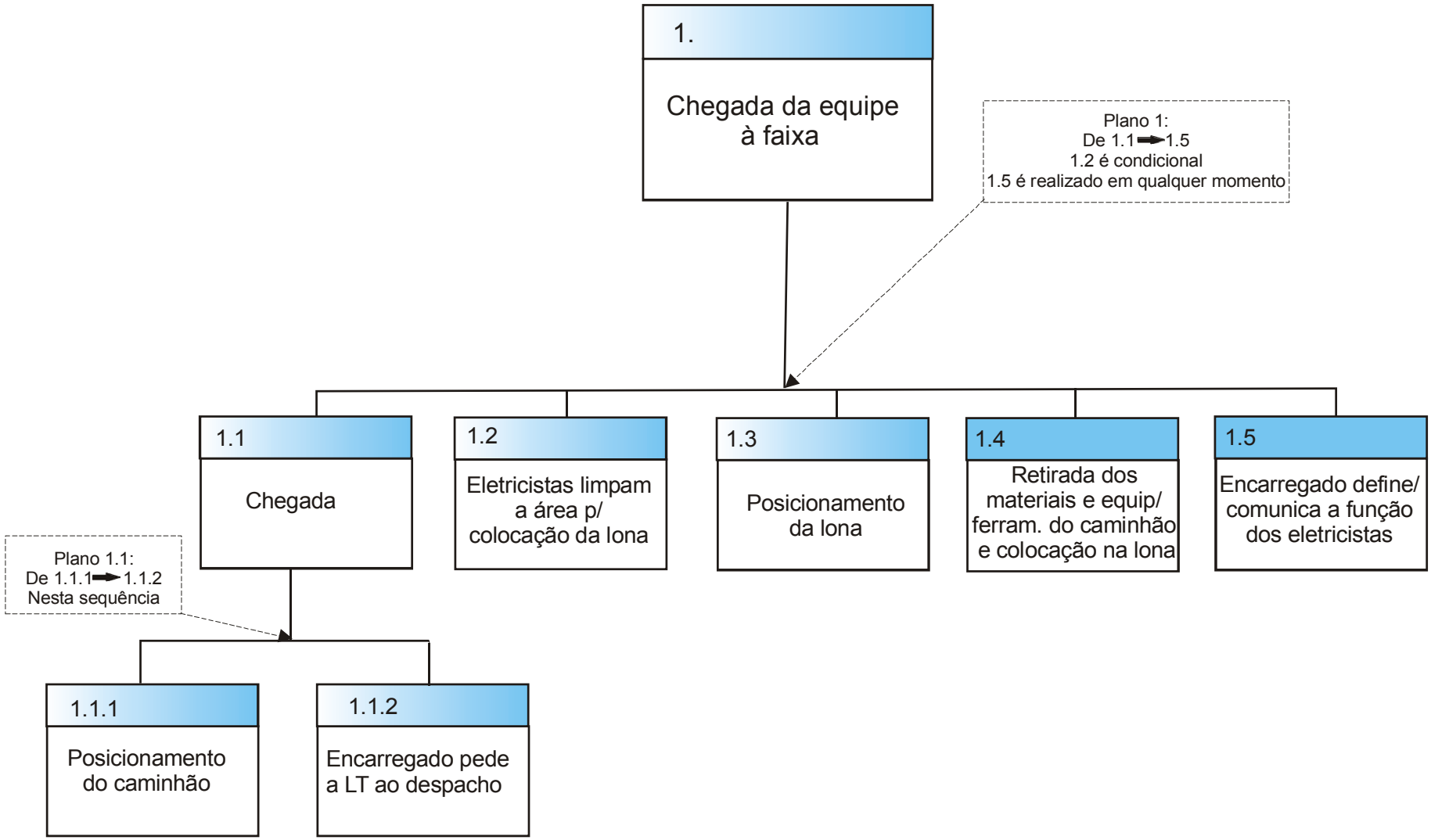
A intervenção para troca de isoladores em cadeias de suspensão I, 230KV em estrutura metálica foi dividida em seis etapas com três níveis de detalhamento. Estas etapas são: Chegada da equipe ao local; Posicionamento dos eletricistas e equipamentos e ferramentas na estrutura; Montagem do retângulo de força; Troca da cadeia de isoladores; Desmontagem do retângulo de força e Finalização. Estas etapas estão representadas nos tópicos a seguir.

5.1.3.1 Intervenção para troca de isoladores em cadeias de suspensão I, 230KV em estrutura metálica

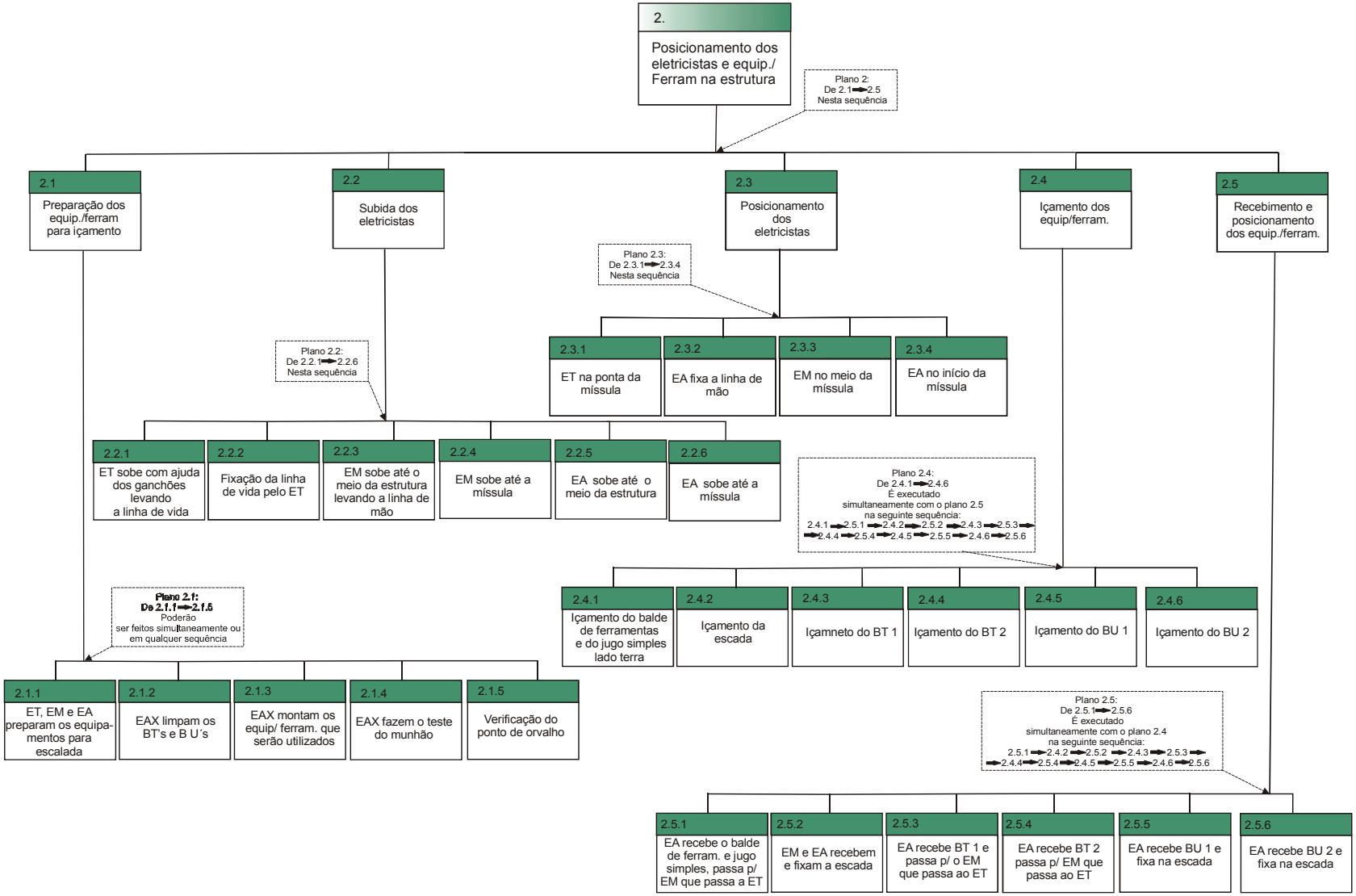


LEGENDA:
BU1: *BASTÃO UNIVERSAL COM GANCHO "J"*
BU2: *BASTÃO UNIVERSAL "COLHER"*
BT1: *BASTÃO TENSOR COM LUVA*
BT2: *BASTÃO TENSOR COM LUVA*
EQUIP/FERRAM: *EQUIPAMENTOS/FERRAMENTAS*
RT: *RETÂNGULO DE FORÇAS*
ET: *ELETRICISTA DE TOPO*
EM: *ELETRICISTA DE MONTAGEM*
EA: *ELETRICISTA DE APOIO*
EAUX: *ELETRICISTAS AUXILIARES*
CADEIA DE ISOLADORES VELHOS: *17 ISOLADORES*
CADEIA DE ISOLADORES NOVOS: *17 ISOLADORES*
LT: *LINHA DE TRANSMISSÃO*
MATERIAIS: *ISOLADORES*

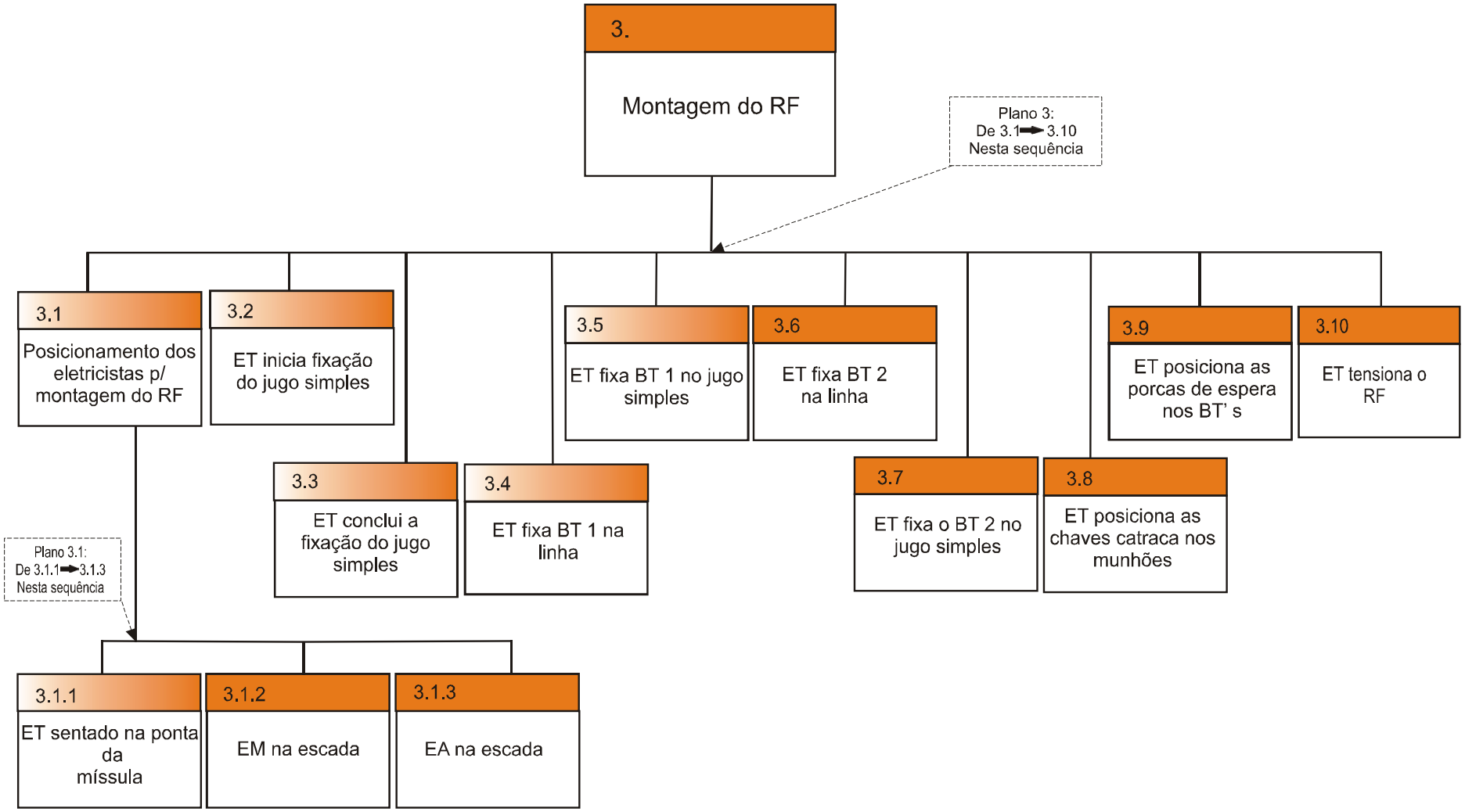
5.1.3.2 Chegada da equipe ao local



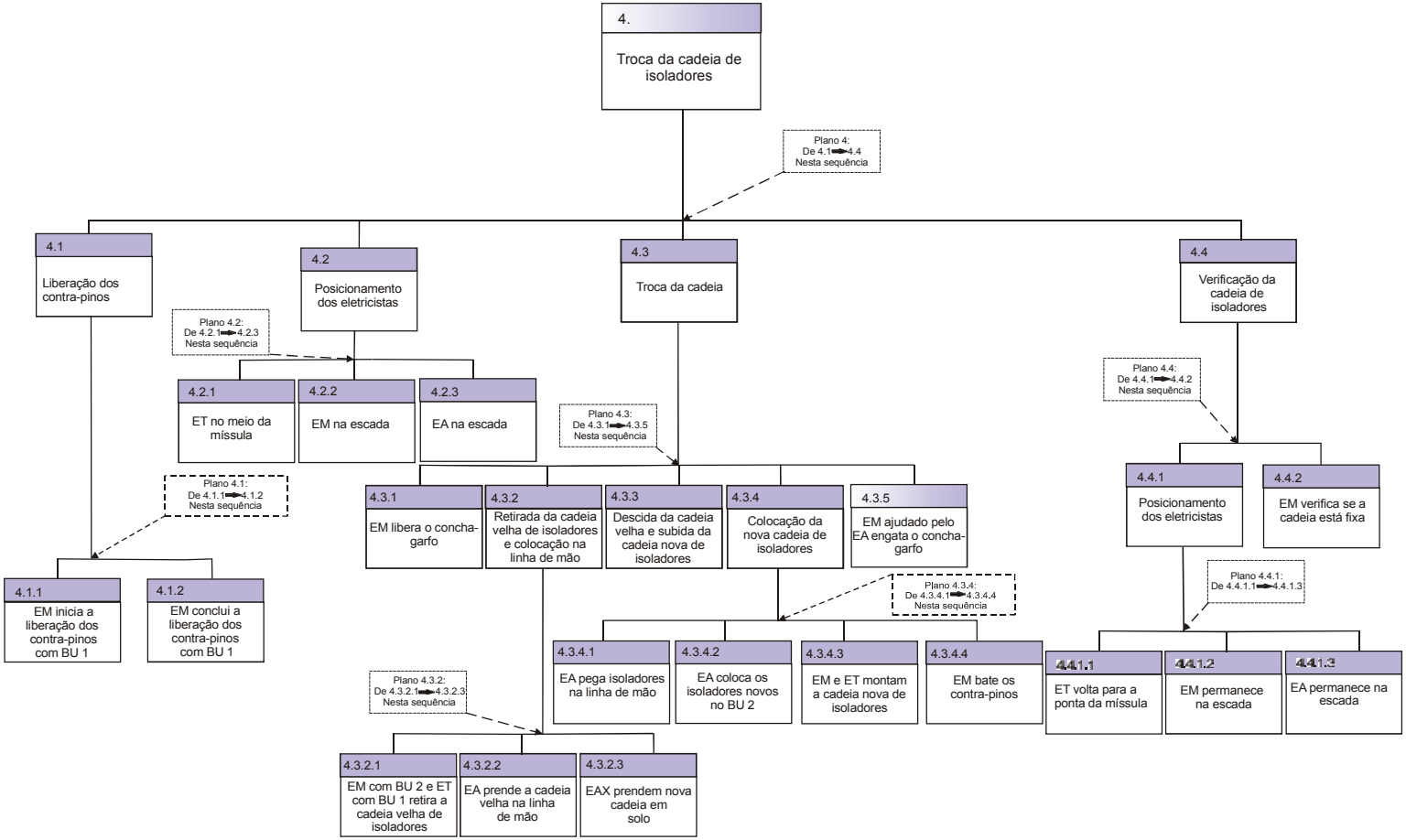
5.1.3.3 Posicionamento dos eletricistas e equipamentos e ferramentas na estrutura



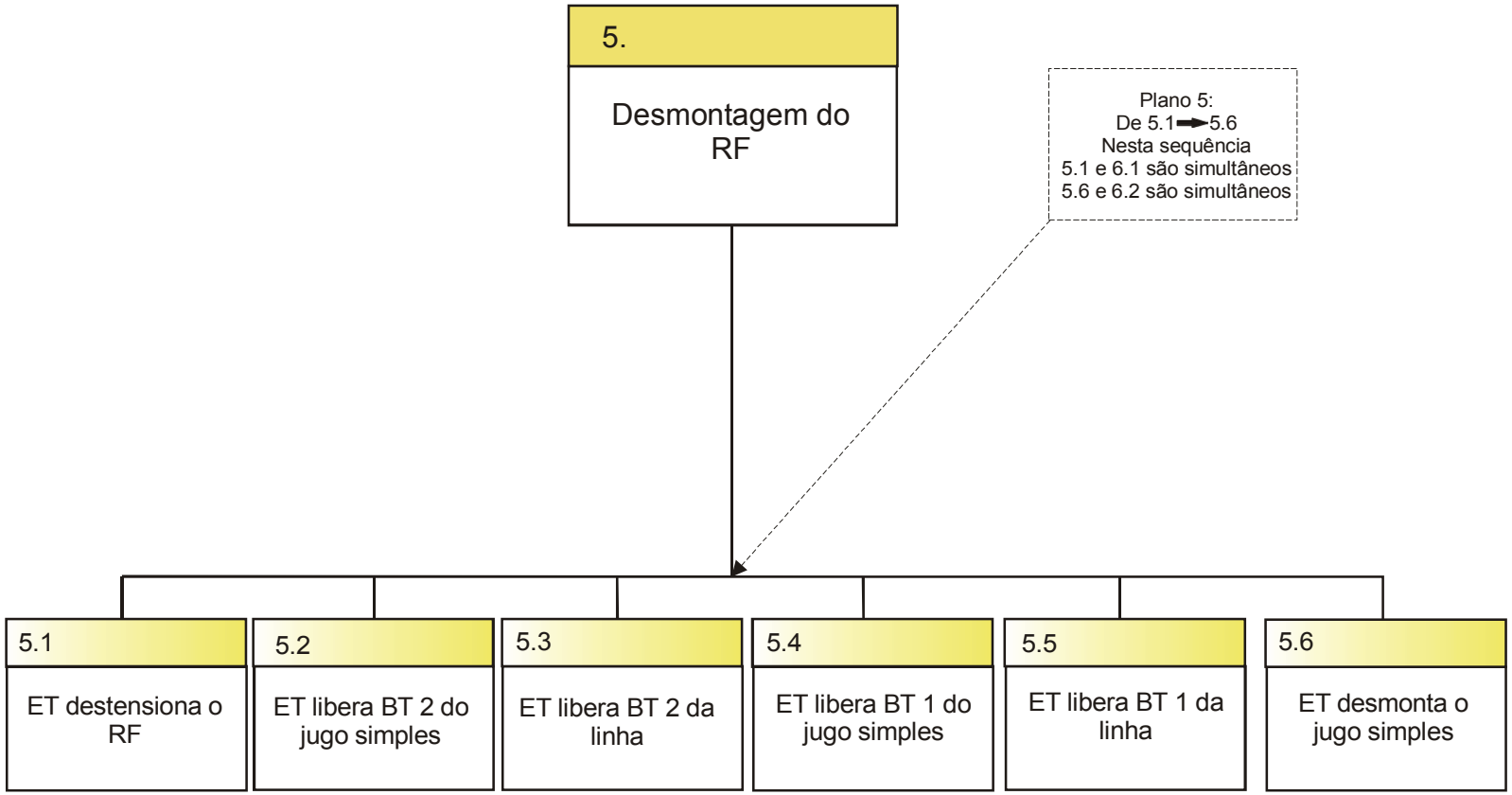
5.1.3.4 Montagem do retângulo de forças



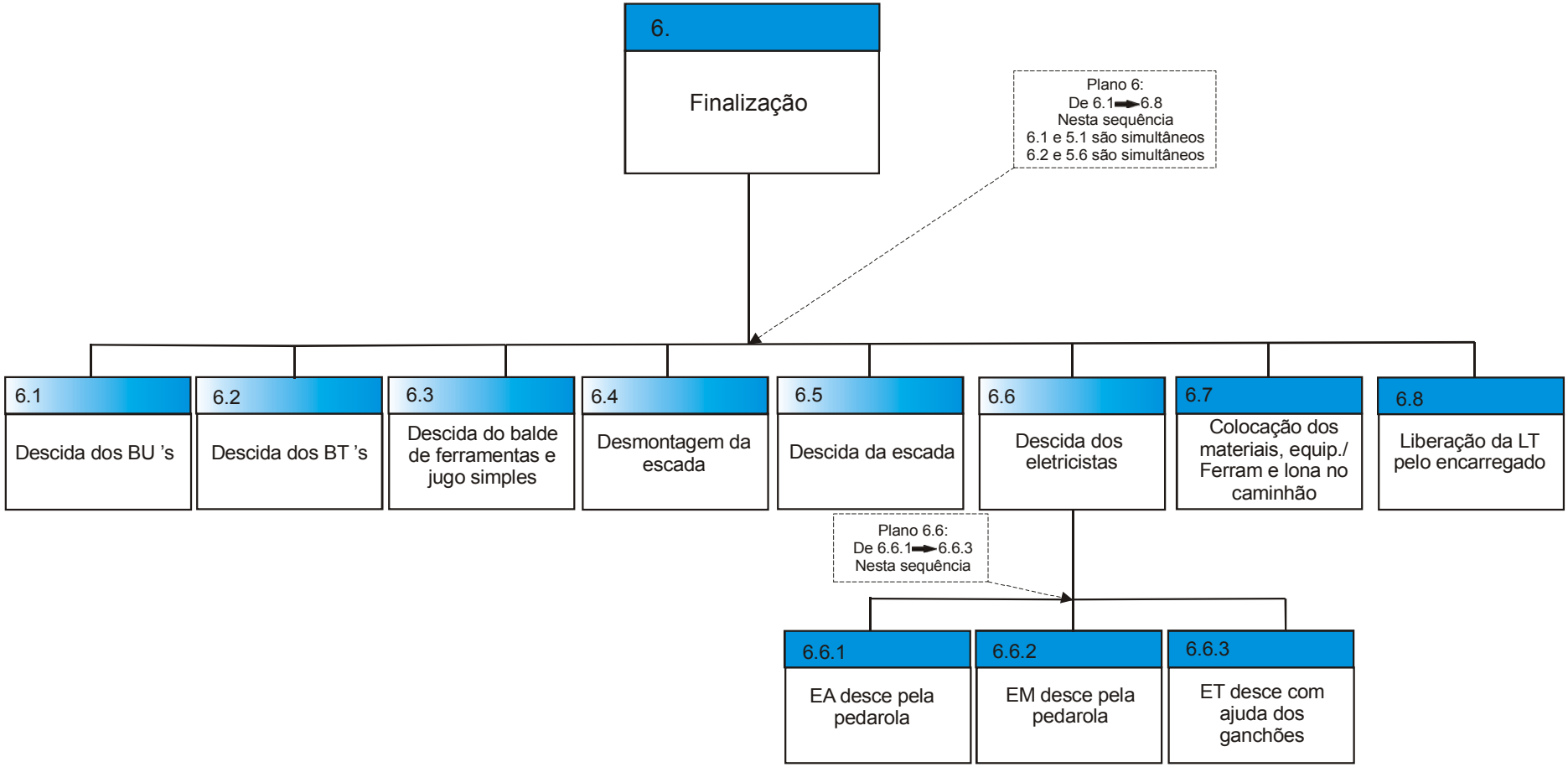
5.1.3.5 Troca da cadeia de isoladores



5.1.3.6 Desmontagem do retângulo de forças



5.1.3.7 Finalização



5.2 Análise da tarefa

Para construção da rede Bayesiana das atividades de substituição de cadeias de isoladores da CHESF foram analisadas as HTAs apresentadas no tópico 5.1.3 em termos de importância e criticalidade das etapas para a confiabilidade e segurança dos eletricistas envolvidos. Evidentemente, um bom desempenho dos eletricistas com exceção de falhas de equipamentos e inadequação de ferramentas, conduzem o sistema ao sucesso.

Dentro deste contexto, as HTAs apresentadas nos tópicos 5.1.3.4, 5.1.3.5 e 5.1.3.6 foram consideradas as mais relevantes. Estes tópicos tratam respectivamente das etapas: Montagem do retângulo de forças, Troca da cadeia de isoladores e Desmontagem do retângulo de forças.

O retângulo de forças (RF) tem a finalidade de sustentar o peso da linha, enquanto os eletricistas realizam a substituição da cadeia de isoladores. Portanto, é fundamental que este esteja corretamente instalado. A Figura 5.6 mostra o ET montando o RF.

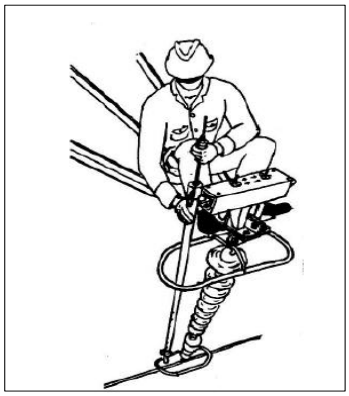


Figura 5.6 Montagem do RF.

A troca da cadeia de isoladores pode ser vista como a etapa da atividade em que há uma maior interação entre os eletricistas. É nesta etapa que os eletricistas retiram a cadeia de isoladores velha e colocam a nova cadeia de isoladores, e conseqüentemente a movimentação dos bastões universais constitui a relevância desta atividade. Pois, existem distâncias mínimas de segurança entre os trabalhos de manutenção e as partes energizadas, as quais precisam ser obedecidas, de forma a garantir que não haja descargas elétricas de potência. A Figura 5.7 mostra esta atividade.

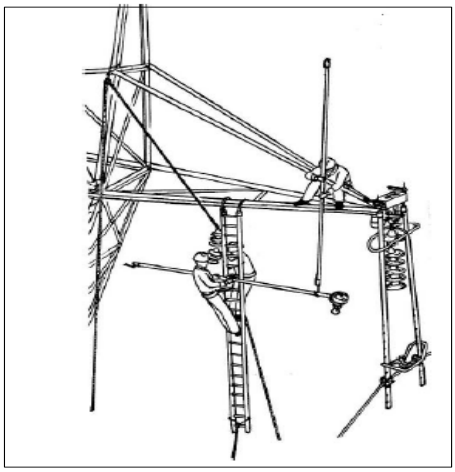


Figura 5.7 Troca da cadeia de isoladores.

Na desmontagem do RF, o ET realiza o destensionamento do retângulo de forças, isto é, a transferência do peso da linha para a nova cadeia de isoladores. Portanto, é imprescindível que a cadeia tenha sido colocada corretamente, isto é, bater todos os contra-pinos, realizar o engate do concha-garfo e verificar se a nova cadeia está fixa. A Figura 5.8 mostra o ET destensionando o retângulo de forças.

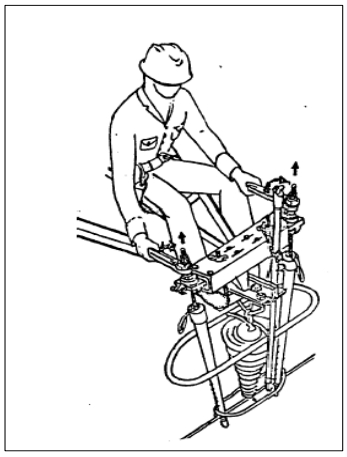


Figura 5.8 Destensionamento do RF.

5.2.1 Rede Bayesiana da tarefa

As etapas comentadas acima serão retratadas através da rede Bayesiana apresentada na Figura 5.9. Estas etapas são apresentadas seqüencialmente em sete cenários críticos cuja descrição se encontra no tópico 5.2.1.1.

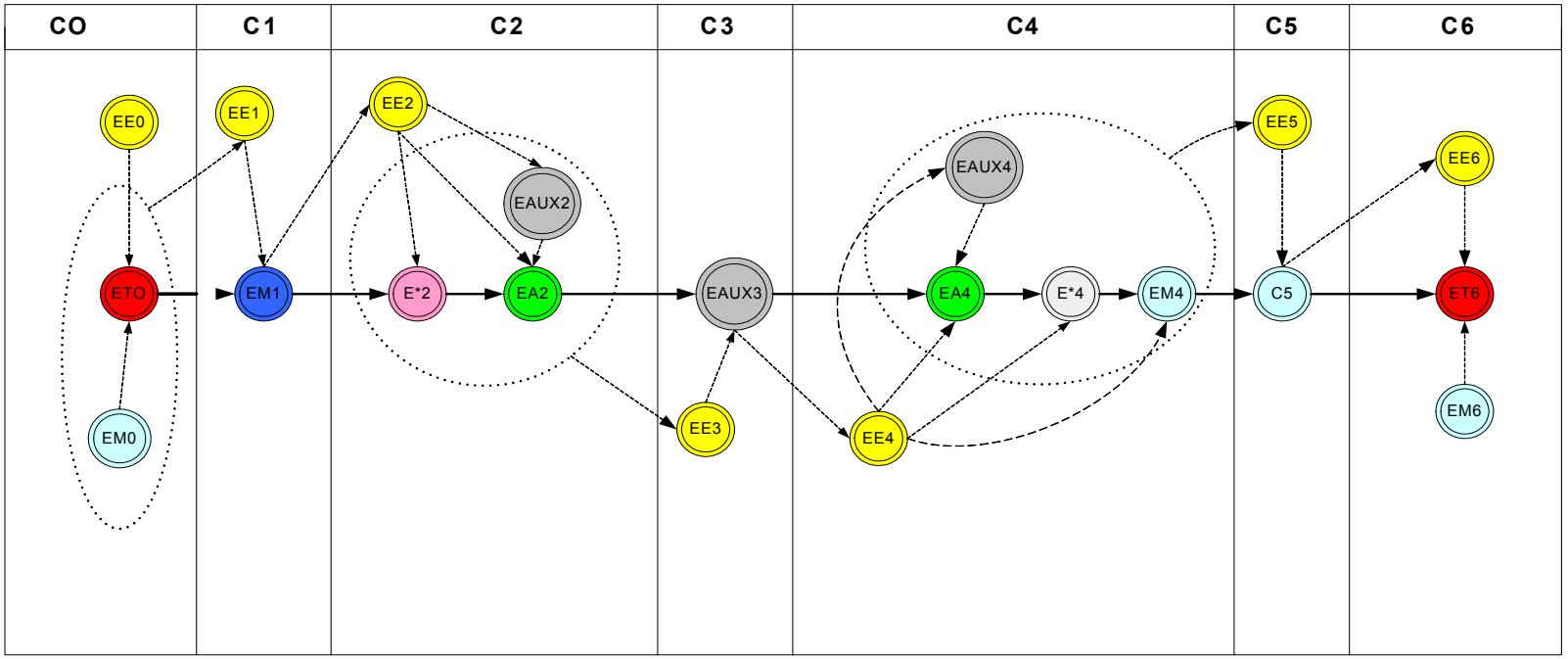


Figura 5.9 Rede Bayesiana da tarefa.

Legenda:

Cenários $c_i : c_0 \ldots c_6$

EAi: Eletricista de apoio no cenario i

ETi: Eletricista de topo no cenario i

EMi: Eletricista de montagem no cenario i

E*i: (ET + EM) no cenario i

EAUXi: Eletricistas auxiliares no cenario i

EEi: Eletricista encarregado no cenario i

C5: (EM + EA) no cenário 5

BT1: Bastão tensor no jugo lado linha, BT2: Bastão tensor luva

BU1: Bastão universal com gancho “j” BU2: Bastão universal “colher”

Identificação dos cenários

Cenário 0: Tensionamento do retângulo de forças;

Cenário 1: Retirada dos contra-pinos;

Cenário 2: Retirada da cadeia velha de isoladores;

Cenário 3: Subida/descida de isoladores;

Cenário 4: Colocação da cadeia de isoladores;

Cenário 5: Engate do concha-garfo e verificação da cadeia;

Cenário 6: Destensionamento\Desmontagem do retângulo de forças.

5.2.1.1 Descrição dos cenários que compõem a rede Bayesiana (RB) da tarefa

Através destes cenários, é possível perceber as interações que ocorrem entre os eletricistas. As linhas cheias na Figura 5.9 representam como a seqüência de atividades é realizada. As linhas tracejadas representam algum tipo de influência física ou mental que um eletricista exerce sobre o outro, ou seja, mostra a interação da equipe.

Estas influências são justamente as causalidades existentes na rede Bayesiana.

As variáveis que estão envolvidas representam os eletricistas que estão realizando as atividades.

As variáveis que identificam a função de cada eletricista possuem um índice que indica o cenário em questão. Assim, as variáveis de cada eletricista são alteradas para que os seus estados sejam devidamente representados no momento considerado, uma vez que cada cenário tem as suas peculiaridades e trás consigo o seu contexto, ou seja, circunstâncias ou condições sobre as quais os eventos ocorrem. Portanto, o desempenho dos eletricistas depende do contexto inserido, o qual pode ser representado pelos fatores de desempenho, agregando assim algum tipo de influência ao comportamento dos mesmos. As redes Bayesianas dos fatores de desempenho serão apresentadas no tópico 5.2.4. Cada eletricista terá uma rede Bayesiana dos FDs associada a variável que o representa na rede. O tópico citado apresentará com maiores detalhes o *link* entre essas redes.

Serão considerados aqui apenas os erros humanos. Portanto, supõe-se que todos os procedimentos iniciais foram realizados com sucesso, ou seja, montagem, limpeza e testes de equipamentos, não havendo possibilidade desses falharem e conseqüentemente provocarem erros humanos.

No cenário 0, o ET0 executa o tensionamento do retângulo de forças, isto é, através do movimento das chaves catraca conectadas aos munhões elevando os bastões tensores e com isto fazendo a transferência do peso da linha para o retângulo de forças, o qual é composto pelos bastões tensores (BT1, BT2) e pelo jugo. O ET e o EM estão sendo influenciados pelo EE0, o qual deve acompanhar e orientar a tarefa. O ET também está sendo influenciado pelo EM0, pois este é responsável por indicar o instante de parada do tensionamento do retângulo de forças. As atividades correspondentes a este cenário influenciarão o EE1, pois dependendo do desempenho dos eletricistas neste cenário, o eletricista encarregado poderá estar com um nível de atenção maior ou menor na próxima tarefa, isto é, no cenário 1. Esta situação é representada na RB pelo arco entre a elipse pontilhada em torno dos nós ET0 e EM0, e o nó EE1 no cenário 1.

No cenário 1, após o ET0 ter executado o tensionamento do retângulo de forças, o EM1 libera o concha – garfo e retira os contra-pinos com o BU2. O mesmo recebe influências do EE1, o qual deve acompanhar e orientar a atividade. Neste cenário, foi feita a suposição de que o EM1 ao liberar os contra-pinos verifica o nível de oxidação dos contra-pinos. A presença de determinados níveis de oxidação dificulta a liberação dos contra-pinos. Neste caso, o EM1 poderá usar o BU1, pois este oferece o recurso necessário (outra ferramenta para retirada do contra-pino) para pinos que estão soldados. O desempenho do EM1 neste cenário influenciará o eletricista encarregado, o qual poderá estar com um nível de atenção maior ou menor na próxima tarefa, isto é, no cenário 2.

No cenário 2, após o EM1 ter concluído a retirada dos contra-pinos no cenário 1, os ET e EM, representados na rede pela variável E*2, executarão a operação conjunta de retirada dos isoladores. Neste cenário, todos os eletricistas estão sendo influenciados pelo EE2, o qual deve acompanhar e orientar a tarefa. O EA2 poderá eventualmente sofrer interferência dos EAUX2, caso estes cometam algum erro, devido a fatores que degradam o desempenho como: fadiga, stress, calor, presença de insetos ou devido algum desconforto no momento da atividade, já que os mesmos estão segurando a linha de mão até que a substituição da cadeia seja realizada. Este erro pode ser, por exemplo, permitir que a linha de mão balance. Neste cenário, a tarefa é realizada em 5 ou 6 etapas de retirada de isoladores. Em cada etapa, os ET e EM retiram 3 ou 4 isoladores da cadeia e posteriormente, o EA2 retira estes isoladores da colher do BU2 do EM2 e coloca na linha de mão. As atividades correspondentes a este cenário influenciarão o EE3, pois dependendo do desempenho dos eletricistas neste cenário, o eletricista encarregado poderá estar com um nível de atenção maior ou menor na próxima tarefa, isto é, no cenário 3.

No cenário 3, após o EA2 ter colocado o último isolador da cadeia velha na linha de mão, os EAUX3 executam a operação paralela de subida da cadeia nova de isoladores e descida da cadeia velha de isoladores e após esta operação continuarão segurando a linha de mão até que todos os isoladores novos sejam retirados da mesma. Os EAUX3 estarão sendo influenciados pelo EE3, o qual dependendo do desempenho dos EAUX, poderá estar com um nível de atenção maior ou menor na próxima tarefa, isto é, no cenário 4.

No cenário 4, após os EUAX3 executarem a operação paralela de subida/descida da cadeia de isoladores, o EA4 retira os isoladores da linha de mão e coloca-os na colher do BU2 do EM4. Posteriormente, os EM e ET, representados na rede pela variável E*4, executarão a operação conjunta de colocação dos novos isoladores. À medida que os EM e ET colocam os isoladores novos, geralmente de 3 em 3 isoladores, o EM4 executa a pinagem. Neste cenário,

todos os eletricistas estão sendo influenciados pelo EE4, o qual deve acompanhar e orientar a tarefa. Assim como no cenário 2, o EA4 também sofre influência dos EAUX4. As atividades correspondentes a este cenário influenciarão o EE5, pois dependendo do desempenho dos eletricistas neste cenário, o eletricista encarregado poderá estar com um nível de atenção maior ou menor na próxima tarefa, isto é, no cenário 5.

No cenário 5, os EM e EA, representados na rede pela variável C5, realizam a operação conjunta. Esta operação consiste do EA segurar a cadeia com o BU1, evitando assim o balanço da mesma, enquanto o EM fixa concha-garfo à cadeia de isoladores e posteriormente verifica se a cadeia está fixa. Observa-se nesta atividade que se o EM4 não tiver executado a pinagem corretamente, os EM e EA podem identificar o erro ao verificarem se cadeia está fixa. Os EM e EA recebem influências do EE5, o qual deve orientar e acompanhar a tarefa. Dependendo do desempenho desses eletricistas, o EE6 poderá estar com um nível de atenção maior ou menor na próxima tarefa, isto é, no cenário 6.

No cenário 6, o ET6 fará o destensionamento do retângulo de forças, ou seja, fará a transferência do peso da linha para a nova cadeia de isoladores. Posteriormente, o ET6 realizará a desmontagem do retângulo de forças. O ET6 e EM6 serão influenciados pelo EE6. Observa-se aqui, que se por um acaso, os EM e ET não verificarem se a cadeia está fixa, no momento em que o ET6 for desmontar o retângulo de forças, a linha de transmissão poderá cair.

Diante deste contexto, o sucesso da intervenção ocorrerá quando o ET6 realizar a desmontagem do retângulo de forcas sem problemas.

As atividades posteriores à desmontagem do retângulo não são críticas, uma vez que não se tem registro de problemas. Porém, em se tratando da total segurança dos eletricistas, o sucesso só deverá acontecer depois que a etapa 6 da HTA tiver sido concluída sem problemas.

5.2.2 Identificação dos prováveis erros humanos e suas conseqüências

Através de uma análise preditiva das etapas críticas apresentadas nos cenários da Figura 5.9, foi possível identificar em cada cenário, os prováveis erros humanos de cada eletricista envolvido, bem como as prováveis conseqüências. Esta identificação tem o objetivo de apresentar de forma mais detalhada o comportamento dos eletricistas na rede Bayesiana apresentada, possibilitando um melhor entendimento de cada variável para a análise da confiabilidade do sistema. As Tabelas a seguir apresentam os prováveis erros e suas conseqüências.

Tabela 5.1 Análise do cenário 0

CENÁRIO 0	PESSOAL ENVOLVIDO	LOCALIZAÇÃO DO ENVOLVIDO	AÇÃO HUMANA	ERRO HUMANO	CONSEQÜÊNCIA
Tensionamento do retângulo de força	Eletricista de Topo	Na ponta da mísula	Posicionar as traves da chave catraca na posição de aperto	**Tensionar mal, causando desbalanceamento do retângulo de forças**	Quebra do jugo e queda da linha de transmissão
			Encaixar as chaves nos munhões e sobre elas, as porcas de espera		
			Transferir a tensão mecâncica da cadeia para os bastões tensores do retângulo de força		
	Eletricista de Montagem	Na escada	Indicar o instante de parada do tensionamento	**Indicar errado**	Atraso na atividade
	Eletricista Encarregado	Na faixa de servidão	Monitorar a atividade	**Não observar a atividade de forma adequada**	Ocorrem erros que poderiam ser corrigi-dos e evitados

Tabela 5.2 Análise do cenário 1

CENÁRIO 1	PESSOAL ENVOLVIDO	LOCALIZAÇÃO DO ENVOLVIDO	AÇÃO HUMANA	ERRO HUMANO	CONSEQÜÊNCIA
Retirada dos contra-pinos	Eletricista de Montagem	Na escada	Desatrelar a cadeia de isoladores do engate do concha olhal	**Não retirar todos os contra-pinos necessários**	Atraso na atividade
			Retirar os contra-pinos de três em três isoladores a partir do concha olhal		
	Eletricista Encarregado	Na faixa de servidão	Monitorar a atividade	**Não observar a atividade de forma adequada**	Ocorrem erros que poderiam ser corrigidos e evitados

Tabela 5.3 Análise do cenário 2

CENÁRIO 2	PESSOAL ENVOLVIDO	LOCALIZAÇÃO DO ENVOLVIDO	AÇÃO HUMANA	ERRO HUMANO	CONSEQÜÊNCIA
Rerirada da cadeia de isoladores	Eletricista de Montagem	Na escada	Retirar os isoladores juntamente com o Eletricista de Topo	**Deixar cair isoladores na faixa de servidão**	Possibilidade de manchucar eletricistas que estão na faixa de servidão
				Movimentos fora de sincronia	Sobrecarregar apenas um eletricista envolvido na operação
	Eletricista de Topo	No meio da mísula	Ajudar o Eletricista de Montagem a suportar o peso dos isoladores	**Idem Eletricista de Montagem**	Idem Eletricista de Montagem
	Eletricista de Apoio	Na escada	Retirar os isoladores do bastão e colocá-los nas linhas de mão	**Deixar cair isoladores na faixa de servidão**	Possibilidade de machucar eletricistas que estão na faixa de servidão
				Movimentos fora de sincronia	Atraso na atividade
	Eletricistas Auxiliares	Na faixa de servidão	Segurar a linha de mão	**Permitir que a linha de mão balance e/ou aproximá-la da operação**	Comprometer o trabalho do Eletricista de Apoio
	Eletricista Encarregado	Na faixa de servidão	Monitorar a atividade	**Não observar a atividade de forma adequada**	Ocorrem erros que poderiam ser corrigidos e evitados

Tabela 5.4 Análise do cenário 3

CENÁRIO 3	PESSOAL ENVOLVIDO	LOCALIZAÇÃO OD ENVOLVIDO	AÇÃO HUMANA	ERRO HUMANO	CONSEQÜÊNCIA
Subida/descida de isoladorres	Eletricistas Auxiliares	Na faixa de servidão	Através da linha de mão conduzem simultaneamente a subida da cadeia nova e descida da cadeia velha de isoladores	**Permitir que haja colisão dos isoladortes com a estrutura**	Danificar isoladores novos
				Deixar cair isoladores na faixa de servidão	Possibilidade de se machucarem, como também machucar o Eletricista Encarregado
	Eletricistas Encarregado	Na faixa de servidão	Monitorar a atividade	**Não observar a atividade de forma adequada**	Ocorrem erros que poderiam ser corrigidos e evitados

Tabela 5.5 Análise do cenário 4

CENÁRIO 4	PESSOAL ENVOLVIDO	LOCALIZAÇÃO DO ENVOLVIDO	AÇÃO HUMANA	ERRO HUMANO	CONSEQÜÊNCIA
Colocação da cadeia de isoladores	Eletricista de Montagem	Na escada	Colocar os isoladores novos juntamente com o Eletrcista de Topo	**Deixar cair isoladores na faixa de servidão**	Possibilidade de machucar eletricistas que estão na faixa de servidão
				Movimentos fora de sincronia	Sobrecarregar apenas um eletricista envolvido na operação
			Realizar a pinagem a cada grupo de isoladores colocados	**Não bater todos os contra-pinos**	Cadeia instável
	Eletricista de Topo	No meio da mísula	Colocar os isoladores novos juntamente com o Eletricista de Montagem	**Idem Eletricista de Montagem**	Idem Eletricista de Montagem
	Eletricista de Apoio	Na escada	Retirar os isoladores do bastão e coloca-los na linha de mão	**Deixar cair isoladores na faixa de servidão**	Possibilidade de machucar eletricistas que estão na faixa de servidão
				Movimentos fora de sincronia	Atraso na atividade
	Eletricistas Auxiliares	Na faixa de servidão	Segurar a linha de mão	**Permitir que a linha de mão balance e/ou aproximá-la da operação**	Comprometer o trabalho do Eletricista de Apoio
	Eletricista Encarregado	Na faixa de servidão	Monitorar a atividade	**Não observar a atividade de forma adequada**	Ocorrem erros que poderiam ser corrigidos e evitados

Tabela 5.6 Análise do cenário 5

CENÁRIO 5	PESSOAL ENVOLVIDO	LOCALIZAÇÃO DO ENVOLVIDO	AÇÃO HUMANA	ERRO HUMANO	CONSEQÜÊNCIA
Engate do Concha-garfo e verificação da cadeia	Eletricista de Montagem	Na escada	Realizar o engate do concha-garfo juntamente como o Eletricista de Apoio		
			Verificar se a cadeia está fixa	**Não verificar**	Cadeia instável
	Eletricista de Apoio	Na escada	Evitar o balanço da cadeia, enquanto o Eletricista de Montagem realiza seu trabalho	**Permitir que a cadeia balance**	O Eletricista de Montagem apresentará dificuldade na realização do seu trabalho
					Atraso na atividade
	Eletricista Encarregado	Na faixa de servidão	Monitorar a atividade	**Não observar a atividade de forma adequada**	Ocorrem erros que poderiam ser corrigidos e evitados

Tabela 5.7 Análise do cenário 6

CENÁRIO 6	PESSOAL ENVOLVIDO	LOCALIZAÇÃO DO ENVOLVIDO	AÇÃO HUMANA	ERRO HUMANO	CONSEQÜÊNCIA
Destensionamento e desmontagem do retângulo de força	*Eletricista de Topo*	*Na Ponta da mísula*	*Transferir a tensão mecânica do retângulo de força para a cadeia de isoladores*		
			Desmontar o retângulo de força	**Evidência de erros cometidos em atividades antecedentes**	*Queda de linha Proveniente da pinagem incorreta e de não checagem da cadeia*
	Eletricista de Montagem	*Na escada*	*Observar o destensionamento, caso perceba algum problema na fixação da cadeia, evitar a conclusão do mesmo*	**Não observar**	*Ocorrem erros que poderiam ser corrigidos e evitados*
	Eletricista de Encarregado	*Na faixa de servidão*	*Monitorar a atividade*	**Não observar atividade de forma adequada**	*Ocorrem erros que poderiam set corrigidos e evitados*

5.2.3 Modelo cognitivo

Ao longo dos anos, vários engenheiros e psicólogos reconheceram a necessidade de incluir a cognição humana na ACH. Portanto, qualquer tentativa de entender o desempenho humano deve incluir o papel da cognição. Segundo Wickens et. al (1998), a cognição é o mecanismo básico pelo qual cada pessoa percebe, pensa e relembra.

A atividade cognitiva envolve diagnósticos, lembranças, reconhecimento, argumentação, planejamento e tomada de decisão.

O modelo proposto aqui tem a finalidade de representar de forma qualitativa os processos cognitivos de um indivíduo em um determinado sistema. Entender como o sistema cognitivo funciona possibilita uma melhor compreensão de suas limitações. Este modelo está baseado no modelo HIP (tópico 3.3) com exceção de alterações que foram realizadas para melhor representar uma atividade cognitiva. Ele apresenta de uma maneira clara e objetiva, os estágios seqüenciais do processo cognitivo, os quais podem ser vistos na Figura 5.10. Aqui, este modelo apresenta o processo cognitivo com destaque para alguns detalhes pertencentes à atividade cognitiva a que se propõe.

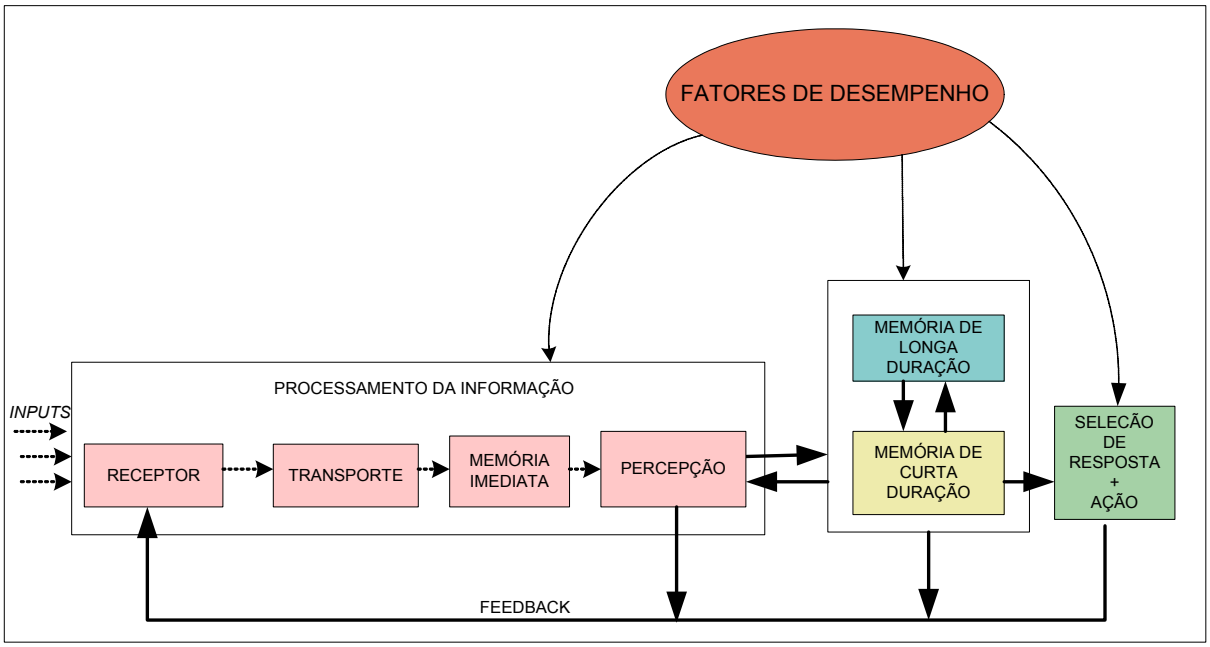


Figura 5.10 Modelo cognitivo proposto

O modelo cognitivo apresenta três estágios:

- Processamento da informação;
- Memória;

- Seleção de respostas e ação.

O primeiro estágio, o módulo de processamento da informação, é subdividido em quatro níveis: Receptor, transporte, memória imediata e percepção. O receptor é responsável pela captação de estímulos provenientes do meio. Estes estímulos são transportados até a memória imediata, local onde informações ficam retidas por um curto intervalo de tempo. O último nível do módulo de processamento da informação envolve a percepção, cuja função é a decodificação dos sinais nervosos em seus significados. Uma vez concluída o estágio de percepção, as informações são enviadas para o segundo estágio do modelo cognitivo, i. e. memória. Este estágio é subdividido em dois níveis: o de memória de curta duração e o de longa duração. Uma vez processadas, as informações são enviadas à memória de curta duração. Dependendo da relevância atribuída a estas informações, elas serão armazenadas na memória de longa duração ou esquecidas.

O terceiro estágio envolve as fases: tomada de decisão, o planejamento e a ação. Nesta primeira fase deste estágio, o cérebro toma as decisões em resposta aos inputs sensoriais recebidos. Na atividade a que se propõe, este estágio apresenta uma função simplificada, já que a atividade exige muito mais esforço físico do que esforço mental. Portanto, a maioria das decisões tomadas pelos eletricistas corresponde apenas à escolha do movimento adequado.

Na fase do planejamento da ação são decididos os músculos que irão se mover e a intensidade e velocidade do movimento para que o mesmo possa ser realizado da melhor maneira possível.

A última fase deste estágio corresponde à realização da ação propriamente dita. Esta fase possui uma forte ligação com o planejamento, já que durante a realização do movimento, ajustes são feitos, caso haja necessidade.

Durante todo o processo existe um *feedback* responsável pela atualização da memória. A realização de cada estágio do modelo atualiza a cognição para respostas futuras. Portanto, quando o caminho cognitivo a ser percorrido já é conhecido, respostas mais rápidas são geradas. Isso é melhor compreendido através dos estágios de aprendizagem, os quais Schmidt & Wrisberg (2001) apresentam com detalhes.

Um fator que merece destaque no modelo é a influência que todos os estágios cognitivos recebem dos FDs (tópicos 2.2.4 e 5.2.4).

Cada um dos estágios do modelo será discutido com detalhes nas seções subseqüentes.

5.2.3.1 Estágio de processamento da informação

Segundo Davidoff (2001), o estágio de processamento da informação é o ponto onde a cognição e a realidade se encontram. É nesse módulo que os *inputs* sensoriais são recebidos, decodificados e analisados.

Como já mencionado, o processamento das informações é realizado através de quatro níveis: receptor, transporte, memória imediata e percepção.

Através do receptor é possível captar os estímulos provenientes do meio. Alguns exemplos de receptores são: a pele, os ouvidos e os olhos. Estes orgãos decodificam as informações do meio em sinais nervosos, os quais serão transportados até a região responsável pela memória imediata do sentido em questão.

As informações são retidas para poderem ser reutilizadas, caso necessário, no nível de percepção. Em alguns casos, as informações já começam a ser decodificadas na memória imediata, também chamada de STTS (*Short Term Sensory Store*). Segundo Wickens & Hollands (1999), o STTS é um mecanismo temporário para prolongação da representação do estímulo, o qual pode durar 0.5 segundos para estímulos visuais e de 2 a 4 segundos para estímulos auditivos.

O último nível do modulo de processamento da informação é o nível da percepção.

Segundo Davidoff (2001), a percepção é um processo de interpretar dados sensoriais recebidos para o desenvolvimento da consciência do ambiente. Este processo é complexo porque depende tanto do meio ambiente como também do indivíduo que o percebe, ou seja, depende do modo como se vê o mundo.

As informações são decodificadas através de comparações com as informações já estocadas nas memórias de longa e de curta duração (tópico 5.2.3.2). Para decodificar o sentido, a pessoa compara continuamente visões, sons e outras sensações com lembranças e experiências semelhantes. Isto explica claramente a influência que as experiências anteriores têm na percepção das informações sensoriais.

Depois de entendidas as informações vão para a memória onde poderão ser armazenadas ou esquecidas, dependendo da relevância dada.

Durante o processamento da informação, o conhecimento sobre o mundo combina-se com as habilidades construtivas, a fisiologia, as experiências do indivíduo e a percepção. O ser humano percebe o mundo através dos órgãos dos sentidos e envia as informações para o cérebro onde estas são percebidas. Para a atividade em contexto, a maior parte das informações processadas são provenientes da visão, audição e sentidos de posição. Os

processamentos neuroanatômico e neurofisiológico desses sentidos não fazem parte do foco desse trabalho.

Os sentidos de posição foram aqui citados porque a troca da cadeia de isoladores é uma atividade realizada a uma certa altura do solo. Portanto, é importante entender o processamento das informações provenientes desses sentidos. A sensação exercida pela gravidade, a aceleração do corpo e a localização dos membros do corpo são informações que o ser humano percebe através dos sentidos de posição. Estes sentidos atuam com o objetivo de localizar o ser humano no meio. Existem dois sentidos de posição: o vestibular e o cinestésico. O primeiro informa sobre o equilíbrio do corpo todo, ou seja, a localização da cabeça e da aceleração enquanto o segundo informa sobre a postura do corpo, ou seja, a localização dos membros.

Sentido cinestésico

O sentido cinestésico fornece importantes informações sobre a localização dos membros do corpo, além da velocidade com que se movem. Este capacita e monitora continuamente o que as partes do corpo estão fazendo além de equilibrar a tensão muscular pelo corpo inteiro para que a realização dos movimentos seja feita de uma forma mais eficiente. Segundo Davidoff (2001), o sentido cinestésico recolhe informações ao longo de todo o corpo através de receptores espalhados na pele e nas articulações. Essas informações são enviadas ao córtex somatosensorial, onde as informações são compreendidas. Depois essas informações são estocadas antes de serem enviadas para a área de associação pré-frontal para a tomada de decisão.

É importante que o eletricista tenha a segurança sobre a sua posição na estrutura. Por exemplo, ele deve ser capaz de ajustar a posição de suas pernas na estrutura sem precisar olhar para elas.

Sentido vestibular

O sentido vestibular, também conhecido como sentido do equilíbrio, fornece informações sobre a orientação da cabeça em relação à terra enquanto os movimentos são realizados, como também a velocidade dos mesmos.

As percepções feitas por esse sentido são realizadas pelos órgãos vestibulares. Estes se localizam nos ossos do crânio em ambos os ouvidos internos. Dos órgãos vestibulares, as informações são enviadas ao cérebro e somam-se as informações visuais na memória de curta duração para que se tenha uma noção espacial completa do corpo em relação ao meio.

5.2.3.2 Estágio de memória

O estágio de memória, também conhecido como estágio de estocagem, é utilizado em dois momentos durante o processo cognitivo. O primeiro momento é na percepção, quando um *input* sensorial é recebido e é comparado com informações que já estão estocadas no cérebro (memória de longa duração). O segundo momento acontece quando as informações estocadas na memória de curta duração e de longa duração são utilizadas para a tomada de decisões.

Os estudos realizados mostram que a memória é subdividida em duas (Chang & Mosleh, 1999):

- Curta duração
- Longa duração.

A memória de curta duração refere-se à estocagem das informações sensoriais, já decodificadas, para que as decisões possam ser tomadas. A princípio, cada sentido analisa os dados de forma paralela e depois envia as informações para o córtex frontal, que representa especificamente a central executiva onde as informações são mantidas com ajuda de partes específicas do cérebro. O tempo máximo de estocagem de informações na memória de curta duração é em torno de trinta segundos (Squire & Kandel, 2000).

A partir do momento que as informações estão na memória de curto prazo, dependendo da relevância atribuída aos fatos, as informações passam para a memória de longa duração ou são simplesmente esquecidas. O local de armazenamento das informações da memória de longa duração é especifico para cada sentido e coincide com o local onde as informações são processadas. As informações podem permanecer na memória de longa duração por longos períodos, chegando inclusive ao resto da vida. As informações da memória de longa duração são utilizadas no processo de percepção e também são consultadas no momento da tomada de decisão e planejamento de resposta.

5.2.3.3 Estágio de seleção de resposta e ação

Depois de processadas e estocadas (temporária ou definitivamente), as informações de todos os sentidos são enviadas ao terceiro estágio do modelo cognitivo. Este estágio envolve três fases: tomada da decisão, planejamento e ação. Como as decisões e o planejamento realizados pelos eletricistas geralmente correspondem apenas à escolha de movimentos e da forma como estes serão realizados, esta fase mostra-se bastante simples. A última fase deste estágio refere-se a resposta do eletricista aos *inputs* recebidos, do meio e dos demais eletricistas durante a tarefa.

Uma vez que a ação já foi realizada, o eletricista recebe através de novos *inputs* sensoriais as conseqüências de sua ação para que possa produzir os seus próximos movimentos, formando assim um ciclo já que *inputs* sensoriais são recebidos, ações são realizadas e a partir destas ações novos *inputs* são gerados. Esses novos *inputs* sensoriais também são conhecidos como *feedback*. Durante o processo cognitivo, as informações são analisadas e estocadas assim como as suas conseqüências também são analisadas e estocadas. O estoque das conseqüências de cada informação facilita a cognição dos próximos *inputs* sensoriais.

É importante perceber que todos os estágios do modelo cognitivo estão sendo influenciados pelos fatores de desempenho. Os FDs mais relevantes para a atividade considerada serão comentados no tópico a seguir.

5.2.4 Fatores de desempenho (FDs)

5.2.4.1 Fatores Externos

São fatores externos aos eletricistas, ou seja, são estímulos percebidos por eles durante a realização da troca da cadeia de isoladores.

De uma maneira geral, os fatores externos são subdivididos em três tipos:

- Características do local de trabalho;
- Fatores organizacionais;
- Fatores relacionados à equipe.

Características do local de trabalho

São fatores relacionados a qualidade do ambiente, os quais possuem uma grande influência no sucesso da tarefa. Destacam-se: temperatura, umidade, grau de limpeza, luminosidade e ruído. Alguns destes fatores são de difícil controle. Porém, a organização pode ter um certo controle através de parâmetros que avaliam estas variáveis. A seguir apresenta-se de forma mais detalhada o controle destes fatores:

A temperatura e a umidade do ambiente são controladas através da determinação do ponto de orvalho, cuja norma deixa claro que a troca não deve ser realizada se a temperatura do bastão (tb) for menor que a temperatura do ponto de orvalho (tpo) acrescida de 3º C;

O Grau de limpeza corresponde à limpeza da faixa de servidão, à limpeza das torres e limpeza dos bastões tensores. A adequada conservação da faixa de servidão e das torres é realizada através de inspeções e é de responsabilidade da empresa. A limpeza dos bastões é realizada pela equipe de manutenção antes das intervenções;

A luminosidade do ambiente pode ser controlada através do uso de EPI (óculos escuros);

O ruído corresponde ao barulho proveniente da indução eletromagnética e do barulho do vento. Este não tem como ser controlado e sua presença compromete a comunicação entre eletricistas.

Problemas podem surgir quando o controle destes fatores não é efetuado, como por exemplo, a não conservação da faixa de servidão poderá dificultar o posicionamento do caminhão e acesso dos eletricistas à estrutura. O posicionamento da lona e dos equipamentos também podem ser realizados com dificuldades. A não ou má conservação da faixa de servidão têm como conseqüências: muito mato e acúmulo de terra na base da estrutura. Essas conseqüências por sua vez, trazem dificuldades para os eletricistas transitarem, além de atraírem insetos. Insetos nas proximidades da estrutura e na própria estrutura poderão lesionar os eletricistas e/ou deixá-los em estado de alerta, desviando assim a atenção do trabalho. Em relação a uma temperatura e umidade desfavoráveis às atividades de manutenção, estas podem comprometer as características isolantes dos bastões utilizados para suporte da instalação e manuseio pelos eletricistas às partes energizadas.

Fatores Organizacionais

São todos os fatores de responsabilidade da organização que têm como objetivo definir regulamentos e procedimentos, assim como fiscalizar as atividades que assegurem a troca da cadeia segura e confiável.

Os fatores organizacionais abrangem os procedimentos, a política da empresa e o *design* de equipamentos estabelecidos pela mesma para intervenções em linhas de transmissão.

A política da empresa envolve aspectos como: metas a serem atingidas, jornada de trabalho, controles administrativos, diárias, entre outros.

Para que a continuidade operacional do sistema de transmissão seja mantida é necessário que um determinado número mínimo de intervenções seja realizado por ano. Este número é definido pela empresa, o qual é função das necessidades de manutenção do sistema. Estas necessidades são identificadas através das inspeções realizadas nas linhas, e outras ocorrências.

A jornada de trabalho corresponde à quantidade de horas trabalhadas, ou seja, o tempo gasto pelos eletricistas para realizarem as intervenções previstas para um dia.

Os controles administrativos são aqueles utilizados pela empresa para garantir a segurança e a confiabilidade das intervenções em linha de transmissão. Alguns deles são:

- Supervisão;
- Autoridade;
- Responsabilidades;

- Auditorias;
- Canais de comunicação;
- Associados à segurança e confiabilidade do sistema.

Sempre que as intervenções são realizadas em locais que excedam uma certa distância da sede da empresa, é política da mesma pagar diárias aos eletricistas. Essas diárias deverão ser usadas para despesas com hospedagem e alimentação.

O design de equipamentos refere-se ao peso, forma e tamanho dos equipamentos, os quais podem afetar o desempenho dos eletricistas, causando desconforto muscular.

Fatores relacionados à equipe

A equipe é definida como a reunião de duas ou mais pessoas que interagem dinamicamente e interdependentemente com metas em comum, onde cada membro da equipe tem um papel importante a desempenhar (Chang & Mosleh, 1999). Alguns fatores são responsáveis pela interação entre os componentes da equipe e comprometimento da mesma com a execução da tarefa, como por exemplo: a união, a liderança, a comunicação, a composição da equipe, coordenação da equipe, ente outros.

5.2.4.2 Características da tarefa

Estes fatores correspondem à capacidade cognitiva e física dos eletricistas para realizarem a tarefa e dependem das características da mesma. Alguns deles são:

- Percepção exigida na tarefa;
- Controle motor;
- Atenção exigida na tarefa;
- Repetições;

A percepção exigida na tarefa corresponde ao entendimento dos *inputs* sensoriais que determinam os passos que deverão ser realizados pelo eletricista durante a troca da cadeia de isoladores. A maioria dos *inputs* necessários para a troca da cadeia de isoladores são obtidos através da visão. O sistema visual funciona como alarme para possíveis mudanças das condições ambientais (mudanças do tempo, presença ou não de insetos na torre, entre outros). A visão também desempenha a função de sistema de segurança nas diversas etapas da intervenção, por exemplo, é através da visão que o eletricista de montagem verifica o encaixe dos contra-pinos. O sistema auditivo tem também a função de alarme. A comunicação entre os membros da equipe é fundamental para alertar a equipe sobre possíveis desvios, os quais podem ser inaceitáveis durante uma intervenção, principalmente em situações críticas, onde, determinadas etapas da intervenção poderão ser omitidas. Logo, a percepção do eletricista

quanto a criticalidade das etapas da intervenção é fundamental, e poderá afetar o seu desempenho.

O controle motor refere-se a capacidade dos eletricistas em controlar a velocidade, a força e a precisão dos movimentos necessários a execução da intervenção com segurança e confiança.

A atenção exigida corresponde ao nível de consciência necessário para realizar a tarefa. Geralmente alguns agentes distratores podem comprometer o nível de atenção dos eletricistas, como por exemplo, a presença de insetos no local, o seu estado emocional, entre outros.

Ocorre um grande número de repetições das intervenções de manutenção em LTs em cadeias de suspensão em I, 230kV, estruturas metálicas.

5.2.4.3 Fatores Estressantes

Os fatores estressantes referem-se a alguma "força externa ou interna" que cause modificação do corpo e da mente (Swain & Guttmann, 1983). Esta definição conduz o pensamento a um nível ótimo de *stress*, aquele que é desejável para estimulação do corpo e da mente. Porém, a palavra *stress* tem adquirido conotação negativa "algo que se deseja evitar". Normalmente isto ocorre porque se pensa em altos níveis de *stress*. Este tipo de *stress* deve ser evitado nas atividades de substituição de cadeias de isoladores.

Os fatores estressantes podem ser classificados em fatores fisiológicos e psicológicos.

Fatores Psicológicos

Os fatores psicológicos representam qualquer força interna ou externa ao indivíduo que cause modificação da mente. Para o caso específico da troca da cadeia de isoladores foram apontados como relevantes os seguintes fatores psicológicos:

- Velocidade na realização da tarefa;
- Carga de trabalho;
- Risco na realização da tarefa;
- Distração;
- *Stress*;
-Criticalidade da tarefa.

Em geral o tempo médio para a troca da cadeia de isoladores em linha de 230kV estrutura metálica é de 40 minutos. Porém, a mudança nas condições climáticas e/ou o número de intervenções previstas para serem realizadas podem exigir que a intervenção seja realizada em um tempo menor do que o normalmente requerido, resultando assim em um aumento da velocidade na realização da tarefa, o que poderá comprometer o desempenho da tarefa,

podendo causar omissão de certas etapas da intervenção e/ou execução de algum passo incorreto.

A carga de trabalho representa o número de intervenções realizadas em um dia. Uma carga de trabalho normal corresponde a oito intervenções por dia. Esta é função das metas estabelecidas pela empresa e da sazonalidade. No período de setembro-março, o número de intervenções tende a ser maior do que no do período março-setembro, pois este corresponde ao período de chuvas. A carga de trabalho é também função da demanda gerada pela inspeção em linha de transmissão, cujo objetivo é verificar o nível de oxidação dos isoladores.

O risco na realização da tarefa refere-se ao *stress* psicológico por realizar uma atividade de risco. Na troca da cadeia de isoladores dois fatores de risco são: o risco de descargas elétricas de potência e o fato das trocas serem realizadas a uma certa altura do solo, podendo ocasionar a queda dos eletricistas e de equipamentos/ferramentas da estrutura.

A distração corresponde ao momento em que o eletricista desvia a sua atenção total ou parcial devido à presença de algum agente distrator. Alguns exemplos de agentes distratores são: Claridade excessiva, presença de insetos, condições climáticas e fatores internos (preocupação, pressão psicológica).

O nível de *stress* está relacionado com os *inputs* externos ou internos recebidos. Este pode ser proveniente de pressão, frustração, conflito e incertezas.

A criticalidade da tarefa refere-se a etapas criticas da intervenção, como por exemplo, a colocação de todos os contra-pinos, o tensionamento do retângulo de forças, entre outras. Estas etapas exigem uma maior atenção dos eletricistas e a percepção destes pontos críticos pode ocasionar stress.

Fatores Fisiológicos

Os fatores fisiológicos representam qualquer força interna ou externa ao indivíduo que cause uma modificação do seu corpo. Ao todo foram apontados cinco fatores fisiológicos relevantes, são eles:

- Fadiga ou cansaço;
- Calor;
- Desconforto;
- Condicionamento físico;
- Qualidade do sono.

A fadiga pode ser compreendida como um conjunto de alterações que ocorrem no organismo, resultantes de atividades físicas ou mentais e que levam a uma sensação generalizada de cansaço (Nahas, 2001). Segundo Powers & Howley (2000), a fadiga apresenta

sintomas como: sonolência, dificuldade para pensar, diminuição da atenção, lentidão e amortecimento das percepções, perdas de produtividade em atividades físicas e mentais. Os fatores que podem levar a fadiga são: longas horas consecutivas sem descanso nas mesmas funções, sono não regular e insuficientes por muito tempo, alimentação inadequada, preocupação, entre outros. Para a equipe de manutenção de LTs, a fadiga é fundamentalmente de origem muscular, causando nos eletricistas uma sensação de cansaço generalizado. A fadiga muscular é responsável pela perda de eficiência, ou seja, diminuição da capacidade de trabalho.

Altas temperaturas ocasionam a sensação de calor intenso. O calor está diretamente ligado à qualidade do ambiente de trabalho e contribui para acelerar a sensação de cansaço generalizado.

As características do local de trabalho, bem como o *design* de equipamentos e ferramentas (peso, tamanho e forma) e movimentos exigidos na tarefa (velocidade, força e precisão) contribuem para gerar desconforto nos eletricistas. A falta de condicionamento físico aumenta a sensação de desconforto durante a intervenção.

A atividade de intervenção em linhas de transmissão exige um bom condicionamento físico dos eletricistas. Condições físicas inadequadas para realização da intervenção diminuem o desempenho e deixam os eletricistas mais propensos a cometerem erros, podendo assim provocar acidentes. Esforço físico decorre da utilização de todos os agrupamentos musculares. Logo, há necessidade de um período de repouso apropriado, para evitar que os eletricistas sejam submetidos a uma exaustão muscular. Soma-se a isso os diversos fatores de desconforto e os incômodos originados pelo *design* inapropriado de equipamentos e ferramentas. A relação trabalho versus descanso é afetada pela característica de sazonalidade da atividade de intervenção e pela política de metas da empresa.

A qualidade do sono corresponde ao repouso suficiente e adequado para recompor a saúde física e mental. Problemas com o sono podem trazer sérias conseqüências. Os distúrbios do sono, por exemplo, poderão ter efeitos significantes no desempenho das atividades dos eletricistas.

Esses distúrbios se manifestam através sintomas como sonolência, insônia, dificuldades de despertar, dificuldades de adormecer, apnéia do sono, facilidades de despertar várias vezes à noite e narcolepsia. Os diagnósticos apresentados para tais manifestações podem ser, uma carga de trabalho excessiva, exposição a ruído, débito do sono, pressão do tempo, *stress* ocupacional, entre outros. Porém na sua grande maioria é proveniente de *stress* ocupacional. Os distúrbios do sono provocam fadiga. Um dos fatores dos distúrbios do sono que

comumente causam fadiga é a quantidade de horas que uma pessoa apresenta em débito com o sono, pois sonos insuficientes por muito tempo resultam em prejuízos acumulativos provocando fadiga e conseqüentemente reduzem o desempenho (Akerstedt et al. 2002).

5.2.4.4 Fatores Internos

Os fatores internos representam as características individuais de cada eletricista, tais como:

- Habilidade;
- Atitude e motivação;
- Estado emocional;
- Experiência.
- Treinamento;
- Conhecimento das normas.

Habilidade

Habilidade é a capacidade que um indivíduo possui em seu mecanismo de expressão, passível de ser desenvolvida por treinamento (Davidoff, 2001). Pode-se entender, dentro desta definição, que uma determinada habilidade é um potencial que está latente num indivíduo. Ele, naturalmente apresentará esta habilidade, em níveis superiores aos outros que não a possuem. Contudo, se não for desenvolvida, continuará como "potencial" e não gerará produtividade em sua vida. O eletricista de manutenção em linhas de transmissão deve possuir determinados requisitos mínimos de habilidade para realização da tarefa de forma segura e confiável, tais como: um sistema vestibular perfeito, boa coordenação motora e um condicionamento físico adequado (força e resistência).

Atitude e motivação

A atitude é uma predisposição ou tendência de um indivíduo para responder de determinada maneira a uma pessoa, grupos ou acontecimentos. Para o eletricista encarregado, esta característica é de fundamental importância para o exercício de sua função. A motivação e atitude dos eletricistas refletem no seu desempenho. Foi observado que as diárias são um fator relevante para motivação. Um outro aspecto que influencia na atitude e motivação é o bom relacionamento dos membros da equipe e também o reconhecimento da organização.

Estado emocional

Davidoff (1983) define estado emocional como um estado interior caracterizado por pensamentos, sensações, reações fisiológicas e comportamento expressivo específico.

Como este fator é complexo e depende de vários outros fatores internos e desconhecidos, o estado emocional para atividade em contexto é representado por emoções reveladas, ou seja, emoções que não importando a sua causa, o seu efeito pode ser observado. Estas emoções são transparentes e estão de uma forma ou de outra, sendo sinalizadas através do comportamento. É importante que o eletricista encarregado tenha a sensibilidade de perceber quando o estado emocional de um eletricista não está favorável para realizar a tarefa, impedindo que o mesmo suba na estrutura e atribuindo-lhe a função de eletricista auxiliar, cuja duração da atividade demanda pouco esforço físico e mental. Foi observado que o estado emocional dos eletricistas é fortemente influenciado pela motivação para o trabalho, onde esta por sua vez, depende da política da empresa, como por exemplo, recebimento de "diárias". Portanto, o eletricista estará muito mais motivado para o trabalho quando está recebendo diárias, e estas são justas. Conseqüentemente, o seu estado emocional estará sofrendo uma influência positiva.

Experiência

A experiência para a realização das intervenções em linhas de transmissão é diretamente proporcional ao número de repetições em que o eletricista habitua-se a realizar o procedimento. Por outro lado, embora um maior número de repetições conduza a uma maior experiência, a qual poderá levar o eletricista a ter o seu nível de atenção diminuído devido à execução da tarefa no modo automático, o qual corresponde ao estágio em que o executor realiza a ação com pouca atividade cognitiva, isto é, quase sem pensar e com um nível de atenção baixo. Recomenda-se Schmidt & Wrisberg (2001) para maiores detalhes sobre os estágios de aprendizagem.

Treinamento / Conhecimento das normas

O treinamento está associado às necessidades motoras para realização da tarefa com segurança e confiabilidade. Este deve ser capaz de permitir ao eletricista executar a tarefa a um nível mínimo de consciência. O treinamento produz aprendizagem das normas e procedimentos exigidos.

Tabela 5.7 FDs relevantes para equipe de manutenção de LTs da CHESF

FATORES EXTERNOS	*CARACTERÍSTICAS DA TAREFA*	*FATORES EXTRESSANTES*	*FATORES INTERNOS*
CARACTERÍSTICAS DO LOCAL DE TRABALHO		*FATORES PSICOLÓGICOS*	*CARACTERÍSTICAS INDIVIDUAIS*
** QUALIDADE DO AMBIENTE* • *Temperatura* • *Umidade* • *Limpeza da faixa* • *Luminosidade* • *Ruído*	** PERCEPÇÃO EXIGIDA NA TAREFA* ** CONTROLE MOTOR* • *Velocidade* • *Força* • *Precisão* ** ATENÇÃO* ** REPETIÇÕES*	** VELOCIDADE NA REALIZACAO DA TAREFA* ** CARGA DE TRABALHO* ** RISCO NA EXECUÇÃO DA TAREFA* ** DISTRAÇÃO* ** STRESS* ** CRITICALIDADE DA TAREFA*	** TREINAMENTO* ** EXPERIÊNCIA* ** HABILIDADE* ** MOTIVAÇÃO* ** ATITUDE* ** CONHECIMENTO DAS NORMAS* ** MORAL*
FATORES ORGANZACIONAIS		*FATORES FISIOLÓGICOS*	
** PROCEDIMENTOS* ** POLÍTICA DA EMPRESA* • *Jornada de trabalho* • *Metas* • *Controles administrativos* • *Diárias* ** DESIGN DE EQUIPAMENTOS*		** FADIGA* ** DESCONFORTO* ** COND. FÍSICO* ** QUALIDADE DO SONO* ** CALOR*	
EQUIPE			
• *União* • *Comunicação* • *Liderança*			

5.2.5 Relação de causa e efeito entre os FDs

Os FDs apresentados na Tabela 5.7 não agem de maneira isolada. Existe uma relação de causa e efeito entre eles, relação esta que não foi considerada ou foi considerada apenas parcialmente nas técnicas de ACH comentadas no capítulo três.

Chang & Mosleh (1999) através do diagrama de influência apresentado na Figura 3.6 mostra a relação de causa e efeito entre a maioria dos FDs. Este diagrama trás uma grande contribuição para ACH ao representar dinamicamente os fatores psicológicos. Porém, não considera a relação de interdependência entre os fatores fisiológicos, entre os fatores externos, entre os fatores pertencentes à informação memorizada e ainda não considera a influência que os fatores fisiológicos têm na informação memorizada.

Com a finalidade de superar as deficiências referentes às relações causais existentes no diagrama IDAC e para uma melhor compreensão da relação de interdependência entre os FDs apresentados na Tabela 5.7, a Figura 5.11 tenta mostrar as reais relações de causa e efeito entre os FDs, as quais podem ser representadas por redes Bayesianas. Esta representação é extremamente importante para ACH, pois através dela é possível identificar de maneira mais

realista a relevância que alguns fatores exercem no desempenho humano. A modelagem das ações humanas através de representações de causa e efeito fornece um conhecimento mais específico sobre a interação homem-sistema, possibilitando melhores diretrizes para soluções práticas. A representação estocástica do processo mental e psicológico do modelo IDAC está fora do escopo deste trabalho. Porém, é importante saber que este conhecimento pode perfeitamente ser representado através de redes Bayesianas.

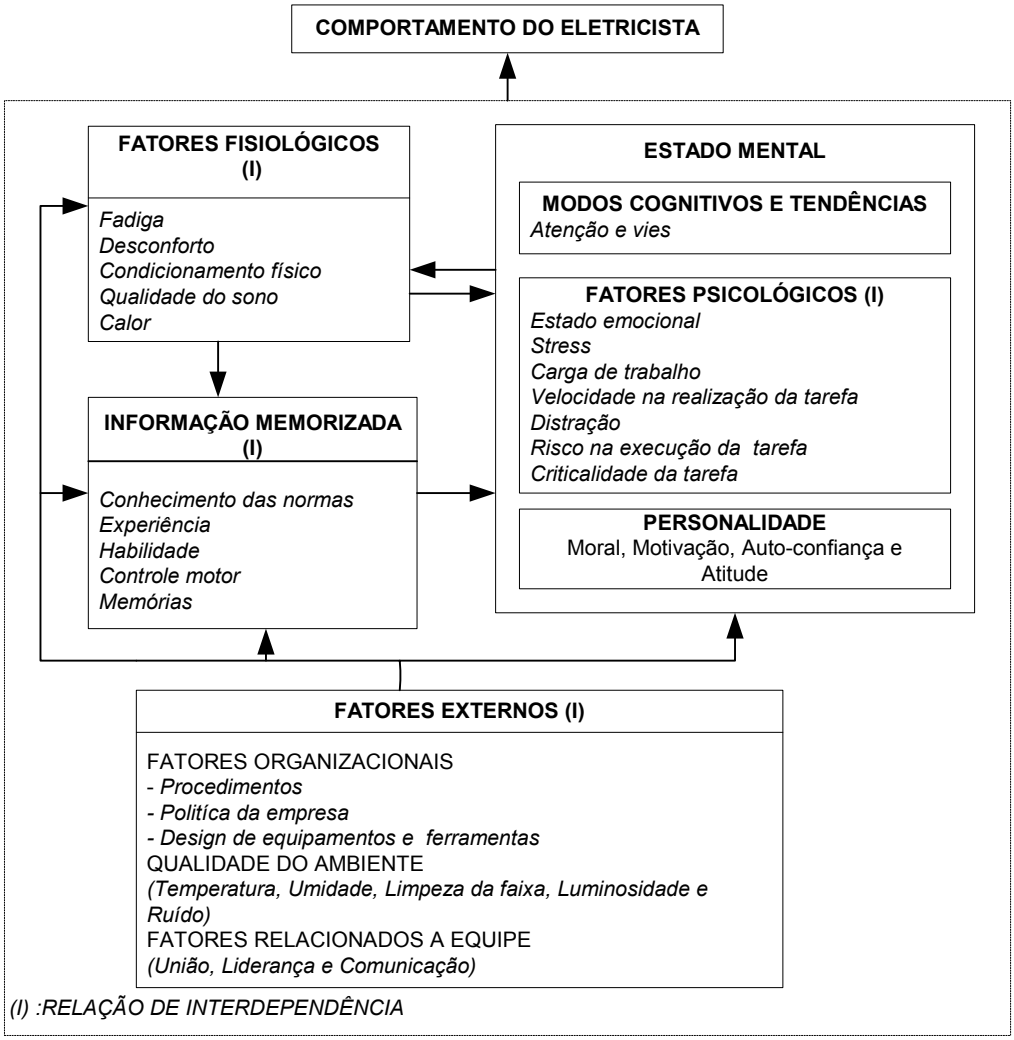


Figura 5.11 Diagrama de interdependência entre os FDs da equipe de manutenção da CHESF.

Além das relações causais já apresentadas no diagrama IDAC, observa-se claramente na Figura 5.11, uma relação de interdependência entre os fatores externos. A política da empresa, por exemplo, poderá influenciar alguns fatores como design dos equipamentos utilizados pelos eletricistas, procedimentos de manutenção de LTs, limpeza da faixa de servidão, entre outros. A comunicação entre os eletricistas também poderá estar comprometida pelo ruído existente no ambiente.

Em relação aos fatores fisiológicos, percebe-se, por exemplo, que o débito do sono poderá causar fadiga. Assim como um condicionamento físico inadequado poderá causar desconforto no momento da execução da tarefa e conseqüentemente causar provável fadiga.

Os fatores pertencentes à informação memorizada reúnem o armazenamento de toda informação e habilidade motora desenvolvida durante o treinamento e a prática da atividade de manutenção de LTs. Nestes fatores, também se observa uma relação de interdependência, como por exemplo, através do treinamento e da prática, os eletricistas conseguem desenvolver suas habilidades para executarem a tarefa com maior segurança e confiança.

É importante perceber também, que alguns fatores fisiológicos influenciam na informação memorizada, como por exemplo, o condicionamento físico poderá afetar o controle motor, como também a fadiga poderá reduzir o desempenho motor e cognitivo dos eletricistas. Para a influência de fatores fisiológicos na cognição recomenda-se Desaulniers (1997) e Wickens & Hollands (2000).

O diagrama da Figura 5.11 apresenta de forma qualitativa a relação existente entre os FDs. Porém, dependendo das circunstâncias e da relevância que estes fatores representam para a tarefa, os eletricistas podem sofrer influências mais significativas ou menos significativas durante o desempenho da atividade. Portanto, modelar estes FDs por redes Bayesianas permite que seja considerada toda e qualquer relação em que exista pelo menos uma influência mínima.

A seção seguinte mostra a relação de causa e efeito entre os fatores de desempenho para equipe de manutenção de LTs

5.2.6 Redes Bayesianas dos FDs

A relação de causa e efeito assumida nas redes Bayesianas dos FDs está baseada no diagrama IDAC, na análise da tarefa, assim como em opiniões de pesquisadores e médicos expressas na literatura de ACH. Para construção destas redes foram selecionados entre os FDs, apenas os fatores causadores mais significantes para os eletricistas. Porém, a rede poderia ser estendida para um maior nível de detalhamento. Na modelagem, estas redes serão conectadas à rede Bayesiana da tarefa apresentada no tópico 5.2.1, ou seja, para cada eletricista específico desta rede existirá uma rede Bayesiana que representa os FDs conectada. Foram construídas quatro diferentes redes Bayesianas para representar a influência dos FDs nos eletricistas. Assume-se que todas as variáveis dessas redes são dicotômicas. A Tabela 5.8 mostra os possíveis valores que cada variável da rede pode assumir.

Tabela 5.8 Valores dos FDs

NÓ	*VALORES **
NÍVEL DE ATENÇÃO	*{adequado, não adequado}*
CAPACIDADE	*{adequada, não adequada}*
CARGA DE TRABALHO	*{excessiva, não excessiva}*
COMUNICAÇÃO	*{boa, ruim}*
CONDICIONAMENTO FÍSICO	*{adequado, não adequado}*
CONTROLE MOTOR	*{adequado, não adequado}*
DESIGN DE EQUIPAMENTOS	*{adequado, não adequado}*
ERROS ANTERIORES	*{ocorreram, não ocorreram}*
ESTADO EMOCIONAL	*{favorável, não favorável}*
FADIGA	*{presente, não presente}*
INSETOS	*{presentes, não presentes}*
**VALOR FAVORÁVEL = 0, VALOR DESFAVORÁVEL = 1*	

Pelo fato dos eletricistas de Montagem e de Topo desempenharem funções com características semelhantes, isto é, atividades que necessitam de controle motor e atenção, apresentam FDs comuns. Portanto, a Figura 5.12 representa a relação entre os fatores mais relevantes para estes eletricistas. Considera-se que dois fatores podem influenciar a capacidade destes eletricistas ao realizarem suas atividades: controle motor e nível de atenção. É possível, por exemplo, que devido à fadiga e a um condicionamento físico inadequado, estes eletricistas não consigam controlar a velocidade, a força e a precisão dos movimentos necessários para execução da tarefa, isto é, controle motor. Já o nível de atenção pode ser prejudicado pela fadiga e/ou pela presença de agentes distratores, tais como, um estado emocional desfavorável e a presença de insetos no local da intervenção.

Considera-se aqui, que se o nível de atenção e o controle motor encontram-se adequados, então a capacidade destes eletricistas realizarem a tarefa é ideal. Caso tanto a atenção quanto o controle motor encontram-se inadequados, então a capacidade destes eletricistas realizarem a tarefa está totalmente comprometida. Ou, em notação probabilística:

$$P(Capacidade = 0 \mid Nível\,de\,atenção = 1,\ Controle\ motor = 1) = 0$$

$$P(Capacidade = 0 \mid Nível\,de\,atenção = 0,\ Controle\ motor = 0) = 1$$

Percebe-se ainda nesta rede que estes eletricistas apresentam uma maior probabilidade de estarem fadigados quando estão sob uma carga de trabalho excessiva, quando estão com um condicionamento físico inadequado e quando manuseiam equipamentos com *design* inadequados.

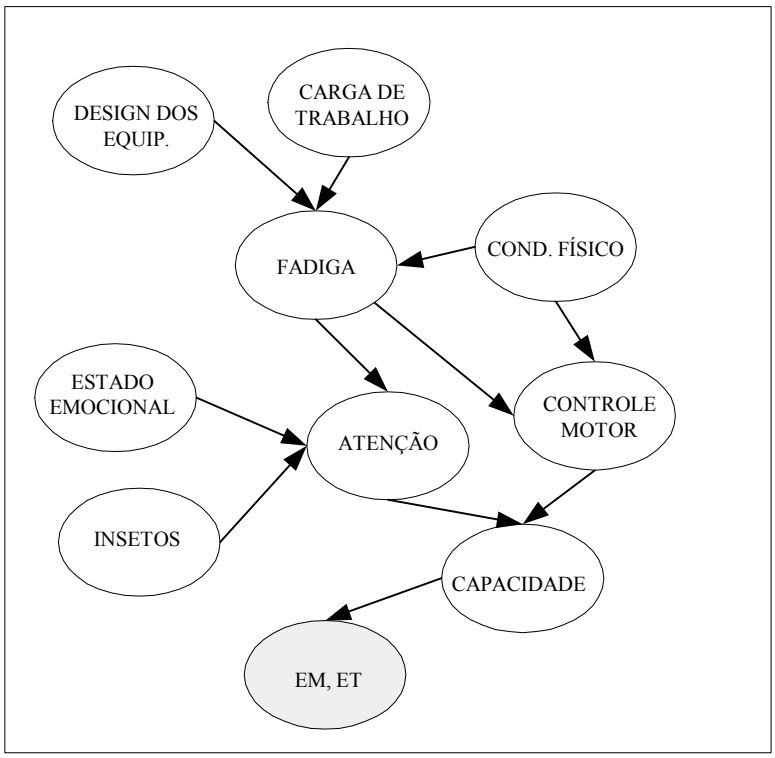


Figura 5.12 Rede Bayesiana para os FDs dos EM e ET

A Figura 5.13 apresenta a rede Bayesiana dos FDs para o eletricista de Apoio. Para este eletricista não foi considerada a influência do controle motor por ser pouco relevante para esta atividade. Conseqüentemente, o eletricista de Apoio recebe apenas um causador imediato na rede dos seus FDs. Como esta constitui a única diferença em comparação com a rede apresentada na Figura 5.12, as outras relações já foram comentadas anteriormente.

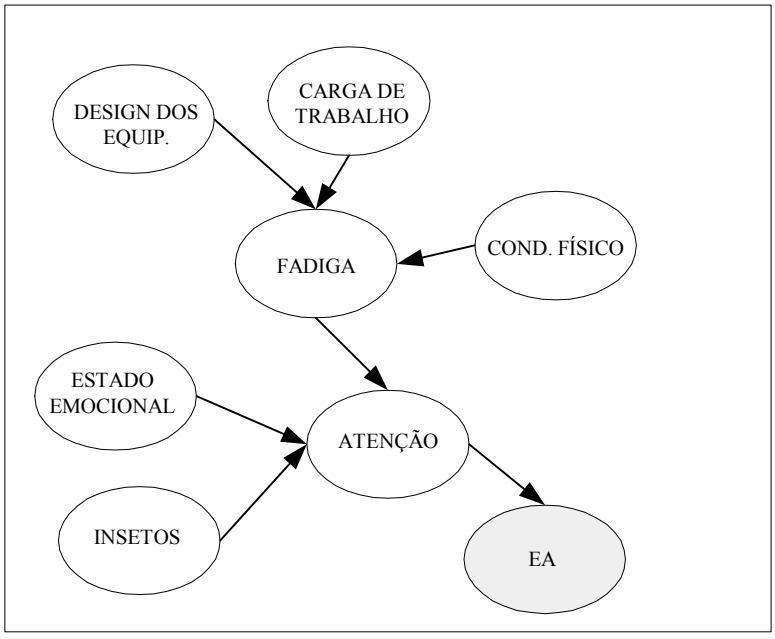


Figura 5.13 Rede Bayesiana para os FDs do EA

A Figura 5.14 mostra a rede Bayesiana dos FDs para os eletricistas Auxiliares. Como esta atividade constitui a mais simples de todas, apresenta um menor numero de nós. Estes eletricistas necessitam de um certo nível de atenção ao exercerem a operação conjunta de manuseio da linha de mão. Considera-se que o nível de atenção recebe apenas influências do estado emocional e da fadiga, uma vez que estes conseguem evitar a aproximação de insetos. A fadiga por sua vez, pode ser uma manifestação de uma carga de trabalho excessiva, bem como de um condicionamento físico inadequado.

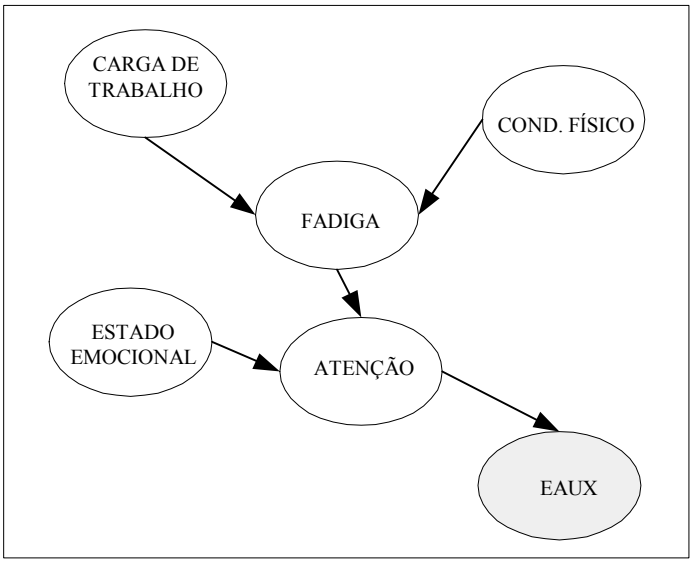


Figura 5.14 Rede Bayesiana para os FDs dos EAUX.

A Figura 5.15 mostra a rede Bayesiana dos FDs para o eletricista Encarregado. Considera-se que dois fatores podem influenciar este eletricista: comunicação e o nível de atenção. A comunicação refere-se à comunicação do eletricista Encarregado com os outros eletricistas. A comunicação é dita inadequada quando existem ruídos, os quais podem ser provenientes da indução eletromagnética, do barulho do vento, entre outros. Percebe-se nesta rede, que o Encarregado apresenta uma maior probabilidade de estar com seu nível de atenção inadequado quando está fadigado e quando seu estado emocional não está favorável. Considera-se ainda como causa do nível de atenção inadequado, o fato dos eletricistas não terem cometido erros na etapa anterior. É possível, por exemplo, que o eletricista Encarregado tenha o seu nível de atenção diminuído no momento em que os eletricistas retiram a cadeia velha de isoladores porque ele observou que os eletricistas não cometeram erro na retirada dos contra-pinos. Portanto, o fato da equipe não ter cometido erro na etapa anterior faz com que o Encarregado fique mais relaxado e conseqüentemente tenha o seu nível de atenção diminuído na etapa presente da intervenção.

Considera-se aqui, que se o nível de atenção e a comunicação do Encarregado com os outros eletricistas encontram-se adequados, então este eletricista está monitorando a tarefa corretamente. Caso tanto o nível de atenção quanto a comunicação encontram-se inadequados, então a monitoração desse eletricista está totalmente comprometida. Ou, em notação probabilística:

$$P(EE = 0 \mid Nível\ de\ atenção = 1, Comunicação = 1) = 0$$

$$P(EE = 0 \mid Nível\ de\ atenção = 0, Comunicação = 0) = 1$$

Assim como na Figura 5.14, a fadiga presente no eletricista Encarregado pode ser uma manifestação de uma carga de trabalho excessiva e de um condicionamento físico inadequado.

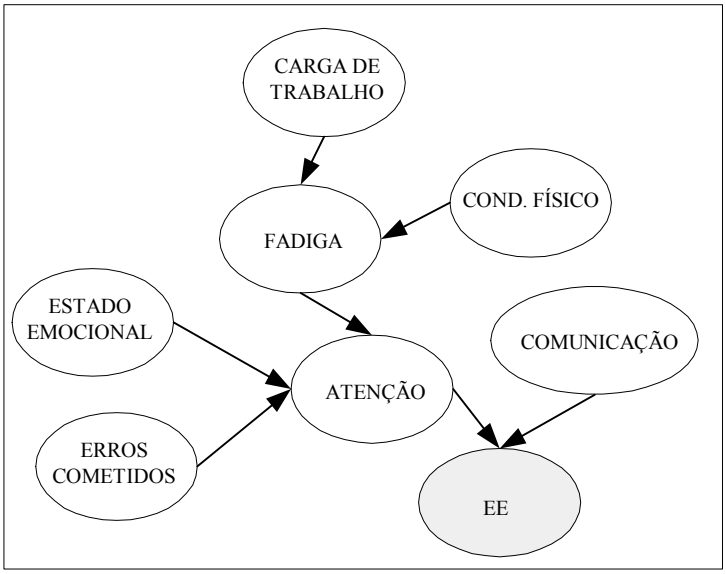


Figura 5.15 Rede Bayesiana para os FDs do EE.

5.3 Quantificação da Rede Bayesiana dinâmica da equipe de manutenção de LTs da CHESF

Apesar de redes Bayesianas não permitirem a modelagem explícita de relações temporais entre variáveis. Korb & Nicholson (2003) comentam que a única maneira para se modelar a relação entre o valor atual de uma variável e seu valor passado ou futuro é pela adição de uma outra variável que possua um nome diferente. Portanto, quando se usa este artifício, redes Bayesianas permitem a modelagem dinâmica do comportamento humano. A rede Bayesiana da modelagem das ações dos eletricistas apresentada na Figura 5.9 é um exemplo disso.

5.3.1 Edução de opiniões dos especialistas

A maior dificuldade na aplicação de redes Bayesianas para solucionar problemas práticos está na grande quantidade de probabilidades condicionais necessárias para alimentação da

rede. Como normalmente estas probabilidades não são encontradas em um banco de dados, depende-se completamente do conhecimento de especialistas. Porém, eduzir este conhecimento demanda esforço e tempo. Para minimizar estes efeitos, existem alguns métodos utilizados na construção e na quantificação de redes Bayesianas que serão comentados a seguir.

5.3.1.1 Utilização da técnica *Divorcing Multiple Parents* (DPM)

A DPM é tipicamente aplicada quando um nó tem muitos pais, o que ocasiona um grande número de probabilidades condicionais em sua TPC. Através desta técnica é possível alterar a estrutura da rede diminuindo assim, a quantidade de pais do nó em questão e conseqüentemente reduz-se a sua TPC. Korb & Nicholson (2003) recomendam utilizar esta técnica quando um nó tiver a partir de 4 pais. Observa-se que um nó dicotômico com 4 pais também dicotômicos gera uma TPC com 16 probabilidades condicionais. Utilizando esta técnica, tem-se combinações de duas ou três TPCs, cuja soma de suas probabilidades de cada combinação a ser eduzida é 12. Portanto, percebe-se uma redução bastante significativa.

Em se tratando de um nó com 3 pais, aparentemente nenhuma redução seria possível através desta técnica. No entanto, algumas considerações precisam ser feitas:

Primeira, esta técnica também pode ser utilizada para outros propósitos. Observa-se claramente, por exemplo, que ela facilita a compreensão do especialista no processo de edução. Pois, quanto menor o numero de variáveis inseridas em um contexto mais fácil será a sua percepção.

Segunda, com o objetivo de atingir a primeira consideração, às vezes são introduzidos na rede alguns nós fictícios, os quais apresentam algumas probabilidades já conhecidas, isto é, probabilidades determinísticas. Conseqüentemente, ocorre uma diminuição das probabilidades condicionais a serem eduzidas. Um exemplo prático vivenciado aqui é comentado a seguir.

O EA2 da Figura 5.9 possui 2 pais (arcos tracejados chegando ao nó). Ao inserir a rede Bayesiana dos seus FDs apresentadas na Figura 5.13, este nó recebe uma causa imediata (ATENÇÃO), ficando assim com 3 pais conforme a Figura 5.16.

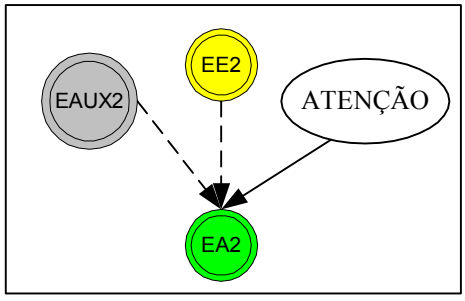


Figura 5.16 Causadores imediatos do EA2 antes da utilização da DMP

Percebe-se na Figura 5.16 que a TPC correspondente ao nó EA2 tem 8 probabilidades condicionais. Através da DMP, foi adicionado um nó fictício, IEB2, conforme Figura 5.17. Algumas probabilidades do nó IEB2 já são conhecidas, pois considera-se que se o eletricista Encarregado (EE2) e os eletricistas Auxiliares (EAUX2) estiverem desempenhado sua função corretamente, a influência destes eletricistas sobre o eletricista de Apoio (EA2) é totalmente positiva. Porém, se os dois não estiverem desempenhado sua função corretamente, a influência é totalmente negativa. Ou, em notação probabilística:

$$P(IEB2 = 0 \mid EE2 = 1, EAUX = 1) = 0$$

$$P(IEB2 = 0 \mid EE2 = 0, EAUX = 0) = 1$$

Com as probabilidades conhecidas, percebe-se na Figura 5.17 que os números de probabilidades condicionais que faltam para compor as TPCs dos nós IEB2 e EA2 são 2 e 4 respectivamente, o que correspondente a um total de 6 probabilidades, apresentando assim uma redução de 2 probabilidades, além de facilitar bastante o entendimento do especialista no cenário.

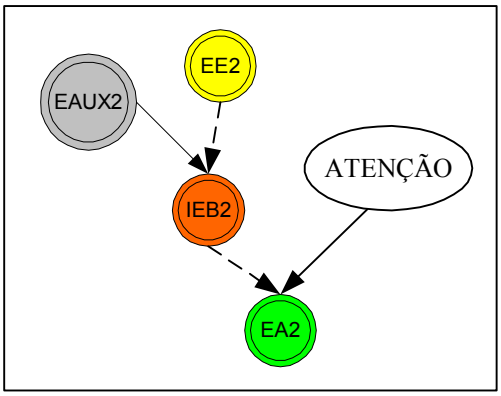


Figura 5.17 Causadores imediatos do EA2 depois da utilização da DMP

A Figura 5.18 mostra a rede Bayesiana da tarefa depois da utilização da técnica DPM. Os nós IES0, IEB4 e IES6 foram criados com a mesma finalidade do exemplo apresentado acima, assim como o nó CAPACIDADE referente aos FDs dos EM e ET, já apresentado na Figura 5.12.

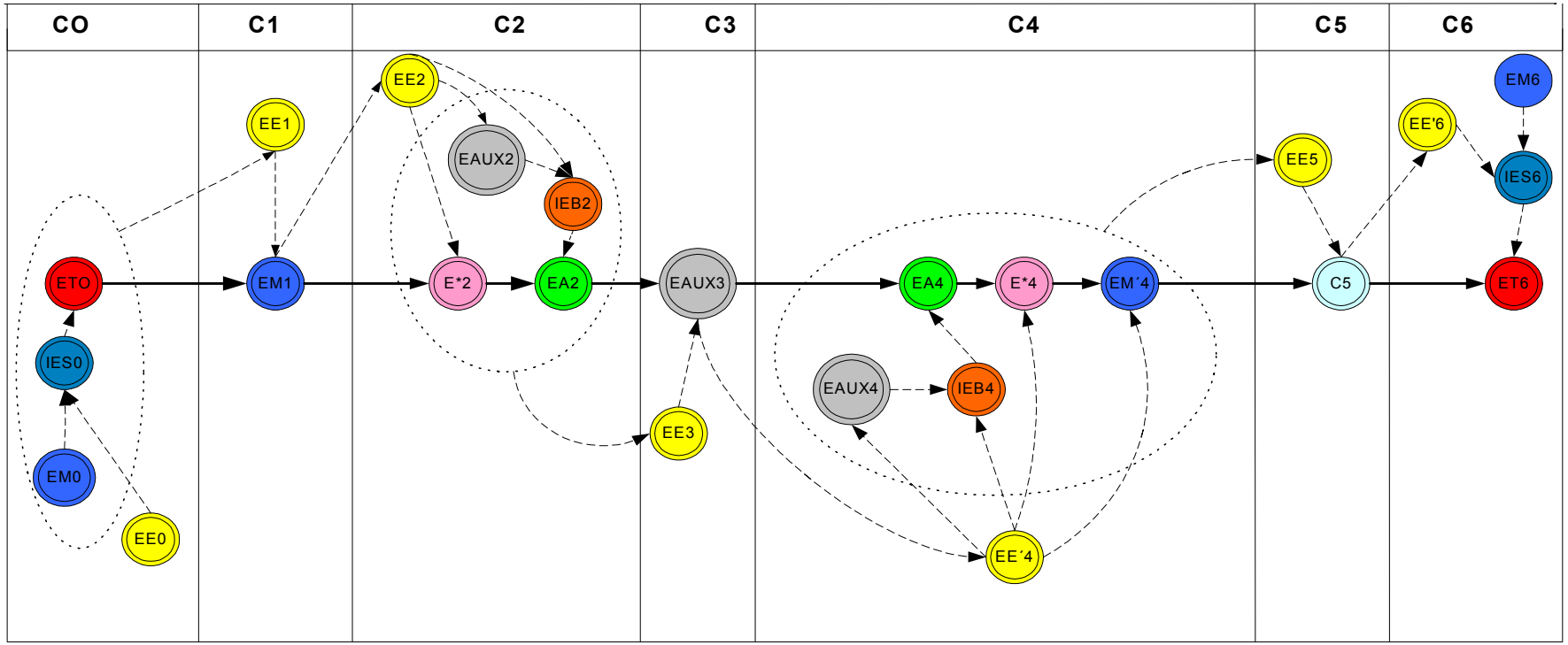


Figura 5.18 Rede Bayesiana da tarefa depois da utilização da DMP

Legenda:

EAi: Eletricista de apoio no cenario i
ETi: Eletricista de topo no cenario i
EMi: Eletricista de montagem no cenario i
E*i: (ET + EM) no cenario i
EAUXi: Eletricistas auxiliares no cenario i
EEi: Eletricista encarregado no cenario i
C5: (EM + EA) no cenário 5
IEBi: Influência da equipe de baixo no cenário i
IESi: Influência da equipe de supervisão no cenário i

IDENTIFICAÇÃO DOS CENÁRIOS:

C 0 - Tensionamento do retângulo de forças;
C 1 - Retirada dos contra-pinos;
C 2 - Retirada da cadeia velha de isoladores;
C 3 - Subida/descida de isoladores;
C 4 - Colocação da cadeia de isoladores;
C 5 - Engate do concha-garfo;
C 6 - Destensionamento do retângulo de forças.

5.3.1.2 Redes Bayesianas e o modelo *Noisy-or*

Alguns tipos de distribuições de probabilidades condicionais podem ser aproximadas por uma distribuição binomial. Esta aproximação permite que apenas parte das probabilidades condicionais da TPC de um determinado nó sejam especificadas, e a partir destas, as outras são calculadas. Este modelo, conhecido como *Noisy-or*, permite tal cálculo com a restrição de que os pais do nó sejam independentes entre si.

Como as variáveis das redes Bayesianas aqui, são consideradas dicotômicas será utilizado o modelo *Noisy-or* binário. Pearl (1988) *apud* Onisko (2001) comenta que o modelo *Noisy-or* binário é aplicado quando existem várias causas X_1, $X_{2,...,}$ X_n para um efeito Y, onde, (1) cada causa X_i tem uma probabilidade p_i de causar Y na ausência de todas as outras causas e (2) cada causa é independente da presença das outras causas. Estas duas condições permitem especificar a TPC de um nó com n parâmetros $p_{1,}$ $p_{2,...,}$ p_n, onde p_i representa a probabilidade do efeito Y ocorrer, uma vez que a causa X_i está presente e todas as outras causas X_j, $i \neq j$ estão ausentes. Ou, em notação probabilística:

$$p_i = P\left(y \mid \bar{x}_{1,} \bar{x}_2, ..., x_i, ..., \bar{x}_{n-1}, \bar{x}_n\right) \qquad \textit{Equação 5.1}$$

A probabilidade de y dado um conjunto de variáveis causadoras $X_p = \left[X_1, X_2, ..., X_n\right]$ presente é calculada através da equação 5.2.

$$P(y \mid X_p) = 1 - \prod_{i:X_i \in X_p} (1 - p_i) \qquad \textit{Equação 5.2}$$

O modelo *Noisy-or* binário também se aplica a situações em que o modelo não captura todas as possíveis causas de Y, o que provavelmente acontece em todas as situações práticas. Esta situação resulta em uma fonte de incerteza conhecida como incerteza de modelos. Para maiores detalhes, recomenda-se Droguett et al. (2004). O parâmetro citado acima pode ser modelado através de uma probabilidade $p_{0,}$ que representa a probabilidade de Y ocorrer espontaneamente, isto é, na ausência de todas as outras causas explicitamente modeladas. Ou, em notação probabilística:

$$p_0 = P\left(y \mid \bar{x}_{1,} \bar{x}_2, ..., \bar{x}_n\right) \qquad \textit{Equação 5.3}$$

Em uma análise dos nós das redes Bayesianas dos FDs, observou-se que alguns nós são constituídos de causadores independentes, o que possibilitou a utilização do modelo *Noisy-or* binário. Por exemplo, o nó fadiga (Y) da Figura 5.11 apresenta como causadores independentes entre si, as variáveis, carga de trabalho (X_1), condicionamento físico (X_2) e design de equipamentos (X_3), as quais possuem as probabilidades $p_{1,}$ p_2 e p_3 respectivamente de causar Y.

As probabilidades p_1, p_2, p_3 e p_0 precisam ser especificadas, enquanto as outras são calculadas de acordo com a equação 5.2. Estas estão apresentadas nas equações abaixo.

$$p_1 p_2 = 1 - (1 - p_1)(1 - p_2) \qquad \textit{Equação 5.4}$$

$$p_2 p_3 = 1 - (1 - p_2)(1 - p_3) \qquad \textit{Equação 5.5}$$

$$p_1 p_3 = 1 - (1 - p_1)(1 - p_3) \qquad \textit{Equação 5.6}$$

A tabela 5.9 mostra a TPC da variável Y. Nestes cálculos, considera-se que o resultado favorável está representado pelo número 0 e o resultado desfavorável está representado pelo número 1.

Tabela 5.9 TPC de Y

TPC de Y				
X_1	X_2	X_3	$P(Y = 0 \setminus X_1, X_2, X_3)$	$P(Y = 1 \setminus X_1, X_2, X_3)$
0	0	0	$1 - p_0$	p_0
0	0	1	p_3	$1 - p_3$
0	1	0	p_2	$1 - p_2$
0	1	1	$p_2 p_3$	$1 - p_2 p_3$
1	0	0	p_1	$1 - p_1$
1	0	1	$p_1 p_3$	$1 - p_1 p_3$
1	1	0	$p_1 p_2$	$1 - p_1 p_2$
1	1	1	p_0	$1 - p_0$

Quando se é possível utilizar o modelo *Noisy-or* binário, observa-se claramente que o número das probabilidades a serem especificadas é reduzido. Neste caso, o número de probabilidades foi reduzido em 50%, o que constitui uma diminuição bastante significativa das perguntas a serem eduzidas.

Este modelo é aplicado aos nós *Fadiga e Atenção* das redes Bayesianas dos FDs apresentados nas Figuras 5.12, 5.13, 5.14 e 5.15.

Na Figura 5.12 e 5.13, a *Fadiga* é uma manifestação da carga de trabalho, do design de equipamentos e do condicionamento físico. Percebe-se que no contexto deste trabalho, esses causadores são independentes entre si, pois a carga de trabalho não possui uma relação causal com os nós: design de equipamentos e condicionamento físico, ou seja, um eletricista pode estar sob carga de trabalho excessiva independentemente de estar com um condicionamento físico adequado e do design de equipamentos estarem adequados. Lembrando que o condicionamento físico aqui, está relacionado com o estilo de vida do eletricista (qualidade do

sono, exercício físico específico e nutrição). Portanto, a atividade física provinda do trabalho não promove condicionamento físico adequado. Em relação à *Atenção,* percebe-se nas mesmas Figuras que esta é uma manifestação dos nós: estado emocional, fadiga e insetos. Percebe-se também, que no contexto deste trabalho, esses causadores são independentes entre si, pois a fadiga não possui uma relação causal com os nós: estado emocional e insetos, ou seja, um eletricista pode estar cansado independentemente de estar bem emocionalmente e da ausência de insetos no local de trabalho.

Para as Figuras 5.14 e 5.15, os nós *Fadiga* e *Atenção* possuem um causador a menos em relação aos mesmos nós das Figuras 5.12 e 5.13. Portanto, para estas, cabem as mesmas considerações realizadas no parágrafo acima.

5.3.1.3 Definição do questionário de edução

O Tópico 4.4.2 apresentou uma série de índices que avaliam de maneira matemática tanto a qualidade do questionário de edução quanto à qualidade das informações eduzidas.

Em relação a qualidade do questionário, dois indicadores são considerados suficientes: (1) Indicador de detalhamento de intervalo elementar (D_{ε_j}), o qual garante a simetria do questionário, evitando a introdução de vieses, e (2) Indicador de detalhamento da questão (D_{p_i}), o qual garante a evolução gradativa do grau de dificuldade das questões, preparando assim o especialista para perguntas mais difíceis.

Como um dos parâmetros de entrada é o número de questões a fazer, um questionário ideal pode ser montado baseando-se nestes dois indicadores. Nadler & Campello (2001) propõem um questionário com 42 questões. Porém, Firmino et al. (2006) perceberam experimentalmente que existe um número mínimo de questões que permite boas inferências.

Observou-se 53 nós provenientes das variáveis das redes Bayesianas dos FDs (Figuras 5.12, 5.13, 5.14 e 5.15) e das variáveis da rede Bayesiana da tarefa (Figura 5.9), sendo necessárias eduzir 126 probabilidades no processo quantitativo destas redes. Caso fosse utilizado o questionário exibido por Nadler & Campello (2001) seria necessário fazer 5292 perguntas ao especialista. Porém, através de uma nova configuração proposta por Firmino et al. (2006) para avaliação da qualidade do questionário, este número caiu para 3276, uma redução de 38,1%. Esta configuração busca conciliar uma quantidade mínima de questões a serem respondidas com a simetria e o índice de detalhamento das mesmas. Isto foi possível devido a uma nova ênfase dada ao protocolo de edução, onde busca-se extrair mais explicitamente medidas estatísticas de posição menos sensíveis à variância do modelo (moda

ou mediana) ao invés de distribuições de probabilidades propriamente ditas, como sugerido por Nadler & Campello (2001).

A principio, foi construído um questionário com 20 questões. Posteriormente, foram analisados os 10 intervalos elementares. Cada intervalo foi testado através do questionário para verificar se o mesmo realmente corresponderia à moda da distribuição. Diante desta análise, foi observado que os intervalos [10-20] e [20-30] e seus respectivos intervalos simétricos [80-90] e [70-80] apresentavam valores modais inconsistentes com os reais conforme Tabela 4.4. Portanto, algumas restrições foram acrescentadas, formulando assim um questionário de 26 questões, conforme Tabela 4.5 apresentada no tópico 4.4.2. Essa nova métrica de qualidade, aqui chamada de indicador de aderência, constitui a contribuição deste trabalho para melhoria do questionário de edução proposto.

Em relação à qualidade das informações eduzidas, que é realizada através de construtos de interesse brevemente comentado no tópico 4.4.2, não será abordada aqui.

5.3.1.4 Definição das questões referentes às redes Bayesianas

As 126 probabilidades são dados necessários para alimentação das redes Bayesianas. Cada probabilidade foi eduzida através do questionário de edução apresentado na Tabela 4.5. As 26 questões deste questionário multiplicadas pelo número de probabilidades da rede, totalizam 3276 questões a serem eduzidas.

Com a finalidade de obter as probabilidades condicionais, deve-se primeiramente introduzir o especialista no cenário desejado. Neste contexto, as redes Bayesianas apresentam uma grande vantagem nos processos de obtenção da opinião do especialista. Pois, devido à sua proveniência da inteligência artificial, apresenta uma grande capacidade de simular o raciocínio sensato do indivíduo em cenários por ele conhecidos. Isto proporciona um envolvimento entre os conceitos de redes Bayesianas e muitos métodos de edução. O papel do analista (ou entrevistador) neste processo é de extrema importância, pois a ele cabe o domínio da atividade considerada e a expressão adequada, devendo ser suficientemente claro e objetivo ao contextualizar os cenários de interesse. Como exemplo, um dos questionários encontra-se no Apêndice 1 deste trabalho.

5.3.1.5 Teste piloto/Entrevistas

Para aplicação do método de edução aqui apresentado, foi realizado um teste piloto com alguns eletricistas e engenheiros da CHESF. Este teste apresentou alguns pontos relevantes, destacam-se:

- Eletricistas que possuem um baixo grau de instrução, idade maior que 40 anos e 15 anos de experiência apresentaram respostas inconsistentes, ou seja, não é possível encontrar o valor modal ou o mesmo se encontra numa larga faixa numérica;
- Necessidade de repetir o cenário algumas vezes para memorização dos eduzidos;
- Os eduzidos após a compreensão do cenário e do questionário apresentaram respostas bem mais rápidas;
- Tempo médio de edução correspondente a 8 probabilidades condicionais ou 208 questões foi de 40 minutos;
- Necessidade de explicar as extremidades dos intervalos;
- Necessidade de uma segunda etapa de edução[1] quando a probabilidade eduzida estiver próxima das extremidades (entre 0 e 20 ou entre 80 e 100) ou ainda quando resultar no mesmo valor para perguntas sobre probabilidades condicionais diferentes, ou seja, onde existem evidências claras nas respostas de que uma é maior ou menor que a outra.

A experiência adquirida no teste piloto auxiliou no planejamento das entrevistas. Conseqüentemente, alguns ajustes foram realizados em relação à escolha dos especialistas, à explicação dos limites superiores e inferiores dos intervalos e em relação ao tempo estimado para edução. As entrevistas foram realizadas com 2 engenheiros e um eletricista com o 3º grau de instrução. Estes foram eduzidos sobre assuntos diferentes, ou seja, cada especialista foi questionado sobre alguns nós específicos da rede. Cada encontro com um especialista em particular levou mais ou menos 2 horas e 30 minutos entre explicações, perguntas e intervalo. Foram necessários 5 encontros para eduzir as 126 probabilidades.

5.3.1.6 Dados obtidos

Os dados obtidos da edução, algumas probabilidades condicionais conhecidas e outras calculadas através do modelo noisy-or estão apresentados nas TPCs dos respectivos nós da rede. O nível 1 e o nível 0 representam respectivamente o valor da variável favorável e desfavorável a tarefa. Como já comentado no tópico acima, foram eduzidos três especialistas sobre nós diferentes da rede Bayesiana da tarefa. A amostragem da edução por especialista será apresentada na Tabela 5.70. Em relação às redes Bayesianas correspondentes aos FDs dos eletricistas, estas foram eduzidas de um mesmo especialista. As tabelas a seguir mostram as TPCs resultantes do processo de edução.

[1] A segunda etapa de edução corresponde ao mesmo questionário em escalas menores baseadas no valor modal da primeira edução.

5.3.1.6.1 TPCs do Cenário 0

Tabela 5.10 TPC da IES0 sobre o ET0

EM0, EE0	*P(ES0=NÍVEL 0\ EM0, EE0)*	*P(ES0=NÍVEL 1\ EM0, EE0)*
NÍVEL 0, NÍVEL 0	1	0
NÍVEL 0, NÍVEL 1	0.35	0.65
NÍVEL 1, NÍVEL 0	0.25	0.75
NÍVEL 1, NÍVEL 1	0	1

Tabela 5.11 TPC da atividade do ET0

ES0, CAPACID	*P(ET0=NÍVEL 0\ ES0, CAPACID)*	*P(ET0=NÍVEL 1\ ES0, CAPACID)*
NÍVEL 0, NÍVEL 0	0.75	0.25
NÍVEL 0, NÍVEL 1	0.25	0.75
NÍVEL 1, NÍVEL 0	0.35	0.65
NÍVEL 1, NÍVEL 1	0.05	0.95

Tabela 5.12 TPC do monitoramento do EE0

ATENÇÃO, COMUN.	*P(EE0=NÍVEL 0\ ATENÇÃO, COMUM.)*	*P(EE0=NÍVEL 1\ ATENÇÃO, COMUM.)*
NÍVEL 0, NÍVEL 0	1.00	0.00
NÍVEL 0, NÍVEL 1	0.25	0.75
NÍVEL 1, NÍVEL 0	0.35	0.65
NÍVEL 1, NÍVEL 1	0.00	1.00

Tabela 5.13 TPC da indicação do EM0

TPC DA INDICAÇÃO DO EM0		
ATENÇÃO	*P(EMO=NIVEL 0\ATENÇÃO)*	*P(EMO=NIVEL 1\ATENÇÃO)*
NÍVEL 0	0.99	0.01
NÍVEL 1	0.65	0.35

Tabela 5.14 TPC referente aos erros cometidos neste cenário

P(Erros cometidos=NÍVEL 0)	*P(Erros cometidos=NÍVEL 1)*
0.97	0.03

5.3.1.6.2 TPCs do Cenário 1

Tabela 5.15 TPC da atividade do EM1

EE1, CAPACIDADE	*P(EM1=NÍVEL 0\ EE1, CAPACIDADE)*	*P(EM1=NÍVEL 1\ EE1, CAPACIDADE)*
NÍVEL 0, NÍVEL 0	0.95	0.05
NÍVEL 0, NÍVEL 1	0.65	0.35
NÍVEL 1, NÍVEL 0	0.90	0.10
NÍVEL 1, NÍVEL 1	0.60	0.40

Tabela 5.16 TPC do monitoramento do EE1

ATENÇÃO, COMUN.	P(EE1=NÍVEL 0\ ATENÇÃO, COMUM.)	P(EE1=NÍVEL 1\ ATENÇÃO, COMUM.)
NÍVEL 0, NÍVEL 0	1.00	0.00
NÍVEL 0, NÍVEL 1	0.95	0.05
NÍVEL 1, NÍVEL 0	0.45	0.55
NÍVEL 1, NÍVEL 1	0.00	1.00

Tabela 5.17 TPC referente aos erros cometidos neste cenário

P(Erros cometidos=NÍVEL 0)	P(Erros cometidos=NÍVEL 1)
0.97	0.03

5.3.1.6.3 TPCs do Cenário 2

Tabela 5.18 TPC da atividade dos E*2 (EM2+ET2)

CAPACID*2, EE2	P(E*2=NÍVEL 0\ CAPACID*2, EE2)	P(E*2=NÍVEL 1\ CAPACID*2, EE2)
NÍVEL 0, NÍVEL 0	0.95	0.05
NÍVEL 0, NÍVEL 1	0.85	0.15
NÍVEL 1, NÍVEL 0	0.75	0.25
NÍVEL 1, NÍVEL 1	0.65	0.35

Tabela 5.19 TPC da IEB2 sobre o EA2

EE2, EAUX2	P(IEB2=NÍVEL 0\ EE2, EAUX2)	P(IEB2=NÍVEL 1\ EE2, EAUX2)
NÍVEL 0, NÍVEL 0	1	0
NÍVEL 0, NÍVEL 1	0.935	0.065
NÍVEL 1, NÍVEL 0	0.975	0.025
NÍVEL 1, NÍVEL 1	0	1

Tabela 5.20 TPC da atividade do EA2

IEB2, ATENÇÃO	P(EA2=NÍVEL 0\ IEB2, ATENÇÃO)	P(EA2=NÍVEL 1\ IEB2, ATENÇÃO)
NÍVEL 0, NÍVEL 0	0.755	0.245
NÍVEL 0, NÍVEL 1	0.650	0.350
NÍVEL 1, NÍVEL 0	0.735	0.265
NÍVEL 1, NÍVEL 1	0.550	0.450

Tabela 5.21 TPC da atividade dos EAUX2

EE2, ATENÇÃO	P(EAUX2=NÍVEL 0\ EE2, ATENÇÃO)	P(EAUX2=NÍVEL 1\ EE2, ATENÇÃO)
NÍVEL 0, NÍVEL 0	0.955	0.045
NÍVEL 0, NÍVEL 1	0.945	0.055
NÍVEL 1, NÍVEL 0	0.935	0.065
NÍVEL 1, NÍVEL 1	0.850	0.150

Tabela 5.22 TPC do monitoramento do EE2

ATENÇÃO, COMUN.	P(EE2=NÍVEL 0\ ATENÇÃO, COMUN)	P(EE2=NÍVEL 0\ ATENÇÃO, COMUM)
NÍVEL 0, NÍVEL 0	1.00	0.00
NÍVEL 0, NÍVEL 1	0.85	0.15

NÍVEL 1, NÍVEL 0	0.65	0.35
NÍVEL 1, NÍVEL 1	0.00	1.00

Tabela 5.23 TPC referente aos erros cometidos neste cenário

P(Erros cometidos=NÍVEL 0)	*P(Erros cometidos=NÍVEL 1)*
0.99	0.01

5.3.1.6.4 TPCs do Cenário 3

Tabela 5.24 TPC do monitoramento do EE3

ATENÇÃO, COMUN.	*P(EE3=NÍVEL 0\ ATENÇÃO, COMUN)*	*P(EE3=NÍVEL 0\ ATENÇÃO, COMUM)*
NÍVEL 0, NÍVEL 0	1.00	0.00
NÍVEL 0, NÍVEL 1	0.95	0.05
NÍVEL 1, NÍVEL 0	0.45	0.55
NÍVEL 1, NÍVEL 1	0.00	1.00

Tabela 5.25 TPC da atividade EAUX3

EE2, ATENÇÃO	*P(EAUX3=NÍVEL 0\ EE2, ATENÇÃO)*	*P(EAUX3=NÍVEL 1\ EE2, ATENÇÃO)*
NÍVEL 0, NÍVEL 0	0.96	0.04
NÍVEL 0, NÍVEL 1	0.64	0.36
NÍVEL 1, NÍVEL 0	0.90	0.10
NÍVEL 1, NÍVEL 1	0.61	0.39

Tabela 5.26 TPC referente aos erros cometidos neste cenário

P(Erros cometidos=NÍVEL 0)	*P(Erros cometidos=NÍVEL 1)*
0.98	0.02

5.3.1.6.5 TPCs do Cenário 4

Tabela 5.27 TPC da atividade dos E*4 (EM4+ET4)

*CAPACID*4, EE4*	*P(E*4=NÍVEL 0\ CAPACID*2, EE4)*	*P(E*4=NÍVEL 1\ CAPACID*2, EE4)*
NÍVEL 0, NÍVEL 0	0.96	0.04
NÍVEL 0, NÍVEL 1	0.88	0.12
NÍVEL 1, NÍVEL 0	0.76	0.24
NÍVEL 1, NÍVEL 1	0.60	0.40

Tabela 5.28 TPC da IEB4 sobre o EA4

EE4, EAUX4	*P(IEB4=NÍVEL 0\ EE4, EAUX2)*	*P(IEB4=NÍVEL 1\ EE4, EAUX4)*
NÍVEL 0, NÍVEL 0	1	0
NÍVEL 0, NÍVEL 1	0.940	0.060
NÍVEL 1, NÍVEL 0	0.977	0.023
NÍVEL 1, NÍVEL 1	0	1

Tabela 5.29 TPC da atividade do EA4

IEB4, ATENÇÃO	*P(EA4=NÍVEL 0\ IE4, ATENÇÃO)*	*P(EA4=NÍVEL 1\ IEB4, ATENÇÃO)*
NÍVEL 0, NÍVEL 0	0.775	0.225

NÍVEL 0, NÍVEL 1	0.700	0.300
NÍVEL 1, NÍVEL 0	0.740	0.260
NÍVEL 1, NÍVEL 1	0.565	0.435

Tabela 5.30 TPC da atividade dos EAUX4

EE4, ATENÇÃO	*P(EAUX4=NÍVEL 0\ EE4, ATENÇÃO)*	*P(EAUX4=NÍVEL 1\ EE4, ATENÇÃO)*
NÍVEL 0, NÍVEL 0	0.960	0.040
NÍVEL 0, NÍVEL 1	0.955	0.045
NÍVEL 1, NÍVEL 0	0.940	0.060
NÍVEL 1, NÍVEL 1	0.875	0.125

Tabela 5.31 TPC do monitoramento do EE4

ATENÇÃO, COMUN.	*P(EE4=NÍVEL 0\ ATENÇÃO, COMUN)*	*P(EE4=NÍVEL 0\ ATENÇÃO, COMUM)*
NÍVEL 0, NÍVEL 0	1.00	0.00
NÍVEL 0, NÍVEL 1	0.88	0.12
NÍVEL 1, NÍVEL 0	0.70	0.30
NÍVEL 1, NÍVEL 1	0.00	1.00

Tabela 5.32 TPC da atividade do EM4

CAPACID, EE4	*P(EM4=NÍVEL 0\ CAPACID, EE4)*	*P(EM4=NÍVEL 1\ CAPACID, EE4)*
NÍVEL 0, NÍVEL 0	0.97	0.03
NÍVEL 0, NÍVEL 1	0.93	0.07
NÍVEL 1, NÍVEL 0	0.58	0.42
NÍVEL 1, NÍVEL 1	0.55	0.45

Tabela 5.33 TPC referente aos erros cometidos neste cenário

P(Erros cometidos=NÍVEL 0)	*P(Erros cometidos=NÍVEL 1)*
0.99	0.01

5.3.1.6.6 TPCs do Cenário 5

Tabela 5.34 TPC da atividade dos C5 (EM5+EA5)

CAPACID.C5, EE5	*P(C5=NÍVEL 0\ CAPACID.C5, EE5)*	*P(C5=NÍVEL 1\ CAPACID.C5, EE5)*
NÍVEL 0, NÍVEL 0	0.98	0.02
NÍVEL 0, NÍVEL 1	0.95	0.05
NÍVEL 1, NÍVEL 0	0.53	0.47
NÍVEL 1, NÍVEL 1	0.51	0.49

Tabela 5.35 TPC do monitoramento do EE5

ATENÇÃO, COMUN.	*P(EE5=NÍVEL 0\ ATENÇÃO, COMUN)*	*P(EE5=NÍVEL 0\ ATENÇÃO, COMUM)*
NÍVEL 0, NÍVEL 0	1.00	0.00
NÍVEL 0, NÍVEL 1	0.95	0.05
NÍVEL 1, NÍVEL 0	0.58	0.42
NÍVEL 1, NÍVEL 1	0.00	1.00

Tabela 5.36 TPC referente aos erros cometidos neste cenário

P(Erros cometidos=NÍVEL 0)	P(Erros cometidos=NÍVEL 1)
0.95	0.05

5.3.1.6.7 TPCs do Cenário 6

Tabela 5.37 TPC do IES0 sobre ET6

EM6, EE6	P(ES6=NÍVEL 0\ EM6, EE6)	P(ES6=NÍVEL 1\ EM6, EE6)
NÍVEL 0, NÍVEL 0	1.00	0.00
NÍVEL 0, NÍVEL 1	0.95	0.05
NÍVEL 1, NÍVEL 0	0.92	0.08
NÍVEL 1, NÍVEL 1	0.00	1.00

Tabela 5.38 TPC da atividade do ET6

ES6, CAPACID	P(ET6=NÍVEL 0\ ES6, CAPACID)	P(ET6=NÍVEL 1\ ES6, CAPACID)
NÍVEL 0, NÍVEL 0	0.90	0.10
NÍVEL 0, NÍVEL 1	0.65	0.35
NÍVEL 1, NÍVEL 0	0.85	0.15
NÍVEL 1, NÍVEL 1	0.60	0.30

Tabela 5.39TPC do monitoramento do EE6

ATENÇÃO, COMUN.	P(EE6=NÍVEL 0\ ATENÇÃO, COMUM.)	P(EE6=NÍVEL 1\ ATENÇÃO, COMUM.)
NÍVEL 0, NÍVEL 0	1.00	0.00
NÍVEL 0, NÍVEL 1	0.82	0.18
NÍVEL 1, NÍVEL 0	0.68	0.32
NÍVEL 1, NÍVEL 1	0.00	1.00

Tabela 5.40 TPC da indicação do EM6

ATENÇÃO	P(EM6=NIVEL 0\ATENÇÃO)	P(EM6=NIVEL 1\ATENÇÃO)
NÍVEL 0	0.99	0.01
NÍVEL 1	0.65	0.35

Tabela 5.41 TPC referente aos erros cometidos neste cenário

P(Erros cometidos=NÍVEL 0)	P(Erros cometidos=NÍVEL 1)
0.995	0.005

5.3.1.6.7 FDs dos EM e ET

Tabela 5.42 TPC da capacidade dos EM e ET

ATENÇÃO, CONT.MOTOR	P(CAPACID=NÍVEL 0\ ATENÇÃO, CONT.MOTOR)	P(CAPACID=NÍVEL 1\ ATENÇÃO, CONT.MOTOR)
NÍVEL 0, NÍVEL 0	1	0

NÍVEL 0, NÍVEL 1	0.65	0.35
NÍVEL 1, NÍVEL 0	0.75	0.25
NÍVEL 1, NÍVEL 1	0	1

Tabela 5.43 TPC da atenção dos ET e EM

INSETOS, EST. EMOC, FADIGA	*P(ATENÇÃO=NÍVEL 0\ INSETOS, EST. EMOC, FADIGA)*	*P(ATENÇÃO=NÍVEL 1\ INSETOS, EST. EMOC, FADIGA)*
NÍVEL 0, NÍVEL 0, NÍVEL 0	0.880	0.120
NÍVEL 0, NÍVEL 0, NÍVEL 1	0.850	0.150
NÍVEL 0, NÍVEL 1, NÍVEL 0	0.550	0.450
NÍVEL 0, NÍVEL 1, NÍVEL 1	0.468	0.532
NÍVEL 1, NÍVEL 0, NÍVEL 0	0.950	0.050
NÍVEL 1, NÍVEL 0, NÍVEL 1	0,808	0.192
NÍVEL 1, NÍVEL 1, NÍVEL 0	0.523	0.477
NÍVEL 1, NÍVEL 1, NÍVEL 1	0.120	0.880

Tabela 5.44 TPC da fadiga dos ET e EM

DESIGN, C. TRAB, COND. FIS.	*P(FADIGA=NÍVEL 0\ DESIGN, C. TRAB, COND. FIS)*	*P(FADIGA=NÍVEL 1\ DESIGN, C. TRAB, COND. FIS)*
NÍVEL 0, NÍVEL 0, NÍVEL 0	0.900	0.100
NÍVEL 0, NÍVEL 0, NÍVEL 1	0.450	0.550
NÍVEL 0, NÍVEL 1, NÍVEL 0	0.550	0.450
NÍVEL 0, NÍVEL 1, NÍVEL 1	0.247	0.753
NÍVEL 1, NÍVEL 0, NÍVEL 0	0.750	0.250
NÍVEL 1, NÍVEL 0, NÍVEL 1	0.337	0.663
NÍVEL 1, NÍVEL 1, NÍVEL 0	0.413	0.587
NÍVEL 1, NÍVEL 1, NÍVEL 1	0.100	0.900

Tabela 5.45 TPC do controle motor dos EM e ET

FADIGA, COND. FÍSICO	*P(C. MOTOR=NÍVEL 0\ FADIGA, COND. FÍSICO)*	*P(C. MOTOR=NÍVEL 1\ FADIGA, COND. FÍSICO)*
NÍVEL 0, NÍVEL 0	0.945	0.055
NÍVEL 0, NÍVEL 1	0.550	0.450
NÍVEL 1, NÍVEL 0	0.450	0.550
NÍVEL 1, NÍVEL 1	0.250	0.750

5.3.1.6.8 FDs do EA

Tabela 5.46 TPC da fadiga do EA

DESIGN, C. TRAB, COND. FIS.	*P(FADIGA=NÍVEL 0\ DESIGN, C. TRAB, COND. FIS)*	*P(FADIGA=NÍVEL 1\ DESIGN, C. TRAB, COND. FIS)*
NÍVEL 0, NÍVEL 0, NÍVEL 0	0.880	0.120
NÍVEL 0, NÍVEL 0, NÍVEL 1	0.650	0.350
NÍVEL 0, NÍVEL 1, NÍVEL 0	0.650	0.350
NÍVEL 0, NÍVEL 1, NÍVEL 1	0.422	0.578
NÍVEL 1, NÍVEL 0, NÍVEL 0	0.850	0.150

NÍVEL 1, NÍVEL 0, NÍVEL 1	0,552	0.448
NÍVEL 1, NÍVEL 1, NÍVEL 0	0.552	0.448
NÍVEL 1, NÍVEL 1, NÍVEL 1	0.120	0.880

Tabela 5.47 TPC da atenção do EA

INSETOS, EST. EMOC, FADIGA	*P(ATENÇÃO=NÍVEL 0\ INSETOS, EST. EMOC, FADIGA)*	*P(ATENÇÃO=NÍVEL 1\ INSETOS, EST. EMOC, FADIGA)*
NÍVEL 0, NÍVEL 0, NÍVEL 0	0.960	0.040
NÍVEL 0, NÍVEL 0, NÍVEL 1	0.875	0.125
NÍVEL 0, NÍVEL 1, NÍVEL 0	0.550	0.450
NÍVEL 0, NÍVEL 1, NÍVEL 1	0.481	0.519
NÍVEL 1, NÍVEL 0, NÍVEL 0	0.950	0.050
NÍVEL 1, NÍVEL 0, NÍVEL 1	0.831	0.169
NÍVEL 1, NÍVEL 1, NÍVEL 0	0.522	0.478
NÍVEL 1, NÍVEL 1, NÍVEL 1	0.040	0.960

5.3.1.6.8 FDs dos EAUX

Tabela 5.48 TPC da fadiga dos EAUX

C. TRAB.,COND. FÍSICO	*P(FADIGA= NÍVEL 0\, C. TRAB., COND. FÍSICO)*	*P(FADIGA= NÍVEL 1\, C. TRAB., COND. FÍSICO)*
NÍVEL 0, NÍVEL 0	0.750	0.250
NÍVEL 0, NÍVEL 1	0.650	0.350
NÍVEL 1, NÍVEL 0	0.450	0.550
NÍVEL 1, NÍVEL 1	0.250	0.750

Tabela 5.49 TPC da atenção dos EAUX

E. EMOC., FADIGA	*P(ATENÇÃO= NÍVEL 0\, E. EMOC., FADIGA)*	*P(ATENÇÃO= NÍVEL 1\, E. EMOC., FADIGA)*
NÍVEL 0, NÍVEL 0	0.750	0.250
NÍVEL 0, NÍVEL 1	0.650	0.350
NÍVEL 1, NÍVEL 0	0.550	0.450
NÍVEL 1, NÍVEL 1	0.250	0.750

5.3.1.6.9 FDs do EE

Tabela 5.50 TPC da fadiga do EE

C. TRAB.,COND. FÍSICO	*P(FADIGA= NÍVEL 0\, C. TRAB., COND. FÍSICO)*	*P(FADIGA= NÍVEL 1\, C. TRAB., COND. FÍSICO)*
NÍVEL 0, NÍVEL 0	0.850	0.150
NÍVEL 0, NÍVEL 1	0.750	0.250
NÍVEL 1, NÍVEL 0	0.650	0.350
NÍVEL 1, NÍVEL 1	0.150	0.850

Tabela 5.51 TPC da atenção do EE

E. ANT., EST. EMOC, FADIGA	*P(ATENÇÃO=NÍVEL 0\ E. ANT., EST. EMOC, FADIGA)*	*P(ATENÇÃO=NÍVEL 1\ E. ANT., EST. EMOC, FADIGA)*
NÍVEL 0, NÍVEL 0, NÍVEL 0	0.800	0.200
NÍVEL 0, NÍVEL 0, NÍVEL 1	0.650	0.350
NÍVEL 0, NÍVEL 1, NÍVEL 0	0.550	0.450
NÍVEL 0, NÍVEL 1, NÍVEL 1	0.357	0.643
NÍVEL 1, NÍVEL 0, NÍVEL 0	0.750	0.250
NÍVEL 1, NÍVEL 0, NÍVEL 1	0.487	0.513
NÍVEL 1, NÍVEL 1, NÍVEL 0	0.412	0.588
NÍVEL 1, NÍVEL 1, NÍVEL 1	0.200	0.800

5.3.1.6.10 Nós raízes das redes dos FDs

Tabela 5.52 TPC da carga de trabalho

P(Carga de trabalho=NÍVEL 0)	*P(Carga de trabalho =NÍVEL 1)*
0.70	0.30

Tabela 5.53 TPC do design de equipamentos relacionados ao desempenho dos EM e ET

P(Design de equipamentos=NÍVEL 0)	*P(Design de equipamentos=NÍVEL 1)*
0.90	0.10

Tabela 5.54 TPC do design de equipamentos relacionados ao desempenho do EA

P(Design de equipamentos=NÍVEL 0)	*P(Design de equipamentos=NÍVEL 1)*
0.98	0.02

Tabela 5.55 TPC do condicionamento físico para os EM e ET

Condicionamento físico=NÍVEL 0	*Condicionamento físico =NÍVEL 1*
0.90	0.10

Tabela 5.56 TPC do condicionamento físico para o EA

Condicionamento físico=NÍVEL 0	*Condicionamento físico =NÍVEL 1*
0.92	0.08

Tabela 5.57 TPC do condicionamento físico para o EAUX

Condicionamento físico=NÍVEL 0	*Condicionamento físico =NÍVEL 1*
0.94	0.06

Tabela 5.58 TPC do condicionamento físico para o EE

Condicionamento físico=NÍVEL 0	*Condicionamento físico =NÍVEL 1*
0.98	0.02

Tabela 5.59 TPC do estado emocional

Estado emocional=NÍVEL 0	*Estado emocional =NÍVEL 1*
0.95	0.05

Tabela 5.60 TPC referente aos insetos

Insetos=NÍVEL 0	*Insetos=NÍVEL 1*
0.90	0.10

Tabela 5.61 TPC da comunicação entre o EE e os outros eletricistas

P(COMUNICAÇÃO=NÍVEL 0)	*P(COMUNICAÇÃO=NÍVEL 1)*
0.9	*0.1*

5.3.1.7 Modelagem

Para ilustrar o procedimento de modelagem das ações humanas através de redes Bayesianas aqui realizado, será apresentada a montagem do cenário 1 da troca de cadeias de isoladores de linhas de transmissão. A Figura 5.19 mostra este cenário com as redes Bayesianas dos FDs conectadas aos seus respectivos nós. Na construção da rede, seleciona-se o ícone desejado e clica-se na tela de construção desta. Pode-se, além do nome da variável na rede, atribuir a quantidade de categorias que particionam os seus possíveis resultados. Posteriormente, define-se o rótulo de cada uma das partições criadas. Aqui, as variáveis envolvidas podem assumir valores: favorável ou desfavorável ao bom desempenho do sistema.

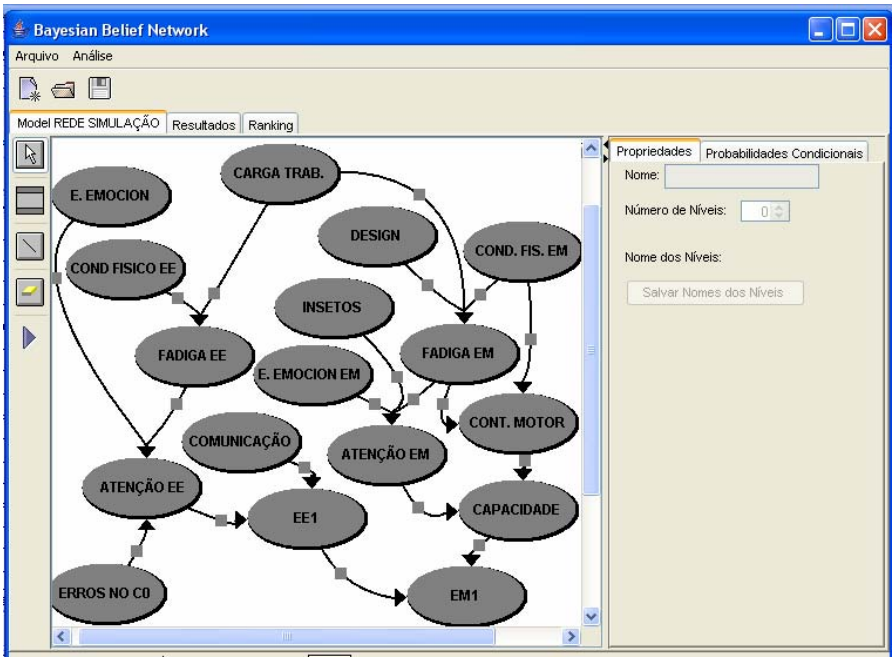


Figura 5.19 Interface principal do software E&P/CHESF BBN na modelagem do cenário 1.

A próxima etapa consiste na especificação das TPCs de cada variável envolvida de acordo com os dados obtidos na edução. Sobre a variável EE1, por exemplo, tem-se que a probabilidade do eletricista Encarregado não monitorar a retirada dos contra-pinos de forma adequada dado que ele não está com sua atenção adequada e sua comunicação está adequada é de *55* % (Tabela 5.16). Ao final deste processo, a rede Bayesiana está pronta para gerar distribuições a *posteriori* sob a presença de evidências empíricas, subjetivas ou diante da ausência de ambas. Isso fornece grande flexibilidade ao analista, pois é possível verificar a probabilidade de erro humano no momento da execução da tarefa através das observações realizadas sobre o estado do executor[2].

A evidência empírica sobre as variáveis da rede é realizada selecionando-se as categorias ou níveis observados e adicionando o valor que corresponde a esta evidência. Se por acaso, observa-se que o EE1 está cansado, pode-se saber a influência que esta evidência tem no insucesso do seu monitoramento (evidência empírica, tópico 4.2.7). A Tabela 5.62 mostra este resultado.

Em relação à introdução de evidências subjetivas, como já foi abordado no tópico 4.2.8, pode-se ter várias evidências subjetivas sobre a mesma variável, pois as taxas correspondentes a cada categoria de cada evidência desta natureza são multiplicadas devido à condição Markoviana, que torna tais evidências independentes dado que se sabe sobre a variável a qual estas se referem. Assim, caso se tenham duas opiniões sobre a atenção do EE1 dado que ele realizou um teste especifico, $T_1 = P_1(\text{aprovação no teste} \mid \text{tem atenção}) = \beta_1(2,1)$ e $T_2 = P_2(\text{aprovação no teste} \mid \text{tem atenção}) = \beta_2(4,2)$, a evidência para efeito de cálculos é $E^* = \beta^*(8, 2)$. A influência destas evidências sobre a probabilidade de sucesso do EE1 pode-se ser vista também na Tabela 5.62.

Tabela 5.62 Análise da variabilidade do comportamento do EE1 diante de condições específicas.

Evidência	*P(EE1 monitorar corretamente a equipe no C1)*
nenhuma	*0,84*
B(2,1) e β (4,2) sobre a atenção adequada do EE1	*0,95*
Fadiga presente no EE1	*0,77*

Percebe-se na Tabela 5.62 que a probabilidade do EE1 monitorar a equipe adequadamente diante do cenário 1 é alta, segundo as edições. Esta probabilidade ainda poderá elevar-se em

[2] Estado do executor pode ser visto como resultado do seu comportamento diante da presença de alguns fatores no momento considerado.

12,6% se mediante um teste, for percebido que este eletricista têm maiores chances de ter atenção adequada para monitorar a tarefa solicitada. Por outro lado, observar-se que se o EE1 estiver cansado, ocorrerá uma redução de 9,3% na probabilidade de sucesso, isto é, ET1 monitorar corretamente. A Figura 5.20 mostra este último resultado.

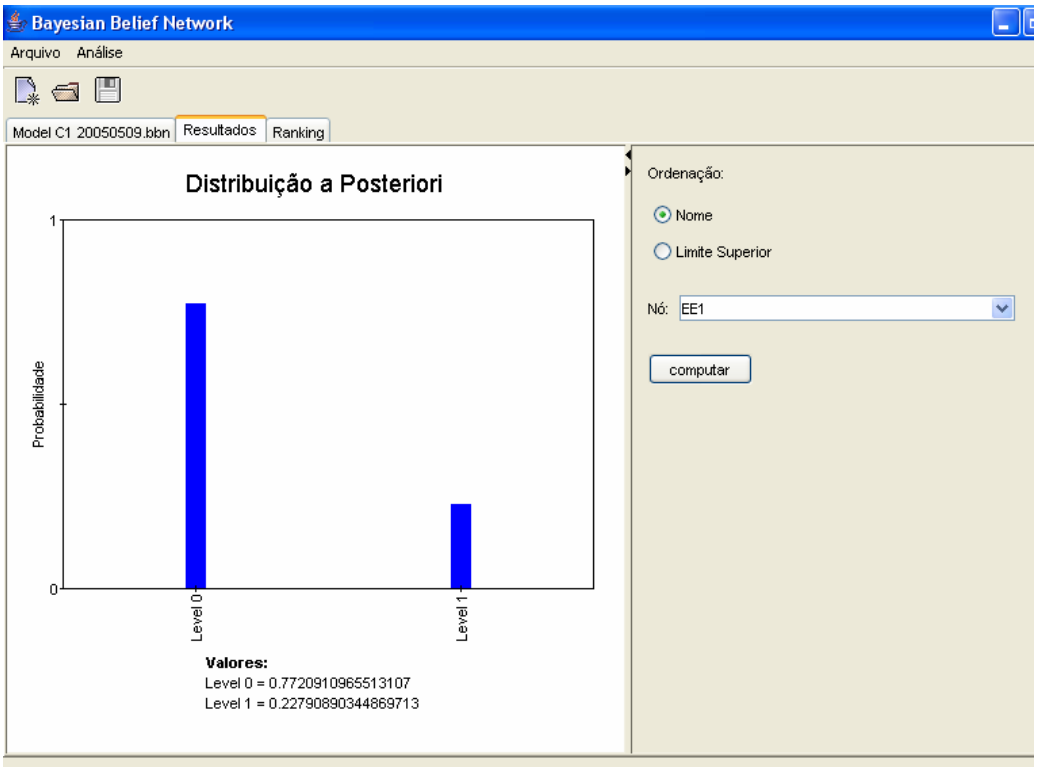


Figura 5.20 Interface de resultados do software E&P/CHESF BBN.

As tabelas a seguir mostram os resultados das modelagens realizadas para cada cenário da rede Bayesiana da Figura 5.18 com as devidas redes Bayesianas dos FDs conectadas aos seus respectivos nós. Estas modelagens foram realizadas sem adição de evidências.

Tabela 5.63 Probabilidades posteriores do cenário 0

NÓ	*NÍVEL 0*	*NÍVEL 1*
ATIVIDADE ET0	*0,617876*	*0,382124*
CARGA DE TRABAHO	*0,696251*	*0,303749*
FADIGA DO EE0	*0,733400*	*0,266600*
FADIGA DO ET0	*0,733401*	*0,266599*
CONTROLE MOTOR DO ET0	*0,782337*	*0,217663*
MONITORAMENTO DO EE0	*0,813923*	*0,186077*
ATENÇÃO DO EE	*0,820963*	*0,179037*
IES0	*0,846372*	*0,153628*
ATENÇÃO DO ET0	*0,856656*	*0,143344*
CAPACIDADE DO ET0	*0,875031*	*0,124969*
COMUNICAÇÃO	*0,896876*	*0,103124*
CONDICIONAMENTO FÍSICO DO ET0	*0,897575*	*0,102425*
DESIGN DE EQUIPAMENTOS	*0,899355*	*0,100645*
INSETOS	*0,899864*	*0,100136*

E. EMOCIONAL, ATIVIDADE DO EM0	*0,950087*	*0,049913*
ATENÇÃO DO EM0	*0,950099*	*0,049901*
CONDICIONAMENTO FÍSICO DO EE0	*0,979861*	*0,020139*

Tabela 5.64 Probabilidades posteriores do cenário 1

NÓ	*NÍVEL 0*	*NÍVEL 1*
CARGA DE TRABAHO	*0,699788*	*0,300212*
FADIGA DO EE1, FADIGA DO EM1	*0,741983*	*0,258017*
ATENÇÃO DO EE1	*0,744788*	*0,255212*
CONTROLE MOTOR DO EM1	*0,789801*	*0,210199*
IES0	*0,827664*	*0,172336*
MONITORAMENTO DO EE1	*0,842730*	*0,157270*
ATENÇÃO DO EM1	*0,858271*	*0,141729*
CAPACIDADE DO EM1	*0,873137*	*0,126863*
CONDICIONAMENTO FÍSICO DO EM0	*0,898139*	*0,101861*
DESIGN DE EQUIPAMENTOS	*0,899727*	*0,100273*
INSETOS	*0,899850*	*0,100150*
COMUNICAÇÃO	*0,900321*	*0,099679*
ATIVIDADE DO EM1	*0,904467*	*0,095533*
E. EMOCIONAL	*0,949406*	*0,050594*
ERROS NO CENÁRIO 0	*0,969836*	*0,030164*
CONDICIONAMENTO FÍSICO DO EE1	*0,980033*	*0,019967*

Tabela 5.65 Probabilidades posteriores do cenário 2

NÓ	*NÍVEL 0*	*NÍVEL 1*
FADIGA EAUX2	*0,657749*	*0,342251*
CARGA DE TRABALHO EAUX2	*0,703362*	*0,296638*
ATENÇÃO EAUX2	*0,704144*	*0,295856*
*FADIGA E*2*	*0,731147*	*0,268853*
ATIVIDADE DO EA2	*0,746643*	*0,253357*
ATENÇÃO EE2	*0,748835*	*0,251165*
*CONTROLE MOTOR E*2*	*0,776616*	*0,223384*
FADIGA EE2	*0,785613*	*0,214387*
FADIGA EA2	*0,795064*	*0,204936*
*ATENÇÃO E*2*	*0,856913*	*0,143087*
CAPACIDADE	*0,865932*	*0,134068*
MONITORAMENTO DO EE2	*0,880500*	*0,119500*
*CONDICIONAMENTO FISICO E*2*	*0,892540*	*0,107460*
COMUNICAÇÃO	*0,896849*	*0,103151*
*DESIGN E*2*	*0,898621*	*0,101379*
INSETOS	*0,900015*	*0,099985*
*ATIVIDADE DOS E*2*	*0,911360*	*0,088640*
ATENÇÃO EA2	*0,919582*	*0,080418*
CONDICIONAMENTO FISICO EA2	*0,921120*	*0,078880*
CONDICIONAMENTO FISICO EAUX2	*0,940806*	*0,059194*
ESTADO EMOCIONAL	*0,949518*	*0,050482*
ATIVIDADE DOS EAUX2	*0,946419*	*0,053581*
ERROS NO CENÁRIO 1	*0,969916*	*0,030084*
DESIGN EA2	*0,980036*	*0,019964*
CONDICIONAMENTO FISICO EE2	*0,979826*	*0,020174*
IEB2	*0,981869*	*0,018131*

Tabela 5.66 Probabilidades posteriores do cenário 3

NÓ	NÍVEL 0	NÍVEL 1
FADIGA EAUX3	0,653569	0,346431
CARGA DE TRABALHO	0,701824	0,298176
ATENÇÃO EAUX3	0,702432	0,297568
ATENÇÃO EE3	0,770973	0,229027
FADIGA EE3	0,786863	0,213137
ATIVIDADE DOS EAUX3	0,852365	0,147635
MONITORAMENTO DO EE3	0,860555	0,139445
COMUNICAÇÃO	0,902719	0,097281
CONDICIONAMENTO FÍSICO EAUX3	0,940190	0,059810
ESTADO EMOCIONAL	0,948906	0,051094
CONDICIONAMENTO FÍSICO EE	0,980010	0,019990
ERROS CENÁRIO 2	0,990065	0,009935

Tabela 5.67 Probabilidades posteriores do cenário 4

NÓ	NÍVEL 0	NÍVEL 1
FADIGA EAUX4	0,648401	0,351599
CARGA DE TRABALHO	0,692311	0,307689
ATENÇÃO EAUX4	0,702527	0,297473
ATENÇÃO EE4	0,721217	0,278783
FADIGA E*4	0,751927	0,248073
ATIVIDADE DO EA4	0,767798	0,232202
CONTROLE MOTOR E*4	0,772515	0,227485
FADIGA EE4	0,785920	0,214080
FADIGA EA4	0,793757	0,206243
ATENÇÃO E*4	0,856969	0,143031
CAPACIDADE E*4	0,866076	0,133924
CONDICIONAMENTO FISICO E*4	0,895818	0,104182
DESIGN E*4	0,898985	0,101015
COMUNICAÇÃO	0,899255	0,100745
INSETOS	0,899466	0,100534
MONITORAMENTO DO EE4	0,900186	0,099814
ATIVIDADE DO EM4	0,912719	0,087281
ATENÇÃO EA4	0,915229	0,084771
CONDICIONAMENTO FISICO EA4	0,919614	0,080386
ATIVIDADE DO E*4	0,922705	0,077295
CONDICIONAMENTO FISICO EAUX4	0,939719	0,019943
ESTADO EMOCIONAL	0,950041	0,049959
ATIVIDADE DOS EAUX4	0,954047	0,045953
DESIGN EA4	0,979946	0,020054
ERROS NO CENÁRIO 3	0,980022	0,019978
CONDICIONAMENTO FISICO EE4	0,980057	0,019943
IEB4	0,987783	0,012217

Tabela 5.68 Probabilidades posteriores do cenário 5

NÓ	NÍVEL 0	NÍVEL 1
CARGA DE TRABALHO	0,699767	0,300233
FADIGA C5	0,739695	0,260305
ATENÇÃO EE5	0,748408	0,251592

FADIGA EE5	*0,785264*	*0,214736*
CONTROLE MOTOR	*0,787302*	*0,212698*
CAPACIDADE C5	*0,871023*	*0,128977*
MONITORAMENTO EE3	*0,872562*	*0,127438*
CONDICIONAMENTO FÍSICO C5	*0,897056*	*0,102944*
COMUNICAÇÃO	*0,898708*	*0,101292*
DESIGN DE EQUIPAMENTOS	*0,899644*	*0,100356*
INSETOS	*0,899968*	*0,100032*
ATIVIDADE C5	*0,918459*	*0,081541*
ATENÇÃO C5	*0,918922*	*0,081078*
ESTADO EMOCIONAL	*0,979950*	*0,050677*
CONDICIONAMENTO FÍSICO EE5	*0,980053*	*0,019937*
ERROS CENÁRIO 4	*0,989976*	*0,010024*

Tabela 5.69 Probabilidades posteriores do cenário 6

PROBABILIDADES POSTERIORES DO CENÁRIO 6		
NÓ	*NÍVEL 0*	*NÍVEL 1*
CARGA DE TRABAHO	*0,700755*	*0,299245*
FADIGA DO ET6, FADIGA EE6	*0,744918*	*0,255082*
ATENÇÃO EE6	*0,753969*	*0,246031*
CONTROLE MOTOR DO ET6	*0,794290*	*0,205710*
ATENÇÃO DO ET6	*0,859499*	*0,140501*
CAPACIDADE DO ET6	*0,882517*	*0,117483*
MONITORAMENTO ET6	*0,889357*	*0,110643*
ATIVIDADE ET6	*0,890213*	*0,109787*
CONDICIONAMENTO FÍSICO DO EE6	*0,898363*	*0,101637*
INSETOS	*0,899818*	*0,100182*
COMUNICAÇÃO	*0,988363*	*0,101637*
ATENÇÃO DO EM6	*0,900547*	*0,099453*
DESIGN DE EQUIPAMENTOS	*0,900351*	*0,099649*
CONDICIONAMENTO FÍSICO DO ET6	*0,902358*	*0,097642*
ERROS NO CENÁRIO 5	*0,950078*	*0,049922*
ESTADO EMOCIONAL	*0,950412*	*0,049588*
ATIVIDADE EM6	*0,956771*	*0,043229*
IES6	*0,983879*	*0,016121*

5.3.2 Avaliação dos dados obtidos através da edução

Como foram eduzidos três especialistas sobre nós diferentes da rede Bayesiana da tarefa como mostra a Tabela 5.70, não foi possível tratar da qualidade das informações eduzidas através da análise das curvas que representam as famílias de distribuição de probabilidades de dois especialistas como apresentado em Campello (2002). Porém, pôde-se recorrer à análise da curva de utilidade de cada especialista para se ter uma noção de sua tolerância ao risco em geral. É certo que se um especialista possui um perfil otimista, este apresentará probabilidades de erro mais baixas que um especialista que possui um perfil pessimista. Hammond et al. (1999) apresenta a interpretação da atitude de uma pessoa em relação ao risco a partir de uma curva de utilidade, onde uma curva arqueada para cima indica atitude de intolerância ao risco,

e quanto maior a curvatura, maior a aversão. Já uma linha reta representa um comportamento neutro, e uma curva arqueada para baixo demonstra disposição para correr risco. Com a finalidade de realizar está análise, aos especialistas foram expostas alternativas associadas à atividade de substituição de cadeias de isoladores, as quais envolvem decisões de risco. Estas alternativas e a maneira como os especialistas foram abordados estão apresentadas no apêndice 2 deste trabalho. As Figuras 5.21, 5.22 e 5.23 apresentam a utilidade de cada especialista (ver anexo 1)

Tabela 5.70 Amostragem da edução dos nós por especialista

CENÁRIO 0		CENÁRIO 1		CENÁRIO 2		CENÁRIO 3		CENÁRIO 4		CENÁRIO 5		CENÁRIO 6	
NÓ	**ESP.**	**NÓ**	**ESP.**	**NÓ**	**ESP.**	**NÓ**	**ESP.**	**NÓ**	**ESP.**	**NÓ**	**ESP.**	**NÓ**	**ESP.**
IES0	A	EM1	B	E*2	B	EE3	B	E*4	C	C5	B	IES6	B
ET0	A	EE1	B	IEB2	C	EAUX3	B	EA4	B	EE5	B	ET6	B
EE0	A	ERROS	B	EA2	A	ERROS	C	IEB4	B	ERROS	C	EE6	B
EM0	B			EAUX2	B			EA4	B			EM6	B
ERROS	C			EE2	B			EAUX4	C			ERROS	B
				ERROS	C			EE4	C				
								EM4	B				
								ERROS	C				

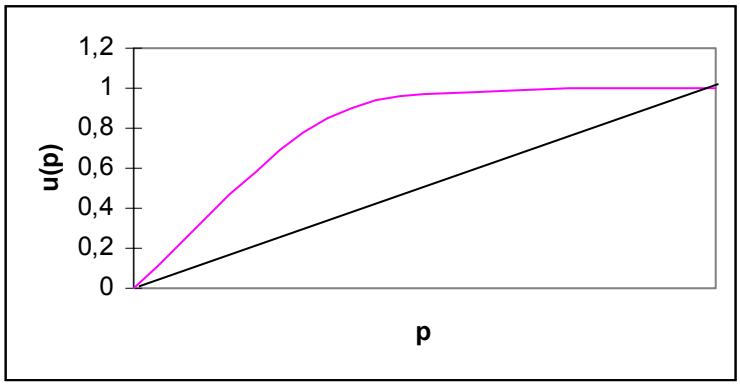


Figura 5.21 Curva da utilidade do especialista A

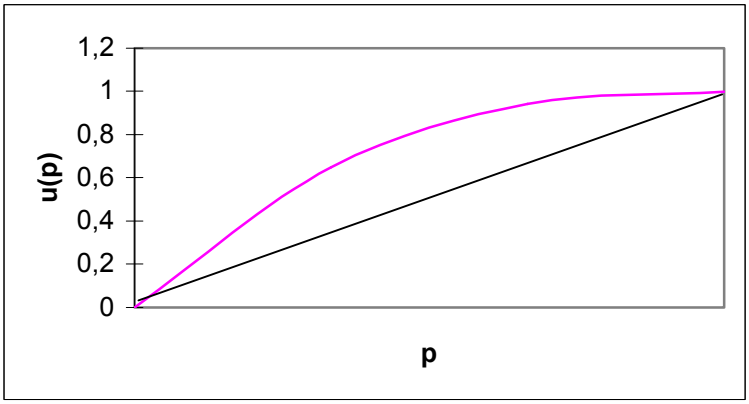


Figura 5.22 Curva da utilidade do especialista B

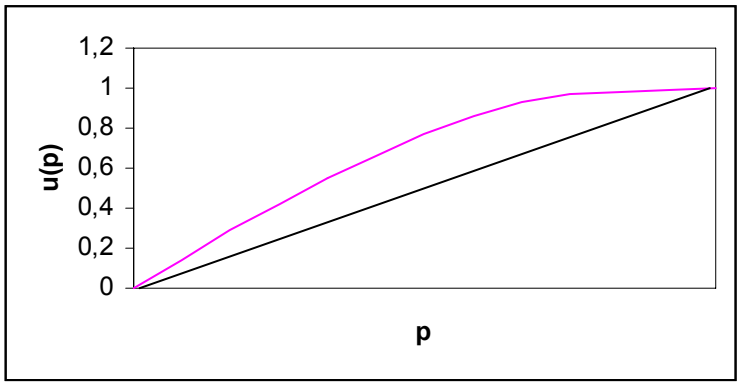


Figura 5.23 Curva da utilidade do especialista C

Comparando as curvas apresentadas nas Figuras acima, percebe-se que o especialista A é bastante avesso ao risco, enquanto os especialistas B e C, apresentam um comportamento um pouco semelhante em relação ao risco. Porém, nota-se que o especialista B apresenta uma aversão ao risco um pouco maior que o especialista C.

5.3.2.1 Interpretação dos resultados

Interpretação da PEH:

A Figura 5.24 apresenta as probabilidades do EE não monitorar corretamente a equipe nos cenários que representam a seqüência da atividade de substituição de cadeias de isoladores. Percebe-se que as probabilidades de maior e menor valor para este caso estão respectivamente nos cenários 0 e 4.

O cenário 0 refere-se ao tensionamento do retângulo, isto é, transferência da tensão mecânica da cadeia para os bastões tensores do retângulo de forças. Nesta atividade, o ET pode tensionar de maneira errada causando desbalanceamento do retângulo. Apesar deste cenário apresentar um certo grau de importância, o EE talvez não dedique atenção necessária porque o EM, nesta atividade, está observando o trabalho do ET. Este fato pode ter elevado a probabilidade de monitoração inadequada. É importante destacar que o cenário 6 e o cenário 0 apresentam atividades simétricas, pois o cenário 6 corresponde ao destensionamento do retângulo de forças. Portanto, esperava-se que estas probabilidades fossem próximas. Porém, como as probabilidades a priori foram eduzidas de especialistas com perfis bastante diferentes (curvas de utilidade apresentadas nas Figuras 5.21 e 5.23), é natural ter ocorrido esta diferença. Pode-se justificar que o fato da menor probabilidade ter sido apresentada no cenário 4, cuja atividade corresponde a colocação da cadeia de isoladores, é devido a criticalidade desta etapa, uma vez que aqui é realizada a pinagem. É importante considerar que a

probabilidade a priori foi eduzida do especialista C, o qual possui a menor aversão ao risco em relação aos outros especialistas.

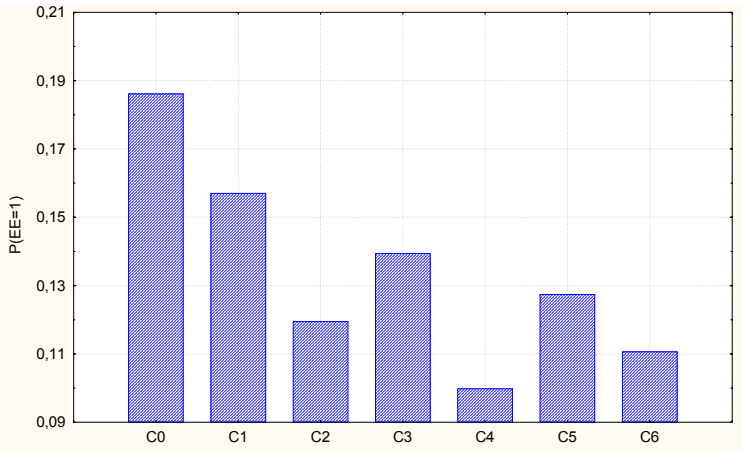


Figura 5.24 Probabilidades do EE monitorar de forma inadequada os cenários da rede

Os parágrafos seguintes comentam as probabilidades de erros dos eletricistas de Topo, de Montagem e eletricistas Auxiliares conforme Figura 5.25.

Percebe-se que o ET apresenta uma maior probabilidade de erro no cenário 0, isto é, no tensionamento do retângulo de forças do que no cenário 6, isto é, no destensionamento do mesmo. Como já foi comentado, estas atividades são simétricas e possuem o mesmo grau de importância e conseqüência (ver Tabelas 5.1 e 5.7), o que conduz a se pensar em probabilidades próximas. No entanto, as probabilidades a priori dos cenários 0 e 6 foram eduzidas dos especialistas[3] A e B respectivamente, o que explica esta enorme diferença. Por outro lado, é importante considerar que talvez a percepção desses especialistas com relação às duas tarefas seja diferente.

Em relação ao EM, pode-se avaliá-lo em duas ocasiões distintas. A primeira corresponde aos cenários 0 e 6, onde o EM observa o trabalho do ET para poder indicar o instante de parada corretamente. A segunda corresponde aos cenários 1 e 4, onde o EM executa a atividade de retirada e colocação dos contra-pinos respectivamente. Percebe-se na Tabela 5.70 que as probabilidades a priori para estas ocasiões foram todas eduzidas do especialista B. Observa-se que na primeira ocasião, o EM apresenta probabilidades de erro muito próximas, o que explica a semelhança destes dois cenários. Na segunda ocasião, o EM apresenta uma probabilidade de erro menor no cenário 4, o que comprova que a colocação dos contra-pinos é mais critica e provavelmente requer mais atenção do EM.

[3] O especialista A possui uma grande aversão ao risco em comparação com o especialista B.

Quanto à operação conjunta[4] dos eletricistas de Topo e de Montagem, percebe-se que estes apresentam uma probabilidade de erro menor no cenário 4 quando comparada ao cenário 2. Estas atividades também são simétricas e possuem o mesmo grau de importância e conseqüência (ver Tabelas 5.3 e 5.5), o que conduziu a resultados próximos. A diferença pode ser explicada pelo fato das probabilidades a priori dos nós referentes aos E* nos cenários 2 e 4 terem sido eduzidas dos especialistas B e C respectivamente, onde C é menos avesso ao risco que B.

Os eletricistas Auxiliares podem ser avaliados em duas ocasiões distintas. A primeira corresponde a ação de segurar a linha de mão que é realizada nos cenários 2 e 4, enquanto os eletricistas retiram a cadeia velha e colocam a cadeia nova. A segunda corresponde a ação de conduzir a subida/descida de isoladores através da linha de mão realizada no cenário 3. Percebe-se que na primeira ocasião a probabilidade de erro humano no cenário 2 é maior que a do cenário 4. Apesar de serem atividades simétricas, a diferença também pode ser compreendida pelo fato de C ser menos avesso ao risco que B. Já na segunda ocasião, a probabilidade desses eletricistas realizarem a operação de forma incorreta é bastante significante. A probabilidade a priori para esta ocasião foi eduzida do especialista B, o qual possui um nível de aversão ao risco intermediário em relação aos outros especialistas, o que se pode concluir que esta atividade apresenta uma probabilidade relevante de ocorrência dos erros relados na Tabela 5.4.

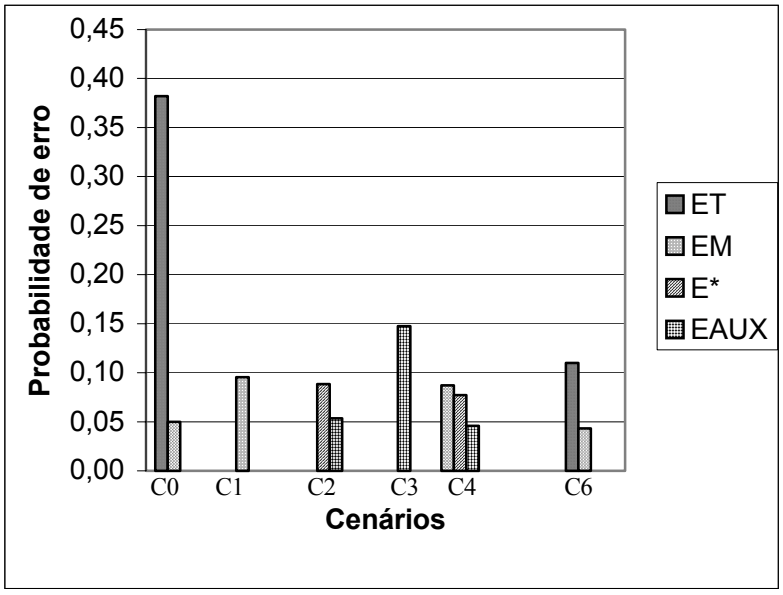


Figura 5.25 Probabilidades de erros dos eletricistas nos cenários

[4] A operação conjunta dos eletricistas de Topo e de Montagem está representada na Figura 5.25 por E*

Em relação ao eletricista de Apoio, as probabilidades desse eletricista cometer erro nos cenários 2 e 4 é de 0,253 e 0,232 respectivamente (Tabelas 5.65 e 5.67). Esperava-se que estas probabilidades fossem menores, uma vez que se trata da atividade mais simples quando comparada com as atividades dos outros eletricistas que sobem na estrutura. No entanto, as probabilidades a priori para este eletricista foram eduzidas do especialista A, o que talvez justifique estes números.

Quanto a operação conjunta[5] dos e eletricistas de Montagem e Apoio, a probabilidade destes eletricistas cometerem erro no engate do concha-garfo é de 0,082 conforme Tabela 5.68. O erro associado a esta atividade consiste em não verificar se a cadeia está fixa após o engate. Este erro poderá deixar a cadeia instável e susceptível a problemas mais sérios nas atividades posteriores.

Interpretação dos FDs:

Todos os FDs constantes nas Figuras 5.12, 5.13, 5.14 e 5.15 foram eduzidos do especialista C.

Os parágrafos seguintes comentam as probabilidades dos nós raízes das redes Bayesianas dos FDs estarem desfavoráveis a tarefa conforme Figura 5.26.

As probabilidades referentes aos fatores: *estado emocional e carga de trabalho* são comuns a todos os eletricistas. Já as probabilidades dos fatores: *design de equipamentos, condicionamento físico e insetos* estão relacionadas com a função assumida pelo eletricista na intervenção. Em relação à *comunicação*, está relacionada com o eletricista Encarregado, pois significa a ausência ou presença de ruídos na comunicação do eletricista Encarregado com os outros eletricistas. Percebe-se nesta Figura 5.26 que o fator *carga de trabalho excessiva* apresentou a maior probabilidade entre os FDs dos nós raízes, significando que de 100 intervenções, em média 30 delas, os eletricistas estão sob uma carga de trabalho excessiva. Este valor possivelmente corresponde ao déficit de intervenções gerado pelo período de chuvas e pelas metas estabelecidas pela empresa.

Observa-se que nesta seqüência: eletricistas de Topo e Montagem, eletricistas de Apoio, eletricistas Auxiliares e eletricista Encarregado, os eletricistas apresentam probabilidades decrescentes de estar com o *condicionamento físico inadequado* a tarefa. Pode-se perceber que esta seqüência também pode corresponder à intensidade decrescente de esforço físico exigido na tarefa.

[5] A operação conjunta dos eletricistas de Apoio e de Montagem está representada na Figura 5.18 por C5

Percebe-se que a probabilidade de se ter *um design de equipamentos inadequado* para os eletricistas de Topo e de Montagem é bem superior à probabilidade do eletricista de Apoio. Esse resultado demonstra que o peso e a forma dos bastões tensores associados ao movimento e posição daqueles eletricistas é mais crítico para o desempenho do que o peso dos isoladores sustentados pelo eletricista de Apoio.

Em relação ao *estado emocional*, em média 5 de 100 intervenções realizadas, os eletricistas apresentam problemas relacionados ao estado emocional. Já os fatores: *comunicação inadequada* durante a monitoração do eletricista Encarregado com os outros eletricistas e *insetos presentes* no local de trabalho apresentam probabilidades praticamente duas vezes maiores de estarem presentes durante a execução da tarefa quando comparadas ao *estado emocional.*

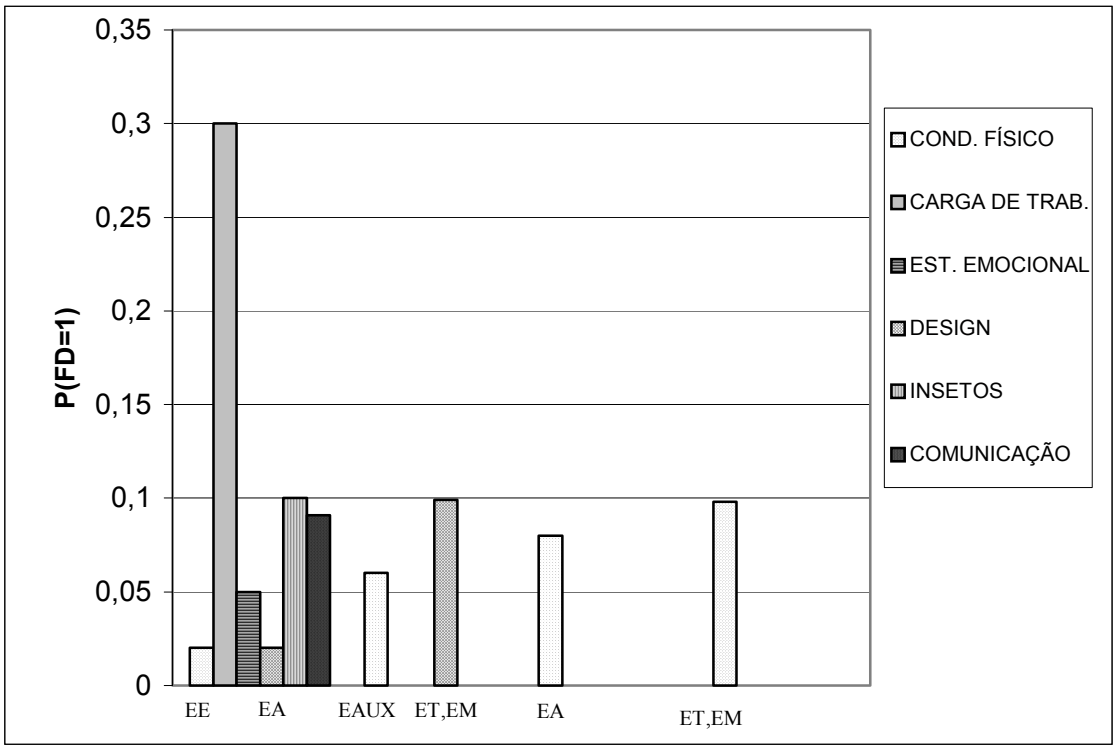


Figura 5.26 Probabilidades dos FDs estarem desfavoráveis durante a tarefa

A Figura 5.27 apresenta as probabilidades da *fadiga* está presente nos eletricistas. Percebe-se que a presença desta foi mais evidente nos eletricistas Auxiliares. Porém, esperava-se que este fator fosse mais evidente nos eletricistas de Topo e de Montagem, uma vez que o esforço físico, durante um período maior de tempo, é maior nestes eletricistas. Neste caso, é possível

que o especialista eduzido[6] tenha exposto sua preferência em relação à função assumida durante a intervenção, ou seja, ele pode achar que o trabalho dos eletricistas Auxiliares é monótono, sem motivação e conseqüentemente cansativo. Segundo Chang & Mosleh (1999), a ausência de motivação pode aumentar o nível de fadiga.

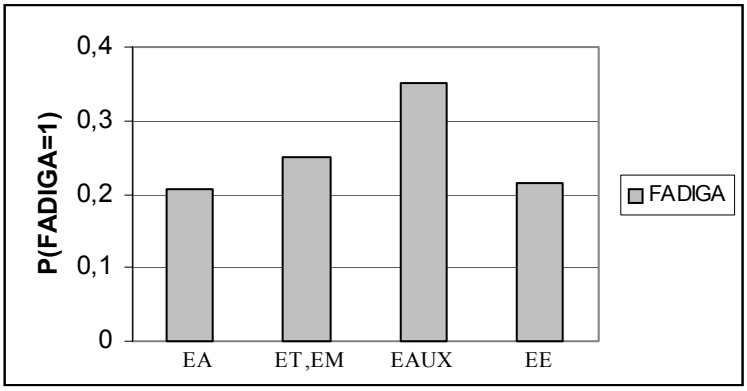


Figura 5.27 Probabilidade da *Fadiga* estar presente durante a tarefa

5.3.2.2 Análise de sensibilidade

As Tabelas a seguir mostram os nós que foram mais sensíveis diante de uma análise de sensibilidade realizada para cada eletricista através de evidências empíricas.

Percebe-se na Tabela 5.70 que a probabilidade do EE não monitorar a equipe corretamente aumenta em 242,5% diante da constatação da atenção inadequada no momento da realização da tarefa. Observa-se também que um outro fator preponderante na monitoração do EE é a comunicação, a qual uma vez constatada a sua inadequação, a probabilidade da monitoração do EE estar comprometida aumenta em 197,4%.

Tabela 5.70 Variáveis que se mostraram mais sensíveis para o EE

Evidências	***Probabilidade do EE não monitorar corretamente***
Nenhuma	*0,1195*
Atenção inadequada	*0,4091*
Comunicação ruim	*0,3554*
Estado emocional desfavorável	*0,1953*

A Tabela 5.71 apresenta as variáveis que mais contribuem para probabilidade de erro dos eletricistas de Topo (ET) e de Montagem (EM), trabalhando conjuntamente ou não. Dentre

[6] Os FDs foram eduzidos do especialista C, único eletricista eduzido entre os especialistas, podendo assumir a função de eletricista de Topo, eletricista de Montagem, eletricista de Apoio ou eletricista Auxiliar.

estas, destacam-se a falta de observação do EE e o controle inadequado desses eletricistas, elevando assim a probabilidade de erro em 98,5% e 72% respectivamente.

Tabela 5.71 Variáveis que se mostraram mais sensíveis para os ET e EM

Evidências	***Probabilidade de erro do EM e ET***
Nenhuma	*0,0886*
Não observação do EE	*0,1759*
Controle motor inadequado	*0,1525*
Condicionamento físico	*0,1243*
Fadiga presente	*0,1233*
Estado emociona desfavorável	*0,1124*

Observa-se na Tabela 5.72 que a probabilidade de erro do eletricista de Apoio (EA) aumenta em 38,5% diante da constatação da atenção inadequada no momento da realização da tarefa. Observa-se também que a comprovação de um estado emocional inadequado eleva a probabilidade de erro deste eletricista em 16%.

Tabela 5.72 Variáveis que se mostraram mais sensíveis para o EA

Evidências	***Probabilidade de erro do EA***
Nenhuma	*0,2535*
Atenção inadequada	*0,3512*
Estado emocional inadequado	*0,2952*
EAUX não seguram a linha de mão corretamente	*0,2610*

A Tabela 5.73 apresenta as variáveis que mais contribuem para o erro dos eletricistas Auxiliares durante a execução da tarefa, dentre estas destaca-se a falta de observação do EE, a qual uma vez comprovada, eleva a probabilidade de erro em 65%.

Tabela 5.73 Variáveis que se mostraram mais sensíveis para os EAUX

Evidências	***Probabilidade de erro dos EAUX***
Nenhuma	*0,0535*
Não observação do EE	*0,0887*
Atenção inadequada	*0,0698*
Estado emocional inadequado	*0,0614*

6. CONCLUSÕES

6.1 Redes Bayesianas na ACH

Através da revisão das técnicas de ACH apresentada no capítulo 3, percebe-se que as técnicas de ACH de 1ª geração apresentam algumas deficiências. Dentre elas, destacam-se suposições irreais de independência e simples representação binária de eventos. Estas são conseqüências da utilização de ferramentas como análise de árvore de eventos e de falhas. Diante disso, apresentam uma grande dificuldade na modelagem das ações humanas, bem como na quantificação dos modelos causais.

Com o objetivo de superar estas deficiências, surgiram as técnicas de 2ª geração. Dentre estas, destaca-se o CREAM, que apresenta uma tentativa de quantificar mais explicitamente a influência de fatores sobre o desempenho dos operários através de uma generalização da árvore de eventos numa classificação policotômica. Porém, a suposição de independência entre eventos e a não incorporação explicita no tratamento de contextos dinâmicos continuou sendo um problema para ACH.

Recentemente, a metodologia desenvolvida por Chang & Mosleh (1999) trouxe uma grande evolução para ACH, pois estes incorporaram vários avanços relevantes nas áreas de psicologia cognitiva, ciências comportamentais, neurociência, fatores humanos, entre outras. Este progresso possibilitou considerar a relação de dependência entre a maioria dos FDs. Porém, a relação de interdependência entre os fatores externos e entre os fatores ficológicos não é considerada, o que constitui uma deficiência deste método. Outras desvantagens também foram observadas, tais como, não permitir quantificar a influência entre dois operadores e não considerar a influência de um evento no outro. Estes problemas mais uma vez surgem pela dificuldade em modelar ações humanas via árvore de eventos.

Diante deste contexto, percebe-se que modelar as causalidades existentes nas ações humanas tornou-se um grande desafio para ACH ao longo dos anos. Porém, pôde-se perceber neste trabalho que modelar ações humanas por redes Bayesianas proporciona uma maior flexibilidade às variáveis componentes de um determinado sistema, pois além de permitir uma representação mais realista da natureza dinâmica da interface homem-sistema e homem-homem em eventos normais ou anormais de um processo, também representa a relação de dependência entre os eventos e entre os fatores de desempenho.

Algumas dificuldades foram encontradas neste trabalho. Entre elas, destaca-se a grande quantidade de probabilidades condicionais necessárias para alimentação da rede, o que

realmente constitui a maior dificuldade na aplicação de redes Bayesianas para solucionar problemas práticos. Porém, demonstrou-se neste trabalho que se pode utilizar métodos de construção e quantificação de redes Bayesianas, tais como o modelo Noisy-or e a técnica DPM apresentados aqui, os quais minimizam problemas como esse.

6.2 ACH da equipe de manutenção de LTs utilizando Redes Bayesianas

Pôde-se perceber algumas discrepâncias nos resultados provindos das modelagens dos dados obtidos através da edução aqui realizada. Uma possível alternativa de solução seria consultar mais de um especialista sobre a mesma probabilidade e assim fazer agregação dos mesmos via metodologia proposta por Droguett et al. (2004). Como não foi possível aplicar esta metodologia aqui, recorreu-se à análise da curva de utilidade de cada especialista como uma aproximação.

6.3 Edução através do método proposto

As probabilidades de erro humano normalmente não são encontradas em um banco de dados. Portanto depende-se completamente do conhecimento do especialista. Porém, quando se tenta eduzir o conhecimento a priori de um especialista, vários problemas associados a fenômenos psicológicos aparecem, tais como representatividade, ancoragem, entre outros, os quais foram apresentados no tópico 4.4. Daí a importância de um método de edução aprimorado. Hokstad et al. (1998) comenta que muitos métodos existentes na literatura foram criticados por não serem sistemáticos e por não desenvolverem diretrizes para assegurar a consistência e confiabilidades dos seus resultados, não tratando assim as incertezas de forma adequada. No entanto, o método de Nadler & Campello (2001) para eduzir o conhecimento a priori destaca-se por ser sistemático, pela maneira natural de combinar evidências e principalmente pelos conceitos introduzidos, os quais permitem uma avaliação mais abrangente do procedimento de inferência. Este protocolo de edução possui duas principais vantagens: (1) promover um auto-conhecimento do especialista quanto às suas crenças de maneira gradativamente refinada e por (2) possuir métricas matemáticas para avaliar tanto a qualidade do questionário de edução quanto das opiniões dadas. Entretanto, como não há restrições sobre o número mínimo de questões a responder, este protocolo torna-se inviável para a quantificação de redes Bayesianas cujo nível de detalhamento requer a quantificação de muitos cenários. Porém, as modificações propostas por este trabalho no protocolo original, viabiliza o método de edução para quantificar o conhecimento em análises de confiabilidade humana por redes Bayesianas. Pôde-se perceber experimentalmente que existe um número

mínimo de questões que permite boas inferências. No entanto, um número menor de perguntas elevam-se as incertezas acerca da distribuição de probabilidades das crenças eduzidas, sendo necessário concentrar-se em medidas menos sensíveis a variância tais como a mediana ou a moda. Observou-se, também, que mesmo com os índices de qualidade tradicionais apresentando bons resultados não se assegura um bom questionário, isto é, um questionário capaz de capturar fielmente o conhecimento do especialista. À observação da não captura do conhecimento do especialista deu-se o nome de *indicador de aderência*, o qual constitui uma nova métrica de qualidade, aqui apresentada, que deve ser adicionada às métricas do questionário de edução proposto.

6.4 Desafios futuros

Uma proposta para trabalhos futuros é um direcionamento à limitação de fatores de desempenho numa rede Bayesiana em relação à mensuração dos mesmos e ao comportamento de cada um deles no domínio do tempo, bem como o desenvolvimento de mecanismos para facilitar o processo de quantificação de variáveis policotômicas.

Propõe-se também, identificar algoritmos para a construção de questionários reduzidos que busquem aperfeiçoar tanto os indicadores de qualidade propostos por Nadler & Campello (2001) quanto o indicador de aderência proposto neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKERSTEDT, T.; FREDLUND, P.; GILLBERG, M. & JANSSON, B. (2002)- Work load and work hours in relation to disturbed sleep and fatigue in a large representative sample. *Journal of Psychosomatic Research*. Vol. 53, p. 585-588.

AYYUB, B. M. (2001)- *Elicitation of expert opinions for uncertainty and risks*. CRC Press. Boca Raton, FL.

BYE, A., HOLLNAGEL, E. & BRENDEFORD, T. S. (1999)- Human machine function allocation: a functional modeling approach. *Reliability Engineering & System Safety*. Vol. 64, p. 291-300.

CAMPELLO DE SOUZA, F. M. (2002a)- *Decisões racionais em situações de incerteza.* Editora Universitária da UFPE. Recife.

CAMPELLO DE SOUZA, F. M. (2002b)- *Sistemas Probabilísticos*. Talus. Recife.

CHANG, Y. H. & MOSLEH, A. (1999)- Cognitive modeling and dynamic probabilistic simulation of operating crew response to complex system accidents (ADS-IDACrew). *Center for Technology Risk Studies*. University of Maryland.

CHESF (2005)- *Linhas de Transmissão/ Visão Geral*. s.n.t. Disponível em http://www.chesf.gov.br/xml/energia_linhasdetrasmissao_visaogeral.php. Acesso em 12 de abril de 2005.

COOKE, R. (1991)- *Experts in Uncertainty: Opnion and subjective probability in science*. Oxford University Press. New York.

COOKE, R. (2004)- The anatomy of the squizzel: the role of operational definitions in representing uncertainty. *Reliability Engineering & System Safety*. Vol. 83, p. 313-319.

DAVIDOFF, L. (2001)- *Introdução à psicologia.* Mcgraw-Hill do Brasil. São Paulo.

DESAULNIERS, D. R. (1997)- Stress in the control room: effects and solutions. U. S. Nuclear Regulatory Commission. Washington, D.C. 20555.

DRISKELL, J. E. & SALAS, E. (1996)- *Stress and human performance*. Lawrence Erlbaum Associates. New Jersey.

DROGUETT, E. L.; GROEN, F. & MOSLEH, A. (2004)- The combined use data and expert estimates in population variability analysis. Reliability Engineering and Systems Safety. Vol. 83, p. 311-321.

FIRMINO, P. R. & DROGUETT, E. L. (2004)- Redes Bayesianas para Parametrização da confiabilidade em sistemas Complexos. Recife. 89p. (Mestrado- Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção/ UFPE).

FIRMINO, P. R.; MENÊZES, R. C., DROGUETT, E. L. & DUARTE, D. L. (2006)- "Eliciting Engineering Judgments in Human Reliability Assessment". *Artigo submetido e aceito para o Annual Reliability & Maintainability Symposium (RAMS)* 2006. California – EUA.

FORESTER, J.; BLEY, D.; COOPER, S.; LOIS, E.; SIU, N.; KOLACZKOWSKI, A. & SIU, N. (2004)- Expert elicitation approach for performing ATHEANA quantification. *Reliability Engineering & System Safety*. Vol. 83, p. 207-220.

FUJITTA, Y. & HOLLNAGEL, E. (2004)- Failures without errors: quantification of context in HRA. *Reliability Engineering & System Safety*. Vol. 83, p. 145-151.

GOOSSENS, L. H. J. & COOKE, R.M. (1997)- Applications of some risk assessment techniques: formal expert judgment and accident sequence precursors. Safety science. Vol. 26, p. 35-47.

GORDON, RACHAEL P.E.(1996)- The contribution of human factors to accidents in the offshore oil industry. *Aberdeen University, Psychology Department, Kings College.* Vol. 61, p. 95 – 108.

HALLBERT, B.; GERTMAN, D.; LOIS, E.; MARBLE, J.; BLACKMAN, H. & BYERS, J. (2004)- The use of empirical data sources in HRA. *Reliability Engineering & System Safety*. Vol. 83, p. 139-143.

HAMMOND, J. S.; KEENEY, R. L. & RAIFFA, H. (1999)- *Somos movidos a decisões, decisões inteligentes: como avaliar alternativas e tomar a melhor decisão*. 5 ed. Campus. Rio de Janeiro.

HOLLNAGEL, E. (1998)- *Cognitive Reliability and Error Analysis Method CREAM*. Elsevier Science. Oxford.

HOLLNAGEL, E. (1996)- Reliability analysis and operator modeling. *Reliability Engineering and System Safety.* Vol. 52, p.327-337.

HOKSTAD, P.; KNUT, O. & REINERTSEN, R. (1998)- Recommendations on the use of expert judgment in safety and reliability engineering studies. *Reliability Engineering and System Safety.* Vol. 61, p. 65-76.

INPO (1985). A maintenance analysis of safety significant events. Atlanta, GA: Institute of Nuclear Power Operations.

KIM, I. S. (2001) Human reliability analysis in the man-machine interface design review. *Annals of Nuclear Energy.* Vol. 28, p. 1069-1081.

KIRWAN, B. & AINSWORTH, L.K. (1992)- *A guide to task analysis*. Taylor & Francis. Washington.

KORB, K. B. & NICHOLSON, A. E. (2003)- *Bayesian artificial intelligence*. Chapman & Hall/CRC. Florida.

KUMAMOTO, H. & HENLEY, E. (1996)- *Probabilistic Risk Assessment and Management for Engineers and Scientists*, IEEE Press, Piscataway, NJ.

MARSDEN, P. & HOLLNAGEL, E. (1996)- Human interaction with technology: the accidental eser. *Acta Psychologica*. Vol. 91, p. 345-358.

MARTZ, H. F. & WALLER, R. A. (1982)- *Bayesian reliability analysis.* 2 ed. Krieger Publishing Company. Florida.

MOSLEH, A. & CHANG, Y. H. (2004)- Model-based human reliability analysis: prospects and requirements. *Reliability Engineering & System Safety*. Vol. 83, p. 241-253.

NADLER, G. C. & CAMPELLO, F. M. (2001)- In: 2º International Symposium on Imprecise Probabilities and Their Applications. New York. *A protocol for the elicitation of prior distributions.*

NAHAS, M. V.(2001)- *Atividade física, Saúde e Qualidade de vida: conceitos e sugestões para um estilo de vida ativo*.Midiograf. Londrina.

NEAPOLITAN, R. E. (2004)- *Learning Bayesian Networks*. Pearson Prentice Hall. New Jersey.

ONÍSKO, A., DRUZDZEL, M. J. & WASYLUK, H. (2001)- Learning Bayesian Network parameters from small data sets: application of Noisy-OR gates. *International Journal of Approximate Reasoning.* Vol. 27, p. 165-182.

PEARL, J. (1988)- *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference*. 2 ed. Morgan Kaufmann. California.

POWERS, S. K. & HONLEY, E. T. (2000)- Fisiologia do exercício: teoria e aplicação ao condicionamento e ao desempenho. 3 ed. Manole.

RASMUSSEN, J. (1980)- *What can be learned from human error reports? In Changes in Working Life.* Wiley. London.

RASMUSSEN, J.; PEDERSEN, O.M.; MANCINI, G.; CARNINO, A.; GRIFFON, M. & GAGNOLET, P. (1981) - Classification System for Reporting Events Involving Human Malfunctions. Report Riso-M-2240, Riso National Laboratories. Denmark.

RASMUSSEN, J. (1983)- Skill, Rules, Knowledge: signals, signs and symbols and other distinctions in human performance models. *IEEE transactions: Systems, Man & Cybernetics.* Vol. 13, p. 257-266.

REASON, J. (1988)- Modeling the basic error tendencies of human operators. *Reliability Engineering and System Safety.* Vol. 22, p.137-153.

REASON, J. (1990) - *Human Error*. Cambridge University Press. Cambridge.

REASON, J. Errors and Violations: The Lessons of Chernobyl, Department of Psychology University of Manchester.

SCHMIDT, R. A. & WRISBERG, C.A (2001)- *Aprendizagem e performance motora: uma abordagem da aprendizagem baseada no problema.* 2 ed. Artemed. Porto Alegre.

SHORROCK, S.T. & KIRWAN, B. (2002)- Development and application of a human error identification tool for air traffic control. *Applied Ergonomics*. Vol. 33, p. 319-336.

STAMATELATOS, M. (2002) – Probabilistic Risk Assessment Procedures Guide for NASA Managers and Practitioners. NASA Headquarters, Washington, DC.

STRATER, O. (2004)- *Considerations on the elements of quantifying human reliability. Reliability Engineering & System Safety*. Vol. 83, p. 255-264.

SWAIN, A D & GUTTMANN, H. E. (1983)- *Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications*, US Nuclear Regulatory Commission. Washington.

TORIIZUKA, T. (2001)- Application of performance shaping factor (PSF) for work improvement in industrial plant maintenance tasks. *Industrial Ergonomics*. Vol. 28, p. 225-236.

WALLS, L. & QUIGLEY, J. (2001)- Building prior distributions to support Bayesian reliability growth modeling using expert judgment. *Reliability Engineering & System Safety*. Vol. 74, p. 117-128.

WICKENS, C. D.; GORDON, S. E. & LIU, Y. (1998)- *An introduction to human factors engineering.* Addison Wesley Educational Publishers. New York.

WICKENS, C.D. & HOLLANDS, J.G.(2000)- *Engineering Psychology and Human Performanc*e. Prentice Hall. New Jersey

WREATHALL, J.; BLEY, D.; ROTH, E.; MULTER, J. & RASLEAR, T. (2004)- Using an integrated process of data and modeling in HRA. *Reliability Engineering & System Safety*. Vol. 83, p. 221-228.

ANEXOS

ANEXO 1

Função utilidade

Definição: u é uma função utilidade se:

a) $u : P^* \to \Re$, isto é para toda distribuição $P \in P^*$ corresponde um número real $u(P)$.

b) Estes números atribuídos preservam a ordem no sentido de que $P \underline{\phi}\, Q \Leftrightarrow u(P) \geq u(Q)$. Eles refletem a ordem de preferência.

c) Existe linearidade; $u[\lambda P + (1-\lambda)Q] = \lambda u(P) + (1-\lambda)u(Q)$.

Para construção de uma função utilidade, fixa-se na mente uma distribuição muito desejável $\overline{P}$ e uma muito indesejável $\underline{P}$. Considera-se também as outras distribuições entre essas duas, $\overline{P}\ \phi\ P, Q, R, \ldots\ \phi\ \underline{P}$. Define-se: $u_{\underline{P},\overline{P}}(P) = \sup\left\{\lambda : P\ \phi\ \lambda\overline{P} + (1-\lambda)\underline{P}\right\}$, onde sup refere-se ao supremo, ou seja, o menor das cotas superiores. Nota-se que $0 \leq u \leq 1$.

ANEXO 2

Parâmetros para os indicadores de qualidade do questionário

Distribuição uniforme e teste de aderência

Função densidade de probabilidade:

$$f_X(x) = \frac{1}{b-a}, \quad para\ a \leq x \leq b$$

Função de distribuição:

$$F_X(x) = \frac{x-a}{b-a}, \quad para\ a \leq x \leq b$$
$$F_X(x) = o, \quad x < a$$
$$F_X(x) = 1, \quad x > b$$

Valor esperado:

$$E(X) = \frac{a+b}{2}$$

Variância:

$$Var(x) = \frac{(b-a)^2}{12}, \quad para\ a \leq x \leq b$$

O teste de aderência é realizado quando se tem uma amostra de uma variável, cuja distribuição não se conhece e deseja-se verificar a adequação ou não de uma certa distribuição de probabilidades. As hipótese do teste aqui realizado são as seguintes:

H_0: X segue uma distribuição uniforme;

H_0: X tem outra distribuição.

Os valores observados de X são divididos em K categorias e a partir do modelo candidato, obtêm-se as freqüências esperadas para as mesmas categorias. Em seguida, calcula-se a estatística de Q^2:

$$Q^2 = \sum_{i-1}^{k} \frac{(F_{obi} - F_{esp_i})^2}{F_{esp_i}}$$

A decisão de aceitar ou não que X segue uma distribuição uniforme está baseada na avaliação da região crítica (RC):

$RC = \{Q^2 : Q^2 > q_c\}$, onde q_c é o valor da χ^2 com (k-1) graus de liberdade

k: número de categorias

Correlação (r)

$$r = \frac{n(\sum XY) - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{[n\sum X^2 - (\sum X)^2][n\sum Y^2 - (\sum Y)^2]}}$$

APÊNDICES

APÊNDICE 1

Questionário de edução sobre o nó EE2 mediante a ausência de erros da equipe no cenário anterior, cansaço presente e estado emocional desfavorável à atividade

Objetivo: ter uma idéia do nível de atenção do EE mediante a presença de alguns fatores.

Descrição dos fatores envolvidos nesta edução: para o EE executar a sua função é exigido dele um certo nível de atenção. Sabe-se que em algumas situações o seu nível de atenção pode estar comprometido. É possível, por exemplo, que o EE tenha uma menor atenção na retirada da cadeia de isoladores porque ele observou que a equipe não cometeu nenhum erro na retirada dos contra-pinos. Portanto, o fato da equipe não ter cometido nenhum tipo de erro na etapa anterior faz com que o EE fique mais relaxado, e conseqüentemente tenha seu nível de atenção diminuído na atividade presente. Caso contrário (se a equipe cometeu algum erro), o EE ficará mais atento. É possível também o EE esteja cansado e que o seu estado emocional não esteja favorável. Conseqüentemente, seu nível de atenção estará comprometido

*Suponha que uma intervenção esteja em andamento. Suponha ainda que ela se encontre na retirada da cadeia de isoladores, ou seja, o ET já concluiu a montagem do retângulo de forças e o EM já retirou os contra-pinos; enfim, a cadeia está pronta para ser retirada".

I) Imagine a seguinte situação: o EE observou que a equipe não cometeu nenhum erro na liberação dos contra pinos. Imagine também que por algum motivo, o EE esteja cansado e que não esteja bem emocionalmente. Você acha que é mais provável que chance do EE estar desatento na retirada da cadeia de isoladores esteja no primeiro ou no segundo intervalo?

Questão	***I1***					***I2***		
1	( )	*Menor*	*que*	*50*	*ou*	*50*	*Acima*	( )
2	( )	*Menor*	*que*	*60*	*ou*	*60*	*Acima*	( )
3	( )	*Menor*	*que*	*40*	*ou*	*40*	*Acima*	( )
4	( )	*Menor*	*que*	*70*	*ou*	*70*	*Acima*	( )
5	( )	*Menor*	*que*	*30*	*ou*	*30*	*Acima*	( )
6	( )	*Menor*	*que*	*40*	*ou*	*50*	*Acima*	( )
7	( )	*Menor*	*que*	*50*	*ou*	*60*	*Acima*	( )
8	( )	*Menor*	*que*	*40*	*ou*	*70*	*Acima*	( )
9	( )	*Menor*	*que*	*30*	*ou*	*60*	*Acima*	( )

10	( )	*30*	*a*	*70*	*ou*	*70*	*Acima*	( )
11	( )	*Menor*	*que*	*30*	*ou*	*30*	*a 70*	( )
12	( )	*40*	*a*	*70*	*ou*	*70*	*Acima*	( )
13	( )	*Menor*	*que*	*30*	*ou*	*30*	*a 60*	( )
14	( )	*Menor*	*que*	*20*	*ou*	*60*	*Acima*	( )
15	( )	*20*	*a*	*50*	*ou*	*60*	*a 80*	( )
16	( )	*20*	*a*	*40*	*ou*	*50*	*a 80*	( )
17	( )	*20*	*a*	*40*	*ou*	*70*	*a 90*	( )
18	( )	*30*	*a*	*50*	*ou*	*80*	*Acima*	( )
19	( )	*40*	*a*	*60*	*ou*	*80*	*Acima*	( )
20	( )	*Menor*	*que*	*20*	*ou*	*40*	*a 60*	( )
21	( )	10	a	20	*ou*	20	*a 30*	( )
22	( )	70	a	80	*ou*	80	*a 90*	( )
23	( )	*Menor*	*que*	*20*	*ou*	20	*a 40*	( )
24	( )	60	a	80	*ou*	80	*Acima*	( )
25	( )	80	a	90	*ou*	90	*Acima*	( )
26	( )	*Menor*	*que*	10	*ou*	10	*a 20*	( )

Da mesma forma, foram eduzidas todas as probabilidades das redes Bayesianas expostas neste trabalho.

APÊNDICE 2

Função utilidade dos especialistas

Para melhor compreensão, raciocina-se num dos casos aqui estudados. Esse refere-se ao monitoramento do eletricista Encarregado (EE), o qual depende da comunicação deste com os outros eletricistas e da sua atenção, conforme Figura 5.15. Diante da notação probabilística:

$I) P(EE = 0 \mid Nível\ de\ atenção = 1, Comunicação = 1) = 0$

$II) P(EE = 0 \mid Nível\ de\ atenção = 0, Comunicação = 0) = 1$

Percebe-se que $u(II)$=1 e $u(I)$= 0. Logo, baseado nas probabilidades condicionais sobre o nó EE2, as quais foram eduzidas pelo especialista B:

$III) P(EE = 0 \mid Nível\ de\ atenção = 1, Comunicação = 0) = 0{,}65$

$IV) P(EE = 0 \mid Nível\ de\ atenção = 0, Comunicação = 1) = 0{,}85$

Monta-se os jogos:

JOGO 1) III = sup {p: pII + (1-p)I}

JOGO 2) IV = sup {p: pII + (1-p)I}

Sobre o jogo 1, o especialista B foi abordado de acordo com a descrição abaixo:

Descrição do jogo 1 ao especialista: você é convidado a observar uma intervenção em uma outra cidade, cuja equipe que realiza a troca você não conhece. Imagine que você chegou exatamente no momento em que os eletricistas estão retirando a cadeia velha de isoladores. Neste momento, você observou que a comunicação entre o EE e os eletricistas estava boa, sem ruído (i. e. barulho do vento). Porém, a atenção do EE estava inadequada.Agora você é convidado a tomar uma decisão!

Você tem duas alternativas: deixar tudo como está, ou seja, decidir que a retirada continuará sendo realizada sem alterações ou tentar corrigir o problema da atenção do EE. Se você decidir corrigir o problema, você corre o risco de comprometer também a comunicação do EE com a equipe.

Claro que se a chance de corrigir o problema for de 100%, você vai decidir corrigir e se for de 0%, você vai decidir não corrigir.

O que se deseja é saber com que chance mínima você está disposto a arriscar, sabendo que se não der certo, a comunicação do EE com a equipe estará comprometida. É mais provável que está chance esteja no primeiro ou no segundo intervalo?

Questão	***I1***					***I2***		
1	( )	*Menor*	*que*	*50*	*ou*	*50*	*Acima*	( )
2	( )	*Menor*	*que*	*60*	*ou*	*60*	*Acima*	( )
3	( )	*Menor*	*que*	*40*	*ou*	*40*	*Acima*	( )
4	( )	*Menor*	*que*	*70*	*ou*	*70*	*Acima*	( )
5	( )	*Menor*	*que*	*30*	*ou*	*30*	*Acima*	( )
6	( )	*Menor*	*que*	*40*	*ou*	*50*	*Acima*	( )
7	( )	*Menor*	*que*	*50*	*ou*	*60*	*Acima*	( )
8	( )	*Menor*	*que*	*40*	*ou*	*70*	*Acima*	( )
9	( )	*Menor*	*que*	*30*	*ou*	*60*	*Acima*	( )
10	( )	*30*	*a*	*70*	*ou*	*70*	*Acima*	( )
11	( )	*Menor*	*que*	*30*	*ou*	*30*	*a 70*	( )
12	( )	*40*	*a*	*70*	*ou*	*70*	*Acima*	( )
13	( )	*Menor*	*que*	*30*	*ou*	*30*	*a 60*	( )
14	( )	*Menor*	*que*	*20*	*ou*	*60*	*Acima*	( )
15	( )	*20*	*a*	*50*	*ou*	*60*	*a 80*	( )

16	( )	*20*	*a*	*40*	*ou*	*50*	*a 80*	( )
17	( )	*20*	*a*	*40*	*ou*	*70*	*a 90*	( )
18	( )	*30*	*a*	*50*	*ou*	*80*	*Acima*	( )
19	( )	*40*	*a*	*60*	*ou*	*80*	*Acima*	( )
20	( )	*Menor*	*que*	*20*	*ou*	*40*	*a 60*	( )
21	( )	10	a	20	*ou*	20	*a 30*	( )
22	( )	70	a	80	*ou*	80	*a 90*	( )
23	( )	*Menor*	*que*	*20*	*ou*	20	*a 40*	( )
24	( )	60	a	80	*ou*	80	*Acima*	( )
25	( )	80	a	90	*ou*	90	*Acima*	( )
26	( )	*Menor*	*que*	10	*ou*	10	*a 20*	( )

Conforme respostas do especialista B aos jogos 1 e 2, calculam-se as utilidades correspondentes as probabilidades condicionais, as quais para este especialista são:

$$u(III) = u(II)\lambda + u(I)(1-\lambda) = (1)(0{,}55) + (0)(0{,}45) = 0{,}5500$$

$$u(IV) = u(II)\lambda + u(III)(1-\lambda) = (1)(0{,}85) + (0{,}55)(0{,}15) = 0{,}9325$$

Posteriormente, constrói-se a curva de utilidade do especialista em função das probabilidades condicionais eduzidas. Procedeu-se da mesma forma para os especialistas A e C, ou seja, a partir de probabilidades condicionais anteriormente eduzidas por eles, montou-se jogos com a finalidade de inserir os especialistas em cenários críticos e saber qual a sua disponibilidade para correr riscos. Em seguida, foram construídas as curvas de utilidades para os especialistas em questão, de acordo com as probabilidades eduzidas e utilidades calculadas.