

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

**ANÁLISE PROBABILÍSTICA DE RISCOS VIA REDES  
BAYESIANAS: UMA APLICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO DE  
POÇOS MULTILATERAIS**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UFPE  
PARA OBTENÇÃO DE GRAU DE MESTRE  
POR

**WAGNER BARBOSA DOS SANTOS**

**Orientador: Prof. Enrique López Droguett, Ph. D**

RECIFE, Junho / 2005

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

**ANÁLISE PROBABILÍSTICA DE RISCOS VIA REDES  
BAYESIANAS: UMA APLICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO  
DE POÇOS MULTILATERAIS**

por

**WAGNER BARBOSA DOS SANTOS**

Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da  
Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para a obtenção do grau de  
Mestre em Engenharia de Produção

**ORIENTADOR: ENRIQUE LÓPEZ DROGUETT, Ph.D**

Recife, Junho de 2005.

© Wagner Barbosa dos Santos, 2005

**Santos, Wagner Barbosa dos**

**Análise probabilística de riscos via Redes Bayesianas : uma aplicação na construção de poços multilaterais / Wagner Barbosa dos Santos. – Recife :**

**O Autor, 2005.**

**xii, 142 folhas : il., fig., tab.**

**Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Engenharia de Produção, 2005.**

**Inclui bibliografia.**

**1. Engenharia de produção – Análise de riscos – Árvores de falhas e de eventos. 2. Análise probabilística de riscos – Modelagem via Redes Bayesianas – Confiabilidade humana. 3. Poços petrolíferos multilaterais – Construção – Ação humana e equipamentos. I. Título.**

**658.5**

**CDU (2.ed.)**

**UFPE**

**658.5**

**CDD (22.ed.)**

**BC2005-423**



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

**PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DA COMISSÃO  
EXAMINADORA**

**DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE  
MESTRADO ACADÊMICO DE**

**WAGNER BARBOSA DOS SANTOS**

**“ANÁLISE PROBABILÍSTICA DE RISCOS VIA REDES BAYESIANAS: UMA  
APLICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO DE POÇOS MULTILATERAIS”**

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PESQUISA OPERACIONAL**

A comissão examinadora composta pelos professores abaixo, sob a presidência do primeiro, considera o candidato **WAGNER BARBOSA DOS SANTOS APROVADO**.

Recife, 02 de Junho de 2005.

---

Prof. ENRIQUE ANDRÉS LÓPEZ DROGUETT, PhD (UFPE)

---

Prof. ADIEL TEIXEIRA DE ALMEIDA, PhD (UFPE)

---

Prof. MANOEL AFONSO DE CARVALHO JÚNIOR, PhD (UFPE)

## DEDICATÓRIA

Dedico aos meus pais,  
Isaac Gomes e Maria da Saúde,  
a minhas irmãs,  
Shirley Barbosa e Élidy Barbosa,  
a minha namorada,  
Gabriela Moreira.

## AGRADECIMENTOS

Perguntei-lhe onde mandara fazê-lo, e ele respondeu que ele mesmo o fizera, e quando perguntei onde conseguira suas ferramentas, disse que ele mesmo as tinha feito e, rindo, acrescentou: “Se eu fosse esperar que outras pessoas fizessem minhas ferramentas e tudo mais para mim, eu nunca teria feito nada”. (Lembranças de Newton, um ano antes de morrer, sobre a construção do primeiro telescópio refletor; recordada por John Conduitt, casado com a sobrinha do cientista).

“Maior que a tristeza de não haver vencido é a vergonha de não ter lutado”. Rui Barbosa.

Agradeço aos meus pais – Isaac Gomes e Maria da Saúde - que souberam me ensinar a lutar pelos objetivos, mesmo que a luz ainda não esteja sendo vista. São dois lutadores e vencedores de primeira categoria.

“Só há duas maneiras de viver a vida: a primeira é vivê-la como se os milagres não existissem. A segunda é vivê-la como se tudo fosse milagre”. Albert Einstein.

“O que sabemos é uma gota, o que ignoramos é um oceano”. Isaac Newton.

Agradeço aos meus mestres: Enrique López, Dayse Duarte, Adiel Teixeira, Paulo Ghinato, e em especial Paulo Roberto, que souberam despertar em mim o senso crítico e a humildade de saber o quanto somos ignorantes diante do universo.

Agradeço a meus amigos: Anderson Siqueira, Paulo Firmino, Regilda Menezes, Felipe Rios, Nádia Kelner, Luciano Brandão, Márcio Moura, Helder Diniz, Rodrigo Vilela que colaboraram com o meu desenvolvimento em debates sempre construtivos e colaborativos.

## RESUMO

A análise probabilística de riscos é um método que ajuda a identificar e avaliar o risco, em sistemas de tecnologia complexa, com o propósito de através de uma análise de custo-benefício melhorar a segurança e desempenho. O método “tradicional” faz uso de duas técnicas de modelagem e avaliação: árvore de falhas e árvore de eventos. Porém, estas técnicas possuem algumas limitações, tais como: O modelo se torna, algumas vezes, uma aproximação grosseira da realidade, devido a considerações necessárias na modelagem do sistema; Dentro deste conceito tem-se a consideração de independência entre variáveis, que algumas vezes não são; a necessidade em descrever os eventos como dicotômicos, que em alguns casos possuem vários estados possíveis. Outra limitação está na dificuldade em atualizar as informações já modeladas a partir de uma nova informação.

Diante destas limitações, a utilização de redes Bayesianas, foi a saída encontrada para modelar sistemas de forma mais próxima a realidade. Possibilitando a constante atualização com base nas informações obtidas, no decorrer da vida útil do sistema.

A análise probabilística de riscos via redes Bayesianas, foi validada pela aplicação da técnica na análise da tecnologia multilateral, que são sistemas utilizados em poços multilaterais de petróleo. A aplicação teve como objetivo, avaliar o risco na construção de poços multilaterais, e com base no modelo, realizar o gerenciamento do risco durante a execução da atividade.

*Palavras-chave: Análise de Probabilística de Riscos, Confiabilidade Humana, Redes Bayesianas, Teorema de Bayes, Poços Multilaterais, Árvores de Eventos.*

## ABSTRACT

The probabilistic risks analysis is a method that helps to identify and evaluate the risk in systems of complex technology with the intention of through a cost-benefit analysis improving the safety and performance. The “traditional method” makes use of two modeling and evaluation techniques: Fault Trees and Event Trees. However, these techniques have some limitations, such as: The model becomes, in some times, a coarse approach of the reality, due to necessary consideration in the modeling of the system; Inside of this concept it is had consideration of independence between variable, that some times aren't; the necessity in describing events as dichotomy, that in some cases they have several possible states. Another limitation is the difficulty in to model information updated from new information.

Ahead of these limitations the use of Bayesian Networks was the exit found in to model systems more close of the reality, making possible the constant update on the basis of the gotten information in elapsing of the useful life of the system.

The probabilistic risks analysis using Bayesian Networks, it was validated by the application of the technique in the analysis of the multilateral technology that is system used in oil multilateral wells. The application had as objective, to evaluate the risk in the construction of multilateral wells, and on the support of the model, to carry through the management of the risk during the execution of the activity.

*Keyword: Probabilistic Risks Analysis, Human Reliability, Bayesian Networks, Bayes's Theorem, Multilateral wells, Event Trees.*

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1	Justificativa .....	2
1.2	Objetivos.....	3
1.2.1	Objetivo Geral .....	3
1.2.2	Objetivos Específicos .....	3
<b>2</b>	<b>POÇOS</b> .....	<b>5</b>
2.1	Poços Direcionais.....	5
2.2	Poços Multilaterais .....	6
2.2.1	Introdução .....	6
2.2.2	Tipos Básicos de Poços Multilaterais .....	8
2.3	Conclusão .....	9
<b>3</b>	<b>SISTEMAS MULTILATERAIS (MLT)</b> .....	<b>11</b>
3.1	Introdução.....	11
3.2	Classificação dos MLT .....	12
3.2.1	Classificação Centrada no Tipo de Completação.....	13
3.2.2	Classificação Centrada no Tipo da Junção .....	13
3.3	Descrição dos MLT.....	15
3.3.1	Nível 1 .....	15
3.3.2	Nível 2 .....	15
3.3.3	Nível 3 .....	16
3.3.4	Nível 4 .....	16
3.3.5	Nível 5 .....	17
3.3.6	Nível 6 .....	17
3.4	Resumo .....	18
<b>4</b>	<b>ANÁLISE PROBABILÍSTICA DE RISCOS (PRA)</b> .....	<b>20</b>
4.1	Histórico .....	20
4.2	Introdução.....	22
4.3	Conceitos Básicos de Risco .....	23
4.4	Escopo da PRA .....	26
4.5	Aplicações.....	28
<b>5</b>	<b>INFERÊNCIA BAYESIANA</b> .....	<b>31</b>
5.1	Introdução.....	31
5.2	Probabilidade Subjetiva.....	31
5.3	Inferência Clássica versus Inferência Bayesiana .....	32
5.3.1	Inferência Clássica.....	32
5.3.2	Probabilidade Condicional.....	33
5.3.3	Inferência Bayesiana.....	33
<b>6</b>	<b>REDES BAYESIANAS</b> .....	<b>37</b>
6.1	Introdução.....	37
6.2	Estrutura .....	38
6.3	Nós e Valores.....	38

<b>6.4</b>	<b>Propriedade das Redes Bayesianas .....</b>	<b>39</b>
<b>6.5</b>	<b>Atualização da Crença .....</b>	<b>40</b>
<b>6.6</b>	<b>Tipos de Raciocínio.....</b>	<b>40</b>
<b>6.7</b>	<b>Tipos de Evidências .....</b>	<b>43</b>
<b>6.8</b>	<b>Convertendo Árvore de Falhas em Redes Bayesianas .....</b>	<b>43</b>
6.8.1	Evento União (Diagrama de Venn e Árvore de Falhas).....	44
6.8.2	Evento Intersetão (Diagrama de Venn e Árvore de Falhas) .....	45
6.8.3	Outro Conceito.....	46
<b>6.9</b>	<b>Convertendo Árvore de Eventos em Redes Bayesianas .....</b>	<b>48</b>
6.9.1	Tipos de dependências .....	49
6.9.2	Rede Bayesiana para modelar cenários de eventos independentes .....	50
6.9.3	Rede Bayesiana para modelar cenários de eventos parcialmente dependentes.....	51
6.9.4	Rede Bayesiana para modelar cenários de eventos totalmente dependentes .....	52
<b>7</b>	<b><i>ANÁLISE DA CONFIABILIDADE HUMANA (ACH).....</i></b>	<b>54</b>
<b>7.1</b>	<b>Erro humano.....</b>	<b>54</b>
<b>7.2</b>	<b>Confiabilidade Humana.....</b>	<b>55</b>
7.2.1	Fatores de Forma de Desempenho (FFD) em ACH.....	56
<b>7.3</b>	<b>FFDs do envolvidos na construção de poços .....</b>	<b>59</b>
<b>8</b>	<b><i>AValiação DE RISCOS NA CONSTRUÇÃO DE POÇOS MULTILATERAIS.....</i></b>	<b>63</b>
<b>8.1</b>	<b>Caracterização das Tarefas e Identificação dos Eventos Iniciadores (EI) .....</b>	<b>63</b>
8.1.1	HTA – 1. Construção de poço multilateral .....	64
8.1.2	HTA - 1.4 Condicionamento do poço principal.....	67
8.1.3	HTA - 1.5 Limpeza e determinação da orientação do ICC em relação ao CSLT .....	69
8.1.4	HTA - 1.6 Abertura do rat hole com BHA (CSLT, BD, whipstock) de fresagem .....	76
8.1.5	HTA - 1.7 Retirada do whipstock .....	82
8.1.6	HTA - 1.8 Descida do CRDT .....	88
<b>8.2</b>	<b>Modelagem dos cenários .....</b>	<b>94</b>
8.2.1	Montagem da coluna de condicionamento.....	95
8.2.2	Montagem do BHA.....	97
8.2.3	Cálculo do offset e alinhamento pelo anel de indexação .....	99
8.2.4	Teste do MWD .....	100
8.2.5	Sondador realiza o torque de montagem do BHA .....	101
8.2.6	Sondador realiza a contagem dos tubos .....	102
<b>8.3</b>	<b>Coleta dos Dados.....</b>	<b>103</b>
<b>8.4</b>	<b>Modelagem das falhas (erro), Quantificação e Avaliação.....</b>	<b>105</b>
8.4.1	Montagem da coluna de condicionamento.....	106
8.4.2	Montagem do BHA.....	110
8.4.3	Cálculo do offset e alinhamento pelo anel de indexação .....	113
8.4.4	Teste do MWD .....	116
8.4.5	Sondador realiza o torque de montagem do BHA .....	118
8.4.6	Sondador realiza a contagem dos tubos .....	121
<b>8.5</b>	<b>Estimação da Probabilidade de Ocorrência dos Cenários.....</b>	<b>124</b>
8.5.1	Montagem da coluna de condicionamento.....	124
8.5.2	Montagem do BHA.....	127
8.5.3	Cálculo do offset e alinhamento pelo anel de indexação .....	128
8.5.4	Teste do MWD .....	130
8.5.5	Sondador realiza o torque de montagem do BHA .....	131
8.5.6	Sondador realiza a contagem dos tubos .....	132
<b>9</b>	<b><i>RESULTADOS E CONCLUSÕES.....</i></b>	<b>134</b>

<i>RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</i>	<i>136</i>
<i>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</i>	<i>137</i>

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 2-1: Primeiro poço multilateral, campo de Bashkiria, Rússia (Bosworth et al, 1998).....</i>	7
<i>Figura 2-2: Multi-ramificado.....</i>	8
<i>Figura 2-3: Ramificado.....</i>	8
<i>Figura 2-4: Ramos laterais a partir de um poço horizontal principal.....</i>	8
<i>Figura 2-5: Ramos laterais a partir de um poço vertical principal.....</i>	8
<i>Figura 2-6: Poços com ramos laterais empilhados.....</i>	8
<i>Figura 2-7: Laterais com dual – oposto.....</i>	8
<i>Figura 2-8: Poço de Austin Chalk no Texas, USA (Bosworth et al, 1998).....</i>	8
<i>Figura 3-1: Nível 1.....</i>	12
<i>Figura 3-2: Nível 2.....</i>	12
<i>Figura 3-3: Nível 3.....</i>	13
<i>Figura 3-4: Nível 4.....</i>	13
<i>Figura 3-5: Nível 5.....</i>	13
<i>Figura 3-6: Nível 6.....</i>	13
<i>Figura 3-7: Nível 6S.....</i>	13
<i>Figura 3-8: Um canal.....</i>	13
<i>Figura 3-9: Dois canais.....</i>	13
<i>Figura 3-10: Canais concêntricos.....</i>	13
<i>Figura 3-11: NR – Reentrada não seletiva.....</i>	14
<i>Figura 3-12: PR – Reentrada após retirada da completação.....</i>	14
<i>Figura 3-13: TR – Reentrada completamente entubada.....</i>	14
<i>Figura 3-14: NON - Sem.....</i>	14
<i>Figura 3-15: SEL - Seletivo.....</i>	14
<i>Figura 3-16: SEP – Segregado.....</i>	14
<i>Figura 3-17: REM – Monitoramento remoto / RMC – Monitoramento remoto e controle.....</i>	14
<i>Figura 4-1: Conceito de risco utilizado em PRA (Stamatelatos et al. 2002b).....</i>	25
<i>Figura 4-2: O fluxo típico das tarefas em PRA (Stamatelatos et al. 2002b).....</i>	26
<i>Figura 5-1: Inferência baseada na teoria amostral (Martz &amp; Waller, 1982).....</i>	33
<i>Figura 6-1: Redes Bayesianas Típicas.....</i>	38
<i>Figura 6-2: Tipos de Raciocínio: (a) Preditiva, (b) Diagnostica, (c) Inter-casual e (d) Combinado (Korb &amp; Nicholson, 2003).....</i>	41
<i>Figura 6-3: Rede Bayesiana para o problema do câncer (Korb &amp; Nicholson, 2003).....</i>	41
<i>Figura 6-4: A operação Negação.....</i>	44
<i>Figura 6-5: O Evento União.....</i>	44
<i>Figura 6-6: Convertendo uma porta lógica OU em um nó equivalente na RB.....</i>	45
<i>Figura 6-7: O evento intercessão.....</i>	45
<i>Figura 6-8: Convertendo uma porta lógica E em um nó equivalente na RB.....</i>	46
<i>Figura 6-9: Convertendo uma porta lógica k/n em um nó equivalente na RB.....</i>	46
<i>Figura 6-10: Definição de cenário.....</i>	48
<i>Figura 6-11: Árvore de Eventos.....</i>	49
<i>Figura 6-12: Modelagem de cenário de eventos independentes via rede Bayesiana.....</i>	51
<i>Figura 6-13: Rede Bayesiana e TPC dos nós (cenário de eventos independentes).....</i>	51
<i>Figura 6-14: Modelagem de cenário de eventos parcialmente dependentes via rede Bayesiana.....</i>	52
<i>Figura 6-15: Rede Bayesiana e TPC dos nós (cenário de eventos parcialmente dependentes).....</i>	52
<i>Figura 6-16: Modelagem de cenário de eventos dependentes via rede Bayesiana.....</i>	53
<i>Figura 6-17: Rede Bayesiana e TPC dos nós (cenário de eventos totalmente dependentes).....</i>	53
<i>Figura 7-1: Proporção das causas de acidente na indústria nuclear (INPO, 1985).....</i>	54

<i>Figura 7-2: RB dos Técnicos.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 7-3: RB do Sondador.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 8-1: HTA – 1. Construção de poço multilateral.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 8-2: HTA - 1.4 Condicionamento do poço principal.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 8-3: HTA - 1.5 Limpeza e determinação da orientação do ICC em relação ao CSLT.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 8-4: HTA - 1.6 Abertura do rat hole com BHA (CSLT, BD, whipstock) de fresagem.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 8-5: HTA - 1.7 Retirada do whipstock.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 8-6: HTA - 1.8 Descida do CRDT.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 8-7: ESD para a atividade 1.4.1 (diâmetro menor).....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 8-8: Árvore de Eventos para a atividade 1.4.1 (diâmetro menor).....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 8-9: ESD para a atividade 1.4.1, 1.4.2 e 1.4.3 (diâmetro maior).....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 8-10: Árvore de Eventos para a atividade 1.4.1, 1.4.2 e 1.4.3 (diâmetro maior).....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 8-11: ESD para a atividade 1.5.1, 1.6.1, 1.7.1 e 1.8.1.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 8-12: Árvore de Eventos para as atividades 1.5.1, 1.6.1, 1.7.1 e 1.8.1.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 8-13: ESD para a atividade 1.5.11, 1.6.1 e 1.8.1.....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 8-14: Árvore de Eventos 1.5.11, 1.6.1 e 1.8.1.....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 8-15: ESD para as atividades 1.5.1, 1.5.6, 1.5.10, 1.5.11, 1.6.1, 1.6.5, 1.7.1, 1.7.4, 1.7.6, 1.8.1 e 1.8.4.....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 8-16: Árvore de Eventos 1.5.1, 1.5.6, 1.5.10, 1.5.11, 1.6.1, 1.6.5, 1.7.1, 1.7.4, 1.7.6, 1.8.1 e 1.8.4.....</i>	<i>101</i>
<i>Figura 8-17: ESD para as atividades 1.5.1, 1.6.1, 1.7.1 e 1.8.1.....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 8-18: Árvore de Eventos 1.5.1, 1.6.1, 1.7.1 e 1.8.1.....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 8-19: ESD para as atividades 1.5.2, 1.6.2, 1.7.2 e 1.8.2.....</i>	<i>103</i>
<i>Figura 8-20: Árvore de Eventos 1.5.2, 1.6.2, 1.7.2 e 1.8.2.....</i>	<i>103</i>
<i>Figura 8-21: RB para a modelagem do erro do técnico de operações especiais (diâmetro maior).....</i>	<i>106</i>
<i>Figura 8-22: RB para a modelagem da falha passagem da ferramenta dado montagem da coluna gabarito menor(MCGMe).....</i>	<i>107</i>
<i>Figura 8-23: RB para a modelagem da falha travamento das ferramentas no poço.....</i>	<i>108</i>
<i>Figura 8-24: RB para modelagem da falha do técnico de operações especiais (diâmetro menor).....</i>	<i>108</i>
<i>Figura 8-25: RB para modelagem da falha passagem da coluna dado montagem da coluna de condicionamento menor.....</i>	<i>110</i>
<i>Figura 8-26: RB para modelagem da falha travamento da ferramenta dado passagem da ferramenta.....</i>	<i>110</i>
<i>Figura 8-27: RB para modelagem do erro do operador MLT na montagem do BHA.....</i>	<i>111</i>
<i>Figura 8-28: RB para modelagem do erro do operador MWD na montagem do BHA.....</i>	<i>112</i>
<i>Figura 8-29: RB para modelagem do erro do supervisor MWD e MLT realizando o cálculo do offset.....</i>	<i>114</i>
<i>Figura 8-30: RB para modelagem do erro do operador MLT realiza o alinhamento pelo anel de indexação..</i>	<i>115</i>
<i>Figura 8-31: RB para modelagem do erro do operador MWD testa o MWD.....</i>	<i>117</i>
<i>Figura 8-32: RB para modelagem da falha na demanda do MWD dado o teste do MWD.....</i>	<i>118</i>
<i>Figura 8-33: RB para modelagem da falha do MWD em informar a leitura correta.....</i>	<i>118</i>
<i>Figura 8-34: RB para modelagem do erro do sondador montagem do BHA (torque).....</i>	<i>119</i>
<i>Figura 8-35: RB para modelagem da informação recebida pelo sondador.....</i>	<i>120</i>
<i>Figura 8-36: RB para modelagem da falha do sistema de torque dado sondador.....</i>	<i>121</i>
<i>Figura 8-37: RB para modelagem do erro do sondador realiza a contagem dos tubos.....</i>	<i>122</i>
<i>Figura 8-38: RB para modelagem do erro da equipe de supervisão.....</i>	<i>123</i>
<i>Figura 8-39: RB referente a árvore de eventos Figura 8-8.....</i>	<i>125</i>
<i>Figura 8-40: RB referente a árvore de eventos Figura 8-10.....</i>	<i>126</i>
<i>Figura 8-41: RB referente a árvore de eventos Figura 8-12.....</i>	<i>128</i>
<i>Figura 8-42: RB referente a árvore de eventos Figura 8-14: Árvore de Eventos 1.5.11, 1.6.1 e 1.8.1.....</i>	<i>129</i>
<i>Figura 8-43: RB referente a árvore de eventos Figura 8-16.....</i>	<i>130</i>
<i>Figura 8-44: RB referente a árvore de eventos Figura 8-18.....</i>	<i>131</i>
<i>Figura 8-45: RB para modelagem do erro do sondador realiza a contagem dos tubos.....</i>	<i>132</i>

## LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 3-1: Critérios para a seleção do Nível da junção (Bosworth et al. 1998).....</i>	18
<i>Tabela 4-1: Aplicações e respectivas prioridades do uso de PRA em NPP (Niehaus, 2002).....</i>	23
<i>Tabela 6-1: Tabela de probabilidades da rede Bayesiana sem evidência.....</i>	42
<i>Tabela 6-2: Comparando Redes Bayesianas e Árvore de Falhas .....</i>	47
<i>Tabela 7-1: Alguns FFD em sistemas homem-máquina (Swain &amp; Guttmann, 1983).....</i>	58
<i>Tabela 8-1: Análise da tarefa 1.4 (Condicionamento do poço principal) com foco no Erro Humano .....</i>	68
<i>Tabela 8-2: Análise da tarefa 1.5 (limpeza e determinação da orientação do ICC em relação ao CSLT) com foco no Erro Humano.....</i>	70
<i>Tabela 8-3: Análise da tarefa 1.6 (abertura do rat hole) com foco no Erro Humano.....</i>	77
<i>Tabela 8-4: Análise da tarefa 1.7 (retirada do whipstock) com foco no Erro Humano .....</i>	83
<i>Tabela 8-5: Análise da tarefa 1.8 (descida do CRDT) com foco no Erro Humano.....</i>	89
<i>Tabela 8-6:TPC do técnico de coluna dado supervisor operações especiais (SOE) e capacidade (CA).....</i>	106
<i>Tabela 8-7:Tabela de probabilidades dos nós folha .....</i>	106
<i>Tabela 8-8:TPC da capacidade dado experiência (EX) e atenção e vigilância (AT).....</i>	107
<i>Tabela 8-9: TPC da atenção e vigilância dado estado emocional (EE) e fadiga (FA) .....</i>	107
<i>Tabela 8-10: TPC da fadiga dado carga de trabalho (CT) e condições ambientais (CA) .....</i>	107
<i>Tabela 8-11: TPC da passagem da ferramenta dado montagem da coluna gabarito menor(MMe).....</i>	107
<i>Tabela 8-12: TPC do travamento da ferramenta (TF) dado passagem da ferramenta (PF).....</i>	108
<i>Tabela 8-13: TPC do técnico de coluna dado supervisor operações especiais (SOE) e capacidade (CA).....</i>	108
<i>Tabela 8-14:Tabela de probabilidades dos nós folha .....</i>	108
<i>Tabela 8-15:TPC da capacidade dado experiência (EX) e atenção e vigilância (AT).....</i>	109
<i>Tabela 8-16: TPC da atenção e vigilância dado estado emocional (EE) e fadiga (FA) .....</i>	109
<i>Tabela 8-17: TPC da fadiga dado carga de trabalho (CT) e condições ambientais (CA) .....</i>	109
<i>Tabela 8-18: TPC da passagem da coluna dado montagem da coluna de condicionamento menor(MMa) .....</i>	110
<i>Tabela 8-19: TPC do travamento da coluna (TC) dado passagem da coluna (PC).....</i>	110
<i>Tabela 8-20: TPC do operador MLT dado supervisor MLT (SMLT) e capacidade (CA) .....</i>	111
<i>Tabela 8-21: Tabela de probabilidades dos nós folha da RB operador MLT na montagem do BHA.....</i>	111
<i>Tabela 8-22: TPC da capacidade dado experiência (EX) e atenção e vigilância (AT).....</i>	111
<i>Tabela 8-23: TPC da atenção e vigilância dado estado emocional (EE) e fadiga (FA) .....</i>	111
<i>Tabela 8-24: TPC da fadiga dado carga de trabalho (CT) e condições ambientais (CA) .....</i>	112
<i>Tabela 8-25: TPC do operador MWD dado supervisor MWD (SMWD) e capacidade (CA).....</i>	112
<i>Tabela 8-26: Tabela de probabilidades dos nós folha da RB operador MWD na montagem do BHA .....</i>	113
<i>Tabela 8-27: TPC da capacidade dado experiência (EX) e atenção e vigilância (AT).....</i>	113
<i>Tabela 8-28: TPC da atenção e vigilância dado estado emocional (EE) e fadiga (FA) .....</i>	113
<i>Tabela 8-29: TPC da fadiga dado carga de trabalho (CT) e condições ambientais (CA) .....</i>	113
<i>Tabela 8-30: TPC dos supervisores MWD e MLT dado o supervisor direcional e equipamento de cálculo .....</i>	114
<i>Tabela 8-31: TP dos nós folha da RB supervisor MWD e MLT realizando o cálculo do offset.....</i>	114
<i>Tabela 8-32: TPC do operador MLT dado equipe de supervisão (ES) e capacidade (CA) .....</i>	115
<i>Tabela 8-33: TP dos nós folha da RB operador MLT realiza o alinhamento pelo anel de indexação.....</i>	115
<i>Tabela 8-34: TPC da equipe de supervisão dado supervisor direcional (SD) e supervisor MLT (SMLT).....</i>	115
<i>Tabela 8-35: TPC do supervisor MLT dado o supervisor direcional (SD) .....</i>	116
<i>Tabela 8-36: TPC da capacidade dado experiência (EX) e atenção e vigilância (AT).....</i>	116
<i>Tabela 8-37: TPC da atenção e vigilância dado estado emocional (EE) e fadiga (FA) .....</i>	116
<i>Tabela 8-38: TPC da fadiga dado carga de trabalho (CT) e condições ambientais (CA) .....</i>	116
<i>Tabela 8-39: TPC do operador MWD dado Supervisor MWD (SMWD) e capacidade (CA) .....</i>	117
<i>Tabela 8-40: TP dos nós folha da RB operador MWD testa o MWD.....</i>	117
<i>Tabela 8-41: TPC da capacidade dado experiência (EX) e atenção e vigilância (AT).....</i>	117
<i>Tabela 8-42: TPC da atenção e vigilância dado estado emocional (EE) e fadiga (FA) .....</i>	117

<i>Tabela 8-43: TPC da fadiga dado carga de trabalho (CT) e condições ambientais (CA)</i> .....	118
<i>Tabela 8-44: TPC do travamento da coluna (TC) dado passagem da coluna (PC)</i> .....	118
<i>Tabela 8-45: TPC do travamento da coluna (TC) dado passagem da coluna (PC)</i> .....	118
<i>Tabela 8-46: TPC do sondador (So) dado Qualidade da Informação recebida (QI) e Capacidade para realizar a tarefa (CA)</i> .....	119
<i>Tabela 8-47: TP dos nós folha da RB do sondador montagem do BHA (torque)</i> .....	119
<i>Tabela 8-48: TPC da capacidade dado experiência (EX) e atenção e vigilância (AT)</i> .....	119
<i>Tabela 8-49: TPC da qualidade da informação dado operador MLT e operador MWD</i> .....	120
<i>Tabela 8-50: TPC da atenção e vigilância dado estado emocional (EE) e fadiga (FA)</i> .....	120
<i>Tabela 8-51: TPC da fadiga dado carga de trabalho (CT) e condições ambientais (CA)</i> .....	120
<i>Tabela 8-52: TPC dos fatores externo dado Design do Equipamento (DE) e Condições Ambientais (CA)</i> .....	120
<i>Tabela 8-53: TPC do sistema de torque dado sondador (So)</i> .....	121
<i>Tabela 8-54: TPC do sondador (So) dado Equipe de Supervisão (ES) e Capacidade para realizar a tarefa (CA)</i> .....	122
<i>Tabela 8-55: TP dos nós folha da RB sondador realiza a contagem dos tubos</i> .....	122
<i>Tabela 8-56: TPC da capacidade dado experiência (EX) e atenção e vigilância (AT)</i> .....	122
<i>Tabela 8-57: TPC da equipe de supervisão dado supervisor MLT e operador MLT</i> .....	123
<i>Tabela 8-58: TPC da atenção e vigilância dado estado emocional (EE) e fadiga (FA)</i> .....	123
<i>Tabela 8-59: TPC da fadiga dado carga de trabalho (CT) e condições ambientais (CA)</i> .....	123
<i>Tabela 8-60: TPC dos fatores externo dado Design do Equipamento (DE) e Condições Ambientais (CA)</i> .....	123
<i>Tabela 8-61: TPC do Estado Final (E_Final) dado Técnico de Coluna (TC), Passagem da Ferramenta (PF) e Travamento da Ferramenta (TF)</i> .....	125
<i>Tabela 8-62: TPC do Estado Final (E_Final) dado Técnico de Coluna (TC), Passagem da Coluna (PC) e Travamento da Coluna (TC)</i> .....	127
<i>Tabela 8-63: TPC do Estado Final (E_Final) dado Operador MLT (OMLT) e Operador MWD (OMWD)</i> .....	128
<i>Tabela 8-64: TPC do Estado Final (E_Final) dado supervisores MLT e MWD (Ss), e operador MLT (OMLT)</i> .....	129
<i>Tabela 8-65: TPC do Estado Final (E_Final) dado operador MWD (OMWD), funcionamento do MWD na demanda (MWDD) e informar a leitura (IL)</i> .....	130
<i>Tabela 8-66: TPC do Estado Final (E_Final) dado Sondador (S), e Sistema de Torque (ST)</i> .....	132

## LISTA DE EQUAÇÕES

<i>Equação 5-1</i> .....	32
<i>Equação 5-2</i> .....	34
<i>Equação 5-3</i> .....	34
<i>Equação 5-4</i> .....	34
<i>Equação 5-5</i> .....	34
<i>Equação 5-6</i> .....	34
<i>Equação 5-7</i> .....	35
<i>Equação 5-8</i> .....	35
<i>Equação 5-9</i> .....	35
<i>Equação 5-10</i> .....	35
<i>Equação 5-11</i> .....	35
<i>Equação 5-12</i> .....	36
<i>Equação 5-13</i> .....	36
<i>Equação 5-14</i> .....	36
<i>Equação 5-15</i> .....	36
<i>Equação 5-16</i> .....	36
<i>Equação 5-17</i> .....	36
<i>Equação 6-1</i> .....	37
<i>Equação 6-2</i> .....	42
<i>Equação 6-3</i> .....	42
<i>Equação 6-4</i> .....	49
<i>Equação 6-5</i> .....	50
<i>Equação 6-6</i> .....	50

## 1 INTRODUÇÃO

A atividade petroleira no Brasil desempenha um papel de grande importância no que se refere ao desenvolvimento tecnológico. Isto ocorre devido ao grande investimento nesta área, necessário devido à competitividade entre grandes empresas multinacionais. Sendo o petróleo um *commodity*, i.e. implica que o preço é definido pelo mercado internacional, lucra mais quem possui sistemas mais eficientes (baixo custo operacional), e investe no aprimoramento das técnicas de exploração, principalmente em campos maduros. Contexto este materializado após a abertura do mercado de exploração nacional. Desta forma este mercado se caracteriza pela necessidade de investimento em todas as áreas que gerem diferenciais competitivos.

Investir em análise de risco é uma forma de gerar diferencial competitivo em pelo menos dois dos cinco possíveis objetivos de desempenho: credibilidade e custo.

Em relação à credibilidade, é possível perceber que só é possível cumprir com o que foi programado se nada de anormal ocorrer no percurso da atividade produtiva. Desta forma, investir em análise de risco para garantir a confiabilidade do processo, reduz a chance de ocorrer algo inesperado durante a atividade produtiva.

O custo, outro objetivo de desempenho, pode ser caracterizado de quatro formas:

- O custo pode surgir na forma de tempo não produtivo. Em geral o tempo é não produtivo quando algo inesperado ocorre, impedindo que a função produção atue conforme o programado. Gerando um impacto na credibilidade e nos custos operacionais;
- Ele pode surgir na forma de perda de bens físicos. Na indústria petroleira, os bens móveis são: sonda, navio, produto armazenado, etc. e os imóveis são: reservatórios, poços, etc. Um exemplo, perda de plataforma P-36 pela Petrobras na Bacia de Campos, na noite de 14 de março de 2001. Neste acidente não foi divulgado se ocorreu também à perda do poço;
- Estes custos podem aparecer na forma de perda humana. Podemos tomar como exemplo o acidente no Centro de Lançamento de Alcântara (CLA) no MA, que resultou na morte de 21 pessoas entre cientistas e funcionários do Centro Técnico Aeroespacial (CTA), este acidente foi em decorrência da explosão no VLS-1 V03 (Veículo Lançador de Satélites). A partir deste acidente, tornou-se evidente que a perda humana resulta em custos, ou seja, em relação ao corpo técnico do CTA, anos de investimentos em

formação e um elevado investimento financeiro foram necessários, para formar estes profissionais, além deste fato, sabe-se que a perda humana por si só é algo imensurável;

- Outro ponto em que o custo pode surgir está relacionado aos acidentes ambientais. O acidente do *Exxon Valdez*<sup>1</sup> em 1989 é um bom exemplo para este caso. Neste acidente ocorreu o derramamento de 41,3 milhões de litros de óleo cru, causando a contaminação de uma grande área de preservação ambiental no Alasca. Além do elevado investimento necessário para recuperar a área contaminada, bancado pela *ExxonMobil*<sup>2</sup>. A empresa foi multada em US\$ 6,75 bilhões, e ainda hoje tem o nome associado a este acidente, comprometendo a imagem da companhia, considerado o maior acidente ambiental do mundo.

Em busca de uma maior integridade de suas operações, a petrobras tem investido de forma substancial no aprimoramento das técnicas de construção de poço e exploração de reservatório. Neste trabalho, o foco está em uma análise de risco na construção de poços multilaterais, pela utilização de tecnologia multilateral. Com o objeto de reduzir a probabilidade de ocorrência de tempo não produtivo e perda de bens, que neste caso são as ferramentas utilizadas na construção do poço e o próprio poço.

## 1.1 Justificativa

Novas tecnologias continuam a ser desenvolvidas e aplicadas na exploração e produção de petróleo, num esforço de aumentar a produção e o índice de recuperação de reservatórios. Tecnologia Multilateral (MLT) é uma dessas tecnologias que, apesar de ainda estar em desenvolvimento, tem sido gradativamente aplicadas na perfuração e produção de poços *onshore*<sup>3</sup> e *offshore*<sup>4</sup>.

Sendo uma tecnologia imatura, o processo de construção de poços multilaterais, é realizado sobre elevados níveis de incerteza. Em decorrência, eventos indesejáveis têm ocorrido nas poucas aplicações de MLT dentro da Petrobras.

Dentro destes eventos, podem-se mencionar acidentes acarretando paradas não programadas das atividades de construção, incorrendo assim em atrasos no cronograma e conseqüente elevação dos custos de construção do poço, conduzindo desta forma a uma necessidade de aumentar a habilidade em controlar o risco durante as fases existentes.

---

<sup>1</sup> **Exxon Valdez:** é o nome do navio petroleiro que sofreu o acidente, gerando vazamento de óleo cru.

<sup>2</sup> **ExxonMobil:** é o nome da companhia de petróleo Americana proprietária do petroleiro Exxon Valdez.

<sup>3</sup> **Onshore:** em terra.

<sup>4</sup> **Offshore:** fora da terra, i.e., no mar.

Desta forma, torna-se imperativo o desenvolvimento de uma metodologia para a análise de riscos, associada às operações de construção de poço, envolvendo falha de equipamentos e erros em ação humana.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do trabalho está no desenvolvimento de uma metodologia integrada para a avaliação dos riscos de forma qualitativa (manobra, peixe<sup>5</sup>, erro na direção da janela, etc.) associados com operações de construção de poços multilaterais. Distintas fontes de riscos serão consideradas, como as relacionadas às falhas de equipamentos e erros em ações humanas. A metodologia a ser desenvolvida será então aplicada dentro do contexto da análise de riscos do processo de perfuração e completção<sup>6</sup> dos poços multilaterais nível 3.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar uma análise de riscos das operações de perfuração e completção de poços multilaterais nível 3:
  - Construir HTA (*Hierarchical Task Analysis*), para a toda operação de construção do poço multilateral, e detalhar a HTA em um terceiro nível para as tarefas relacionadas à fase de abertura da janela.
  - Identificação dos eventos iniciadores dos cenários de risco na tecnologia MLT Nível 3;
  - Desenvolvimento dos cenários de risco resultantes dos eventos iniciadores, através de ESD (*Event Sequence Diagram*);
  - Converter os cenários de risco descritos via ESD em árvore de eventos;
- Desenvolvimento de uma metodologia integrada para avaliação do risco, pela conversão do modelo integrado (Árvore de Eventos e Árvore de Falhas) chamada “convencional”, pela metodologia utilizando unicamente Redes Bayesianas.
  - Converter os cenários descritos, via árvore de eventos em redes Bayesianas;
  - Desenvolver a análise da confiabilidade humana em função dos fatores de desempenho de forma, via redes Bayesianas;

---

<sup>5</sup> **Peixe:** Qualquer objeto estranho que tenha caído, partido ou ficado preso no poço.

<sup>6</sup> **Completção:** Consiste na fase de equipar o poço com a finalidade de produzir ou injetar fluido.

- Integrar a rede Bayesiana provinda das árvores de eventos, como as redes Bayesianas provinda da análise da confiabilidade humana;
- Quantificar utilizando técnica de elicitación direta;
- Obter as probabilidades das falhas ou erro, e dos estados finais;

## 2 POÇOS

### 2.1 Poços Direcionais

Devido à busca pela eficiência na produção, que está relacionada ao maior volume de produção possível no menor espaço de tempo, atualmente as técnicas direcionais estão sendo bastante utilizadas. Os poços direcionais são agrupados em 3 tipos: Poço Tipo I, Tipo II e Tipo III, (Thomas, 1996).

O poço direcional tipo I possui o ponto de desvio raso e o trecho inclinado prossegue até atingir o objetivo.

O poço direcional tipo II também possui o ponto de desvio raso, porém o trecho inclinado prossegue somente até alcançar o afastamento lateral projetado, neste ponto o poço volta para a direção vertical até atingir o objetivo.

O poço direcional tipo III é semelhante ao tipo I, porém neste o ponto de desvio é mais próximo do objetivo.

Dentro destes três grupos existe o poço horizontal, poços de longo alcance “*Extended-Reach Wells*” e poço multilateral.

O poço horizontal tem a característica de atingir o objetivo horizontalmente, percorrendo um trecho reto dentro do reservatório, aumentando desta forma a exposição do reservatório. Isto proporciona um aumento da produtividade e da recuperação final do hidrocarboneto.

O poço de longo alcance “*Extended-Reach Wells*” tem a característica de atingir o objetivo com grande afastamento horizontal em relação ao ponto de partida, existem poços com mais de 10 Km de afastamento horizontal.

Por fim os poços multilaterais, que são poços ramificados a partir de uma mesma locação.

Todos estes poços descritos acima são ditos poços direcionais, os poços direcionais podem ser definido como poços que possuem desvio da localização na superfície. Este desvio são feitos de forma intencional devido a vários motivos, que pode ser: controlar poços em *blowout*<sup>7</sup>, atingir formações produtoras que estejam abaixo de localizações inacessíveis, tais como rios, lagos, cidades, ou no caso de poços multilaterais onde se deseja aumentar o índice

---

<sup>7</sup> **Blowout:** ESTOURO - Condição de um poço descontrolado devido aos fluidos da formação estourarem na superfície. A causa de um estouro sem controle pode ser sabotagem, falha do equipamento do cabeçote do poço ou do equipamento dentro do poço, descuido da equipe de controle ou por um Ato de Providência. São raros.

de recuperação do reservatório ou extrair produtos de diferentes reservatórios a partir de uma mesma sonda.

## 2.2 Poços Multilaterais

### 2.2.1 Introdução

O poço multilateral, por se tratar do foco da aplicação da tecnologia multilateral, será apresentado em maior detalhe nesta subseção.

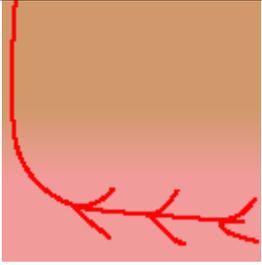
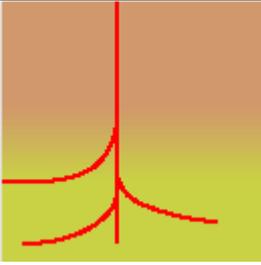
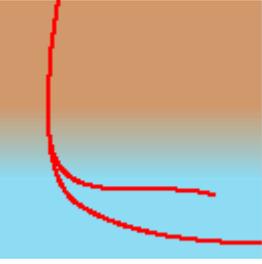
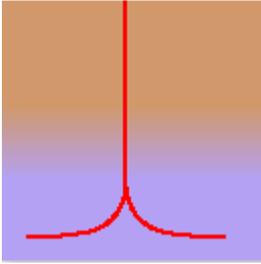
Poço multilateral é um único poço, com um ou mais ramos radiais em varias direções, a partir do poço principal. Este poço pode ser de exploração, de desenvolvimento ou reentrada em um poço existente. Ele pode ser tão simples quanto um poço vertical com uma perna lateral ou tão complexo quanto um poço horizontal, de alcance prolongado, com múltiplos laterais e ramos sublaterais, (Bosworth et al, 1998).

O primeiro poço multilateral foi construído por um engenheiro de perfuração e de petróleo soviético, Alexander Mikhailovich Grigoryan. Nascido em 1914 em Baku capital da atual republica do Azerbaijão, após se graduar ele foi trabalhar como assistente de perfuração de poços de petróleo, (Bosworth et al. 1998).

Grigoryan, possivelmente por conta das grades cotas de produção impostas, despertou nele o talento com um inventor e inovador. Sendo ele o primeiro no mundo a perfurar poços direcionais, em “Baku 1385”, no ano de 1941. Aproximadamente 20 anos depois ninguém tinha conseguido esta proeza. Desenvolveu também uma nova técnica de desvio no início da perfuração e um invento para estabilizar e controlar a curvatura da coluna sem deflexão.

Contudo todas estas inovações somente deram maturidade para o desenvolvimento da maior contribuição na tecnologia de perfuração. Baseada em um trabalho científico do americano L. Yuren, onde Yuren defendia que o aumento da produção poderia ser atingido pelo aumento do diâmetro do poço na zona produtiva. Grigoryan propôs a perfuração de ramos na zona produtiva para aumentar a área exposta, em substituição ao aumento do diâmetro do poço, proposto por Yuren, que gerava uma série de inconvenientes. Colocado em prática, por Grigoryan no campo de Bashkiria perto de Bashkortostan, Rússia, no ano de 1941. Quando ficou pronto o poço “66/45” tinha nove ramos de produção lateral, com uma distancia máxima de 136 metros do ponto de inicio e um total de escoamento de 322 metros, Figura 2-1.



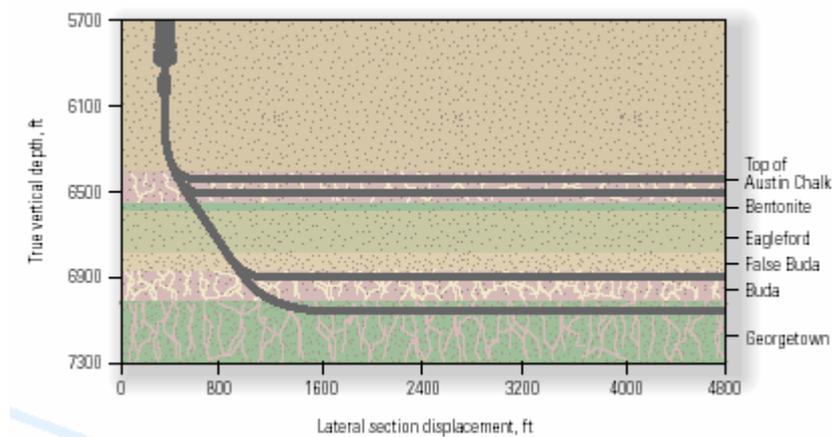
<p><b>Figura 2-2: Multi-ramificado</b></p>	<p><b>Figura 2-3: Ramificado</b></p>
 <p><b>Figura 2-4: Ramos laterais a partir de um poço horizontal principal</b></p>	 <p><b>Figura 2-5: Ramos laterais a partir de um poço vertical principal</b></p>
 <p><b>Figura 2-6: Poços com ramos laterais empilhados</b></p>	 <p><b>Figura 2-7: Laterais com dual – oposto</b></p>

2.2.2 Tipos Básicos de Poços Multilaterais

Os poços multilaterais possuem duas tipificações básicas: poços multilaterais com ramos em diferentes reservatórios, e com ramos em um mesmo reservatório.

2.2.2.1 Diferentes reservatórios

O objetivo principal deste tipo de poço é atingir várias zonas de produção, com a finalidade de aumentar a taxa de produção e melhorar o recobrimento por meio da produção misturada. A configuração mais utilizada para este fim, i.e., atingir diferentes reservatórios, é o lateral verticalmente balanceado. Um exemplo de poço deste tipo é o de Austin Chalk no Texas (USA), Figura 2-8.



**Figura 2-8: Poço de Austin Chalk no Texas, USA (Bosworth et al, 1998)**

Esta configuração atinge o reservatório horizontalmente, a vantagem nisto está em uma maior chance de atravessar mais de uma fratura se comparada com o poço vertical, porém existe um limite de quão distante um poço vertical pode ser perfurado.

A perfuração de outra derivação lateral através de uma perfuração existente é melhor, pois aumenta o número de fraturas que pode ser exposta a um menor custo, quando comparado com a perfuração de uma longa secção horizontal ou um outro poço.

#### 2.2.2.2 Mesmo reservatório

O objetivo principal deste tipo de poço é atingir a mesma zona de produção, com a finalidade de aumentar a taxa de produção e melhorar o recobrimento de hidrocarboneto e maximizar a produção a partir daquela zona, reduzindo o ciclo de vida do campo. Algumas configurações mais utilizadas são: lateral horizontalmente espalhado em leque, espinha dorsal e costela (*spine and-rib*) e dual-oposto em Forma de T.

O poço lateral horizontalmente espalhado em leque pode atingir múltiplas camadas finas de formação, de forma a drenar o produto pela variação da inclinação e profundidade vertical de cada “poço-dreno”. Em uma rocha naturalmente fraturada com uma orientação da fratura desconhecida ou variável, a configuração em leque pode melhorar a probabilidade de encontrar fraturas e a completação econômica do poço. Se a orientação da fratura é conhecida, um poço dual-oposto em forma de T pode duplicar o comprimento do poço lateral exposto dentro da zona. O poço do tipo espinha dorsal e costela (*Spine-and-rib*) reduzem a tendência de cone de água em formações não fraturadas e *reservatórios de matriz permeável*<sup>8</sup>.

### 2.3 Conclusão

Um poço multilateral bem sucedido, que atravessa várias zonas, pode reduzir o custo de perfuração e completação, aumentar a produção e fornecer uma drenagem mais eficiente de um reservatório. Além disto, os poços multilaterais podem tornar o gerenciamento do reservatório mais eficiente e também ajudar no aumento de reserva acumulada. Apesar de todas estas vantagens, os poços multilaterais possuem ainda problemas a serem resolvidos. Apesar da evolução da tecnologia relacionada à perfuração de poços multilaterais foi superior quando comparado com o nível de complexidade dos poços. Contudo o risco em poços multilaterais tem sido na construção e completação de junções laterais, instabilidade do caminho aberto

---

<sup>8</sup> **Reservatório de matriz permeável:** É o reservatório que possui a propriedade de ter a matriz com característica permeável. PERMEABILIDADE - É a propriedade de uma formação rochosa porosa permitir o fluxo de um líquido contido nela, em geral óleo.

pelo poço, coluna presa, problemas de sobre-pressão no *revestimento*<sup>9</sup>, cimentação e problemas nos ramos.

De forma geral as múltiplas penetrações no mesmo reservatório ou em reservatórios independentes reduz significativamente o custo e aumenta a taxa de produção, os poços multilaterais são também uma boa maneira de esgotar rapidamente um reservatório, reduzindo o ciclo de vida do campo e reduzindo os custos operacionais.

---

<sup>9</sup> **Revestimento:** Tubulação de aço carbono utilizada para revestir um poço após o término da operação de perfuração, aumentando a estabilidade, impedindo que a formação colapse.

### **3 SISTEMAS MULTILATERAIS (MLT)**

#### **3.1 Introdução**

No processo de construção de um poço, o objetivo principal é maximizar o retorno do investimento. Por conta disto, novas técnicas e tecnologia continuam sendo desenvolvidas. Dentro deste conceito, uma destas novas técnicas e tecnologia é a *tecnologia multilateral ou sistemas multilaterais*, devido aos custos de completção, produção, manutenção e disponibilidade destes sistemas.

A primeira instalação do sistema multilateral foi feita no Alaska, a segunda foi no oriente médio em março de 1996, neles a completção consistia de dois horizontal lateral com aproximadamente 1 km exposto em cada, (Longbottom, 1996).

Desde a sua introdução em 1993, os sistemas multilaterais e suas aplicações têm se desenvolvido rapidamente.

Os sistemas multilaterais (MLT) podem ser de vários tipos, grau de complexidade e funcionalidade e são classificados conforme a TAML (Technical Advances in Multi-Laterals).

Apesar das vantagens apresentadas na utilização de poços multilaterais, para a utilização dos sistemas multilaterais, são necessários requisitos técnicos, para garantir uma completção multilateral eficiente. Então, antes mesmo de realizar a perfuração dos poços multilaterais com a aplicação de ferramentas multilaterais, é necessário determinar algumas características que são de fundamental importância para uma completção eficiente. Desta forma existe uma série de combinações que envolvem critérios técnicos, custo, complexidade e risco. São elas:

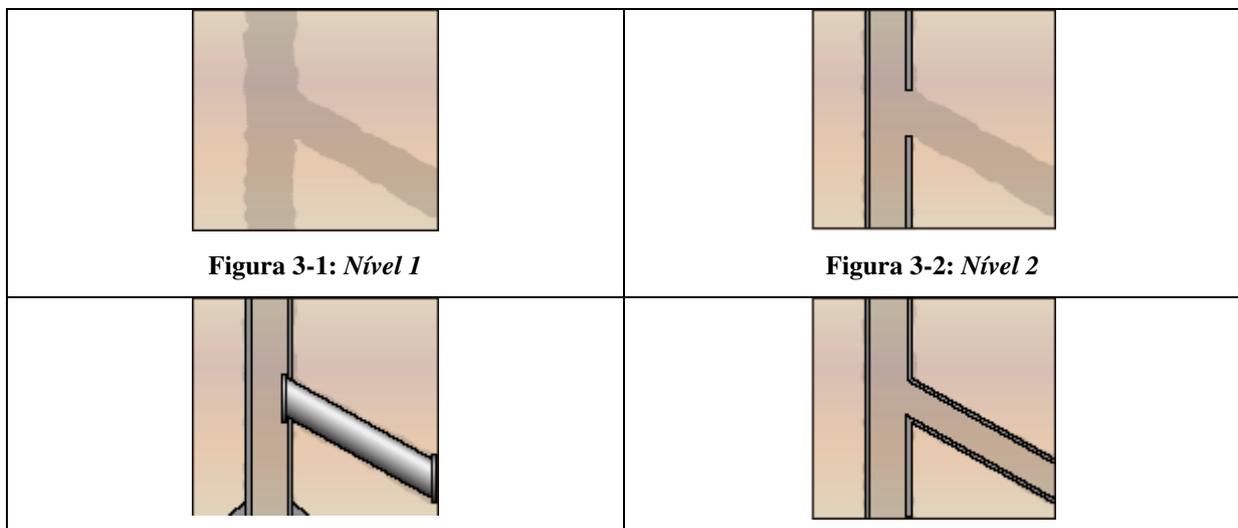
- Isolamento entre laterais;
- Tipo de intervenção do poço durante a vida do poço;
- Tipo de controle de fluxo;
- Acessibilidade.

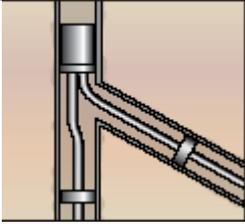
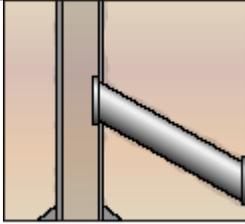
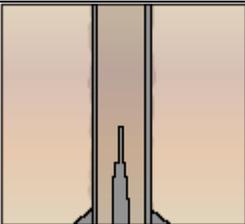
Por conta destes critérios técnicos, diferentes sistemas multilaterais surgiram cada um com a finalidade de atingir alguns critérios de forma total e outros de forma parcial, gerando uma série de combinações possíveis, que dificultava a caracterização das diferentes tecnologias. Desta forma, a classificação dos MLT tornou-se uma necessidade.

### 3.2 Classificação dos MLT

Até 1997 existia uma certa dificuldade em caracterizar as diferentes tecnologias multilaterais, surgindo daí à necessidade de uma padronização universal que envolvesse características mais restritas, em substituição às utilizadas naquela época, que eram dificuldade e risco, e que fornecesse também um direcionamento mais unificado do desenvolvimento da tecnologia multilateral. Foi neste ponto que em 1997, sob o comando de Eric Diggins da Shell U.K. E&P, num fórum chamado “Technology Advancement—Multi Laterals (TAML)”, em Aberdeen, Escócia, foi decidido classificar os poços multilaterais pelo nível de *complexidade* e *funcionalidade*. Porém estas duas classificações não eram suficientes, hoje foi acrescentado ao nível de complexidade e funcionalidade, o *tipo*.

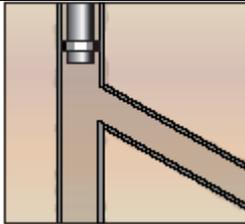
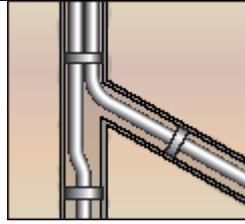
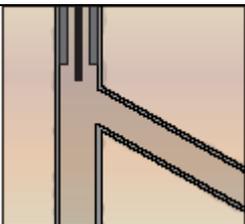
A classificação centrada na *complexidade* é categorizada do Nível 1 ao 6s, que se baseia na complexidade da junção. O nível 1 é um poço principal a poço aberto com o lateral também a poço aberto, i.e., sem revestimento, Figura 3-1. O Nível 2 tem o poço principal revestido e cimentado, e o poço lateral a poço aberto, Figura 3-2. O Nível 3 tem o poço principal revestido e cimentado com o lateral somente revestido, Figura 3-3. O Nível 4 tem o poço principal e o lateral revestido e cimentado juntos, Figura 3-4. O Nível 5 a garantia da integridade devido a diferença de pressão entre o principal e lateral é alcançada pela utilização de equipamentos de completção, Figura 3-5. O Nível 6 a garantia da integridade é alcançada pelo revestimento e sem a assistência ou dependência de equipamentos de completção, Figura 3-6. No Nível 6S a parte inferior do poço é dividida em duas saídas, onde um revestimento dual tipo cabeça de poço é utilizada, porém na face inferior do poço, que divide o poço principal em dois poços laterais de mesmo tamanho, Figura 3-7 (Bosworth et al. 1998).



<p><b>Figura 3-3: <i>Nível 3</i></b></p>	<p><b>Figura 3-4: <i>Nível 4</i></b></p>
 <p><b>Figura 3-5: <i>Nível 5</i></b></p>	 <p><b>Figura 3-6: <i>Nível 6</i></b></p>
 <p><b>Figura 3-7: <i>Nível 6S</i></b></p>	

### 3.2.1 Classificação Centrada no Tipo de Completação

Em combinação com a complexidade da junção e função do poço – produzir com ou sem elevação artificial, injetor ou multi-propósito – o tipo de completção definirá com maior rigor quais equipamentos serão necessários na junção. Abaixo são apresentados os três tipos de completção utilizadas em poços multilaterais.

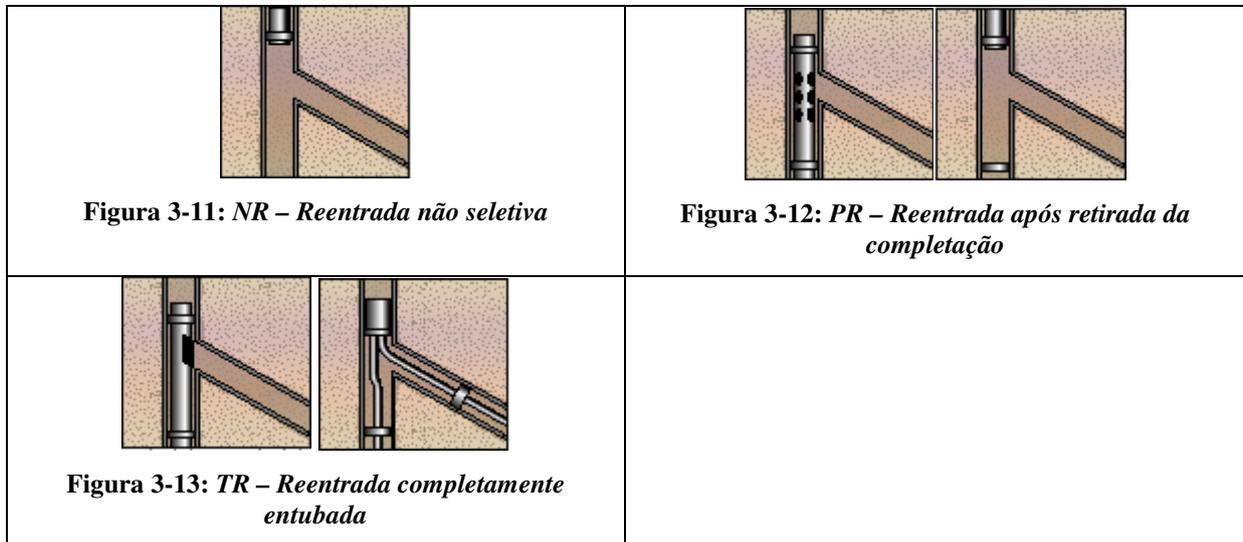
 <p><b>Figura 3-8: <i>Um canal</i></b></p>	 <p><b>Figura 3-9: <i>Dois canais</i></b></p>
 <p><b>Figura 3-10: <i>Canais concêntricos</i></b></p>	

### 3.2.2 Classificação Centrada no Tipo da Junção

O tipo da junção visa alcançar dois objetivos, acessibilidade e controle de fluxo. Por conta disto existe uma variedade de opções de acessibilidade e controle de fluxo existente.

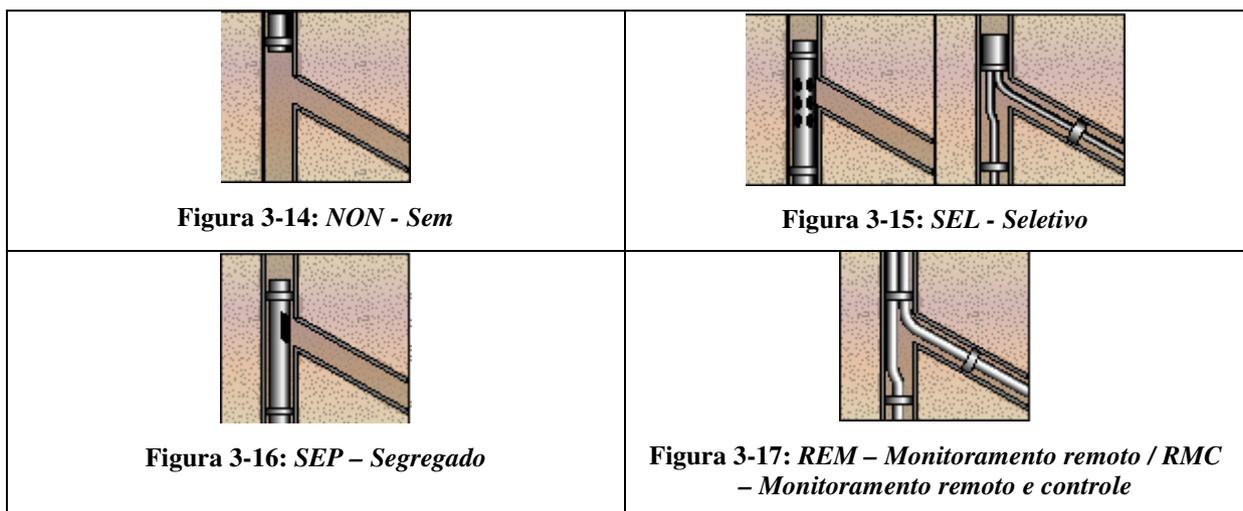
3.2.2.1 Acessibilidade

O tipo da junção é categorizado em função do tipo de acesso possível, no poço principal e lateral, e ela pode ser do tipo: Reentrada não seletiva, Figura 3-11. Reentrada após retirada da completção, Figura 3-12. Reentrada completamente entubada, Figura 3-13.



3.2.2.2 Controle de Fluxo

O tipo da junção também pode ser categorizado em função do tipo de controle do fluxo necessário, que pode ser: Sem controle, Figura 3-14. Controle Seletivo, Figura 3-15. Separador, Figura 3-16. Monitoramento remoto ou Monitoramento remoto e controle, Figura 3-17.



A complexidade da junção por ser a premissa obrigatória na construção de um poço, uma vez que na maioria das vezes não é opcional a escolha da matriz em que a junção será instalada, as tecnologias desenvolvidas por diferentes companhias atrelaram a ela (complexidade) as outras opções (tipo de junção que por sua vez restringe o tipo de

completação). Desta forma, abaixo será apresentado uma descrição das tecnologias multilaterais existentes, definidas em função dos níveis.

### 3.3 Descrição dos MLT

#### 3.3.1 Nível 1

O desvio se dá a partir do poço principal de modo que a perfuração lateral ocorre de forma aberta, com uma perfuração dita “junção de poço aberto”, isto é não existe cimentação da perfuração laterais neste nível, este nível só é utilizado em caso de perfuração em áreas onde a estabilidade lateral pode ser garantida com segurança por um longo período de tempo, área altamente estáveis geologicamente.

Trata-se do mais simples em complexidade, onde não existe nenhum tratamento especial para a junção entre o poço principal vertical e o desvio horizontal, é recomendado somente para locais onde a formação é de rocha dura, permitindo desta forma resistir (i.e., se manter estável) por um longo período de tempo, sem desmoronar sobre os equipamentos de completação, é apropriado para regiões onde o fluido e as pressões são homogêneas e *pressão drawdown*<sup>10</sup> é pouco provável.

Não faz parte do projeto de completação Nível 1 controle de fluxo cruzado, injeção de fluido, controle de produção areia, reentrada, empacotamento de cascalho ou outro método complexo de completação. Neste sistema deve-se tomar cuidado com a formação de cone de água, pois ele não permite contingência para uma produção imprevista de água.

#### 3.3.2 Nível 2

Algumas perfurações ocorreram em áreas relativamente estáveis (i.e., a estabilidade é garantida de forma mais segura), quando isto ocorre, ele é recomendado. Nele o poço principal é revestido e cimentado, o poço lateral é aberto com a *liner* “jogado”.

Na junção Nível 2 o poço principal é revestido, e uma janela no revestimento vertical da perfuração mãe é feita, permitindo uma perfuração lateral aberta (sem revestimento), neste nível não existe conexões mecânicas com revestimento do poço principal. O revestimento reduz a chance de colapso da formação por sobre os equipamentos de completação e fornece um isolamento hidráulico entre zonas laterais.

Ela não permite a uma produção separada, e simultânea através de vários laterais.

---

<sup>10</sup> **Pressão drawdown:** Diferença entre a pressão média do reservatório e a pressão no fim do poço.

Este Nível é apropriado para junções duras e laterais duros, com baixo potencial de fluxo cruzado, baixo potencial de re-entrada, baixa necessidade de isolamento entre laterais e mistura de várias zonas.

### 3.3.3 Nível 3

É utilizado quando a junção das perfurações se dá em uma formação instável, tal como xisto. O termo “instável” também faz referência a formações que pode se tornar instável com o passar de um longo período de tempo.

Neste nível o poço principal é revestido e cimentado e o lateral é revestido e não cimentado. O *liner* lateral é ancorado mecanicamente na perfuração lateral por meio do *liner hanger*<sup>11</sup>. O poço pode ser completado com um sistema de entrada lateral ou uma luva deslizante. A junção é protegida contra infiltração de areia ou colapso. Apoio mecânico está presente, mas um suficiente isolamento hidráulico não está presente na junção. A cimentação na junção pode ser capaz de se manter estável a poucas centenas de psi de diferencial de pressão, contudo uma falha potencial pode vir a ocorrer se a pressão drawdown se tornar substancial. Conseqüentemente, esta junção não pode ser usada em poços onde a formação não é bem consolidada na junção lateral se a pressão drawdown é esperada permanecer alta ou por um longo período de tempo.

Se comparada ao Nível 2, pode-se concluir que em geral os custos de completação são maiores.

### 3.3.4 Nível 4

Neste Nível o poço principal e lateral são revestidos e cimentados, ambos são cimentados juntos com a junção, a junção Nível 4 permite a máxima integridade da junção pelo período de vida do poço. Ele oferece uma junção *dual*, produção isolada até a superfície e oferecem seletividade sem interrupção do tubo em ambos poços. Permite produzir separadamente e simultaneamente através de vários laterais. É o mais apropriado para junção e laterais não consolidados, com controle potencial de fluxo cruzado. Deve ser usado se a pressão drawdown esperada for alta por um longo período de tempo.

São instalados geralmente quando não é requerida a instalação de zonas imediatamente perto da junção, porém pode ser ainda desejável ter uma cimentação no linear (em alguns casos para minimizar ou eliminar possível produção de areia). Se comparada ao Nível 3,

---

<sup>11</sup> **Liner hanger:** SUPORTE DE REVESTIMENTO - É um conjunto montado com cunhas de dentes cambiáveis e vedadores de borracha usado para sustentação de um revestimento na seção inferior da coluna de revestimento de produção.

pode-se concluir que em geral os custos de completação e manutenção são maiores, e a disponibilidade pode ser menor.

### 3.3.5 Nível 5

Neste nível a integridade mecânica e pressão na junção são garantidas. Ele é completado por meio de tubos e de pelo menos três *packer*<sup>12</sup>, sendo um packer de isolamento lateral, um packer abaixo da junção no poço principal, e um acima da junção no poço principal, para estabelecer um isolamento total entre as junções laterais.

A integridade da pressão é atingida pelo uso de packers únicos em cada lateral, um packer dual no poço principal acima da junção, e um tubo *string*<sup>13</sup> colocado dentro de cada lateral.

Existem opções disponíveis que permite uma produção independente de cada zona de produção para a superfície ou uma produção misturada.

Permite a produção separadamente e simultaneamente através de vários laterais. É uma boa solução para poços multilaterais em formações fracas, e susceptíveis ao colapso do poço, é também uma boa solução para junções e laterais não consolidadas. Ele é capaz de controlar o fluxo cruzado se necessário. Deve ser usado se a pressão drawdown for esperada alta e por um longo período de tempo. Instalados geralmente quando não é necessário o isolamento entre zonas ou perto da junção. Se comparada ao Nível 4, pode-se concluir que os custos de completação em geral são maiores.

### 3.3.6 Nível 6

Neste nível toda a junção é parte integral do revestimento do poço principal. A junção consiste de um metal expansível em conjunto com o revestimento principal. Após a expansão, ela é cimentada no local utilizando as técnicas convencionais. Nesta tecnologia, diferente da utilizada no Nível 5, conta com equipamentos de fundo de poço que cria a integridade hidráulica da junção.

A junção é formada por um molde pré-formado como parte do revestimento ou *liner string*, no qual pode ser instalado a partir da superfície ou com um *liner hanger*.

A área do poço aberto na profundidade da junção é mandrilhada antes da junção ser instalada, para fornecer um alojamento necessário para a instalação da junção. Uma vez instalado na secção mandrilhada, a perna não circular (elíptica) é expandida, usando

---

<sup>12</sup> **Packer:** VEDADOR / OBSTRUIDOR - É um plug de expansão, geralmente feito de borracha, colocado em um poço para obstruir a passagem do fluido.

<sup>13</sup> **String:** COLUNA - Tubulação conectada em seqüência.

tecnologia de moldagem. A partir daí técnicas de perfuração e completação convencional são utilizados para finalizar a construção e completação do poço.

O sistema multilateral Nível 6 oferece a melhor opção para junções fracas, e é o mais recomendado para junções não consolidadas, e laterais com formação de mole a média dureza, com baixo potencial de produção de areia. Ele permite o controle de fluxo cruzado se necessário, satisfaz a necessidade de seletividade, e também o isolamento da produção entre laterais na produção simultânea.

Existem opções disponíveis que permite a injeção /produção de cada zona de produção, ou injeção /produção misturada de vários de vários laterais. Ambas opções são fornecidas ao mesmo tempo. Este Nível é uma boa opção se a pressão drawdown for esperada alta por períodos longos de tempo.

O Nível 6S é categorizada como um sub-nível do Nível 6, ele utiliza um divisor do fundo do poço, ou uma montagem de uma cabeça de poço de sub-superfície, que divide o poço principal em dois poços laterais menores de igual tamanho.

### 3.4 Resumo

No passado, existiam grandes limitações na aplicação de poços multilaterais, contudo o desenvolvimento da tecnologia multilateral reduziu estas limitações a poucas. Permitindo que hoje uma vasta aplicabilidade seja feita. Na Tabela 3-1 temos um resumo de todas os critérios detalhado em função do possível nível da junção.

**Tabela 3-1: Critérios para a seleção do Nível da junção (Bosworth et al. 1998)**

	Nível					
	1	2	3	4	5	6
<b>Poço Principal (Rocha)</b>	Dura	Mole	Mole	Todos	Mole	Todos
<b>Lateral (Revestimento)</b>	Poço aberto	Poço aberto ou Liner ranhurado	Liner com ECP, ranhurado, ou perfurado	Poço revestido	Poço revestido	Liner ranhurado
<b>Junção (Rocha)</b>	Dura	Dura	Médio	Quebradiça	Quebradiça	Quebradiça
<b>Controle de fluxo cruzado</b>	Não	Baixa	Baixa	Moderada	Alta	Alta
<b>Injeção de Fluido</b>	Não	Não	Não	Moderada	Alta	Alta
<b>Isolamento da Produção</b>	Não	Baixa	Moderada	Todos	Alta	Alta
<b>Controle de Areia</b>	Não	Baixa	Moderada	Baixa	Alta	Baixa

<b>Re-entrada</b>	Não	Baixa	Moderada	Entre moderada e alta	Alta	Alta
<b>Pressão Drawdown</b>	Insignificante	Insignificante	Baixa a moderada	Alta	Alta	Alta
<b>Lateral Fraturado</b>	Pode ser	Pode ser	Pode ser	Ñ pode ser	Ñ pode ser	Ñ pode ser
<b>Raio</b>	Todos os tipos	Curto, Médio ou Longo	Médio / Longo	Médio / Longo	Médio / Longo	Curto, Médio ou Longo

Neste momento, a busca está no aumento da confiabilidade, principalmente na aplicação das tecnologias mais complexas. Para tanto a análise probabilística de riscos torna-se uma ferramenta extremamente útil para este avanço.

## 4 ANÁLISE PROBABILÍSTICA DE RISCOS (PRA)

### 4.1 Histórico

Otterloo (1995) em seu artigo “*Probabilistic Risk Assessment: An Historic Overview from Determinism to Probabilism*”, levantou a dúvida de quem teria sido o primeiro analista de confiabilidade. Ele analisou os artigos publicados por três respeitados filósofos, listados abaixo:

- René Descartes, que escreveu em 1637 “*Discours de la methode*”;
- Pierre Simon de Laplace, que escreveu em 1812 “*Théorie analytique des probabilités*”;
- Charles Robert Darwin, que escreveu em 1859 “*On the origin of species by means of natural selection*”.

René Descartes, em seu artigo, formulou quatro regras que segundo ele, deve ser seguida quando uma análise for realizada, são elas: Não acredite em nada que não seja evidente; Solucione os problemas através de partição; Desenvolva partindo do simples para o complexo; Faça um registro tão completo seja possível. Comparando com os analistas de risco da atualidade, eles usam os seguintes princípios: Seja independente; Análise de Árvore de Falhas; Análise de Árvore de Eventos; FMEA.

Piere Simon Laplace escreveu o primeiro trabalho em estatística e probabilidade, que são os conceitos usados em nossa análise de risco e confiabilidade.

E Charles Darwin mostrou que sempre existirá uma batalha entre o *estresse* (meio ambiente) e a *resistência* (de uma espécie). Assim se o *estresse* vence, uma falha se constitui, e se a *resistência* vence, pode ser dito que ocorreu a chamada “sobrevivência do mais preparado”.

Com base nesta análise, Otterloo concluiu que Charles Darwin poderia ser considerado o primeiro analista de risco, uma vez que a analogia entre a *segurança* e a *sobrevivência* pode ser feita sem grandes distorções.

Por outro lado, René Descartes desenvolveu a base filosófica do método que tem aplicação em vasta área, inclusive em análise probabilística de riscos, uma vez que uma análise, por dedução simples, necessita de um método para ser desenvolvido. Darwin restringiu sua teoria estritamente no campo da Biologia, além de nunca ter tratado do acaso, uma vez que, se o acaso (azar) não definisse o futuro da evolução das espécies, os dinossauros ainda estariam vivos na terra, assim sendo Darwin não tratou das incertezas

inerentes à lei da sobrevivência onde sobrevive quem está mais preparado e têm mais sorte, eventos estes mutuamente exclusivos. Desta forma, Descartes pode ser considerado o pai da análise probabilística de riscos.

Um pouco antes da publicação do artigo de Darwin, George Boule (1854) escreveu “*Investigation of the Laws of thought*”, onde a Álgebra Booleana é elucidada. A importância deste trabalho é destacada pelo fato da Álgebra da Boule ser a base matemática para a análise de risco e confiabilidade.

Aproximadamente 100 anos depois, entre os anos 50 e durante a década de 60, a construção de projetos seguros eram baseados em métodos estritamente determinísticos. Um conceito utilizado nesta época era o *Maximum Credible Accident* (MCA). Nele, os cenários de falha eram gerados com base na *Máxima Conseqüência Crível* (*Máxima Conseqüência Acreditável*). A lógica aplicada neste método baseava-se na crença de que, se a planta fosse projetada para suportar todos os maiores acidentes acreditáveis (tais como terremotos, tornado de máxima escala, e etc), ela poderia resistir a qualquer outro tipo de acidente possível. Porém ainda havia um inconveniente a respeito do que é realmente “crível”.

A maior desvantagem da abordagem determinística é que a otimização da segurança é impossível. A partir deste momento, foi percebida a necessidade de evoluir o método de avaliação e construção de projetos seguros. E para que fosse possível otimizar a segurança dois fatores deveriam ser considerados, são eles *probabilidade* e *conseqüência* (Otterloo, 1995).

No início dos anos setenta a abordagem probabilística teve início. O risco não era mais uma mera *conseqüência*, ele se tornou uma função da *probabilidade* e *conseqüência*.

A partir daquele momento, foi possível analisar instalações industriais complexas através de Árvore de Falhas, Árvore de Eventos e FMEA para se obter um entendimento do risco e ser hábil em otimizar as barreiras de segurança (Otterloo, 1995).

Na história recente o maior projeto de análise de confiabilidade que se tornou conhecido em todo o mundo foi o “WASH-1400”, que também é conhecido pelo nome do líder da equipe que realizou a análise, “O relatório de Rasmussen”. Norman C. Rasmussen era professor do Massachusetts Institute of Technology (MIT), USA. Este trabalho foi realizado no ano de 1972, durou 3 anos, e é considerado o ponto decisivo na direção de como pensar na segurança de plantas nuclear, ou qualquer tipo de sistema com este mesmo fim (Garrick & Christie, 2002).

No estudo realizado por Rasmussen, dois diferentes tipos de reatores foram analisados (reator de ebulição da água e o reator de água pressurizada), os riscos destes reatores foram

analisados por meio de *Árvore de Falhas* e *Árvore de Eventos*. Os resultados foram comparados com os riscos que eram gerados pelo homem e risco de origem na natureza.

O rascunho do estudo do U.S. Nuclear Regulatory Commission apareceu no final de 1974, e foi o início do desenvolvimento contínuo da técnica chamada hoje em dia de *Análise Probabilística de riscos (PRA)* (Otterloo, 1995).

## 4.2 Introdução

A análise probabilística de riscos é um método de análise compreensível, estruturado e lógico. Que ajuda a identificar e avaliar o risco em sistema de tecnologia complexa, e também contribui para melhorias tanto na segurança quanto no desempenho, baseado em uma análise de custo – benefício (Stamatelatos et al. 2002b).

PRA vem se tornando uma ferramenta útil e respeitada na avaliação de segurança, sendo utilizada não somente nos na indústria nuclear e programas espaciais, mais também nas indústrias petroquímica, e plataformas offshore. A utilização da PRA no ramo petrolífero se dá por extremamente necessária, por conta das altas conseqüências envolvidas quando um acidente ocorre.

Esta metodologia mostrou que é importante além de examinar a baixa probabilidade e alta conseqüência, como são feitos em outros métodos, também é importante examinar os cenários onde a alta conseqüência emerge da combinação de múltiplos eventos de alta e até mesmo de baixa probabilidade. A PRA pode ser utilizada com o objetivo de avaliar o custo-benefício, comparando o investimento com a redução no risco, e assim colaborando de forma quantitativa para o apoio a decisão.

Com freqüência é encontrado o termo *Análise Probabilística da Segurança (PSA)* no lugar da *Análise Probabilística de riscos (PRA)*, isto ocorre devido a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA) acreditar que o termo “Risco” é parte integrante da avaliação da segurança, logo segundo IAEA, PSA é o termo mais apropriado a ser usado quando uma avaliação deste tipo é realizada (Niehaus, 2002).

Nos dias de hoje aproximadamente 200 Plantas de Energia Nuclear (NPP) tem utilizado PSA, e isto tem contribuído para o grande avanço na melhoria da segurança das instalações (Niehaus, 2002), e conseqüentemente na técnica.

Segundo Niehaus, (2002), a tendência agora é fazer mais uso de estrutura de “informação do risco e tomada de decisão”. Mais adiante será mostrado que o uso de Redes Bayesianas para PRA alcança este objetivo.

No encontro da IAEA em 2000, foram coletadas informações por meio dos especialistas e usuários sobre as aplicações e suas respectivas prioridades no uso da PRA em NPP, o resultado da pesquisa é mostrado na Tabela 4-1, (Niehaus, 2002).

**Tabela 4-1: Aplicações e respectivas prioridades do uso de PRA em NPP (Niehaus, 2002)**

<b>Aplicação</b>	<b>Prioridade</b>
Uso de PRA para apoiar o projeto da planta	Alta
Uso de PRA para apoiar as melhorias e ajustes na planta	Alta
Uso de PRA para avaliar os problemas de segurança	Alta
Uso de PRA para melhorar os programas de treinamento dos operadores	Alta
PRA baseada na avaliação e categorização dos eventos operacionais	Alta
Uso de PRA para melhorar os procedimentos operacionais de segurança	Média
Uso de PRA para apoiar o gerenciamento de acidente	Média
Risco baseado no controle da configuração	Média
Uso de PRA para apoiar a revisão periódica de segurança	Média
Uso de PRA na manutenção	Média
Uso de PRA em conexão com especificações técnicas	Média
Uso de PRA para apoiar o plano de emergência	Baixa
Risco baseado no indicador de segurança	Baixa
Grau de qualidade assegurada	Baixa

Com base nesta pesquisa, é possível perceber que a técnica tem uma vasta aplicação dentro da área nuclear. Contudo, estas aplicações podem ser realizadas em outras áreas, dada as devidas customizações, contribuindo da mesma forma para o avanço sob o ponto de vista da segurança, manutenção, treinamento e custos.

### **4.3 Conceitos Básicos de Risco**

Para que o conceito de risco seja compreendido, é necessário definir primeiramente a incerteza. Segundo Kumamoto & Henley (1996), a incerteza é o elemento central do risco e pode ser representada pelos vários resultados possíveis e sua probabilidade futura. Esta definição conduz ao entendimento clássico sobre incerteza, uma vez que a incerteza não existe quando o resultado futuro é único. Exemplo, uma moeda que possui ambas faces “cara”, segue esta premissa, uma vez que a probabilidade do evento “cara” ocorrer é igual a 1. Por ser o único resultado possível, não existe incerteza neste experimento. Logicamente,

todos os outros eventos pouco prováveis, tais como a perda da moeda entre outros, estão sendo desprezados.

Com base neste contexto, uma situação com duas alternativas extremamente opostas de igual probabilidade pode ser a mais arriscada. Exemplo, investir todo o capital em um “novo negócio”, que pode gerar um lucro no mínimo duas vezes maior que o investimento atual. Porém, este “novo negócio” não é certo, se ele der errado, o investidor perderá tudo. As duas conseqüências (o novo negócio dar certo ou dar errado) possuem probabilidade de 50% de ocorrer. Em uma definição menos formal, a situação é chamada “muito arriscada” quando severidade (ou níveis) de alternativas negativas ou suas probabilidades são altas.

Este último exemplo, reflete de forma aproximada o contexto de aplicação da técnica realizada neste trabalho, a diferença está no conhecimento acerca das probabilidades, que no problema ainda é algo desconhecido.

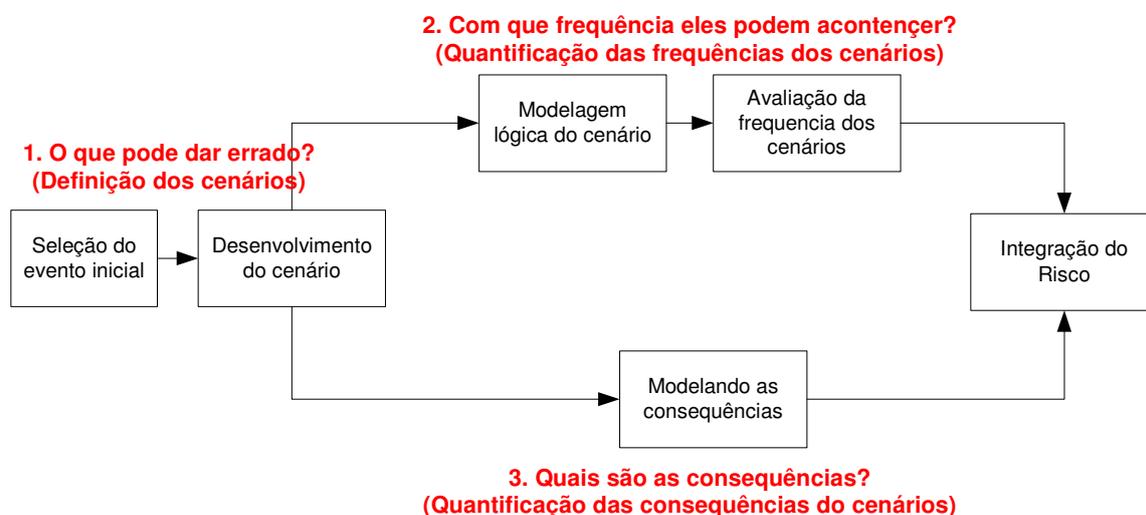
Risco possui muitas definições, porém todas têm em comum o fato de que ele é a combinação da conseqüência indesejada (cenário) e a probabilidade deste cenário ocorrer.

A definição mais comum de risco é o conjunto de três fatores, determinados através da resposta das três perguntas abaixo, (Stamatelatos et al. 2002b):

1. O que pode dar errado?
2. O quão provável ele é?
3. Quais são as conseqüências?

A resposta da primeira pergunta é o conjunto dos cenários de acidentes. A segunda resposta requer a avaliação da probabilidade deste cenário. A terceira estima as conseqüências de cada cenário analisado.

A Figura 4-1 mostra a implementação destes conceitos em uma PRA.



**Figura 4-1: Conceito de risco utilizado em PRA (Stamatelatos et al. 2002b)**

Este processo, inicia com o conjunto de “Eventos Iniciais” (EIs) que perturba o sistema (i.e. causa mudança no estado de operação ou configuração). Para cada EI, a análise procede pela determinação da falha adicional que pode conduzir a conseqüências indesejadas.

Outro conceito importante para o entendimento do risco é o de “perigo”. Segundo Niehaus, (2002), não existe uma definição científica para “perigo” e sim uma expressão coloquial que é “*a situação que tem potencial de gerar dano*”, sem o aspecto científico da quantificação. A quantificação é introduzida no termo científico “risco”. Desta forma, o termo “perigo” pode ser substituído por “*fonte de risco*”.

A IAEA não possui uma definição para o termo *perigo*, pois não está presente no glossário de terminologia usado por ela (Niehaus, 2002).

O perigo, comentado acima é o que se deseja atenuar ou eliminar, sua identificação é realizada através de técnicas denominadas *técnicas de identificação de perigo*, na literatura existe várias técnicas com este fim.

Outro conceito é o de *aceitação ao risco*, para o entendimento, será tomado o exemplo da análise da taxa de mortes por acidentes fatais nos U.S.

Exemplo:  $10^{-6}$  morrem nos U.S. por acidentes fatais em uma população de 23 milhões. Isto significa que 236 mortes adicionais ocorrem, além das decorrentes de morte natural. Nos U.S. o tempo de vida médio é de 70 anos. A morte de 236 pessoas pode ser vista como aceitáveis em comparação a 2 milhões de mortes anuais por causas não fatais.

**Nos U.S o risco anual de morte fatal  $\equiv (10^{-6}, \text{morte fatal})$ : aceitável.**

No atentado de 11 de setembro de 2001, morreram 2.819. Se a média anual de 236 mortes for tomada como base, pode-se dizer que este atentado equivaleu a 12 anos, i.e. o que seria considerado aceitável, se este mesmo número de morte tivesse ocorrido durante 12 anos, tornar-se totalmente inaceitável tendo ocorrido em um único dia.

Baseado nos conceitos apresentados acima é possível apresentar uma definição mais formal, se comparada com a primeira apresentada.

O Risco é formalmente definido como a combinação de cinco fatores primitivos: *cenário causal, conseqüências, probabilidade, população afetada e significância*.

*Cenário causal* é a seqüências de eventos que emerge do evento iniciador. O estado final indesejado atingido por esta seqüência, determina a *conseqüência*. Cada evento da seqüência de eventos é quantificado por meio das *probabilidades*. Com base na análise das conseqüências é possível determinar a *população afetada* (a população afetada é utilizada na análise probabilística de riscos, pelo fato dela ter surgido na indústria nuclear, onde a

principal consequência é o vazamento de material radioativo para o ambiente), e a *significância ou utilidade*.

A avaliação do risco determina a *cenário causal, consequência, probabilidade, e população afetada*. A *significância* por depender de julgamento, ela pertence à fase de gerenciamento do risco.

#### 4.4 Escopo da PRA

Na Figura 4-2, um fluxo típico de uma análise probabilística de riscos é apresentado, ele é clássico para a aplicação na indústria aéreo espacial. E será a partir dele, que a aplicação no problema da construção de poços multilaterais a análise probabilística será feita. Porém, customizações foram necessárias.

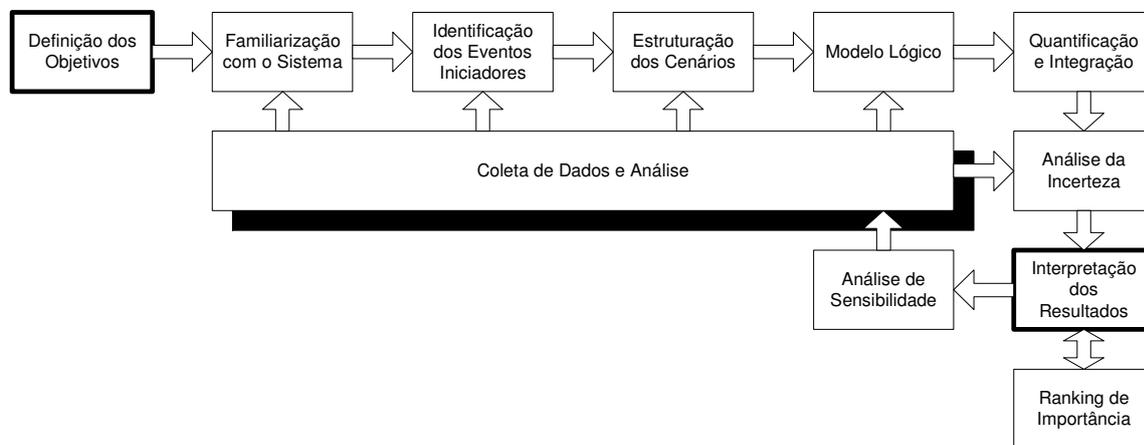


Figura 4-2: O fluxo típico das tarefas em PRA (Stamatelatos et al. 2002b)

**Definição dos objetivos:** Os objetivos da avaliação do risco deve ser bem definido, e as consequências de interesse (e estados) devem ser identificados e selecionados. Isto pode incluir itens como re-trabalho, manobra, peixe, erro na direção da janela, perda do lateral. Estes objetivos estão sempre relacionados ao insucesso da missão ou fase da missão;

**Familiarização com o sistema:** Familiarização do sistema sobre análise é o próximo passo. Isto cobre todas as informações de projeto e operacionalidade do sistema, incluindo engenharia. Inspeção visual do sistema neste ponto é recomendada se for possível;

**Identificação dos EI (Eventos Iniciadores):** Os EI é o conjunto dos eventos gatilho para as seqüências de eventos (cenário de acidente). Eles podem ser obtidos por *Master Logic Diagrams* (MLD) em plantas ou equipamentos ou *Hierarchical Task Analysis* (HTA) que é mais apropriada para analisar seqüência de atividades. EI independentes, que conduzem para cenários similares, são agrupados e suas freqüências são somadas para avaliar a freqüência do grupo iniciador;

**Modelagem dos cenários:** A modelagem para cada cenários de acidente procede por uma indução lógica, e ferramenta probabilística chamada Árvore de Eventos (AE). Uma AE inicia com um evento inicial (EI), e progride através de cenários, a série de sucesso ou falha de eventos intermediários são chamados de eventos pivôs, até que o estado final seja atingido. A ferramenta gráfica chamada de *Event Sequence Diagram* (ESD) é primeiramente usada para descrever um cenário de acidente, por ela ser mais apropriada que uma ET em relação à maneira de pensar de um engenheiro. A ESD deve ser convertida em uma ET para a quantificação;

**Modelagem da falha:** Cada falha (ou seu complementar, sucesso) de um evento principal em um cenário de acidente é geralmente modelada por uma ferramenta dedutiva e probabilística chamada Árvore de Falhas (AF). Uma AF consiste de três partes: o topo é chamado de Evento Topo (ET) e é o Evento Pivô (EP) da AE. Eventos intermediários, eles são os causadores do evento topo, estes eventos (intermediários) são conectados por portas lógicas (e.g., portas E e OU) entre eventos básicos e o topo. As árvores de falhas são conectadas e simplificadas (usando regras de redução Booleana) para apoiar a quantificação dos cenários do acidente. A árvore de falha é apropriada para modelar falha de equipamentos, porém no problema aplicado, a falha dos equipamentos não serão modelados. A modelagem da falha aplicada no problema, somente tratarão do erro humano, em função dos fatores de desempenho de forma, por meio da aplicação de rede Bayesiana como ferramenta de modelagem, que será tratado no Capítulo 7.

**Coleta dos Dados, Análises, e Desenvolvimento:** Vários tipos de dados podem ser colecionados e processados para na PRA. Dados são utilizados para quantificar os cenários, e eles podem ser do tipo: dados de taxa de falha, dados de tempo de reparo, probabilidades dos EI, probabilidade de erro humano, e probabilidade de falha de causa comum, etc.

**Quantificação e Integração:** A AF aparece no caminho (seqüência) onde cada cenário de acidente é logicamente conectado e quantificado. A freqüência da ocorrência de cada estado final na AE é o produto das freqüências dos EI e das probabilidades (condicionais) dos EP ao longo do caminho, este caminho se refere à seqüência de eventos que conduzir ao estado final. Os cenários são agrupados de acordo com cada estado final, definindo assim consequência de cada estado final. No problema, a integração será feita utilizando unicamente redes Bayesianas, onde serão integradas a modelagem da falha, que será o erro humano, e a seqüência de eventos. Todas na mesma rede Bayesiana;

**Análise de Incerteza:** Como parte da quantificação, análise de incerteza é realizada para avaliar o grau de conhecimento ou confiança do resultado do risco numericamente

calculado. Método de simulação Monte Carlo são geralmente usado em análise de incerteza, contudo outros métodos existem. No problema, a análise de incerteza não foi aplicada, ficando como recomendação para trabalhos futuros;

**Análise de Sensibilidade:** Análise de sensibilidade é também freqüentemente realizada em PRA e tem o objetivo de mostrar quais eventos de entrada, variando a probabilidade de ocorrência, podem causar grandes mudanças no resultado parcial ou final do risco. Da mesma forma que a análise de incerteza, a análise de sensibilidade ficará como recomendação para trabalhos futuros. Neste ponto, algumas análises foram de sensibilidade na modelagem da confiabilidade humana foram feitas.

## 4.5 Aplicações

A análise probabilística de riscos na indústria exploratória de petróleo, ainda é pouco aplicada. Isto é percebido pela falta de trabalhos divulgados em simpósios, congressos e jornais da área. Desta forma poucas aplicações serão apresentadas.

Moss (1990), comenta que no Reino Unido e a Noruega têm utilizado a análise probabilística de risco para avaliar o potencial de acidentes, nas operações offshore, com o objetivo de melhoria da segurança. Porém, ele relata que poucas são às vezes que a análise probabilística de riscos é aplicada neste tipo de indústria.

Burns (1991), apresentou a vantagem em se aplicar à análise probabilística do risco na indústria offshore. Ele defende que o mesmo avanço ocorrido na indústria nuclear, sob o ponto de vista da confiabilidade, por conta da aplicação da análise probabilística de riscos, pode ocorrer na indústria offshore se a aplicação da análise se tornar prática comum. Neste artigo é apresentado um modelo para avaliação do custo do ciclo de vida de uma instalação, com base na análise de disponibilidade. Além de uma análise voltada para identificar que eventos perigosos podem ser minimizados, em relação aos riscos com consequência relacionada a danos causados aos seres humanos, ao meio ambiente e aos equipamentos da instalação.

Pietersen & Engelhard (1991), realizaram uma avaliação do risco em plataformas offshore, neste trabalho os eventos iniciadores identificados para o problema apresentado foram os seguintes: Vazamento de Hidrocarboneto pelos equipamentos do processo e tubulações, falha das utilidades, falha na construção, redução de capacidade de produção, acidentes de helicópteros e colisão de navio.

Em geral as análises probabilísticas do risco são realizadas em operação de plataformas offshore, pelo fato dos riscos serem bastante elevados se comparado a plataformas onshore.

Em seguida serão apresentadas algumas aplicações da PRA na indústria nuclear.

A PRA pode ser utilizada como ferramenta para “otimização” da manutenção, Perryman, Foster & Nicholls (1995) realizaram uma análise com o objetivo de aumentar a segurança da planta e reduzir os custos de manutenção. Apesar destes objetivos aparentemente serem contraditórios, os autores mostraram que é possível alcançar ambos de forma simultânea. Com este objetivo, a estação de energia nuclear de Koeberb foi estudada. Ela possui duas unidades de força com 922 MW cada, a primeira teve início de operação em junho 1984.

Eles inicialmente classificaram os componentes em uma lista de importância obtida pelo critério de Fussel-Vesely, nele são obtidas as probabilidades de falha dos componentes dado que o “acidente” ocorreu. A partir desta lista, foram criterizados os componentes que deve possuir uma maior exigência na manutenção, eles também são agrupados em três categorias, (1) relacionamento crítico com a segurança, (2) relacionamento com a segurança, e (3) não relacionado com a segurança. Outro critério também é utilizado para avaliar o sistema, o chamado critério *Risk Achievement*, nele é considerado a falha do componente, e é observada a probabilidade do “estado final” ocorrer, este critério avalia o risco de se operar o sistema com parte do sistema falho. Em conjunto com o critério de Fussel-Vesely é definido o nível de manutenção necessária para cada componente e o controle de qualidade requerida. Com base nos critérios apresentados foi realizada uma análise na bomba trocadora de calor, onde ao final da análise ficou comprovada uma redução de 70% na taxa de falha. O gerador diesel de energia também foi analisado, conduzindo a uma redução na indisponibilidade de 20% em 1990 para 2,14% em 1993.

Assim foi mostrado que a análise probabilística de riscos melhora a manutenção e segurança da planta, e através dela são identificados os componentes críticos para a segurança, conduzindo assim a um maior rigor no regime de manutenção e controle de qualidade, estas ações resultam em redução considerável no aspecto financeiro e tempo. Porém para que seja possível se beneficiar desta análise, dados de confiabilidade dos componentes da planta são essenciais.

Aneziris, et al. (2004), realizou uma Análise Probabilística da Segurança Nível 1 para o *Greek Research Reactor (GRR-1)* do Centro Nacional de Pesquisa Científica “Demokritos”. Este trabalho foi realizado como parte da inspeção e revisão da análise da segurança em reator, que ocorreu com o objetivo de avaliar a troca do combustível deste reator. A PSA

Nível 1 foi realizada identificando eventos e seqüências de eventos que pudessem conduzir a cenários que pudessem ultrapassar os limites de segurança da planta e depois quantificá-los.

Na seqüência será feito um breve comentário sobre inferência Bayesiana, isto se faz necessário, pois ela foi à base para o desenvolvimento das redes Bayesianas apresentadas mais adiante.

## 5 INFERÊNCIA BAYESIANA

### 5.1 Introdução

Rer. Thomas Bayes (1702-1761), em seu famoso artigo publicado postumamente (Thomas Bayes (1763), *An Essay Towards Solving a Problem in the Doctrine of Chances*) fornece a base para o método conhecido como “Inferência Estatística Bayesiana”. Bayes combina dois corpos de evidência com o objetivo de realizar um refinamento da informação, evidência epistêmica (probabilidade *a priori*; opinião do especialista, etc.), e frequêntista (dados, frequência relativa, função de verossimilhança, etc.), esta combinação gera uma probabilidade dita *a posteriori* (Campello de Souza, 2002).

Devido à importância do artigo, ele tem sido constantemente republicado. Porém, desde a sua publicação, o interesse tem alternado entre períodos de aceitação e rejeição do método, como base para a inferência estatística (Martz & Waller, 1982).

Segundo Martz & Waller (1982), alguns fatores contribuem para o ressurgimento.

Primeiro, o trabalho de alguns autores, tais como DeFinetti (1937), Good (1950), Jeffreys (1961), Lindley (1965), Ramsey (1931), e Savage (1954), forneceu a base filosófica para este método.

O segundo argumento diz que as outras teorias se baseiam em pré-consideração restritiva, que conduzem a análise muitas vezes para algo fora da realidade, estas considerações são basicamente para fornecer uma solução matemática conveniente.

O terceiro se baseia no fato do surgimento de computadores de alta velocidade, permitindo que uma vasta classe de análise de dados possa ser considerada e comparada.

O quarto argumento está relacionado ao interesse dos especialistas por métodos que incorporam vários recursos de dados, isto é, dados subjetivos e objetivos para uma análise.

### 5.2 Probabilidade Subjetiva

A probabilidade subjetiva é uma área da probabilidade que não trata somente de *eventos*, mais também de *proposições*, nela a probabilidade reflete o nível de confiança em uma *proposição*. (Martz & Waller, 1982). Uma *proposição* é considerada como uma oração declarativa que pode ser classificada de verdadeira ou falsa, e que não pode ter sua resposta obtida por meio de uma série de repetições (i.e., na prática a probabilidade dita subjetiva não pode ser adquirida por meio de experimentos, tal como um jogo de dados, desta forma é dito que a probabilidade subjetiva trabalha como proposições). No jargão estatístico, a palavra

*hipótese* é usada no lugar da palavra *proposição*, isto se dá pelo fato da hipótese está relacionada ao interesse sobre a proposição aceita como verdadeira. Uma nova evidência eleva a relevância da *hipótese* e então muda o grau de crença sobre ela.

Segundo Martz & Waller (1982), a probabilidade subjetiva reflete o grau de crença a respeito de uma *proposição*.

O grau de confiança (crença) é uma medida de conhecimento a respeito de uma proposição ou evento. Por conta disto, ele é subjetivo por essência. É uma medida de incerteza, que representa o estado mental e não o mundo externo (Droguett, 2002).

### 5.3 Inferência Clássica versus Inferência Bayesiana

A inferência baseada na Inferência Clássica é diferente da realizada na inferência Bayesiana. São duas escolas diferentes, com relação à interpretação e conseqüentemente aplicação da probabilidade, dita frequêntista (Clássica) e subjetivista (Bayesiana).

#### 5.3.1 Inferência Clássica

Na inferência clássica, a probabilidade é o limite tendendo ao infinito da frequência relativa da ocorrência de um resultado desejado, pelo número de vezes em que o experimento em questão é realizado. Formalmente, a probabilidade de um evento E é dado por:

$$\Pr(E) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_E}{N}$$

**Equação 5-1**

Onde  $N_E$  é o número de vezes em que o evento desejado (E) ocorre;

N é o número total de tentativas (repetições);

P(E) é a razão se tal limite existe (i.e. N tende ao infinito).

De acordo com a Figura 5-1, o método da teoria amostral tem início na postulação do modelo amostral mais adequado para os dados existentes, em seguida um argumento indutivo é usado na conjunção da observação amostral, produzindo inferência acerca do parâmetro do modelo assumido.

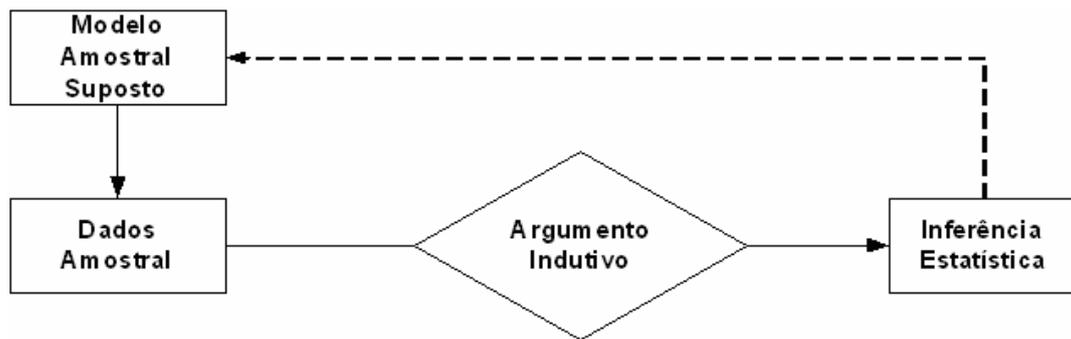


Figura 5-1: Inferência baseada na teoria amostral (Martz & Waller, 1982)

### 5.3.2 Probabilidade Condicional

A probabilidade condicional é à base da teoria de Bayes, logo para uma melhor compreensão dos conceitos de inferência de Bayesiana e posteriormente das Redes Bayesianas, esta breve introdução será feita.

Dois eventos são ditos *independentes*, quando a probabilidade de ocorrência de um não afeta a do outro, e.g., em um jogo de moedas, a probabilidade de sair uma “cara na décima jogada” (C10), não gera qualquer influência na probabilidade de sair “cara na décima primeira” (C11).

Desta forma, a probabilidade de sair cara na décima e décima primeira jogada é:  $\Pr \{C10 \ C11\} = \Pr \{C10\} \cdot \Pr \{C11\} = (0,5) \cdot (0,5) = 0,25$ . Neste caso, quando os eventos são independentes, o uso da probabilidade condicional não se faz necessário.

Porém, quando dos eventos são ditos *dependentes*, a probabilidade condicional é utilizada nos cálculos probabilísticos.

Dois eventos são ditos dependentes, quando a probabilidade de ocorrência de um afeta (aumentando ou diminuindo) a probabilidade do outro, e.g., em uma urna contendo três bolas brancas e 2 bolas pretas. Seja P1 o evento “a primeira bola retirada é preta” e P2 o evento “a segunda bola retirada é preta”, as bolas não são recolocadas depois da retirada.

Desta forma, a probabilidade de P1 é,  $\Pr = \{P1\} = 2/(2+3) = 2/5$ , enquanto que a probabilidade de P2 é,  $\Pr = \{P2/P1\} = 1/(1+3) = 1/4$ . Então, a probabilidade de ambas bolas retiradas serem pretas é:  $\Pr = \{P1 \ P2\} = \Pr \{P1\} \Pr \{P2/P1\} = 2/5 \cdot 1/4 = 1/10$ . Quando os eventos são dependentes, o uso da probabilidade condicional faz necessário, como neste caso.

### 5.3.3 Inferência Bayesiana

Antes de iniciar a dedução do teorema de Bayes, um breve comentário sobre Probabilidade condicional será feita. Seja “ $\Omega$ ” um espaço amostral, “A” um evento e “E” uma evidência. O símbolo  $P(A/E)$  é a *probabilidade condicional do evento “A”, uma vez*

que “E” ocorreu. Quando calcula-se  $P(A/E)$  tudo se passa como se “E” fosse o novo espaço amostral “reduzido” dentro do qual, queremos calcular a probabilidade de “A”.

Então se um experimento aleatório for repetido  $N$  vezes, sejam  $n_A$ ,  $n_E$  e  $n_A \cap n_E$  o número de vezes que ocorrem A, E e  $A \cap E$ , respectivamente. A frequência relativa de A, naqueles resultados que E ocorre é  $(n_A \cap n_E/n_E)$ , isto é, a frequência relativa de A condicionada a ocorrência de E.

$$(n_A \cap n_E/n_E) = [(n_A \cap n_E)/N]/(n_E/N) = f_{A \cap E}/f_E$$

**Equação 5-2**

onde  $f_{A \cap E}$  e  $f_E$  representam as frequências relativas da ocorrência de  $A \cap E$  e de E respectivamente. Então quando  $N$  é grande,  $f_{A \cap E}$  se aproxima de  $P(A \cap E)$ , e  $f_E$  se aproxima da  $P(E)$ . Deste ponto surge a definição da Equação 5-3, aplicada o teorema da multiplicação.

A Equação 5-3 diz que, a probabilidade da ocorrência simultânea de dois eventos ( $P(A \cap B)$ ) é o produto da probabilidade de um deles, pela probabilidade do outro dado o primeiro, i.e., a probabilidade da ocorrência simultânea do evento “A” e a evidência “E”, é igual ao produto da probabilidade da evidência “E” pela probabilidade do evento “A” dado a ocorrência da evidência “E”.

Dado o evento “A” e a evidência “E”, temos que:

$$\Pr(A \cap E) = \Pr(E) \Pr(A/E)$$

**Equação 5-3**

Equação 5-4 segue a mesma definição mostrada na Equação 5-3, nesta as parcelas são invertidas.

$$\Pr(E \cap A) = \Pr(A) \Pr(E/A)$$

**Equação 5-4**

A Equação 5-5 expressa a igualdade entre as intersecções, de acordo com a propriedade comutativa.

$$\Pr(A \cap E) = \Pr(E \cap A)$$

**Equação 5-5**

A Equação 5-6 mostra a substituição das parcelas da igualdade apresentadas na Equação 5-5, pelas respectivas igualdades apresentadas na Equação 5-3 e Equação 5-4.

$$\Pr(A/E) \Pr(E) = \Pr(E/A) \Pr(A)$$

**Equação 5-6**

Na Equação 5-7 a parcela  $\Pr(A/E)$  é isolada, e assim o teorema de Bayes é obtido.

$$\Pr(A/E) = \frac{\Pr(E/A)\Pr(A)}{\Pr(E)}$$

Equação 5-7

No teorema de Bayes os termos possuem definições específicas, são elas:

**Pr (A/E)** é denominado a probabilidade *a posteriori* de “A” dada a evidência “E”, que significa a ocorrência da evidência “E”.

**Pr (E/A)** é a *verossimilhança* da evidência assumindo a ocorrência de “A”.

**Pr (A)** é a probabilidade *a priori* do evento “A”.

**Pr (E)** é o termo de normalização.

$$\Pr(E) = \Pr(E/A)\Pr(A) + \Pr(E/\bar{A})\Pr(\bar{A})$$

Equação 5-8

Para um melhor entendimento de como a inferência Bayesiana opera, um exemplo será apresentado:

Exemplo 1: *A avaliação inicial de um engenheiro sobre os possíveis valores da taxa de falha  $\lambda$  de um componente, é representada na forma da distribuição de probabilidade na Equação 5-9. O componente opera por 10.000 horas durante as quais o mesmo falha uma vez. O engenheiro em questão gostaria de obter a distribuição de probabilidade atualizada de  $\lambda$  dado a nova informação.*

$$\Pr_0(\lambda) = (2000)^2 \lambda e^{-2000 \lambda} \quad 0 \leq \lambda \leq \infty$$

Equação 5-9

A evidência dada no problema diz que  $E = \{1 \text{ falha em } 10.000 \text{ horas}\}$ .

$$\Pr(\lambda/E) = \frac{L(E/\lambda)\Pr_0(\lambda)}{L(E)}$$

Equação 5-10

Diante desta nova informação, o teorema de Bayes é utilizado para atualizar o estado de conhecimento sobre a taxa de falha do componente.

Para modelar a evidência, a distribuição de probabilidade de Poisson será utilizada.

$$L(1 \text{ falha em } 10.000/\lambda) = (10.000)\lambda e^{-10.000\lambda}$$

Equação 5-11

A partir da função verossimilhança e da distribuição *a priori* o  $L(E)$  do teorema de Bayes  $\Pr(\lambda/E) = \frac{L(E/\lambda)\Pr_0(\lambda)}{L(E)}$  pode ser calculado:

$$L(E) = \int_0^{\infty} (10.000)\lambda e^{-10.000\lambda} (2.000)^2 \lambda e^{-2000\lambda} d\lambda$$

Equação 5-12

$$L(E) = \int_0^{\infty} (10.000)\lambda e^{-10.000\lambda} (2.000)^2 \lambda e^{-2000\lambda} d\lambda$$

Equação 5-13

$$L(E) = \int_0^{\infty} (4x10^{10} \lambda^2 e^{-12.000\lambda}) d\lambda$$

Equação 5-14

$$L(E) = 4,63x10^{-2}$$

Equação 5-15

Desta forma a distribuição a *posteriori* é obtida a partir do teorema de Bayes, onde:

$$\Pr(\lambda/1 \text{ falha em } 10.000 \text{ h}) = \frac{(10.000)\lambda e^{-10.000\lambda} (2.000)^2 \lambda e^{-2000\lambda}}{4,63x10^{-2}}$$

Equação 5-16

$$\Pr(\lambda/1 \text{ falha em } 10.000 \text{ h}) = \frac{4x10^{10} \lambda^2 e^{-12.000\lambda}}{4,63x10^{-2}} = \frac{12.000^3 \lambda^2 e^{-12.000\lambda}}{2} \quad 0 \leq \lambda \leq \infty$$

Equação 5-17

A Equação 5-17 representa a nova distribuição de probabilidade de  $\lambda$  dado a evidência 1 falha em 10.000 horas.

Para maiores detalhes sobre inferência Bayesiana, Martz & Waller (1982) e Campello de Souza (2002).

Para o problema, a rede Bayesiana será utilizada como ferramenta de modelagem da confiabilidade humana e da seqüência de eventos. Por este motivo, o capítulo seguinte trata deste tema.

## 6 REDES BAYESIANAS

### 6.1 Introdução

As Redes Bayesianas foram desenvolvidas início dos anos 80 para facilitar a tarefa de predição e “abdução” em sistemas de Inteligência Artificial (AI) (Pearl, 2000).

Em resumo, Redes Bayesianas (RB) também conhecidas como redes de opinião, redes causais, gráficos de dependência probabilística, são modelos gráficos para raciocínio (conclusões) baseado na incerteza, onde os nós representam as variáveis (discreta ou contínua), e os arcos representam a conexão direta entre eles (Korb & Nicholson, 2003). Ela vem se tornando a metodologia padrão para a construção dos sistemas que confiam no conhecimento probabilístico e tem sido aplicado em uma variedade de atividades do mundo real (Bobbio, et al., 2001).

A inferência Bayesiana mostrada anteriormente 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). Por conta disto às redes Bayesianas são recomendadas na modelagem de sistemas complexos. A relação de dependência é tratada pela propriedade Markoviana, que é atribuída às variáveis aleatórias envolvidas no sistema.

Os processos Markovianos possuem como uma de suas características a falta de memória, a propriedade Markoviana diz que o sistema está no estado  $i$  no instante  $t$ , i.e.,  $X(t) = i$ , os estados futuros  $X(t+v)$  não depende dos estados anteriores  $X(u)$ ,  $u < t$ . Ou seja, quando o estado atual é conhecido, a probabilidade de qualquer comportamento futuro do processo não é modificada com o conhecimento adicional sobre o seu comportamento passado (Droguett, 2002).

Probabilisticamente, a propriedade Markoviana é dada por:

$$P[X(t+v) = j / X(t) = i, X(u) = x(u)] = P[X(t+v) = j / X(t) = i]$$

**Equação 6-1**

Para todo  $x(u)$ ;  $0 \leq u < t$ .

Para saber detalhe sobre a propriedade Markoviana, aplicada a redes Bayesianas, recomenda-se (Pearl, 2000) e (Korb & Nicholson, 2003).

As redes Bayesianas são grafo acíclico direcionado, e por definição um Grafo Acíclico Direcionado (GAD) é um grafo direcionado que não possui ciclos, isto é, seus arcos são

unidirecionais de forma que, partindo-se de qualquer um dos elementos de  $V$  é impossível que se retorne ao mesmo.

Matematicamente, a RB é um par  $N = \langle \langle V, E \rangle, P \rangle$  onde  $\langle V, E \rangle$  são os nós e as arestas dos GAD, respectivamente, e  $P$  é a distribuição de probabilidade a respeito de  $V$ . Variáveis discretas aleatórias  $V = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$  são distribuídos para os nós, enquanto as arestas  $E$  representam o relacionamento causal probabilístico entre os nós.

## 6.2 Estrutura

A estrutura da RB é uma representação gráfica da relação qualitativa entre variáveis. A conexão entre dois nós só deve existir, se um afeta ou causa o outro, e esta relação de causa e efeito é indicada pela direção das setas, que parte da causa em direção ao efeito. Assuma  $G=(V,A)$ , e um par  $(Y,X) \in A$ ,  $Y$  é pai de  $X$ , então  $X$  é filho de  $Y$  se existir um arco partindo de  $Y$  em direção a  $X$ . Pode ser dito também que  $X$  é descendente de  $Y$  e  $Y$  é ancestral de  $X$ . Um nó é chamado raiz, se não existir um pai para ele, e é chamado de folha, se ele não possuir filho.

Para uma melhor compreensão destes conceitos, observe a na Figura 6-1 (b), têm-se que  $Z$  é pai de  $X$ , que por sua vez é pai de  $W$ .  $Z$  é ancestral de  $X$  e de  $W$ .  $W$  é descendente de  $X$  e de  $Z$ .  $Z$  é o único nó raiz da rede; por ele não possuir pai e por só existir um caminho de  $Z$  a  $W$ ,  $[Z, X, W]$ ,  $W$  é o nó folha deste rede. Por estes motivos que a Figura 6-1 (b) é um DAG, uma vez que partindo de  $Z$  chega-se a  $X$  ou a  $W$ , partindo-se de  $X$  chega-se a  $W$  que por sua vez não permite passagem, desta forma não é possível retornar para o nó inicial, independente de quem seja ele.

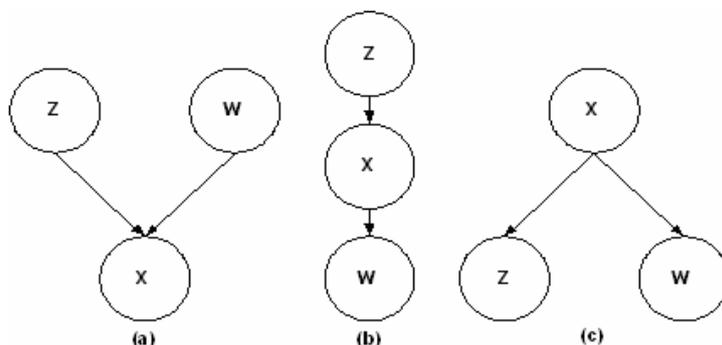


Figura 6-1: Redes Bayesianas Típicas

## 6.3 Nós e Valores

Para a construção de uma RB, o primeiro passo está relacionado à identificação das variáveis de interesse. Para tanto, é necessário responder as perguntas: O que os nós

representam e que valores eles podem assumir? Para variáveis discretas, o valor das variáveis deve ser tanto mutuamente exclusivo quanto exaustivo, i.e., a variável deve assumir somente um valor no tempo. Alguns tipos de nós discretos são:

- **Nós Booleanos:** São proposições que assumem valores binários, e.g. verdadeiro e falso;
- **Valores ordenados:** Um exemplo deste tipo de nó é a variável consequência, pois ela pode assumir valores do tipo, baixa, media e alta;
- **Valor integral:** Para este tipo de nó, a variável idade é um bom exemplo, uma vez que ela pode assumir valores de 1 a 120 anos, por exemplo.

#### 6.4 Propriedade das Redes Bayesianas

As Redes Bayesianas, pode ser caracterizada pelo tipo de conexão básica: série, divergente e convergente (Figura 6-1). A conexão do tipo em série e divergente, Figura 6-1 (b) e (c) respectivamente, possui a característica onde mudança no estado de  $Z$  irá afetar o estado de  $W$  uma vez que a variável intermediária  $X$  não foi instanciada, porém se  $X$  for instanciado  $Z$  torna-se pouco relevante na avaliação de  $W$ , i.e., se  $X$  é conhecido, o estado de  $Z$  não influencia o estado de  $W$  e vice versa, Figura 6-1 (b) e (c) respectivamente. No caso onde a conexão é do tipo convergente (Figura 6-1 (a)), uma evidência da variável intermediária  $X$  torna os descendentes  $X$  e  $W$  independentes, esta propriedade é denominada *d-Separação*.

A ativação de dependência é outra propriedade de relacionamento entre variáveis das redes Bayesianas, ela aparece em conexões do tipo convergente, que possui uma variável filho  $X$  em comum, como na Figura 6-1 (a). Esta propriedade modela os casos onde a variável  $X$  ocorre e uma das variáveis  $Z$  ou  $W$  é evidenciada, como resultado ocorrerá uma redução na probabilidade da variável não evidenciada. Exemplo, um sistema de alarme é instalado em uma residência, é sabido que ele é ativado somente por duas causas distintas, terremoto ou furto, não existe informação para crer que estas variáveis são dependentes, logo se o alarme foi acionado e um furto foi comprovado, a probabilidade de ter ocorrido um terremoto é desprezado.

Em redes Bayesianas, a relação de causa e efeito, i.e., relação de dependência condicional, entre as variáveis é mostrada através de funções de distribuição (ou densidade) de probabilidades condicionais.

No caso de variáveis discretas, as possíveis combinações de valores entre os nós parentes são apresentadas na tabela de probabilidade condicional, tal combinação é chamada de instanciação dos conjuntos dos parentes.

## 6.5 Atualização da Crença

A atualização da crença também conhecida como propagação da probabilidade ou inferência, é desempenhada pela propagação da informação através da rede. Em redes Bayesianas a propagação da informação não se limita à direção dos arcos, nela ocorre à computação das probabilidades posteriores dos nós desconhecidos, a partir do valor de algum nó evidência. Esta atualização é dividida em quatro diferentes tipos de raciocínio, que serão descritos na seção seguinte. A partir de uma RB montada, ela pode ser atualizada com base em novas evidências, na seção 6.7 será apresentada alguns tipos de evidências e como a atualização da crença de processa na rede Bayesiana.

## 6.6 Tipos de Raciocínio

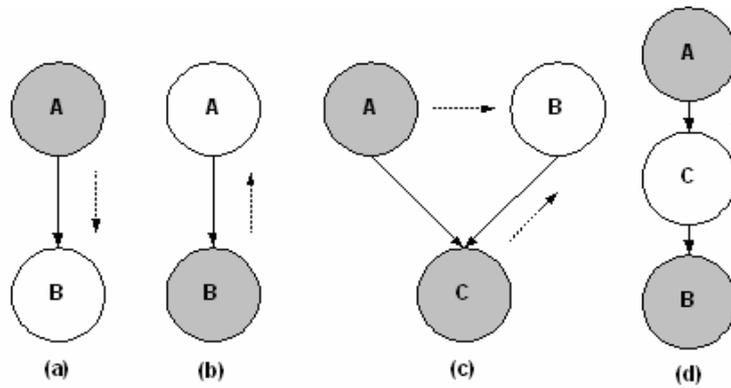
Os tipos de raciocínio são as formas de atualização da rede com base na(s) evidência(s) obtidas, abaixo são apresentados os diferentes tipos de raciocínio.

**Raciocínio Préditivo**, Figura 6-2 (a). Nela a evidência surge na causa para atualizar a crença sobre o(s) efeito(s), i.e., do pai para o filho. Nela a atualização ocorre no mesmo sentido do arco da rede. Entenda o destacado como a evidência, que neste caso é o nó A.

**Raciocínio Diagnóstico**, Figura 6-2 (b). A evidência parte do efeito para atualizar a crença sobre a(s) causa(s), i.e., do nó filho para o pai. Nele a atualização ocorre no sentido contrário ao arco da rede. A evidência é o nó B.

**Raciocínio Inter-causal**, Figura 6-2 (c). Nela o raciocínio envolve evidências de causa mútua com um efeito comum. As evidências são os nós A e C.

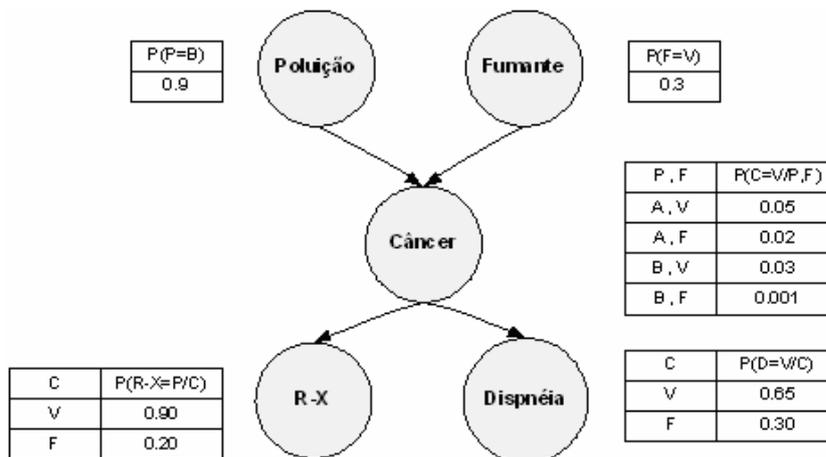
**Raciocínio Combinado**, Figura 6-2 (d). Neste é evidenciado o nó raiz A e o nó folha B, desta forma ocorre uma atualização da crença sobre o nó intermediário C. As evidências são os nós A e B.



**Figura 6-2: Tipos de Raciocínio: (a) Preditiva, (b) Diagnostica, (c) Inter-casual e (d) Combinado (Korb & Nicholson, 2003)**

Como base no exemplo abaixo, Figura 6-3, a atualização da crença via o tipo de raciocínio preditivo será apresentada em maior detalhe.

Exemplo 2: O câncer de pulmão é uma doença bastante estudada da medicina, por este motivo, é possível construir uma rede Bayesiana envolvendo os principais causadores (poluição e fumante) e os principais sintomas apresentados (R-X e Dispneia). Se a poluição no ambiente em que o paciente vive for alta (A), então a probabilidade dele ter câncer aumenta. Se ele é fumante a mesma tendência segue. Em relação aos sintomas (R-X e Dispneia), se o paciente tem câncer (V), isto aumenta a chance dele apresentar um R-X positivo (P), da mesma forma com dispneia isto ocorre.



**Figura 6-3: Rede Bayesiana para o problema do câncer (Korb & Nicholson, 2003)**

Então as probabilidades, sem que nenhuma observação (evidência) específica, apresenta-se conforme a Tabela 6-1. Onde, as variáveis são: P → poluição, F → fumante, C → câncer, X → Raios-X e D → Dispneia, e os valores são: A → alta, V → verdadeira, Pos → positiva e V → verdadeiro.

Na rede Bayesiana, os cálculos das probabilidades se dão conforme apresentado abaixo.

A probabilidade de a poluição ser baixa (P=B) é igual a 0,9, logo a probabilidade da poluição ser alta (P=A) é igual a 0,1.

A probabilidade de um paciente ser fumante (F=V) é igual a 0,3, logo a probabilidade de um paciente não ser fumante (F=F) é igual a 0,7.

A probabilidade de um paciente ter câncer depende das condições poluição e fumante, então, a probabilidade de uma paciente ter câncer (C=V) é calculada conforme abaixo:

Assuma:

C=V como C, e C=F como -C;

P=A como P, e P=B como -P;

F=V como F, e F=F como -F.

Então,

$$p(C=V) = p(C / P, F) \cdot p(P, F) + p(C / -P, F) \cdot p(-P, F) + p(C / P, -F) \cdot p(P, -F) + p(C / -P, -F) \cdot p(-P, -F)$$

**Equação 6-2**

Como as probabilidades da poluição (P) e fumante (F) são independentes, nada leva a crer o contrário, então  $P(P, F) = P(P) \cdot P(F)$ .

Com base na tabela de probabilidade (condicional), a probabilidade de um paciente ter câncer é 0,01163, logo a de não ter é 0,98837.

Na Tabela 6-1 são apresentados os valores das probabilidades dos nós da rede Bayesiana.

**Tabela 6-1: Tabela de probabilidades da rede Bayesiana sem evidência**

	Sem evidência
p(P=A)	0,100
p(F=V)	0,300
p(C=V)	0,011
p(X=Pos)	0,208
p(D=V)	0,304

Agora assumo que um determinado paciente é fumante (evidência), então se deseja saber qual é a probabilidade daquele paciente em específico ter câncer.

$P(C=V / F=V)$ ; desta forma, na Equação 6-2, as probabilidades  $P(F=V)$  assumem valor 1, e  $P(-F)$  assumem valor 0. Desta forma a equação fica:

$$p(C=V) = p(C / P, F) \cdot p(P) \cdot 1 + p(C / -P, F) \cdot p(-P) \cdot 1 + p(C / P, -F) \cdot p(P) \cdot 0 + p(C / -P, -F) \cdot p(-P) \cdot 0$$

**Equação 6-3**

Substituindo as probabilidades, a probabilidade deste paciente ter câncer é de 0,032.

Este foi um exemplo de raciocínio preditivo, i.e., onde a informação sobre as causas atualiza a crença a respeito das conseqüências.

## 6.7 Tipos de Evidências

Na seção 6.5, foi visto que a rede pode ser atualizada como base em novas informações, denominada evidência. Aqui serão tratados os diferentes tipos de evidência.

**Evidência Específica** é definida como sendo aquela em que a variável (nó)  $X$  assume um valor em particular  $x$ , i.e,  $X=x$ . quando isto ocorre é tipificado este tipo de evidencia.

**Evidência Negativa** é o caso onde uma evidência é observada, nela é percebido que a variável  $Y$  pode assumir os valores  $y_1$  e  $y_2$ , isto implica em dizer que todos os outros valores são impossíveis. Este mesmo tipo de evidencia, também denomina o caso onde a evidência diz que a variável  $Y$  não está no estado  $y_1$ , porém pode assumir qualquer outro estado.

**Evidência Virtual** denomina o caso onde, por exemplo, um exame de Raios-X é realizado e o radiologista, pela análise dos Raios-X, diagnostica como positivo, porém ele não está certo deste valor, inferindo uma probabilidade de 80% de certeza. Para este caso é realizado tratamento probabilístico onde uma nova distribuição a *posteriori* é adotada. Ela também é conhecida por **Evidência Verossimilhança**.

A utilização das evidências aplicada nas redes Bayesiana, para atualizar o estado atual de conhecimento, em PRA as evidências servirão para o gerenciamento do risco, com base das técnicas de Fussel-Vesely, e *Risk Achievement*.

## 6.8 Convertendo Árvore de Falhas em Redes Bayesianas

Abaixo, é mostrada a metodologia padrão utilizada em análise de árvore de falhas:

1. Os eventos são binários (funciona / não funciona);
2. Os eventos são estatisticamente independentes;
3. A relação entre eventos e causas são representados pelas portas lógicas E e Ou;
4. O objetivo da árvore de falhas, é a análise do evento topo, que é um evento indesejado.

Uma variável  $X$  pode ser adotada para indicar o resultado do evento  $E$ , para tanto é adotado os valores 1 ou 0.

$$X \Rightarrow \begin{cases} 1, & \text{se } E \text{ é Verdadeira} \\ 0, & \text{se } E \text{ é Falsa} \end{cases}$$

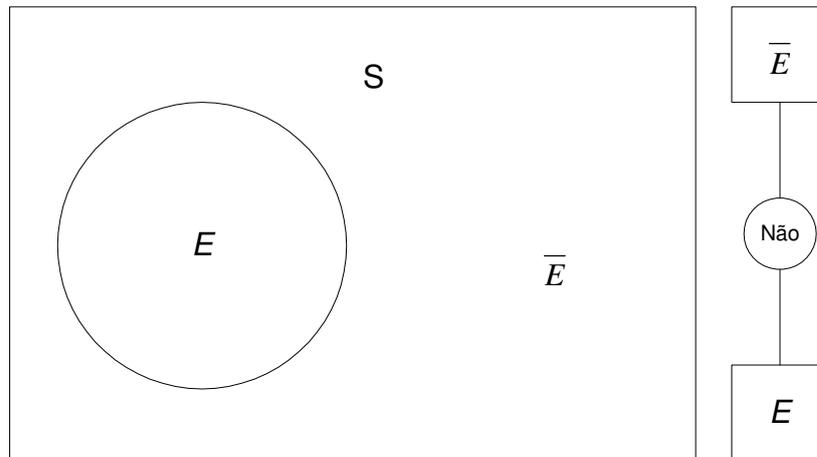
Este indicador de variável será útil em operação Booleana.

As três operações Booleana básicas são: negação, interseção, e união.

**Complementar de um evento (negação)**

Para o evento  $E$ , é definido o complementar  $\bar{E}$ , então:  $\bar{E}$  é falso quando  $E$  é verdadeiro. O indicador da variável é a expressão.

$$\bar{X}_E = 1 - X_E$$



**Figura 6-4: A operação Negação**

Na Figura 6-4, é mostrado o diagrama de Venn para a operação negação, além da porta lógica “Negação”.

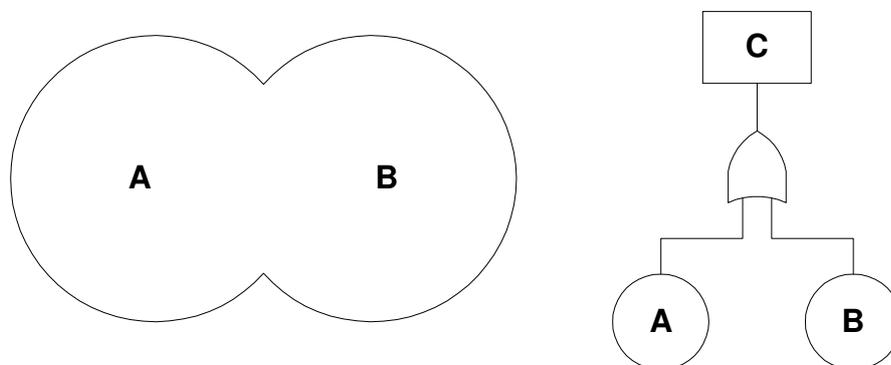
Em uma modelagem por árvore de falhas as portas lógicas E e OU são primitivas e todas as outras são derivadas delas. Portanto, sendo possível a conversão das portas lógicas E e OU para redes Bayesianas, todas as outras também serão.

### 6.8.1 Evento União (Diagrama de Venn e Árvore de Falhas)

Dado dois eventos,  $A$  e  $B$ , que gera o terceiro evento  $C$ , de forma que  $C$  é verdadeiro quando  $A$  ou  $B$  é verdadeiro. A porta lógica OU é mostrada na Figura 6-5.

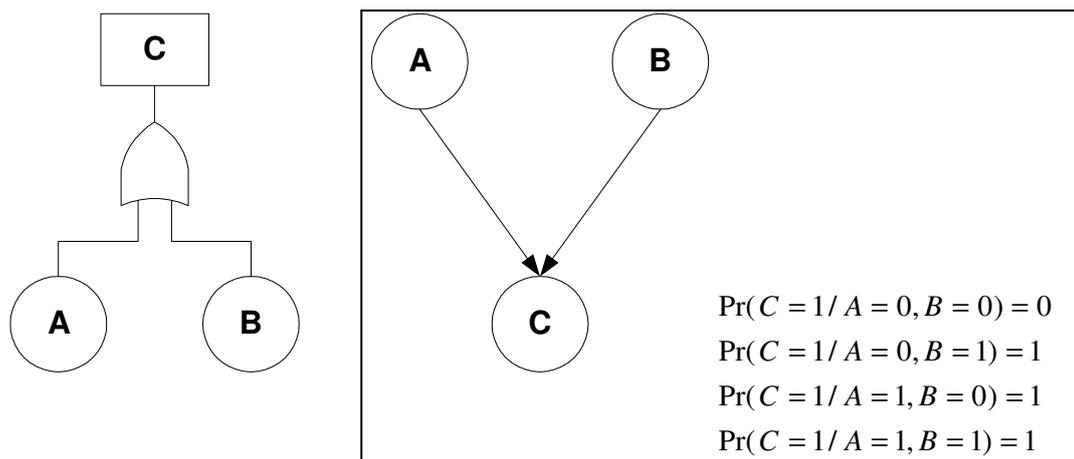
$$A \cup B = C$$

$$X_c = 1 - (1 - X_A)(1 - X_b) = \coprod X_j, \quad j = A, B$$



**Figura 6-5: O Evento União**

Convertendo o Evento União da Árvore de Falhas em Redes Bayesianas



**Figura 6-6: Convertendo uma porta lógica OU em um nó equivalente na RB**

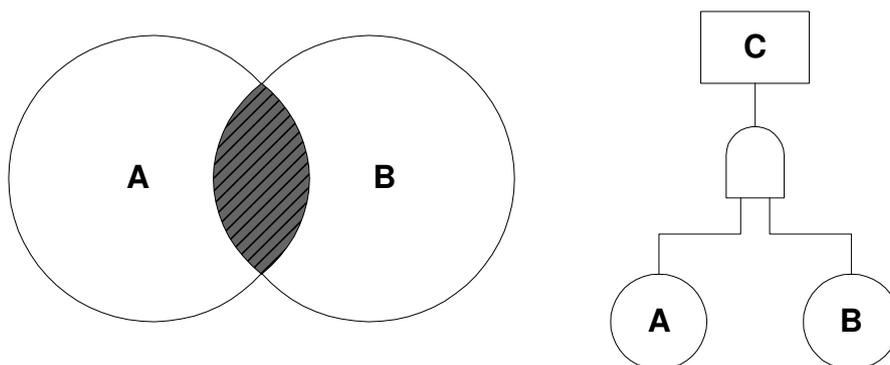
Existe uma relação determinística entre os eventos A e B, e o evento C. Na modelagem da porta lógica união, a ocorrência do evento C se dá sempre que A ou B ocorrer e também quando A e B ocorrerem simultaneamente. Conforme tabela de probabilidade condicional apresentada na Figura 6-6.

### 6.8.2 Evento Intercessão (Diagrama de Venn e Árvore de Falhas)

Dado dois eventos A e B, o terceiro evento C é obtido se ambos, A e B são verdadeiros. O diagrama de Venn e a porta lógica E é mostrada na Figura 6-7.

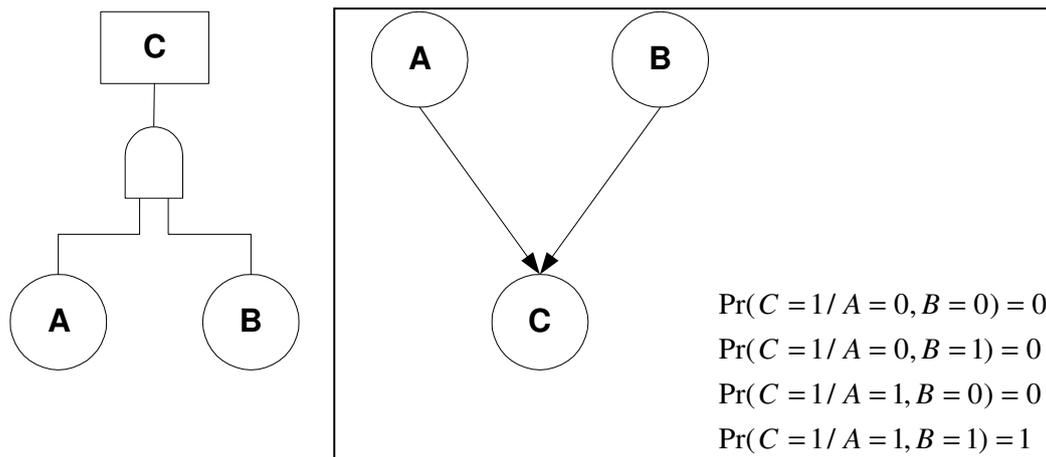
$$A \cap B = C$$

$$X_c = X_A X_b = \prod X_j$$



**Figura 6-7: O evento intercessão**

### Convertendo o Evento Intercessão da Árvore de Falhas em Redes Bayesianas

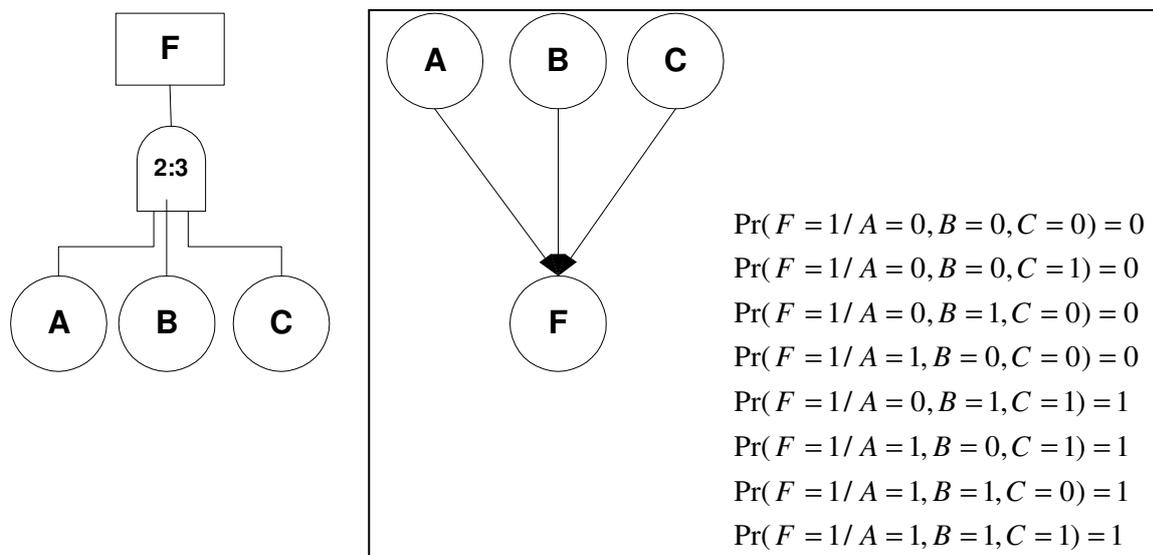


**Figura 6-8: Convertendo uma porta lógica E em um nó equivalente na RB**

Neste caso a modelagem por redes Bayesianas se dá introduzindo o conceito determinístico da relação entre os eventos A e B, que possui uma relação da seguinte forma com o evento C: C ocorre somente se A e B ocorrerem simultaneamente.

### 6.8.3 Outro Conceito

#### Convertendo o Evento k/n da Árvore de Falhas em Redes Bayesianas



**Figura 6-9: Convertendo uma porta lógica k/n em um nó equivalente na RB**

Para que uma árvore de falha seja convertida em uma rede Bayesianas equivalente, deve ser mostrado como é possível relaxar as considerações de 1-3 feitas na apresentação da metodologia da análise de árvore de falhas.

A consideração número 1 comenta sobre os eventos binários utilizados em árvore de falhas. Em redes Bayesianas é possível utilizar variáveis do tipo multi-estados, esta aplicação se torna bastante útil onde não é suficiente restringir de forma dicotômica o comportamento

de um componente. A incorporação dos multi-estados à estrutura da rede é feita pela Tabela de Probabilidade Condicional (TPC), nela são descritos os possíveis estados do componente.

A consideração número 2 explicita a independência entre os eventos, em redes Bayesianas os eventos são relacionados por meio das probabilidades condicionais, estas probabilidades condicionais são construídas com base no diagrama (grafo) de causa e efeito das variáveis, e os valores das probabilidades condicionais são introduzidos na TPC.

A consideração número 3 comenta sobre o relacionamento lógico entre eventos e causas, feita através das portas lógicas E e Ou, em redes Bayesianas a relação lógica entre os eventos é feita com base na introdução de nós, por meio da TPC deste nó, e o relacionamento lógico entre os eventos é mantido.

Na Tabela 6-2, são comparados as RB e AF em relação à ajuda na tomada de decisão e análise de sistemas.

**Tabela 6-2: Comparando Redes Bayesianas e Árvore de Falhas**

	<b>Árvore de Falhas</b>	<b>Redes Bayesianas</b>
Compreensão da condução lógica ao ET;	Sim	Sim
Possível priorizar eventos que conduzem ao ET;	Sim	Sim
Ferramenta pró-ativa, na prevenção do ET;	Sim	Sim
Usada para monitorar o desempenho do sistema;	Sim	Sim
Usada para minimizar e otimizar recursos;	Sim	Sim
Usada para colaborar no projeto do sistema;	Sim	Sim
Usada como ferramenta de diagnóstico do ET;	Sim	Sim
Número de Estados.	2	Vários

Como é possível perceber, em relação à tomada de decisão tanto a árvore de falhas como as redes bayesianas possuem características semelhantes, levando a conclusão de que ambas são similares neste assunto. Porém, a rede Bayesiana possui uma certa vantagem em relação às árvores de falhas, no que se refere à relação de dependência entre as variáveis, suposição feita em árvores de falha, ele aumenta as incertezas quando uma análise diagnóstica do ET é realizada, outra está no número de estados possíveis assumidos por uma variável, i.e., em árvore de falhas as variáveis são exclusivamente dicotômicas, enquanto que em redes Bayesianas vários estados podem ser modelados em uma mesma variável.

Outra vantagem na utilização das redes Bayesianas se dá na possibilidade de utilizar a policotomia para descrever um evento em função dos seus modos de falha, isto traz a

vantagem de agregar em um mesmo modelo diversos cenários em função dos diferentes modos de falhas existente.

Na árvore de falhas, as portas lógicas descrevem uma relação determinística entre os eventos básicos, i.e., a porta lógica OU, por exemplo, descreve que certamente se um dos eventos básicos ocorrer, o evento topo irá ocorrer. Esta é uma suposição bastante forte, uma vez que não permite a possibilidade da não ocorrência. Deste modo, a rede Bayesiana se mostra mais flexível, permitindo que na tabela de probabilidade condicional seja introduzida à probabilidade de não ocorrência do evento topo dado que um dos eventos básico ocorreu.

## 6.9 Convertendo Árvore de Eventos em Redes Bayesianas

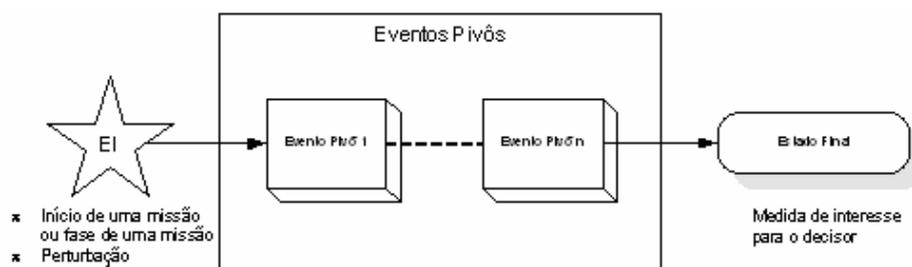
A análise probabilística do risco é composta por três principais termos: cenários, probabilidades e a consequência associada a cada cenário descrito.

Os cenários são constituídos de um evento iniciador, (geralmente) um ou mais eventos pivôs que conduzem para um estado final, Figura 6-10, (Stamatelatos et al. 2002b).

Na maioria das análises probabilísticas de riscos, o evento iniciador é uma perturbação que solicita algum tipo de resposta dos operadores ou de outra pessoa diretamente responsável ou de um ou mais sistemas. Porém, o evento iniciador pode ser utilizado como sendo o início de uma missão ou início de uma fase da missão.

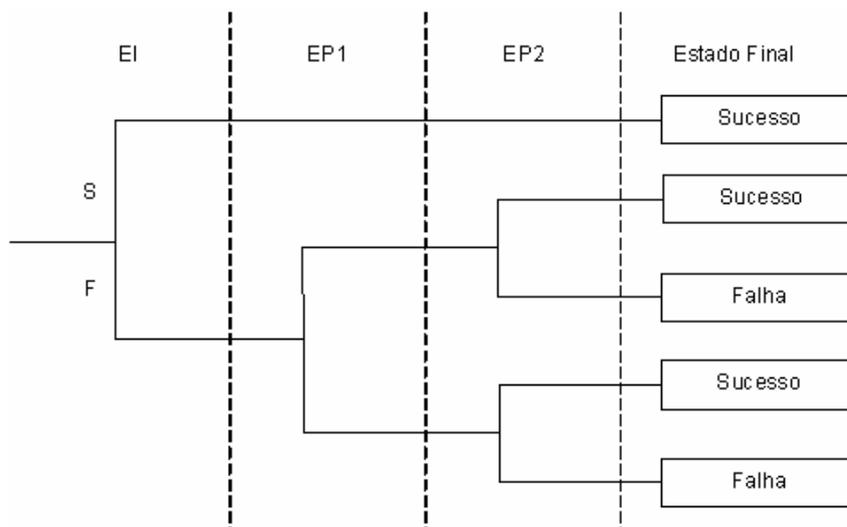
Os eventos pivôs são as respostas do sistema para este evento iniciador, e são geralmente descritos como sucesso ou falha.

Os estados finais são formulados de forma que ajude no apoio a decisão do analista. Desta forma, os cenários são classificados conforme o tipo e severidade da consequência.



**Figura 6-10: Definição de cenário**

A árvore de eventos é uma técnica bastante utilizada na modelagem de cenários, ela surgiu na avaliação de riscos realizada no WASH-1400, por Norman Rasmussen em 1972. A árvore de eventos, no WASH-1400 foi utilizada para gerar, definir, e classificar cenários, especificado ao nível de eventos pivôs (Garrick & Christie, 2002).



**Figura 6-11: Árvore de Eventos**

A árvore de eventos da Figura 6-11, possui três eventos: Evento Iniciador ( $EI$ ), Evento Pivô 1 ( $EP_1$ ) e Eventos Pivô 2 ( $EP_2$ ). Todos os eventos são binários, sucesso ou falha. Os cenários obtidos pelas combinações possíveis dos eventos levam o sistema a dois possíveis estados finais, Sucesso e Falha.

O estado final do sistema é sucesso se o  $EI$  for sucesso, ou se o  $EI$  for falha e o  $EP_1$  for sucesso e o  $EP_2$  for sucesso, ou se o  $EI$  for falha e o  $EP_1$  for falha e o  $EP_2$  for sucesso.

A árvore de eventos possui a propriedade de obter caminhos mutuamente exclusivos e exaustivos.

### 6.9.1 Tipos de dependências

Um cenário pode ser modelado levando em consideração três diferentes tipos de dependências entre os eventos: *Independência*, *dependência parcial* e *dependência total*.

A *Independência* trata da consideração onde os eventos de uma dada seqüência (cenário), são quantificados de forma independente, i.e., é feita a consideração de que o evento atual não sofre qualquer influência dos eventos anteriores e não causará influência em nenhum dos eventos posteriores. Esta consideração é geralmente utilizada em árvore de eventos, e em alguns casos, é uma opção razoável para modelagem de cenários, tornando o processo de quantificação mais fácil. Porém, reflete quantitativamente somente uma aproximação acentuada da realidade. Desta forma, a probabilidade do estado final ser *sucesso*, para a árvore de eventos da Figura 6-11, utilizando o critério de independência é:

$$P(EF=s)=[P(EI=s) + P(EI=f).P(EP1=s).P(EP2=s) + P(EI=f).P(EP1=f).P(EP2=s)]$$

**Equação 6-4**

Onde  $f \rightarrow$  falha e  $s \rightarrow$  sucesso;

A *dependência parcial* entre eventos trata da consideração onde os eventos de uma dada seqüência (cenário) são quantificados de forma dependente, porém de forma parcial, i.e., os eventos são considerados dependentes somente do evento imediatamente anterior. Desta forma, cada evento só influencia os que estão imediatamente a sua frente, perdendo completamente a sua influência sobre os que estão depois. Com base na Figura 6-11, caso a dependência parcial fosse assumida, a probabilidade do estado final ser *sucesso* tornar-se-ia:

$$P(EF=s)=[P(EI=s)+P(EI=f).P(EP1=s/EI=f).P(EP2=s/EP1=s)+P(EI=f).P(EP1=f/EI=f).P(EP2=s/EP1=f)]$$

**Equação 6-5**

Note que este tipo de dependência pode ser flexibilizado de forma que, o evento atual dependa de quantos eventos anteriores seja desejado, tornando-o independente a partir de um certo ponto. Esta flexibilização pode ser bastante conveniente para modelagem de cenários onde diferentes tipos de eventos (equipamentos, pessoas, etc.,) estão envolvidos.

A *dependência total* trata da modelagem onde os eventos de um dado cenário são dependentes dos todos os seus anteriores, para a Figura 6-11 apresentada anteriormente, a probabilidade do estado final ser *sucesso* tornar-se-ia:

$$P(EF=s)=[P(EI=s)+P(EI=f).P(EP1=s/EI=f).P(EP2=s/EP1=s,EI=f)+P(EI=f).P(EP1=f/EI=f).P(EP2=s/EP1=f,EI=f)]$$

**Equação 6-6**

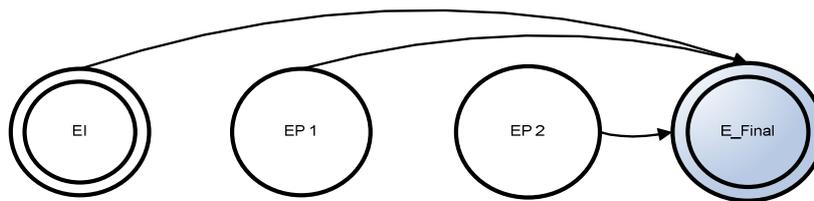
Note que a probabilidade de sucesso do  $EP_2$  depende da falha dos eventos  $EP_1$  e  $EI$ .

Como visto, a dependência pode ser tratada de diversas formas a depender do nível de precisão que se deseja. No capítulo seguinte uma breve descrição sobre redes Bayesianas é feita, ela será apresentada como uma alternativa para o tratamento da dependência entre os eventos na modelagem de cenários.

A rede Bayesiana, por modelar a relação de causa e efeito entre as variáveis, por meio da relação probabilística entre eles, pode tratar os três tipos de dependências citadas acima. Para tanto é necessário desenvolver de diferentes formas a construção da rede para que tais interpretações sejam possíveis.

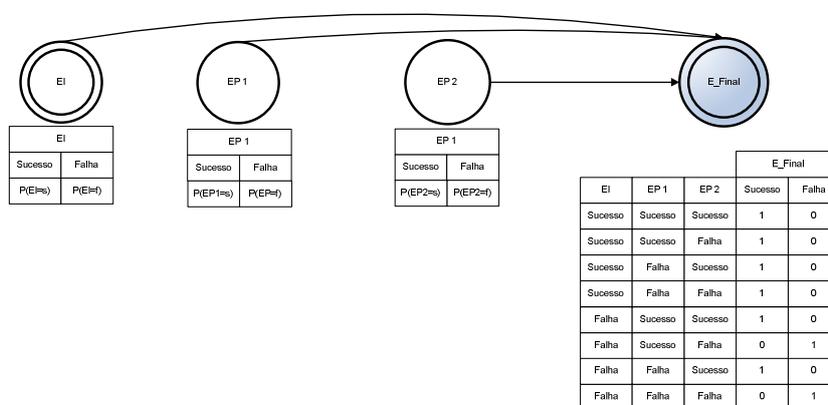
### 6.9.2 Rede Bayesiana para modelar cenários de eventos independentes

Na Figura 6-12 não existe arco interligando os eventos  $EI$  e  $EP_1$ ,  $EP_1$  e  $EP_2$ . A não interligação destes eventos (nós) permite a consideração de independência entre eles. Todos os nós que representam  $EI$ ,  $EP_1$  e  $EP_2$ , (evento iniciador e pivôs) devem ser ligados ao nó (estado final), por meio dos arcos. Esta ligação permite que todas combinações possíveis de caminhos sejam obtidas.



**Figura 6-12: Modelagem de cenário de eventos independentes via rede Bayesiana**

Uma boa prática na modelagem de cenários via redes Bayesianas é organizar na Tabela de Probabilidades Condicionais (TPC) do estado final, os eventos em conformidade com a seqüência de eventos, i.e, primeiro o  $EI$ , em seguida o  $EP_1$  e por fim o  $EP_2$ . A rede Bayesiana e a TPC da árvore de eventos é apresentada na Figura 6-13.



**Figura 6-13: Rede Bayesiana e TPC dos nós (cenário de eventos independentes)**

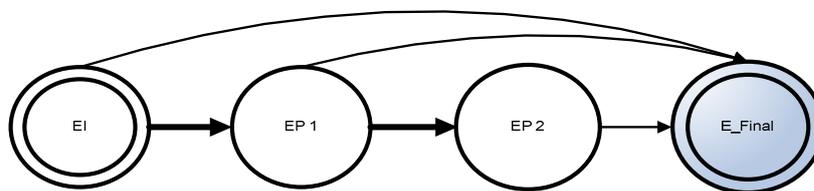
Note através da TPC que os eventos  $EI$ ,  $EP_1$  e  $EP_2$  são independentes entre si. Observando a TPC do nó  $E\_Final$ , é possível perceber que só existem dois cenários para o estado final ser “falha”,  $EI - Falha$ ,  $EP_1 - Falha$ ,  $EP_2 - Sucesso$ , e  $EI - Falha$ ,  $EP_1 - Falha$ ,  $EP_2 - Falha$ .

Em uma rede Bayesiana, a modelagem dos cenários é feita por meio da quantificação da tabela de probabilidade condicional do estado final, onde o valor (1) indica o estado final do sistema para a seqüência de eventos descrita na TPC.

### 6.9.3 Rede Bayesiana para modelar cenários de eventos parcialmente dependentes

Para a modelar um cenário de eventos parcialmente dependentes, primeiramente uma rede do tipo seqüência deve ser construída. Os arcos interpretam graficamente a dependência entre os eventos (observe arcos em destaque, Figura 6-14). Em detalhe, o nó raiz representa o evento iniciador, o nó folha o estado final, e os nós entre o nó raiz e folha, representam os eventos pivôs.

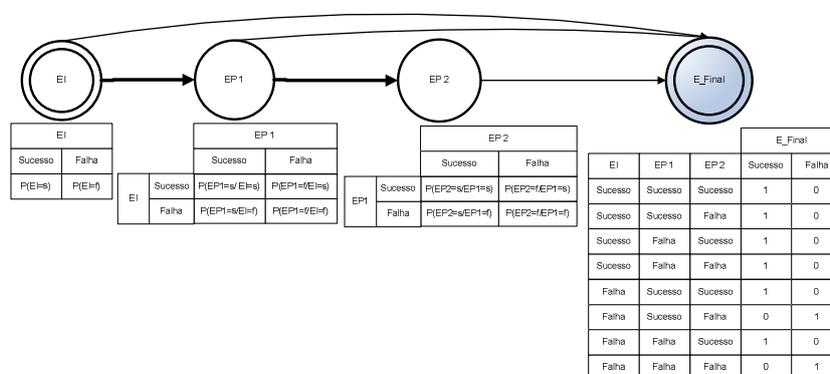
Por conta de o nó folha representar o estado final do sistema, todos os eventos (iniciador e pivôs) devem ser ligados a ele, por meio dos arcos. Esta ligação permite que todas combinações possíveis de caminhos sejam obtidas.



**Figura 6-14:** Modelagem de cenário de eventos parcialmente dependentes via rede Bayesiana

Após as ligações terem sido feitas, as tabelas de probabilidades condicionais devem ser alimentadas.

Na Figura 6-15, a rede Bayesiana e as TPC da Figura 6-14 é mostrada.



**Figura 6-15:** Rede Bayesiana e TPC dos nós (cenário de eventos parcialmente dependentes)

Note que a ligação dos nós pelos arcos se limitou aos eventos imediatamente anterior, desta forma, as probabilidades condicionais dos eventos ( $EP_1$  e  $EP_2$ ) dependem somente dos eventos imediatamente precedente, caracterizando desta forma o cenário onde existe uma dependência parcial.

#### 6.9.4 Rede Bayesiana para modelar cenários de eventos totalmente dependentes

Como mostrado anteriormente, a dependência entre os eventos em uma rede Bayesiana é garantida, pela interligação de arcos entre os nós (observe arcos em destaque, Figura 6-16). Desta forma, para modelar cenários totalmente dependentes, cada evento deve receber um arco de cada evento anterior a ele. Para um melhor entendimento, no mesmo problema apresentado acima, a dependência total será introduzida.



## 7 ANÁLISE DA CONFIABILIDADE HUMANA (ACH)

A apresentação da confiabilidade humana neste trabalho faz-se necessário, uma vez que a análise probabilística foi realizada em uma atividade que se processa por uma seqüência de procedimentos, que são executados por pessoas, e deste modo estão susceptíveis ao erro. Desta forma, nesta seção serão apresentadas os conceitos utilizados em confiabilidade humana e como ela se dará dentro do problema proposto.

### 7.1 Erro humano

Segundo Wickens et al. (1997), 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.

Hollnagel (1998) definiu erro humano como sendo as ações com conseqüências indesejáveis para o sistema.

O erro humano é a base para os estudos da confiabilidade humana, é através dele que um cenário é analisado quando uma ação humana é necessária. No trabalho apresentado, a identificação do erro humano será feita pelo uso da HTA. Por ela, o sistema estudado será detalhado ao nível da ação necessária pelo envolvido na tarefa. Desta forma será possível identificar o erro humano que poderá ser cometido.

Um estudo realizado pelo *Institute of Nuclear Power Operation* mostrou que as causas dos acidentes da indústria nuclear apresentam a seguinte proporção (INPO, 1985):

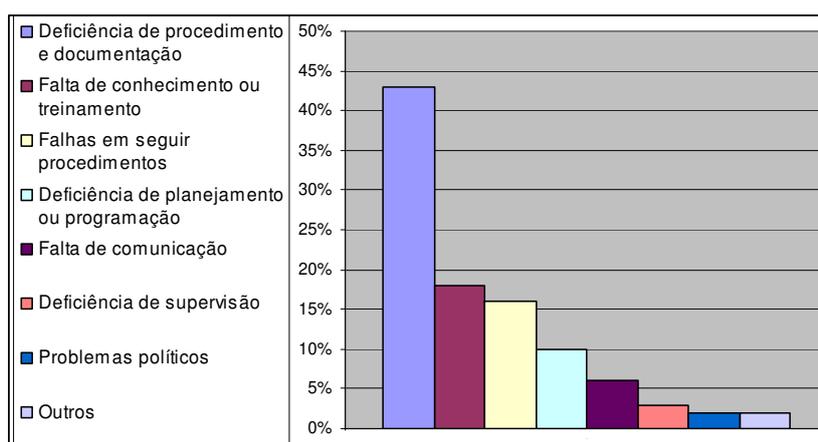


Figura 7-1: *Proporção das causas de acidente na indústria nuclear (INPO, 1985)*

A deficiência de procedimentos e documentação liderou como sendo a causa de acidentes em 43% dos eventos analisados, sendo seguido pela falta de conhecimento ou treinamento com 18%, a falha em seguir procedimentos vem em seguida com 16%. Com esta

breve análise foi possível perceber que a maioria das causas está relacionada a erros cometidos na administração e organização do sistema, e não pela execução da atividade.

Apesar do estudo ter mostrado que o percentual de erros cometidos pelos executores ter sido inferior ao percentual de erros de projetos e falhas na estrutura organizacional de um sistema, o erro cometido pelo executor está na linha de frente, e conseqüentemente os erros humanos serão mais visíveis neste nível. Ele ressalta que, além de ser necessário investir em análises ao nível do executor, por ele ser a última barreira para evitar a propagação do erro, as fases de planejamento e elaboração de procedimentos devem ser tratadas sob este aspecto.

Com base nesta informação, o trabalho realizado, teve como foco os principais problemas identificados neste estudo realizado pelo INPO. Onde foi desenvolvido um modelo de confiabilidade humana em que o conhecimento ou treinamento (no modelo será chamado de *experiência e treinamento*), deficiência de supervisão (no modelo será chamado de *supervisão*), falta de comunicação (no modelo será chamado de *qualidade da informação recebida*). Nele também foram acrescentados *fatores* que apresentaram apropriados para a atividade em questão. Como o estudo apresentou como principal causa de acidente a *deficiência de procedimento e documentação*, no mesmo trabalho, análise de risco permitiu um maior aprofundamento no detalhamento do procedimento, tornando-o mais completo e compreensível.

O erro humano poderá ter diferentes causas, sendo necessárias diferentes medidas para preveni-lo. Para saber qual medida de prevenção deve ser adotada ou tipo de erro a ser evitado, é necessário identificar a maneira ou modo como estes erros são cometidos para aplicar a ACH (Análise de Confiabilidade Humana), pois através dela serão desenvolvidos métodos sistemáticos para identificar o potencial de erro humano e quantificar a probabilidade de erro humano.

## 7.2 Confiabilidade Humana

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) (Swain & Guttman, 1983).

Método através do qual a confiabilidade humana é avaliada, é a análise da confiabilidade humana. Para realizá-la, 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 significativa. Esta avaliação, como comentado anteriormente, será feita através da análise da tarefa, que no problema foi aplicada a HTA.

Em sistemas complexos, o homem é solicitado a fazer as atividades de manutenção, calibração, teste, ou atividades normal de operação. De forma geral cada individuo com uma entidade ou como membro de uma equipe deve perceber as informações (que pode ser oriunda do painel de controle, condições do poço, ler instruções, por exemplo), estas informações se relacionam diretamente com o individuo responsável por uma ação em questão. Assim ele deve processar as informações recebidas, e só assim determinar que ação deverá ser tomada e em seguida agir. Porém a interação entre o homem e o sistema não é tão fácil de ser descrita e entendida.

Em algumas teorias em análise de confiabilidade humana, é acreditado que o homem pode ser tratado analiticamente, tanto quanto outros componentes do sistema, levando a conclusão de que ele pode ser gerenciado como qualquer outro componente do sistema. Porém se for considerado a grande variabilidade e interdependência do desempenho humano, tal conclusão é altamente refutável.

### 7.2.1 Fatores de Forma de Desempenho (FFD) em ACH

Qualquer fator que influencia o desempenho humano é definido como um FFD (Swain & Guttmann, 1983).

Os FFD são divididos em três classes: (1) Os FFD Externos – aqueles que estão fora do individuo, (2) Os FFD internos – aqueles que operam no próprio indivíduo, e os (3) Estressores.

#### 7.2.1.1 FFD Externo

Em geral são aqueles relacionados às condições ambientais e aqueles intrínsecos a realização de uma tarefa específica, onde são definidos as condições de trabalho dos operadores, técnicos, pessoal de manutenção, engenheiros, e os que mantêm o desempenho confiável e seguro da tarefa. Os FFD Externos são subdivido em três categorias: Características do local de trabalho, Características da tarefa e equipamento, e Instruções da atividade de trabalho e da tarefa.

Características do local de trabalho incluem FFD que geralmente influenciam toda a planta ou que cobre várias atividades de trabalho diferentes e tarefas na planta.

Características da tarefa e equipamento incluem FFD que são restritos a uma dada atividade de trabalho ou até tarefa dentro de uma atividade de trabalho.

Instruções da atividade de trabalho e da tarefa incluem FFD que estão relacionados à característica da tarefa, e representam uma área no qual um pequeno investimento de tempo e dinheiro pode resultar em uma melhoria substancial na confiabilidade humana.

#### 7.2.1.2 FFD Interno

É pouco provável que o sistema homem-máquina funcione como um ser único, uma vez que cada indivíduo possui certos dons, habilidade, atitude, entre outros atributos de natureza humana. Um desejo, mostrado inclusive nos filmes americanos, onde a criação de humanos padronizados de forma que possuam características habilidosas para desempenhar uma determinada tarefa. Porém pouco possível, pelo menos na atualidade. Se este desejo fosse possível, certamente seria bem conveniente, principalmente para atividade de alto risco. Uma vez que esta opção não é disponível, então o melhor é selecionar trabalhadores que possuam um nível de desempenho no mínimo aceitável para a realização de uma atividade, desta forma o FFD Interno determina o nível de competência de um determinado indivíduo para desempenhar uma determinada atividade.

Contudo existe também uma relação entre os FFD Internos e as ações desempenhadas pela organização, por exemplo, a experiência, treinamento, estado atual de prática, são dependentes diretamente do método empregado pela organização em manter, treinar ou melhorar a proficiência do trabalhador.

Na indústria nuclear, a prática mostra que os fatores externos são mais importantes que os fatores internos.

#### 7.2.1.3 Estressantes

Devido à importância o estresse é tratado de forma diferenciada apesar de fazer parte dos FFD Internos. O estresse é definido como a tensão física ou mental e o estressor como qualquer força interna ou externa que causa o estresse (Swain & Guttmann, 1983).

Segundo Lipp (1996), "Stress é definido como uma reação do organismo, com componentes físicos e/ou psicológicos, causadas pelas alterações psicofisiológicas que ocorrem quando a pessoa se confronta com uma situação que, de um modo ou de outro, a irrite, amedronte, excite, confunda ou mesmo que a faça imensamente feliz".

O estresse pode ser dito como algo sentido pela pessoa; e estressor é algo que produz o estresse. O estresse pode ser fisiológico ou psicológico, por exemplo. O estresse fisiológico é qualquer força interna ou externa ao indivíduo que cause uma modificação do seu corpo. O

estresse psicológico refere-se a qualquer força interna ou externa ao indivíduo que cause uma modificação da mente (Swain & Guttman, 1983).

Segundo Vieira e Schüller Sobrinho (1995), as formas de estresse, mais freqüentes, atualmente, são:

1. Estresse dos indivíduos que vivem de forma corrida, competitiva, agressivamente envolvidos em uma luta crônica e incessante;
2. Estresse dos indivíduos que vivem tensos seja no ambiente do trabalho, em casa, consigo mesmo;
3. Estresse dos indivíduos em crise existencial, geralmente entre 38 - 45 anos, questionando-se sobre o significado da vida, principalmente do tipo de vida que vem tendo, diante da perspectiva de que não vão conseguir realizar tudo a que se propuseram;
4. Estresse do indivíduo que está vivendo alto grau de desajustamento, consciente ou inconsciente, a uma realidade de sua vida, seja à realidade do seu ambiente de trabalho, do seu ambiente familiar, social ou dele consigo mesmo.

Os modelos quantitativos para desempenho humano em combinação com os FFD são o maior determinante na probabilidade de erro humano. Na Tabela 7-1 é apresentado uma lista de FFD úteis em HRA/PRA.

Tabela 7-1: Alguns FFD em sistemas homem-máquina (Swain & Guttman, 1983)

FFD EXTERNO		FFD ESTRESSANTE	FFD INTERNO
CARACTERÍSTICAS DO LOCAL DE TRABALHO	CARACTERÍSTICAS DA TAREFA E EQUIPAMENTO	FATORES PSICOLÓGICOS	CARACTERÍSTICAS INDIVIDUAIS
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Característica Arquitetural (estrutural);</b></li> <li>• Qualidade do ambiente de trabalho:               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Temperatura;</li> <li>○ Umidade;</li> <li>○ Qualidade do ar;</li> <li>○ Radiação da luz;</li> <li>○ <b>Perturbação sonora;</b></li> <li>○ <b>Vibração;</b></li> <li>○ Grau de limpeza;</li> </ul> </li> <li>• <b>Hora de Trabalho / Hora de Descanso;</b></li> <li>• <b>Mudança de turno;</b></li> <li>• Disponibilidade / Adequação de equipamento e ferramenta especial;</li> <li>• Estrutura organizacional:               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Autoridade;</li> <li>○ Responsabilidade;</li> <li>○ Canais de</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Percepção exigida na tarefa;</li> <li>• Movimentos exigidos na tarefa:               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Velocidade;</li> <li>○ Força;</li> <li>○ Precisão;</li> </ul> </li> <li>• Atenção aos sinais de alerta;</li> <li>• Solicitação antecipada;</li> <li>• <b>Interpretação;</b></li> <li>• Tomada de decisão;</li> <li>• Complexidade (descarga de informação);</li> <li>• Estreiteza da tarefa;</li> <li>• Freqüência e repetitividade;</li> <li>• <b>Criticalidade da tarefa;</b></li> <li>• Capacidade de memória exigida na execução da tarefa;               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ <b>Termos exigidos durante muito tempo na memória</b></li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Surpresa inicial;</li> <li>• <b>Duração do estresse;</b></li> <li>• Velocidade da Tarefa;</li> <li>• <b>Carga de atividade;</b></li> <li>• <b>Risco na execução da tarefa;</b></li> <li>• <b>Ameaças:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ De fracasso;</li> <li>○ Perda do trabalho;</li> </ul> </li> <li>• Trabalhos Monótonos, degradantes, ou insignificante;</li> <li>• Trabalhos longos e sem sentido;</li> <li>• Conflitos sobre avaliação desempenho do trabalho;</li> <li>• Ausência de</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Treinamento prévio / experiência;</b></li> <li>• Estado prático atual ou destreza;</li> <li>• Personalidade e inteligência variável;</li> <li>• <b>Motivação e atitude;</b></li> <li>• <b>Estado emocional;</b></li> <li>• <b>Estresse (mental ou tensão corpórea);</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Conhecimento do desempenho necessário padrão;</li> <li>○ Diferença sexual;</li> <li>○ Condição física;</li> <li>○ Atitude baseada na influencia da família outras pessoas de fora da família ou agencias;</li> </ul> </li> <li>• Identificação do grupo.</li> </ul>

comunicação; • Política organizacional da empresa; • Prêmio, reconhecimento, benefício.	o Termos exigidos durante pouco tempo na memória • Requisito matemático; • Feedback (conhecimento do resultado); • Atividade dinâmica vs passo a passo; • Estrutura e comunicação da equipe; • Fatores de interface entre homem-máquina:	reforço ou reforço negativa; • <b>Senso de privação</b> ; • Distração devido a: <ul style="list-style-type: none"> <li>o Barulho;</li> <li>o Luminosidade;</li> <li>o Movimento;</li> <li>o Tela tremula;</li> <li>o Cor;</li> </ul> • Dicas inconsistentes;	
<b>FATORES ORGANIZACIONAIS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>o Projeto do primeiro equipamento;</li> <li>o Teste de equipamento;</li> <li>o Fabricação do equipamento;</li> <li>o Ajuda no trabalho;</li> <li>o Ferramenta;</li> </ul>	<b>FATORES FISIOLÓGICOS</b>	
• <b>Procedimento realizado (escrito ou não escrito)</b> ; • <b>Comunicação escrita ou oral</b> ; • Prevenção e advertência; • Método de trabalho; • Política da planta (prática de compra).		• Duração do estresse; • <b>Fadiga</b> ; • Dor ou desconforto; • Fome ou sede; • Temperatura extrema; • Radiação; • Força – G Extrema; • Pressão atmosférica extrema; • Oxigênio insuficiente; • Vibração; • Restrição de movimento; • Falta de exercício físico; • Interrupção do ritmo cardíaco;	

Os em negrito estão os fatores que são os mais relevantes para a aplicação na construção de poços multilaterais.

### 7.3 FFDs do envolvidos na construção de poços

A sonda possui uma atividade intensa, onde a perturbação sonora e vibração são constantes. As sondas *offshore* possuem ainda o inconveniente de estarem em constante oscilação geradas pelas ondas em alto mar. Desta forma a qualidade do ambiente de trabalho torna-se um FFD Externo – Características do Local de Trabalho - importante para os envolvidos nas atividades de construção de poços em plataformas *offshore*. Ainda tratando dos FFD Externo, o sondador por sempre utilizar equipamentos de leitura (relógios) para interpretação de informação do tipo: pressão, vazão, torque, peso, etc. a característica arquitetural (design) torna-se um FFD importante para a execução do trabalho.

Em geral o custo de um funcionário (treinamento e salário) na indústria *offshore* são bastante elevados, por conta disto em geral as empresas possuem poucos especialistas em cada área específica, outro fator que contribui para o reduzido número de especialistas em

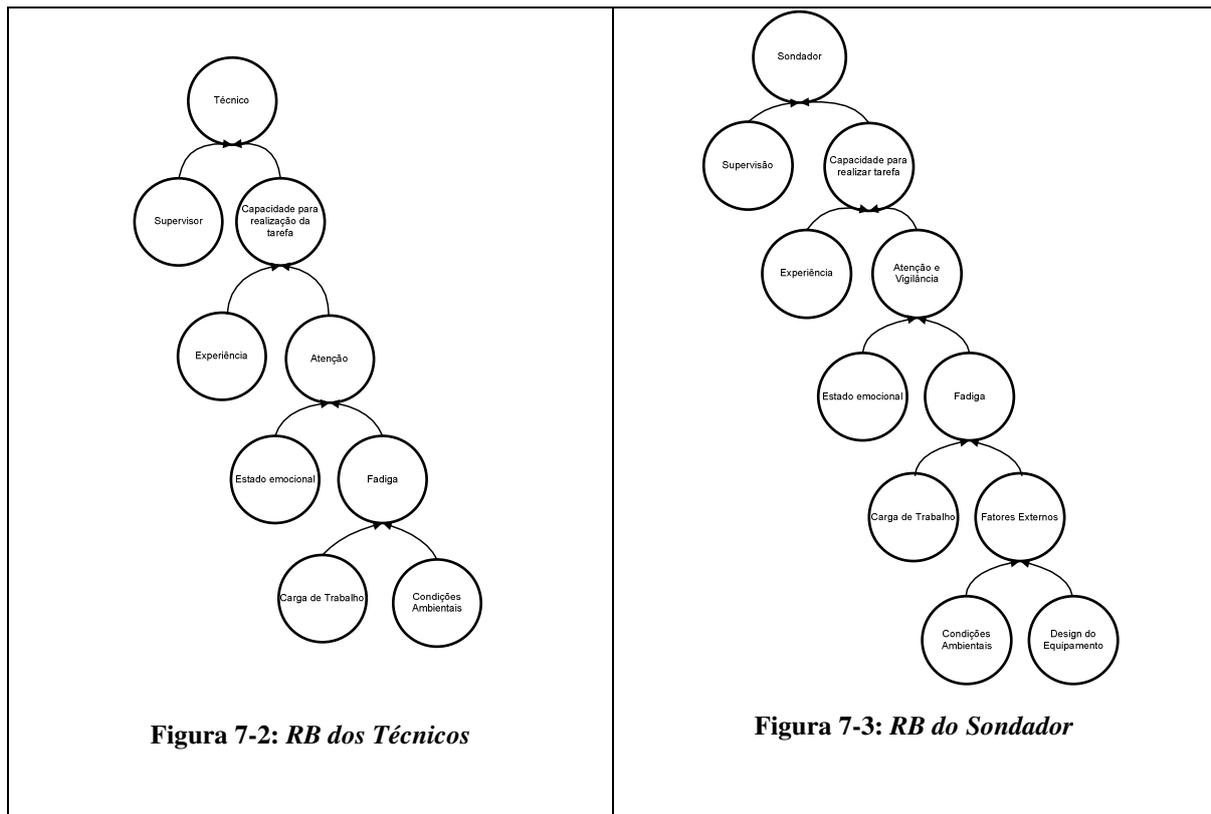
cada área de atuação, está relacionado à vasta opção de especialização. Deste modo, é necessário que o especialista permaneça na sonda durante todo o período de execução da fase relacionada a sua área de atuação. Por conta disto, são impostas elevadas cargas de trabalho. Por permanecerem longos períodos (14 dias para brasileiros) longe dos amigos e da família, isto gera um certo senso de privação que afeta o estado emocional (Estado Emocional – FFD Interno – Característica Individual).

Estes fatores (carga de trabalho e senso de privação) são categorizados como Fatores Estressantes – Fatores Psicológicos.

Dentro dos Fatores Fisiológicos, a fadiga se apresenta como um fator relevante para atividades em sonda, a fadiga pode estar presente no envolvido, devido à carga de trabalho e condições ambientais, comentado anteriormente, em que ele está sendo submetido.

Por se tratar de uma atividade altamente especializada, dentro dos FFD Interno – Características Individuais – a experiência e treinamento aparecem como FFD relevante para a modelagem. Como comentado anteriormente o estado emocional também é relevante para a modelagem da confiabilidade humana dos envolvidos na construção de poços multilaterais. Chang & Mosleh (2004), em seu artigo “*Model-based human reliability analysis: prospects and requirements*” re-organizou os FFD em quatro diferentes grupos, fatores externos, fatores psicológicos, fatores internos e informação memorizada, e tratou a relação de influência dos FFD a alto nível, i.e., a relação de causa e efeito gerada por FFD de diferentes grupos. Porém, fatores de um mesmo grupo podem influenciar e ser influenciados entre si.

Esta deficiência no modelo de Chang & Mosleh, foi tratada no trabalho de Menêzes & Droguett (2005) e Menêzes & Droguett (2006), e será aplicado neste trabalho.



Para este trabalho, os indivíduos tratados foram: Técnicos e sondador. Os técnicos são os: Operadores MLT, operadores MWD e técnico de coluna.

Eles foram selecionados para uma análise mais aprofundada sob o ponto de vista da confiabilidade humana, por se tratarem de indivíduos que estão na linha de frente da execução das atividades.

Os fatores de desempenho tratados foram: *Experiência*, *Estado Emocional*, *Carga de Trabalho*, *Condições Ambientais*, *Atenção* e *Fadiga* (técnico e sondador), e *Design do Equipamento* (sondador).

**Experiência:** É o conhecimento técnico específico adquirido pelo indivíduo ao longo do tempo pela prática de uma atividade. Ela pode ser caracterizada como: adequada ou inadequada;

**Estado Emocional:** É um estado interior caracterizado por pensamentos, sensações e reações fisiológicas, ele pode ser identificado pela mudança no comportamento padrão de um indivíduo. Estes pensamentos geram uma redução no nível de atenção do indivíduo. Ele pode ser caracterizado como: favorável ou desfavorável;

**Carga de Trabalho:** Está relacionada a jornada de trabalho do individuo. Ela pode ser caracterizada como: excessiva ou não excessiva;

**Condições Ambientais:** Refere-se as condições impostas pelo local de trabalho que de alguma forma influencia no desempenho do indivíduo. Ela pode ser caracterizada como: favorável ou desfavorável;

**Atenção:** A atenção exigida corresponde ao nível de consciência necessário para realizar a tarefa. Estudos comprovam que a fadiga diminui o poder de concentração, desta forma colaborando para o aumento na probabilidade de erro em atividades que demandam atenção. Ela pode ser caracterizada como: adequada ou inadequada;

**Design do Equipamento:** Trata-se da disposição e interface dos equipamentos utilizados pelo sondador na cabine de controle. Ele pode ser caracterizado como: adequada ou inadequada;

**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). Ela pode ser caracterizada como: presente ou não presente;

Nas redes Bayesianas do técnico e sondador existe um nó denominado “*capacidade para realizar a tarefa*”, este nó é fictício, i.e. não é um fator de desempenho. A utilização deste nó é baseada na técnica chamada “separação de múltiplos pais” (Korb & Nicholson, 2003). O nó “*fatores externos*” presente na RB do sondador também é um nó fictício.

A utilização desta técnica faz-se necessário por dois motivos principais, (i) facilitar o processo de educação, uma vez que mais de duas variáveis dependentes influenciando a ocorrência de outra, torna a construção de um cenário bastante complexo e muitas vezes difícil para introduzir o especialista no cenário e conseqüentemente extrair dele as probabilidades, (ii) um menor número de variáveis dependentes reduz o tamanho das tabelas de probabilidades condicionais da rede, colaborando para uma melhor compreensão da tabela e facilitação dos cálculos das probabilidades.

## **8 AVALIAÇÃO DE RISCOS NA CONSTRUÇÃO DE POÇOS MULTILATERAIS**

As fases iniciais de uma avaliação de risco são, primeiramente, definição dos objetivos da análise e em seguida familiarização com sistema a ser estudado. Como a definição dos objetivos estão descritos na sessão 1.2 e a familiarização com o sistema está descrita na sessão 2.2, e capítulo 3 este capítulo será iniciado pela identificação dos eventos iniciadores.

### **8.1 Caracterização das Tarefas e Identificação dos Eventos Iniciadores (EI)**

Neste sistema estudado, por se tratar de uma seqüência de atividades, os eventos iniciadores em geral, serão erros de ação humana. Por conta disto, faz-se necessário o uso de técnica de análise da tarefa. Por meio delas, é possível documentar a informação de como uma tarefa é realizada, apoiando desta forma a análise de risco no sentido de fornecer as informações necessárias para o analista sobre o verdadeiro envolvimento do homem no sistema, suas relações e os possíveis erros de natureza humana.

Com a aplicação da técnica de análise da tarefa o analista pode coletar informações, organizá-las, e por fim tomar decisões, de forma mais estruturada.

As técnicas de análise da tarefa podem ser definidas como o estudo, que um operador (ou equipe) precisa fazer, em termos de ação e (ou) processo cognitivo para alcançar a meta do sistema (Kirwan & Ainsworth, 1993).

Neste trabalho, a identificação dos eventos iniciadores, foi realizada pela aplicação da HTA (*Hierarchical Task Analysis*), que é uma técnica de análise da tarefa. As técnicas de análise da tarefa são utilizadas por diversas áreas da segurança, pois possuem a capacidade de descrever como as tarefas se procedem além de avaliar a interação homem-máquina e homem-homem no sistema.

A HTA é uma abordagem ampla da análise da tarefa, no qual induz o analista a estabelecer as condições necessárias quando várias subtarefas devem ser desenvolvidas em uma seqüência para satisfazer a meta do sistema, além de fornecer uma hierarquia de operações.

Este trabalho está voltado unicamente para a análise das tarefas de perfuração e complementação (construção) de poços multilaterais, pois como se tratam de tarefas de pouquíssima experiência do pessoal envolvido, representam um risco maior.

8.1.1 HTA – 1. Construção de poço multilateral

Na Figura 8-1 a HTA – 1., referente ao primeiro nível da HTA, onde as fases principais para construção de um poço multilateral são descritas por meio das tarefas que vão da 1.1 a 1.15. Como comentado anteriormente, nesta HTA só constam as tarefas exclusivas de multilaterais, desta forma, é possível perceber que existem tarefas entre as apresentadas que não foram explicitadas por não fazerem parte do escopo da análise.

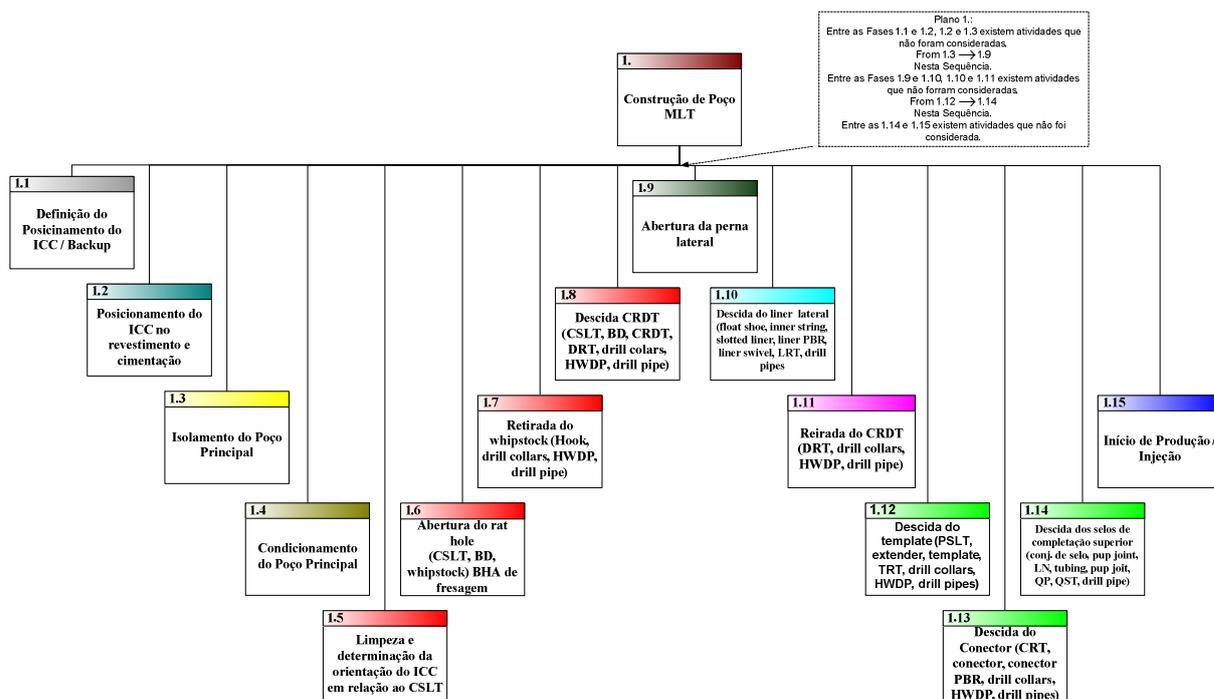


Figura 8-1: HTA – 1. Construção de poço multilateral

Como visto acima, a perfuração de um poço multilateral possui várias tarefas com início na fase de planejamento onde uma das mais importante atribuição é a definição do posicionamento do ICC<sup>14</sup>, e com término no início da produção ou injeção (a depender do objetivo do poço). Dentre estas tarefas existem algumas que são mais críticas que outras, como é o caso das tarefas relacionadas à fase de abertura da janela, foco deste trabalho. Ela foi escolhida, por se tratar de um conjunto de tarefas de relativa complexidade, onde na execução, existe a possibilidade real da perda do poço. Foi inserida também nesta análise a tarefa de condicionamento do poço principal, uma vez que é condicionante imediata para a realização da abertura da janela.

A fase de condicionamento do poço principal é apresentada na HTA por tarefa que está na caixa com faixa marrom, conforme ilustração abaixo, e ela corresponde à tarefa 1.4.

<sup>14</sup> ICC: Indexing Casing Coupling (Junção indexada ao revestimento).

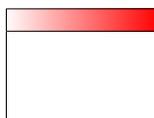


Detalhando as tarefas do condicionamento do poço principal, ela é sub dividida em:

#### 1.4. Condicionamento do poço principal;

- 1.4.1. Montar coluna de condicionamento;
- 1.4.2. Descer condicionando o poço;
- 1.4.3. Manobrar coluna.

A fase de abertura da janela é apresentada na HTA por tarefas que estão nas caixas com faixa em vermelho, conforme ilustração abaixo, e ela cobre as tarefas que inicia na 1.5 e finaliza na 1.8.



Em detalhes, as tarefas da fase de abertura da janela são:

#### 1.5. Limpeza e determinação da orientação do ICC em relação ao CSLT<sup>15</sup>;

- 1.5.1. Montar BHA<sup>16</sup>;
- 1.5.2. Correr BHA no poço e medir comprimento dos tubos de perfuração;
- 1.5.3. Gravar o peso de tração, compressão e neutro quando se aproximar do ICC superior;
- 1.5.4. Iniciar a circulação cinco pés acima do ICC;
- 1.5.5. Circular reciprocando<sup>17</sup> no ICC superior;
- 1.5.6. Gravar leitura do MWD<sup>18</sup> acima, através e abaixo do ICC do superior;
- 1.5.7. Correr para o ICC de trabalho;
- 1.5.8. Gravar o peso de tração, compressão e neutro quando se aproximar do ICC de trabalho;
- 1.5.9. Circular reciprocando no ICC de trabalho;
- 1.5.10. Gravar leitura do MWD quando o CSLT estiver acima do ICC de trabalho;
- 1.5.11. Encaixar o CSLT no ICC de trabalho e fazer leitura (3x);
- 1.5.12. Assentar o CSLT no ICC de trabalho rompendo os pinos de cisalhamento;
- 1.5.13. Tracionar a coluna para garantir que o CSLT está travado;
- 1.5.14. Parar a circulação;

<sup>15</sup> **CSLT:** Construction Selective Landing Tool (Ferramenta de Acomodação para a Construção Seletiva).

<sup>16</sup> **BHA:** Bottom Hole Assembly (Conjunto de Fundo do Poço).

<sup>17</sup> **Reciprocando:** Processo pelo qual o sondador, por meio do sistema de elevação, eleva e baixa a coluna repetidas vezes em uma determinada profundidade.

<sup>18</sup> **MWD:** Measure While Drilling (Medindo enquanto perfurando)

- 1.5.15. Tracionar para romper os pinos de liberação do CSLT;
- 1.5.16. Manobrar a coluna com o BHA (Broca, ferramenta de jateamento, CSLT, MWD).
- 1.6. Abertura do rat hole<sup>19</sup>;
  - 1.6.1. Montar BHA com CSLT, BD (Barreira de Detritos), whipstock, fresa e MWD;
  - 1.6.2. Correr no poço e medir comprimento dos tubos de perfuração;
  - 1.6.3. Reduzir a velocidade quando atravessar do ICC superior e aproximar do ICC 2;
  - 1.6.4. Gravar o peso de tração, compressão e neutro quando se aproximar do ICC 2;
  - 1.6.5. Confirmar a orientação do whipstock com o MWD;
  - 1.6.6. Assentar o CSLT rompendo os pinos de cisalhamento;
  - 1.6.7. Tracionar a coluna para verificar se o CSLT está assentado;
  - 1.6.8. Tracionar para romper o shear stud;
  - 1.6.9. Perfurar o orifício de rato (rat hole);
  - 1.6.10. Manobrar a coluna com a fresa.
- 1.7. Retirada do whipstock<sup>20</sup>;
  - 1.7.1. Montar BHA (gancho, colar de perfuração, HWDP<sup>21</sup>);
  - 1.7.2. Correr no poço e medir comprimento dos tubos de perfuração;
  - 1.7.3. Gravar o peso de tração, compressão e neutro quando se aproximar do whipstock;
  - 1.7.4. Utilizando o MWD orientar a gancho 180° em relação à fenda do whipstock. Parte de trás do gancho em direção fenda do whipstock;
  - 1.7.5. Circular reciprocando na frente da fenda do whipstock. Cobrir 3 pés acima e abaixo da fenda;
  - 1.7.6. Posicionar o gancho acima da janela e usando o MWD orientar o gancho na direção da fenda do whipstock;
  - 1.7.7. Baixar coluna, posicionando o gancho 3 pés abaixo da fenda;
  - 1.7.8. Tracionar encaixando o gancho na fenda;
  - 1.7.9. Parar a circulação;
  - 1.7.10. Tracionar para verificar se o gancho está encaixado;
  - 1.7.11. Tracionar para romper os pinos de liberação da barreira de detritos e CSLT;
  - 1.7.12. Manobrar a coluna com o BHA (gancho, colar de perfuração, HWDP), whipstock, barreira de detritos e CSLT.

---

<sup>19</sup> **Rat hole:** Consiste na abertura inicial da janela, por meio da perfuração do revestimento, camada de cimentação e formação. Na formação, é perfurada uma distância necessária para acomodar os equipamentos de perfuração do lateral. Por este motivo o nome “rat hole”.

<sup>20</sup> **Whipstock:** Equipamento utilizado para defletir a fresa na direção do revestimento, possibilitando à abertura do lateral.

<sup>21</sup> **HWDP:** Heavy Weight Drill Pipe (Tubo de perfuração de alto peso)

### 1.8. Descida do CRDT<sup>22</sup>.

- 1.8.1. Montar BHA (CSLT, barreira de detritos, CRDT, Deflector Running Tool, colar de perfuração, HWDP);
- 1.8.2. Correr no poço e medir comprimento dos tubos de perfuração;
- 1.8.3. Reduzir a velocidade quando atravessar o ICC superior e aproximando do ICC de trabalho;
- 1.8.4. Gravar o peso de tração, compressão e neutro acima do ICC;
- 1.8.5. Confirmar a orientação do CRDT no MWD;
- 1.8.6. Assentar o CSLT rompendo os pinos de cisalhamento;
- 1.8.7. Tracionar a coluna para garantir que o CSLT está travado;
- 1.8.8. Aplicar torque para romper pino e depois rotacionar para direita para desconectar a Deflector Running Tool;
- 1.8.9. Manobrar a coluna com o BHA (Deflector Running Tool, colar de perfuração e HWDP).

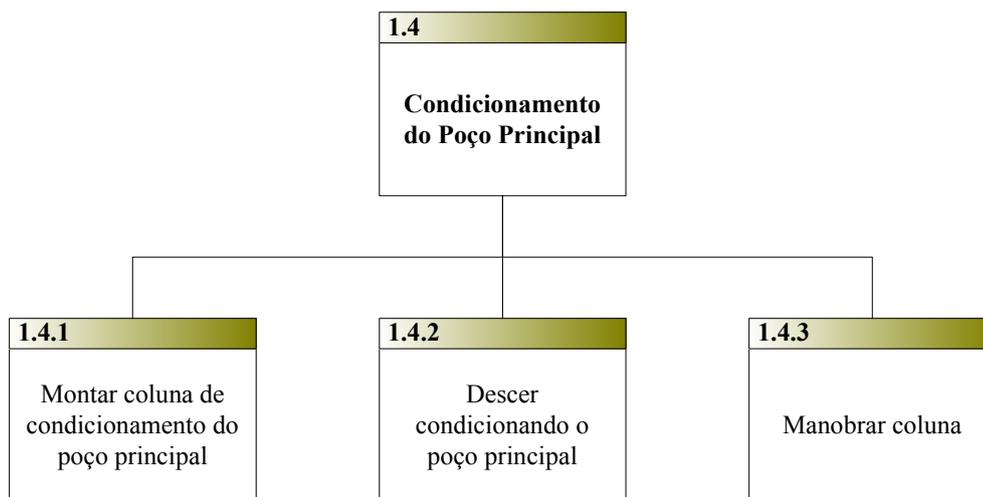
Abaixo serão apresentadas as HTAs de segundo nível para as tarefas de abertura da janela, como parte da análise, após cada HTA descrita uma tabela com a descrição das tarefas de forma mais detalhada relativa a cada envolvido será feita. Esta tabela tem como objetivo descrever as responsabilidades de cada envolvido e como é a interação entre eles. Podendo desta forma, identificar pontos frágeis numa seqüência de eventos, desencadeada por um erro na ação humana onde o estado final pode representar um prejuízo.

#### 8.1.2 HTA - 1.4 Condicionamento do poço principal

Como justificado anteriormente, a primeira HTA a ser apresentada será a 1.4, referente ao condicionamento do poço principal. Em seguida a HTA 1.5, Limpeza e determinação da orientação do ICC em relação ao CSLT. Depois a HTA 1.6, que descreve a abertura do orifício de rato (rat hole). Em seguida a HTA 1.7, referente à retirada do whipstock. E para finalizar a HTA 1.8, referente à descida do CRDT.

---

<sup>22</sup> **CRDT:** Construction Reentry Deflector Tool (Ferramenta defletora para construção da re-entrada).



**Figura 8-2: HTA - 1.4 Condicionamento do poço principal**

Na Figura 8-2, é apresentada a HTA – 1.4, ela consiste de três subtarefas, são elas: montar coluna gabarito para revestimento, descer condicionando o poço principal, e manobrar coluna. Estas tarefas têm como objetivo checar o diâmetro interno do revestimento por todo o poço principal, verificando se não ocorreu colapso ou redução gerada pela cimentação.

**Tabela 8-1: Análise da tarefa 1.4 (Condicionamento do poço principal) com foco no Erro Humano**

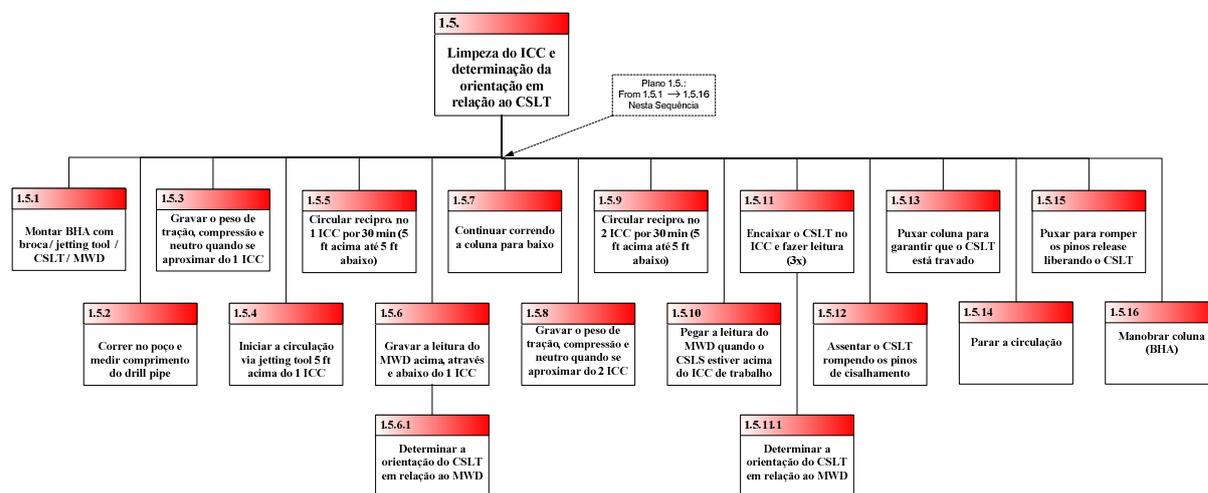
DESCRIÇÃO	ENVOLVIDO	LOCAL	TAREFA	ERRO
1.4.1 Montar coluna de condicionamento do poço principal	Supervisor operações especiais	Na mesa	Supervisionar a montagem	Supervisionar de forma inadequada
	Técnico de operações especiais	Na mesa	Montar coluna de condicionamento para revestimento	Montar coluna de condicionamento com $\Phi$ diferente do programado (menor ou maior)
1.4.2 Descer condicionando o poço principal	Sondador	Na cabine	Controlar a descida (velocidade e carga)	Controlar a descida de forma inadequada

A Tabela 8-1, apresenta de forma detalhada a tarefa condicionamento do poço principal. Nela está detalhada cada subtarefa, identificando os envolvidos, o local (localização na sonda do envolvido), a ação necessária do envolvido na subtarefa, i.e., responsabilidades do envolvido na subtarefa, o(s) erro(s) possível (eis) na realização desta ação e, por fim, a figura – que é a ESD gerada pelo EI que está relacionado ao erro humano.

Conforme Tabela 8-1, da tarefa 1.4 existem duas subtarefas que podem conduzir a uma perda por erro humano. A primeira, 1.4.1, refere-se a duas situações: uma está relacionada à possibilidade do técnico de operações especiais montar a coluna de condicionamento com um diâmetro menor que o programado e a outra se refere à possibilidade do técnico de coluna montar a mesma coluna, porém desta vez com o diâmetro maior. A segunda, 1.4.2, cita a

possibilidade do sondador não controlar a velocidade e carga de descida de forma adequada, e desta forma perceber a dificuldade na passagem da ferramenta no poço ou da coluna de condicionamento, onde o caso se aplicar.

### 8.1.3 HTA - 1.5 Limpeza e determinação da orientação do ICC em relação ao CSLT



**Figura 8-3: HTA - 1.5 Limpeza e determinação da orientação do ICC em relação ao CSLT**

Na Figura 8-3 é apresentada a HTA referente a limpeza e determinação da orientação do ICC em relação ao CSLT. Ela consiste de dezesseis subtarefas, são elas: Montar BHA; Correr BHA no poço e medir comprimento dos tubos de perfuração; Gravar o peso de tração, compressão e neutro quando se aproximar do ICC superior; Iniciar a circulação cinco pés acima do ICC; Circular reciprocando no ICC superior; Gravar leitura do MWD acima, através e abaixo do ICC do superior; Correr para o ICC de trabalho; Gravar o peso de tração, compressão e neutro quando se aproximar do ICC de trabalho; Circular reciprocando no ICC de trabalho; Gravar leitura do MWD quando o CSLT estiver acima do ICC de trabalho; Encaixar o CSLT no ICC de trabalho e fazer leitura (3x); Assentar o CSLT no ICC de trabalho rompendo os pinos de cisalhamento; Tracionar a coluna para garantir que o CSLT está travado; Parar a circulação; Tracionar para romper os pinos de liberação do CSLT; Manobrar a coluna com o BHA (Broca, ferramenta de jateamento, CSLT, MWD).

Em resumo, esta tarefa é iniciada na montagem do BHA, que neste caso é composto pela ferramenta jateadora, CSLT e MWD. Após a montagem o BHA é descido no poço para que a limpeza do ICC via ferramenta de jateamento seja feita. Em seguida é realizado o assentamento do CSLT no ICC para determinar a orientação do ICC. Estando assentado, os pinos de cisalhamento do CSLT são rompidos para que o CSLT se aloje no ICC. Esta ação verifica se o ICC está permitindo o assentamento, após isto o CSLT é liberado pela ruptura

dos pinos de liberação. Estando o CSLT liberado a coluna é puxada para fora do poço, retirando o BHA.

**Tabela 8-2: Análise da tarefa 1.5 (limpeza e determinação da orientação do ICC em relação ao CSLT) com foco no Erro Humano**

DESCRIÇÃO	ENVOLVIDO	LOCAL	TAREFA	ERRO
<b>1.5.1</b> Montar BHA (Broca, ferramenta de jateamento, CSLT, MWD)	Supervisor MLT	Na mesa	Supervisionar a montagem do BHA	Supervisionar de forma inadequada
	Operador MLT	Na mesa	Montar o BHA	Não colocar a bola na ferramenta de jateamento
			Montar os pinos do BHA	Erro na montagem dos pinos de assentamento e/ou desassentamento
			Alinhar o CSLT com anel de indexação e o CSLT	Alinhar errado
		Na cabine	Informar os torques de montagem	Informar os torques incorretos
	Supervisor MWD	Na mesa	Supervisionar as tarefas relacionadas ao MWD	Supervisionar de forma inadequada
	Operador MWD	Na mesa	Montar BHA	Não montar o MWD corretamente no BHA
			Testar o MWD	Testar de forma inadequada ou não testar o MWD
			Alinhar MWD na pump joint com o CSLT	Alinhar errado
		Na cabine	Informar os torques de montagem	Informar os torques incorretos
Sondador	Na cabine	Realizar torque de montagem	Realizar torque de forma inadequada	
<b>1.5.2</b> Correr BHA no poço e medir comprimento dos tubos de perfuração	Supervisor MLT	Na cabine	Supervisionar a velocidade de descida	Supervisionar de forma inadequada
		Na cabine	Controlar a contagem e medida dos	Não controlar a contagem e/ou medida dos tubos

			tubos	adequadamente
	Operador MLT	Na cabine	Controlar a contagem e medida dos tubos	Não controlar a contagem e/ou medida dos tubos adequadamente
	Sondador	Na cabine	Controlar a descida (velocidade e carga)	Não controlar a descida adequadamente
			Controlar a contagem e medida dos tubos	Não controlar a contagem e/ou medida dos tubos adequadamente
<b>1.5.3</b> Gravar o peso de tração, compressão e neutro quando se aproximar do ICC superior	Sondador	Na cabine	Gravar os pesos	Gravar os pesos de forma inadequada
<b>1.5.4</b> Iniciar a circulação cinco pés acima do ICC	Sondador	Na cabine	Acionar as bombas	Tarefa não analisada
<b>1.5.5</b> Circular reciprocando no ICC superior	Sondador	Na cabine	Reciprocicar em cima do ICC superior	Reciprocicar de forma incorreta ou não reciprocicar
<b>1.5.6</b> Gravar leitura do MWD, acima, através e abaixo do ICC superior	Supervisor MWD	Na mesa	Gravar a leitura do MWD	Leitura incorreta
<b>1.5.7</b> Correr para o ICC de trabalho	Sondador	Na cabine	Descer coluna utilizando o sistema de elevação	Tarefa não analisada
<b>1.5.8</b> Gravar o peso de tração, compressão e neutro quando se aproximar do ICC de trabalho	Sondador	Na cabine	Gravar os pesos	Gravar os pesos de forma inadequada
<b>1.5.9</b> Circular reciprocando no ICC de trabalho	Sondador	Na cabine	Reciprocicar em cima do ICC de trabalho	Reciprocicar de forma incorreta ou não reciprocicar
<b>1.5.10</b> Gravar leitura do MWD quando o CSLT estiver acima do ICC de trabalho	Supervisor MWD	Na mesa	Gravar a leitura do MWD	Leitura incorreta
<b>1.5.11</b> Encaixar o CSLT no ICC de trabalho e fazer	Supervisor de perfuração direcional	Na mesa	Supervisionar a realização do cálculo do offset	Supervisionar de forma inadequada

leitura (3x)	Supervisor MWD	Na mesa	Realizar o cálculo do offset	Erro no cálculo do offset
	Supervisor MLT	Na mesa	Realizar o cálculo do offset	Erro no cálculo do offset
<b>1.5.12</b> Assentar o CSLT no ICC de trabalho rompendo os pinos de cisalhamento	Supervisor MLT	Na cabine	Supervisionar a informação das cargas de ruptura	Supervisionar de forma inadequada
	Operador MLT	Na cabine	Informar as cargas de ruptura	Erro na informação das cargas de ruptura
	Sondador	Na cabine	Controlar a carga de ruptura	Controlar a carga de ruptura inadequadamente
<b>1.5.13</b> Tracionar a coluna para garantir que o CSLT está travado	Sondador	Na cabine	Puxar BHA para cima	Tarefa não analisada
<b>1.5.14</b> Parar a circulação	Sondador	Na cabine	Desligar bombas	Tarefa não analisada
<b>1.5.15</b> Tracionar para romper os pinos de liberação do CSLT	Supervisor MLT	Na cabine	Supervisionar a informação das cargas de ruptura	Supervisionar de forma inadequada
	Operador MLT	Na cabine	Informar as cargas de ruptura	Erro na informação das cargas de ruptura
	Sondador	Na cabine	Controlar a carga de ruptura	Controlar a carga de ruptura inadequadamente
<b>1.5.16</b> Manobrar a coluna com o BHA (Broca, ferramenta de jateamento, CSLT, MWD).	Sondador	Na cabine	Puxar BHA para fora do poço por meio do sistema de elevação	Tarefa não analisada

A Tabela 8-2, apresenta de forma detalhada a tarefa limpeza e determinação da orientação do ICC em relação ao CSLT. Nela está detalhada cada subtarefa, identificando os envolvidos, o local (localização na sonda do envolvido), a ação necessária do envolvido na subtarefa i.e., as responsabilidades do envolvido na subtarefa, o(s) erro(s) possível (eis) na realização desta ação, e por fim, a figura – que é a ESD gerada pelo EI que está relacionado ao erro humano.

Na subtarefa 1.5.1 - Realizada a montagem do BHA, que neste caso consiste da broca, ferramenta de jateamento, CSLT e MWD. Para que a montagem do BHA seja bem sucedida, é necessário que ocorra um perfeito trabalho em equipe, onde cada envolvido possui

responsabilidade específica. Os supervisores MLT e MWD, os operadores MLT e MWD e o sondador são os principais envolvidos nesta sub tarefa.

O supervisor MLT tem como atribuição, supervisionar a montagem do BHA, observando se os equipamentos MLT estão sendo montados de forma correta.

O operador MLT tem a responsabilidade de realizar a montagem dos equipamentos MLT no BHA. Nas ações do operador MLT, foram identificados quatro possíveis erros de natureza humana: o primeiro está relacionado à não colocação da esfera dentro da ferramenta jateadora. Sem esta esfera não é possível realizar a limpeza dos ICC, pois o fluxo não terá direção radial. O segundo erro está na montagem dos pinos de assentamento e (ou) desassentamento. Caso estes pinos sejam colocados em número incorreto, ocorrerá uma mudança na carga de ruptura. O terceiro é o alinhamento do CSLT com anel de indexação e o CSLT. Se este alinhamento não for feito, um erro na direção da janela poderá ocorrer. O quarto está na informação dos torques de montagem do BHA para o sondador. O torque sendo informado de forma incorreta, um peixe poderá ser gerado.

O supervisor MWD supervisiona as tarefas relacionadas ao MWD, i.e., a supervisão colabora para reduzir a probabilidade de erro do operador MWD.

O operador MWD tem a responsabilidade de realizar a montagem do equipamento MWD no BHA e teste do MWD. Nas ações do operador MWD, foram identificados quatro possíveis erros de natureza humana: o primeiro erro de montagem do MWD, o segundo testar de forma incorreta ou não testar o MWD, o terceiro é alinhar errado o MWD na pump joint com o CSLT, e o quarto é informar os torques incorretos ao sondador.

Na sub tarefa 1.5.2 - Correr o BHA no poço e medir comprimento dos tubos de perfuração, o principal responsável é o sondador. Na realização desta sub tarefa, o sondador deve controlar a descida do BHA (velocidade e carga). Caso este controle não seja realizado poderá ocorrer uma ruptura prematura dos pinos de assentamento do CSLT ou dano às ferramentas. O sondador realiza também a contagem e medidas dos tubos garantindo que o BHA esteja na profundidade correta dentro do poço. Caso este controle não seja feito corretamente, a ferramenta de jateamento pode não limpar o ICC. O supervisor MLT supervisiona o controle da velocidade de descida. O supervisor MLT e operador MLT realizam a supervisão da contagem dos tubos.

Na sub tarefa 1.5.3 – Gravar o peso de tração, compressão e neutro quando se aproximar do ICC superior – o principal responsável é o sondador. Ele, localizado na cabine, como nas tarefas anteriores, anota estes pesos. O peso de compressão tem grande influência na tarefa de ruptura dos pinos de assentamento, pois os pinos necessitam de uma certa carga para romper.

Se esta carga não for atingida, os pinos poderão não romper impedindo desta forma o assentamento do CSLT. Nesta subtarefa, só se deseja realizar o assentamento do CSLT no ICC superior (secundário), caso o ICC inferior (primário) esteja danificado.

Na subtarefa 1.5.4 – Iniciar a circulação – Esta subtarefa descreve a ação do sondador, por meio do sistema de bombeamento (circulação), acionar a bomba. Por se tratar de uma ação pouco relacionada à tecnologia multilateral, não será analisada neste trabalho.

Na subtarefa 1.5.5 - Circular reciprocando no ICC superior, o principal responsável é o sondador. Nesta subtarefa, o sondador passa a ferramenta de jateamento pela frente do ICC diversas vezes (reciprocando) para garantir a limpeza do ICC. Caso esta limpeza não seja feita corretamente poderá gerar um não travamento do CSLT no ICC (secundário), quando ou se necessário for a sua utilização.

Na subtarefa 1.5.6 – Gravar leitura do MWD, acima, através e abaixo do ICC superior – o principal responsável é o supervisor MWD. Nela o supervisor anota esta informação que será utilizada para calcular o offset deste ICC (ICC secundário). Caso a informação seja armazenada de forma incorreta ou não armazenada, poderá ocorrer um erro na direção da janela se o ICC secundário for solicitado.

Subtarefa 1.5.7 - Correr para o ICC de trabalho. Esta subtarefa descreve a ação do sondador em descer o BHA para o ICC de trabalho (primário). Por se tratar de ação simples e comum, ela não será descrita.

Subtarefa 1.5.8 – Gravar o peso de tração, compressão e neutro quando se aproximar do ICC de trabalho. Da mesma forma que descrita na subtarefa 1.5.3, o principal responsável é o sondador, o qual deve anotar os pesos citados acima. O peso de compressão tem grande influência na tarefa de ruptura dos pinos de assentamento, pois os pinos necessitam de uma certa carga para romper. Se esta carga não for atingida, os pinos poderão não romper impedindo desta forma o assentamento do CSLT. Aqui se torna imprescindível esta informação, uma vez que ela será utilizada para assentar o CSLT no ICC de trabalho (primário).

Subtarefa 1.5.9 - Circular reciprocando no ICC de trabalho. São dois ICC (primário e secundário), onde o secundário é utilizado quando, por qualquer motivo, o primário está indisponível. As ações relacionadas à limpeza se repetem para ambos. Por este motivo esta subtarefa tem como ação a mesma realizada na subtarefa 1.5.5, onde o principal responsável é o sondador. Ele passa a ferramenta de jateamento pela frente do ICC diversas vezes (reciprocando) para garantir a limpeza do ICC. Caso esta limpeza não seja feita corretamente,

poderá gerar um não travamento do CSLT no ICC (primário) durante a realização da subtarefa 1.5.11.

Subtarefa 1.5.10 - Gravar leitura do MWD quando o CSLT estiver acima do ICC de trabalho. Da mesma forma que na subtarefa 1.5.6, o principal responsável por esta subtarefa é o supervisor MWD. Nela o supervisor anota esta informação que será utilizada para calcular o offset deste ICC (ICC primário). Caso a leitura seja feita de forma incorreta, o cálculo do offset poderá ser feito de forma incorreta.

Subtarefa 1.5.11 - Encaixar o CSLT no ICC de trabalho e fazer leitura (3 vezes). Este encaixe ocorrerá porque o ICC de trabalho possui o mesmo perfil do CSLT. Esta ação é realizada por três vezes para garantir que a leitura informada no MWD seja a correta. Os envolvidos nesta subtarefa são: supervisor de perfuração direcional, que tem a responsabilidade de supervisionar o cálculo do offset, supervisor de MWD e MLT, que são responsáveis pela realização do cálculo do offset. O erro no cálculo do pode gerar o erro no posicionamento da janela.

Subtarefa 1.5.12 - Assentar o CSLT no ICC de trabalho rompendo os pinos de cisalhamento. Nesta subtarefa o CSLT é assentado no ICC de trabalho para garantir que ele esteja perfeitamente disponível. Esta é a única verificação do estado do ICC. O operador MLT, sob a supervisão do supervisor MLT, informa as cargas de ruptura ao sondador que, por sua vez, tem como ação controlar a carga aplicada na coluna. Caso ocorra algum erro que contribua para uma não ruptura dos pinos de cisalhamento do CSLT, uma manobra será necessária.

Subtarefa 1.5.13 - Tracionar a coluna para garantir que o CSLT está travado. Esta subtarefa descreve a ação do sondador que, por meio do sistema de elevação, tracionar a coluna para verificar se o CSLT está realmente travado no ICC. Por se tratar de ação simples e comum, ela não será descrita.

Subtarefa 1.5.14 - Parar a circulação. Esta subtarefa descreve a ação do sondador, por meio do sistema de bombeamento (circulação), desligar a bomba. Por se tratar de ação simples e comum, ela não será descrita.

Subtarefa 1.5.15 - Tracionar para romper os pinos de liberação do CSLT. Esta subtarefa descreve a ação do sondador, por meio do sistema de elevação, tracionar a coluna gerando uma carga que aplicada nos pinos de cisalhamento (que neste caso são os de desassentamento) gera a ruptura, liberando o CSLT. Se algum problema ocorrer impedindo que o CSLT desassente, a coluna ficará presa no poço.

Subtarefa 1.5.16 - Manobrar a coluna com o BHA (Broca, ferramenta de jateamento, CSLT, MWD). Esta subtarefa descreve a ação do sondador que, por meio do sistema de elevação, retira o BHA do poço. Por se tratar de ação simples e comum, ela não será descrita.

8.1.4 HTA - 1.6 Abertura do rat hole com BHA (CSLT, BD, whipstock) de fresagem

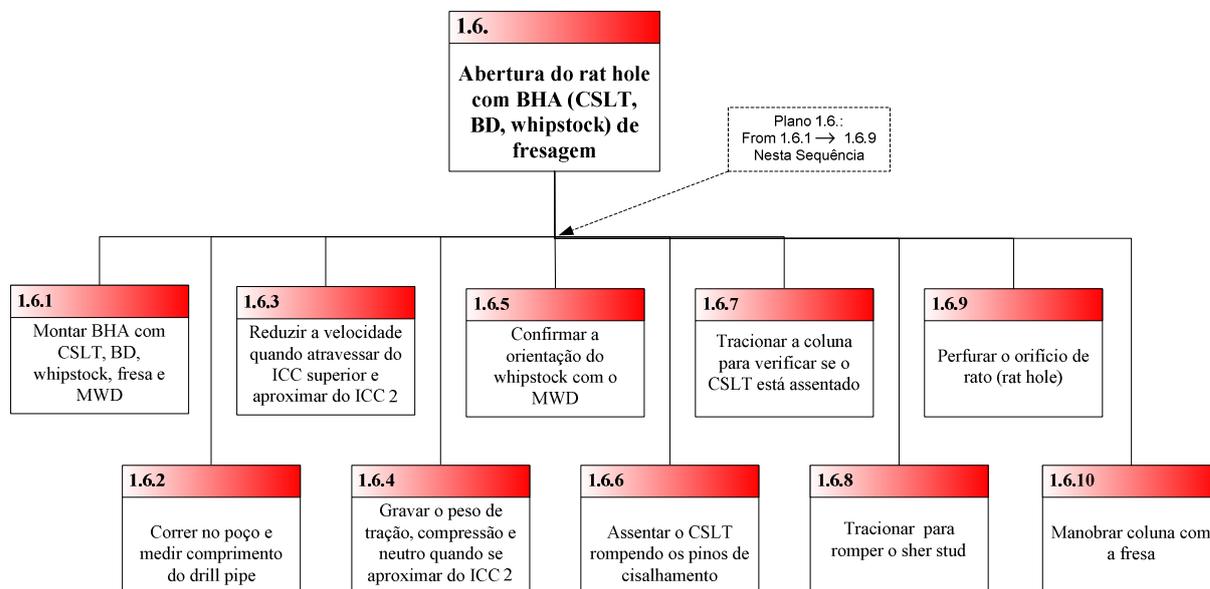


Figura 8-4: HTA - 1.6 Abertura do rat hole com BHA (CSLT, BD, whipstock) de fresagem

Na Figura 8-4 é apresentada a HTA referente a abertura do orifício de rato (rat hole), a qual consiste de dez subtarefas: Montar BHA com CSLT, BD (Barreira de Detritos), whipstock, fresa e MWD; Correr no poço e medir comprimento dos tubos de perfuração; Reduzir a velocidade quando atravessar do ICC superior e aproximar do ICC de trabalho; Gravar o peso de tração, compressão e neutro quando se aproximar do ICC de trabalho; Confirmar a orientação do whipstock com o MWD; Assentar o CSLT rompendo os pinos de cisalhamento; Tracionar a coluna para verificar se o CSLT está assentado; Tracionar para romper o shear stud; Perfurar o orifício de rato (rat hole); Manobrar a coluna com a fresa.

Em resumo, esta tarefa é iniciada na montagem do BHA – composto pelo CSLT, barreira de detritos, whipstock, fresa e MWD. Após a montagem o BHA, ele é descido no poço até a posição do ICC. Em seguida é realizado o assentamento do CSLT no ICC. Estando assentados, os pinos de cisalhamento do CSLT são rompidos para que o CSLT se aloje no ICC. Após isto os pinos de cisalhamento da barreira de detritos são rompidos. A barreira de detritos tem a função de impedir a passagem de detritos para o CSLT. Ela se faz necessário uma vez que nesta tarefa o orifício de rato (rat hole) é aberto, gerando detritos que podem se alojar no CSLT. Desta forma ela impede que isto ocorra. Em seguida, o pino shear stud é rompido. Este pino tem a função de manter unidas as duas partes do BHA, que são: CSLT,

BD e whipstock com a fresa. Com a ruptura a fresa fica livre para ser rotacionada iniciando a abertura da janela, e em seguida do orifício de rato (rat hole). Uma vez que o orifício de rato (rat hole) está perfurado, a fresa é manobrada, i.e, retirada para fora do poço, deixando no fundo do poço o conjunto CSLT, BD e whipstock, que será retirado na tarefa seguinte.

**Tabela 8-3: Análise da tarefa 1.6 (abertura do rat hole) com foco no Erro Humano**

DESCRIÇÃO	ENVOLVIDO	LOCAL	TAREFA	ERRO
1.6.1 Montar BHA com CSLT, BD, whipstock, fresa e MWD	Supervisor MLT	Na mesa	Supervisionar a montagem do BHA	Supervisionar de forma inadequada
	Operador MLT	Na mesa	Montar o BHA	Errar na montagem do BHA invertendo a posição da BD
			Montar os pinos do BHA	Erro na montagem dos pinos de assentamento e/ou desassentamento
			Alinhar o CSLT pelo anel de indexação, alinhar a face do whipstock com o CSLT e o MWD com o whipstock	Erro no alinhamento do anel de indexação ou face do whipstock na direção incorreta ou MWD e whipstock
		Na cabine	Informar os torques de montagem	Informar os torques incorretos
	Supervisor MWD	Na mesa	Supervisionar as tarefas relacionadas ao MWD	Supervisionar de forma inadequada
	Operador MWD	Na mesa	Montar o BHA	Errar na montagem do BHA de forma que o MWD não opere
			Alinhar o CSLT pelo anel de indexação, alinhar a face do whipstock na direção correta e o MWD com o whipstock	Erro no alinhamento do anel de indexação ou face do whipstock na direção incorreta ou MWD e whipstock
			Testar o MWD	Testar de forma inadequada ou não testar o MWD

		Na cabine	Informar os torques de montagem	Informar os torques incorretos
	Sondador	Na cabine	Realizar torque de montagem	Realizar torque de forma inadequada
<b>1.6.2</b> Correr BHA no poço e medir comprimento dos tubos de perfuração	Supervisor MLT	Na cabine	Supervisionar a velocidade de descida	Supervisionar de forma inadequada
			Controlar a contagem e medida dos tubos	Não controlar a contagem e/ou medida dos tubos adequadamente
	Operador MLT	Na cabine	Controlar a contagem e medida dos tubos	Não controlar a contagem e/ou medida dos tubos adequadamente
	Sondador	Na cabine	Controlar a descida (velocidade e carga)	Não controlar a descida adequadamente
			Controlar a contagem e medida dos tubos	Não controlar a contagem e/ou medida dos tubos adequadamente
<b>1.6.3</b> Reduzir a velocidade quando atravessar o ICC superior e aproximar do ICC de trabalho	Sondador	Na cabine	Controlar a velocidade e carga ao atravessar o ICC superior e aproximar do ICC de trabalho	Controlar a velocidade e carga de forma inadequada
			Controlar a carga de torção ao atravessar o ICC superior e aproximar do ICC de trabalho	Controlar carga de torção de forma inadequada
<b>1.6.4</b> Gravar o peso de tração, compressão e neutro quando se aproximar do ICC de trabalho	Sondador	Na cabine	Gravar os pesos	Gravar os pesos de forma inadequada
<b>1.6.5</b> Confirmar a orientação do whipstock com o MWD	Supervisor MWD	Na mesa	Supervisionar as atividades relacionadas ao MWD	Supervisionar de forma inadequada
	Operador MWD	Na mesa	Fazer leitura do MWD	Falha do MWD, não informa a leitura
			Confirmar a orientação do whipstock com o MWD	Não confirmar ou confirmar estando errado

<b>1.6.6</b> Assentar o CSLT rompendo os pinos de cisalhamento	Supervisor MLT	Na cabine	Supervisionar a informação das cargas de ruptura	Supervisionar de forma inadequada
	Operador MLT	Na cabine	Informar as cargas de ruptura	Erro na informação das cargas de ruptura
	Sondador	Na cabine	Controlar a carga de ruptura	Controlar a carga de ruptura inadequadamente
<b>1.6.7</b> Tracionar a coluna para verificar se o CSLT está assentado	Sondador	Na cabine	Puxar BHA para cima	Tarefa não analisada
<b>1.6.8</b> Tracionar para romper o shear stud	Supervisor MLT	Na cabine	Supervisionar a informação das cargas de ruptura	Supervisionar de forma inadequada
	Operador MLT	Na cabine	Informar as cargas de ruptura	Erro na informação das cargas de ruptura
	Sondador	Na cabine	Controlar a carga de ruptura	Controlar a carga de ruptura inadequadamente
<b>1.6.9</b> Perfurar o orifício de rato (rat hole)	Sondador	Na cabine	Rotacionar a fresa e iniciar a abertura de janela em na seqüência o orifício de rato	Tarefa não analisada
<b>1.6.10</b> Manobrar a coluna com a fresa	Sondador	Na cabine	Puxar BHA para fora do poço por meio do sistema de elevação	Tarefa não analisada

A Tabela 8-1 apresenta de forma detalhada a tarefa abertura do orifício de rato (rat hole). Nela está detalhada cada subtarefa, identificando os envolvidos, o local (localização na sonda do envolvido), a ação necessária do envolvido na subtarefa i.e., responsabilidades do envolvido na subtarefa, o(s) erro(s) possível (eis) na realização desta ação e, por fim, a figura – que é a ESD gerada pelo EI que está relacionado ao erro humano.

A subtarefa 1.6.1 é a montagem do BHA, que neste caso consiste do CSLT, BD, whipstock, fresa e MWD. Da mesma forma na subtarefa de montagem apresentada na tarefa 1.5, para que a montagem do BHA seja bem sucedida, é necessário que ocorra um perfeito trabalho em equipe, onde cada envolvido possui responsabilidades específicas. Os supervisores MLT e MWD, os operadores MLT e MWD e o sondador são os principais envolvidos nesta subtarefa.

O supervisor MLT tem como atribuição supervisionar a montagem do BHA observando especificamente se os equipamentos MLT estão sendo montados de forma correta.

O operador MLT tem a responsabilidade de realizar a montagem. Nesta tarefa foram identificados quatro possíveis erros de natureza humana por parte do operador MLT: o primeiro está relacionado ao erro na montagem do BHA posicionando a BD de forma invertida, sendo necessária à execução de uma manobra para corrigir o erro. O segundo consiste na montagem dos pinos de cisalhamento do BHA. Através destes pinos o CSLT e BD são assentados e desassentados no poço e a fresa é liberada. Caso um erro na montagem ocorra, poderá ocorrer o não assentamento ou a geração de diversos tipos de peixe, por conta da mudança na carga de ruptura. O terceiro está relacionado ao alinhamento do CSLT, por meio do anel de indexação, na direção da janela; alinhar a face do whipstock na direção da chaveta do CSLT; e alinhar o MWD com a face do whipstock. Caso qualquer um destes três alinhamentos não seja feito, um erro na direção da janela pode ocorrer. O quarto está relacionado à informação dos torques ao sondador.

O supervisor MWD supervisiona as tarefas relacionadas ao MWD. A supervisão colabora para reduzir a probabilidade de erro do operador MWD, garantindo que a montagem do BHA e o alinhamento sejam feitos de forma correta, assim como o teste do MWD seja realizado adequadamente.

O operador MWD tem a responsabilidade de realizar a montagem. Nesta tarefa foram identificados quatro possíveis erros de natureza humana por parte do operador MLT: o primeiro está relacionado ao erro na montagem do BHA, onde o MWD não opera corretamente, sendo necessária à realização de manobra para corrigir o erro. O segundo, na realização do teste do MWD, o operador pode realizar o teste de forma incorreta ou não realizar o teste. O terceiro está relacionado ao erro no alinhamento do anel de indexação ou face do whipstock na direção incorreta, ou erro no alinhamento do MWD com whipstock. Caso qualquer um destes três alinhamentos não seja feito, um erro na direção da janela pode ocorrer. O quarto está relacionado à informação dos torques ao sondador.

Na subtarefa 1.6.2 - Correr o BHA no poço e medir comprimento dos tubos de perfuração, o principal responsável é o sondador. Na realização desta subtarefa o sondador deve controlar a descida do BHA (velocidade e carga). Caso este controle não seja realizado poderá ocorrer uma ruptura prematura dos pinos de assentamento do CSLT ou BD, ou ruptura do pino shear stud, ou dano as ferramentas. O supervisor MLT supervisiona o controle da velocidade de descida. O sondador realiza também a contagem e medidas dos tubos garantindo que o BHA esteja na profundidade correta dentro do poço. Caso este controle não

seja feito corretamente, a ferramenta de jateamento pode não limpar o ICC. O supervisor MLT e operador MLT realizam a supervisão da contagem dos tubos.

A subtarefa 1.6.3 corresponde a reduzir a velocidade quando atravessar o ICC superior e aproximar do ICC de trabalho. O sondador é o principal responsável por esta subtarefa. Ele tem duas ações principais. A primeira é controlar a velocidade e carga ao atravessar o ICC superior e aproximar do ICC de trabalho. Este controle reduz a probabilidade de ocorrer uma ruptura prematura dos pinos de assentamento. A segunda ação é controlar a carga de torção ao atravessar o ICC superior e aproximar do ICC de trabalho. Realizando este controle, reduz-se a probabilidade de ruptura do pino shear stud. Se o mesmo for rompido, um estado final denominado peixe é gerado.

Subtarefa 1.6.4 – Gravar o peso de tração, compressão e neutro quando se aproximar do ICC de trabalho. Nesta subtarefa, o sondador tem como ação anotar os pesos de tração compressão e neutro da coluna. Estes valores serão utilizados quando o assentamento e desassentamento do CSLT e BD, e ruptura do shear stud forem realizados.

Subtarefa 1.6.5 – Confirmar a orientação do whipstock com o MWD. Nesta subtarefa, o supervisor MWD, em equipe com o operador MWD, confirmam se a orientação do whipstock está conforme programado. Caso a confirmação não seja feita, um erro na direção da janela pode ocorrer.

Subtarefa 1.6.6 – Assentar o CSLT rompendo os pinos de cisalhamento. Esta subtarefa tem o envolvimento do supervisor MLT, operador MLT e sondador. O supervisor, em equipe com o operador, informam ao sondador a carga de ruptura necessária para romper os pinos de assentamento do CSLT, BD e shear stud. Porém este valor é especificamente a carga aplicada nas ferramentas (CSLT, BD e shear stud). Para saber qual será a carga aplicada no sistema de elevação necessária para atingir este valor, faz-se necessário adicionar o valor do peso de compressão gravado na subtarefa 1.6.4. Se a execução ou cálculo for feito de forma errada a coluna poderá ficar presa.

Subtarefa 1.6.7 – Tracionar a coluna para verificar se o CSLT está assentado. Esta subtarefa consiste na ação do operador, aplicar uma carga de tração na coluna, para verificar se o CSLT está devidamente assentado. Por se tratar de ação simples e comum, ela não será descrita.

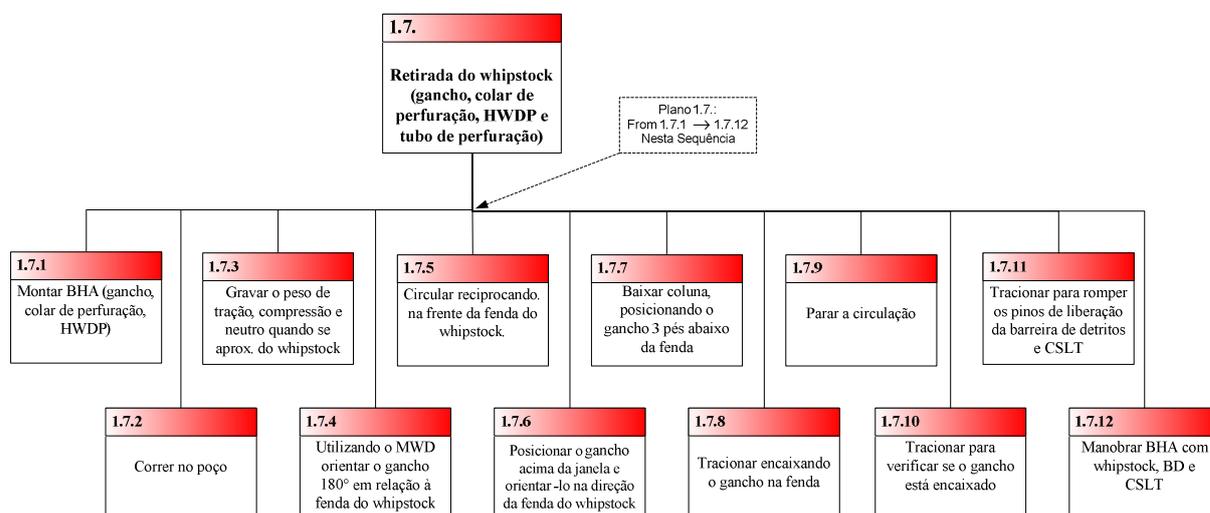
Subtarefa 1.6.8 – Tracionar para romper o shear stud. Nesta subtarefa o sondador por meio do sistema de elevação, tracionar a coluna aplicando a carga necessária de ruptura do pino shear stud. O supervisor MLT, junto com o operador MLT, informa ao sondador o valor desta carga e supervisiona a aplicação. Caso a aplicação do torque seja diferente do

programado, a não ruptura do pino poderá ocorrer gerando um estado denominado coluna presa.

Subtarefa 1.6.9 – Perfurar o orifício de rato (rat hole). Esta subtarefa descreve a ação do sondador que, por meio do sistema de circulação e torque, realiza a abertura da janela e em seguida abre o orifício de rato. Por se tratar de ação simples e comum, ela não foi descrita.

Subtarefa 1.6.10 – Manobrar a coluna com a fresa. Esta subtarefa descreve a ação do sondador que, por meio do sistema de elevação, retira a coluna com a fresa do poço deixando o conjunto CSLT, BD e whipstock. Por se tratar de ação simples e comum, ela não foi descrita.

### 8.1.5 HTA - 1.7 Retirada do whipstock



**Figura 8-5: HTA - 1.7 Retirada do whipstock**

Na Figura 8-5 é apresentada a HTA referente a tarefa retirada do whipstock. Ela consiste de doze subtarefas: Montar BHA (gancho, colar de perfuração, HWDP e MWD); Correr no poço e medir comprimento dos tubos de perfuração; Gravar o peso de tração, compressão e neutro quando se aproximar do whipstock; Utilizando o MWD orientar a gancho 180° em relação à fenda do whipstock (parte de trás do gancho em direção fenda do whipstock); Circular reciprocando na frente da fenda do whipstock (cobrir três pés acima e abaixo da fenda); Posicionar o gancho acima da janela e usando o MWD orientar o gancho na direção da fenda do whipstock; Baixar coluna, posicionando o gancho três pés abaixo da fenda; Tracionar encaixando o gancho na fenda; Parar a circulação; Tracionar para verificar se o gancho está encaixado; Tracionar para romper os pinos de liberação da barreira de detritos e CSLT; Manobrar a coluna com o BHA (gancho, colar de perfuração, HWDP), whipstock, barreira de detritos e CSLT.

Em resumo esta tarefa é iniciada na montagem do BHA – composto pelo gancho, colar de perfuração, HWDP e MWD. Após a montagem, o BHA é descido no poço até a profundidade do whipstock. Alcançada a profundidade, a face contrária do gancho é direcionada para fenda do whipstock, nesta face existe um furo de jateamento que tem a função de limpar a fenda caso ela esteja com detritos de perfuração. Com a fenda limpa, novamente o gancho é rotacionado para que ele faça face com a fenda. Depois disto o whipstock é encaixado no gancho. O próximo passo é parar a circulação e tracionar para confirmar se o gancho está encaixado. Em seguida, a coluna é tracionada para romper os pinos de liberação da BD e CST, nesta seqüência. Por fim todo o conjunto é retirado do poço.

**Tabela 8-4: Análise da tarefa 1.7 (retirada do whipstock) com foco no Erro Humano**

DESCRIÇÃO	ENVOLVIDO	LOCAL	TAREFA	ERRO
1.7.1 Montar BHA (gancho, colar de perfuração, HWDP)	Supervisor MLT	Na cabine	Supervisionar a montagem do BHA	Supervisionar de forma inadequada
	Operador MLT	Na mesa	Montar o BHA	Errar na montagem do BHA
		Na cabine	Informar os torque de montagem	Torques não informado ou informado incorretamente
	Supervisor MWD	Na mesa	Supervisionar as tarefas relacionadas ao MWD	Supervisionar de forma inadequada
	Operador MWD	Na mesa	Montar o BHA	Alinhar de forma incorreta ou não alinhar
			Teste do MWD	Testar de forma inadequada ou não testar o MWD
		Na cabine	Informar os torque de montagem	Torques não informado ou informado incorretamente
	Sondador	Na cabine	Realizar torque de montagem	Realizar torque de forma inadequada
1.7.2 Correr BHA no poço e medir comprimento dos tubos de perfuração	Supervisor MLT	Na cabine	Controlar a contagem e medida dos tubos	Não controlar a contagem e/ou medida dos tubos adequadamente
	Operador MLT	Na cabine	Controlar a contagem e medida dos tubos	Não controlar a contagem e/ou medida dos tubos adequadamente

	Sondador	Na cabine	Controlar a contagem e medida dos tubos	Não controlar a contagem e/ou medida dos tubos adequadamente
<b>1.7.3</b> Gravar o peso de tração, compressão e neutro quando se aproximar do whipstock	Sondador	Na cabine	Gravar os pesos	Gravar os pesos de forma inadequada
<b>1.7.4</b> Utilizando o MWD orientar a gancho 180° em relação à fenda do whipstock. Parte de trás do gancho em direção fenda do whipstock	Supervisor MWD	Na cabine	Supervisionar as atividades relacionadas ao MWD	Supervisionar de forma inadequada
	Operador MWD	Na cabine	Fazer leitura do MWD	Falha do MWD, não informa a leitura
<b>1.7.5</b> Circular reciprocando na frente da fenda do whipstock. Cobrir 3 pés acima e abaixo da fenda	Sondador	Na cabine	Reciprocicar a coluna	Tarefa não analisada
<b>1.7.6</b> Posicionar o gancho acima da janela e usando o MWD orientar o gancho na direção da fenda do whipstock	Supervisor MWD	Na cabine	Supervisionar as atividades relacionadas ao MWD	Supervisionar de forma inadequada
	Operador MWD	Na cabine	Fazer leitura do MWD	Falha do MWD, não informa a leitura
<b>1.7.7</b> Baixar coluna, posicionando o gancho 3 pés abaixo da fenda	Sondador	Na cabine	Baixar a coluna de forma que o gancho fique posicionando abaixo da fenda	Tarefa não analisada
<b>1.7.8</b> Tracionar encaixando o gancho na fenda	Sondador	Na cabine	Tracionar a coluna, de forma que o gancho se encaixe na fenda	Tarefa não analisada
<b>1.7.9</b> Parar a circulação	Sondador	Na cabine	Desligar a bomba via sistema de circulação	Tarefa não analisada
<b>1.7.10</b> Tracionar para verificar se o gancho está encaixado	Sondador	Na cabine	Tracionar coluna e observar indicação de carga pelo sistema de elevação	Tarefa não analisada
<b>1.7.11</b> Tracionar para romper os pinos de liberação da barreira de detritos e CSLT	Supervisor MLT	Na cabine	Supervisionar a informação das cargas de ruptura	Supervisionar de forma inadequada
	Operador MLT	Na cabine	Informar as cargas de ruptura	Erro na informação das cargas de ruptura

	Sondador	Na cabine	Controlar a carga de ruptura	Controlar a carga de ruptura inadequadamente
<b>1.7.12</b> Manobrar a coluna com o BHA (gancho, HWDP), whipstock, BD e CSLT	Sondador	Na cabine	Puxar BHA para fora do poço por meio do sistema de elevação	Erro na execução na manobra (afrouxar enquanto manobrando)

A Tabela 8-4, apresenta de forma detalhada a tarefa retirada do whipstock. Como nas tarefas anteriores, nela está detalhada cada subtarefa, identificando os envolvidos, o local (localização na sonda do envolvido), a ação necessária do envolvido na subtarefa, i.e., as responsabilidades do envolvido na subtarefa, o(s) erro(s) possível (eis) na realização desta ação e, por fim, a figura – que é a ESD gerada pelo EI que está relacionado ao erro humano.

Subtarefa 1.7.1 – Montagem do BHA, composto por gancho, colar de perfuração, HWDP e MWD. Nela estão envolvidos os supervisores MLT e MWD, os operadores MLT e MWD e o sondador.

O supervisor MLT tem como atribuição supervisionar a montagem do BHA, observando se os equipamentos MLT estão sendo montados de forma correta.

O operador MLT tem a responsabilidade de realizar a montagem do BHA. Nesta subtarefa foram identificados dois possíveis erros de natureza humana. O primeiro está relacionado ao erro na montagem do BHA, o qual acarreta em manobra para corrigir o erro. O segundo está relacionado à informação dos torques de montagem do BHA ao sondador. Caso esta informação seja incorreta, um peixe poderá ser gerado.

O supervisor MWD supervisiona as tarefas relacionadas ao MWD. A supervisão colabora para reduzir a probabilidade de erro do operador MWD, garantindo que a montagem do BHA (alinhamento e a realização do teste do MWD), sejam feitos de forma correta.

O operador MWD tem a responsabilidade de realizar a montagem do BHA. Nesta subtarefa foram identificados três possíveis erros de natureza humana. O primeiro está relacionado ao erro na montagem do BHA, onde o alinhamento da face do gancho com o MWD não é realizada. Neste caso, uma manobra será necessária para corrigir o erro. O segundo está relacionado à informação dos torques de montagem do BHA ao sondador. Caso esta informação seja incorreta, um peixe poderá ser gerado. O terceiro está relacionado ao teste do MDW. Caso o teste não seja feito ou feito de forma incorreta uma manobra será necessária.

Na subtarefa 1.7.2 - Correr BHA no poço e medir comprimento dos tubos de perfuração, o principal responsável é o sondador. Na realização desta subtarefa o sondador

deve controlar a contagem e medida dos tubos. Caso este controle não seja feito o gancho poderá se chocar com o whipstock gerando um dado no gancho. O supervisor MLT e operador MLT realizam a supervisão da contagem dos tubos.

Subtarefa 1.7.3 – Gravar o peso de tração, compressão e neutro quando se aproximar do ICC de trabalho. Nesta subtarefa, o sondador tem como ação anotar os pesos de tração compressão e neutro da coluna, estes valores serão utilizados quando desassentamento do CSLT e BD forem realizadas.

Subtarefa 1.6.4 – Utilizando o MWD orientar a gancho 180° em relação à fenda do whipstock. Parte de trás do gancho em direção fenda do whipstock. Os principais envolvidos são o supervisor MWD e operador MWD. Nesta subtarefa, sendo a leitura do MWD necessária, o MWD deve operar e informar a leitura corretamente. Caso isto não ocorra, uma manobra será necessária.

Subtarefa 1.6.5 – Circular reciprocando na frente da fenda do whipstock. Está subtarefa trata da ação do sondador em elevar e baixar a coluna para que o jato do gancho limpe o whipstock. Por se tratar de ação simples e comum, ela não será descrita.

Subtarefa 1.6.6 – Posicionar o gancho acima da janela e usando o MWD orientar o gancho na direção da fenda do whipstock. Da mesma forma que a subtarefa 1.6.4, o supervisor e o operador MWD são os principais responsáveis na realização desta subtarefa. Note que a leitura por meio do MWD para orientar o gancho é necessária.

Subtarefa 1.6.7 – Baixar coluna, posicionando o gancho três pés abaixo da fenda. O sondador é o principal responsável por realizar esta ação. Nela é necessário, por meio do sistema de elevação, baixar a coluna de forma que o gancho fique posicionando abaixo da fenda. Por se tratar de ação simples e comum, ela não será descrita.

Subtarefa 1.6.8 – Tracionar a coluna, encaixando o gancho na fenda. O sondador é o principal responsável por realizar esta ação. Nela é necessário, por meio do sistema de elevação, tracionar a coluna de forma que o gancho se encaixe na fenda. Por se tratar de ação simples e comum, ela não será descrita.

Subtarefa 1.6.9 – Parar a circulação. O sondador é o principal responsável por realizar esta ação. Nela é necessário, por meio do sistema de circulação, desligar a bomba via sistema de circulação. Por se tratar de ação simples e comum, ela não será descrita.

Subtarefa 1.6.10 – Tracionar para verificar se o gancho está encaixado na fenda do whipstock. O sondador é o principal responsável por realizar esta ação. Nela é necessário tracionar coluna e observar indicação de carga pelo sistema de elevação. Por se tratar de ação simples e comum, ela não será descrita.

Subtarefa 1.6.11 – Tracionar para romper os pinos de liberação da barreira de detritos e CSLT. Os principais envolvidos nesta subtarefa são o supervisor MLT, operador MLT e sondador. O supervisor tem a função de verificar se as cargas de ruptura informadas pelo operador ao sondador estão corretas. O operador informa ao sondador as cargas de ruptura, enquanto que o sondador controla a carga de ruptura por meio do sistema de elevação. Caso esta operação seja realizada de forma incorreta, diversos tipos de peixe poderão ser gerados. Abaixo serão apresentadas todas as combinações possíveis de falha e as respectivas operações necessárias. Para identificar as posições dos pinos, e equipamentos no BHA.

- Ruptura do pino REL 1 (Barreira de Detritos) e REL 2 (CSLT);
  - Retirada normal do conjunto.
- Ruptura do pino REL 1, NÃO Ruptura do pino REL 2, Ruptura do Hinge Pin 70 (entre o whipstock e barreira de detrito) e 90 Klb (entre a barreira de detritos e CSLT).
  - Retirar o whipstock, depois pescar a barreira de detritos. O CSLT fica como peixe e travado.
- Ruptura do pino REL 1, NÃO Ruptura do pino REL 2, Ruptura do Hinge Pin 70 e NÃO ruptura do Hinge Pin de 90 Klb.
  - Retira o conjunto whipstock e barreira de detritos. O CSLT fica como peixe e travado.
- Ruptura do pino REL 1, NÃO Ruptura do pino REL 2, Ruptura do Hinge Pin 90 e NÃO ruptura do Hinge Pin de 70 Klb.
  - Retirar o whipstock. O conjunto barreira de detritos e CSLT ficam como peixe, com o CSLT travado.
- NÃO Ruptura do pino REL 1 e Ruptura do pino REL 2.
  - Retirada sob condição anormal, devido ao NÃO desalojamento da barreira de detritos, atraso na operação.
- NÃO Ruptura do pino REL 1, NÃO Ruptura do pino REL 2, Ruptura do Hinge Pin 70 e ruptura do Hinge Pin de 90 Klb.
  - Retirar o whipstock, depois pescar a barreira de detritos não desalojada. O CSLT fica como peixe e travado.
- NÃO Ruptura do pino REL 1, NÃO Ruptura do pino REL 2, Ruptura do Hinge Pin 70 e NÃO ruptura do Hinge Pin de 90 Klb.

- Retirar o conjunto whipstock e barreira de detritos não desalojada. O CSLT fica como peixe e travado.
- NÃO Ruptura do pino REL 1, NÃO Ruptura do pino REL 2, NÃO Ruptura do Hinge Pin 70 e ruptura do Hinge Pin de 90 Klb.
  - Retirar o whipstock. O conjunto barreira de detritos não desalojada e CSLT ficam como peixe, com o CSLT travado.
- NÃO Ruptura do pino REL 1, NÃO Ruptura do pino REL 2, NÃO Ruptura do Hinge Pin 70 e NÃO ruptura do Hinge Pin de 90 Klb.
  - O conjunto whipstock, barreira de detritos não desalojada e CSLT ficam como peixe, com o CSLT travado.

Subtarefa 1.6.12 – Manobrar a coluna com o BHA gancho, whipstock, BD e CSLT. Esta subtarefa descreve a ação do sondador de puxar o BHA para fora do poço por meio do sistema de elevação. O sondador pode cometer um erro na execução da manobra, afrouxando a coluna enquanto estiver manobrando, gerando assim um peixe.

8.1.6 HTA - 1.8 Descida do CRDT

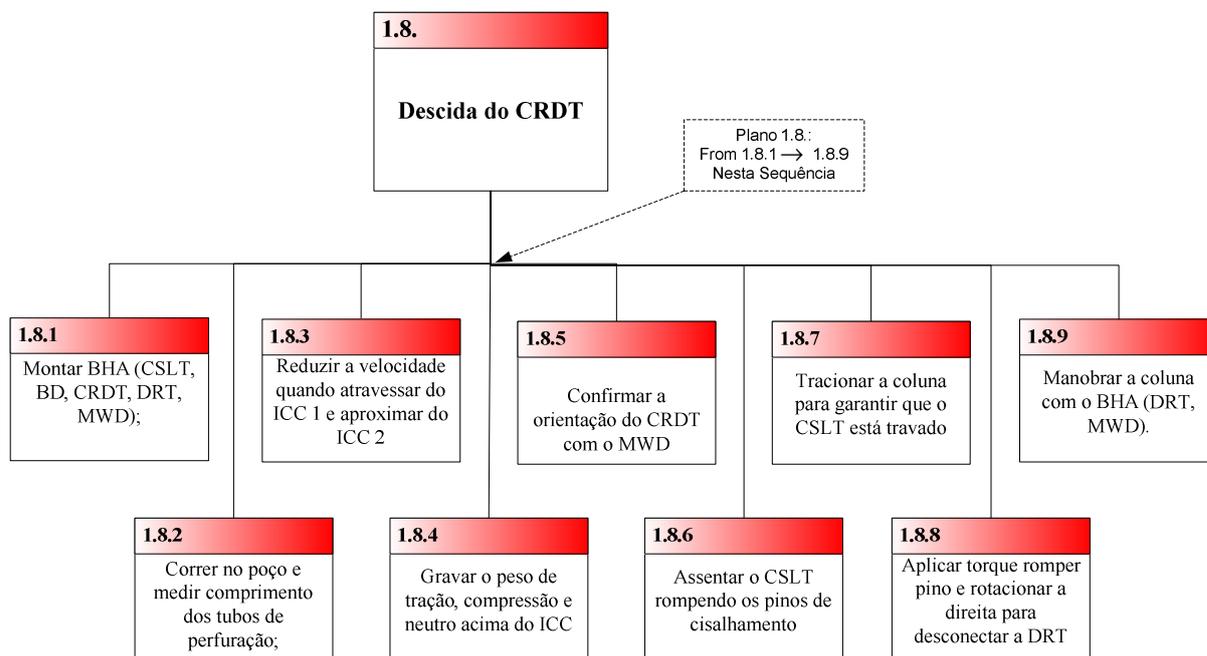


Figura 8-6: HTA - 1.8 Descida do CRDT

Na Figura 8-6 é apresentada a HTA referente a descida do CRDT, a qual consiste de nove subtarefas: Montar BHA com CSLT, BD (Barreira de Detritos), CRDT, DRT e MWD; Correr no poço e medir comprimento dos tubos de perfuração; Reduzir a velocidade quando atravessar do ICC superior e aproximar do ICC de trabalho; Gravar o peso de tração,

compressão e neutro quando se aproximar do ICC de trabalho; Confirmar a orientação do CRDT com o MWD; Assentar o CSLT rompendo os pinos de cisalhamento; Tracionar a coluna para verificar se o CSLT está assentado; Aplicar torque para romper pino e rotacionar a direita para desconectar a DRT; Manobrar a coluna com DRT e MWD.

Em resumo, esta tarefa é iniciada na montagem do BHA – composto pelo CSLT, barreira de detritos, CRDT, DRT e MWD. Após a montagem o BHA, ele é descido no poço até a posição do ICC de trabalho. Em seguida é realizado o assentamento do CSLT no ICC. Estando assentados, os pinos de cisalhamento do CSLT são rompidos para que o CSLT se aloje no ICC de trabalho. Após isto, os pinos de cisalhamento da barreira de detritos são rompidos. A barreira de detritos tem a função de impedir a passagem de detritos para o CSLT. Ela se faz necessária uma vez que nesta tarefa a perfuração da perna lateral é realizada, gerando detritos que podem se alojar no CSLT. A BD impede que isto ocorra. Em seguida, a coluna é rotacionada para que o pino que mantém o DRT e CRDT fixo seja rompido. Após a ruptura a coluna é rotacionada para a direita liberando o DRT do CRDT. Estando o DRT livre, ele é manobrado para fora do poço.

**Tabela 8-5: Análise da tarefa 1.8 (descida do CRDT) com foco no Erro Humano**

DESCRIÇÃO	ENVOLVIDO	LOCAL	TAREFA	ERRO
1.8.1 Montar BHA (CSLT, BD, CRDT, DRT, HWDP)	Supervisor MLT	Na mesa	Supervisionar a montagem do BHA	Supervisionar de forma inadequada
	Operador MLT	Na mesa	Montar o BHA	Erro no posicionamento do mandril
			Montar os pinos do BHA	Erro na montagem dos pinos de assentamento e/ou desassentamento
			Alinhar o CSLT pelo anel de indexação, alinhar a face do CRDT com o CSLT e o MWD com o CRDT	Erro no alinhamento do anel de indexação ou face do CRDT na direção incorreta ou MWD e CRDT
		Na cabine	Informar os torques de montagem	Informar os torques incorretos
Supervisor MWD	Na mesa	Supervisionar as tarefas relacionadas ao MWD	Supervisionar de forma inadequada	

Operador MWD	Na mesa	Montar o BHA	Errar na montagem do BHA de forma que o MWD não opere	
		Alinhar o CSLT pelo anel de indexação, alinhar a face do CRDT na direção correta e o MWD com o CRDT	Erro no alinhamento do anel de indexação ou face do CRDT na direção incorreta ou MWD e CRDT	
		Testar o MWD	Testar de forma inadequada ou não testar o MWD	
	Na cabine	Informar os torques de montagem	Informar os torques incorretos	
Sondador	Na cabine	Realizar torque de montagem	Realizar torque de forma inadequada	
<b>1.8.2</b> Correr BHA no poço e medir comprimento dos tubos de perfuração	Supervisor MLT	Na cabine	Supervisionar a velocidade de descida	Supervisionar de forma inadequada
		Controlar a contagem e medida dos tubos	Não controlar a contagem e/ou medida dos tubos adequadamente	
	Operador MLT	Na cabine	Controlar a contagem e medida dos tubos	Não controlar a contagem e/ou medida dos tubos adequadamente
	Sondador	Na cabine	Controlar a descida (velocidade e carga)	Não controlar a descida adequadamente
			Controlar a contagem e medida dos tubos	Não controlar a contagem e/ou medida dos tubos adequadamente
<b>1.8.3</b> Reduzir a velocidade quando atravessar do ICC superior e aproximar do ICC de trabalho	Sondador	Na cabine	Controlar a velocidade e carga ao atravessar o ICC superior e aproximar do ICC de trabalho	Controlar a velocidade e carga de forma inadequada
			Controlar a carga de torção ao atravessar o ICC superior e aproximar do ICC de trabalho	Controlar carga de torção de forma inadequada

<b>1.8.4</b> Gravar o peso de tração, compressão e neutro acima do ICC	Sondador	Na cabine	Gravar os pesos	Gravar os pesos de forma inadequada
<b>1.8.5</b> Confirmar orientação do CRDT com o MWD	Supervisor MWD	Na mesa	Supervisionar as atividades relacionadas ao MWD	Supervisionar de forma inadequada
	Operador MWD	Na mesa	Fazer leitura do MWD	Falha do MWD, não informa a leitura
Confirmar a orientação do CRDT com o MWD			Não confirmar ou confirmar estando errado	
<b>1.8.6</b> Assentar o CSLT rompendo os pinos de cisalhamento	Supervisor MLT	Na cabine	Supervisionar a informação das cargas de ruptura	Supervisionar de forma inadequada
	Operador MLT	Na cabine	Informar as cargas de ruptura	Erro na informação das cargas de ruptura
	Sondador	Na cabine	Controlar a carga de ruptura	Controlar a carga de ruptura inadequadamente
<b>1.8.7</b> Tracionar a coluna para garantir que o CSLT está travado	Sondador	Na cabine	Puxar BHA para cima	Tarefa não analisada
<b>1.8.8</b> Aplicar torque para romper pino e depois rotacionar à direita para desconectar o DRT	Supervisor MLT	Na cabine	Supervisionar a informação das cargas de ruptura	Supervisionar de forma inadequada
	Operador MLT	Na cabine	Informar as cargas de ruptura	Erro na informação das cargas de ruptura
	Sondador	Na cabine	Controlar a carga de ruptura	Controlar a carga de ruptura inadequadamente
<b>1.8.9</b> Manobrar a coluna com o BHA (DRT, HWDP)	Sondador	Na cabine	Puxar BHA para fora do poço por meio do sistema de elevação	Tarefa não analisada

A Tabela 8-5, apresenta de forma detalhada a tarefa descida do CRDT. Nela está detalhada cada subtarefa, identificando os envolvidos, o local (localização na sonda do envolvido), a ação necessária do envolvido na subtarefa, i.e., responsabilidades do envolvido

na subtarefa, o(s) erro(s) possível (eis) na realização desta ação e, por fim, a figura – que é a ESD gerada pelo EI que está relacionado ao erro humano.

Subtarefa 1.8.1 - Montagem do BHA, que neste caso consiste do CSLT, BD, CRDT, DRT e MWD. Da mesma forma do que na subtarefa de montagem apresentada na tarefa 1.5, para que a montagem do BHA seja bem sucedida, é necessário que ocorra um perfeito trabalho em equipe, onde cada envolvido possui responsabilidades específicas. Os supervisores MLT e MWD, os operadores MLT e MWD e o sondador são os principais envolvidos nesta subtarefa.

O supervisor MLT tem como atribuição supervisionar a montagem do BHA observando especificamente se os equipamentos MLT estão sendo montados de forma correta.

O operador MLT tem a responsabilidade de realizar a montagem das ferramentas MLT no BHA. Nesta tarefa foram identificados quatro possíveis erros humano por parte do operador MLT. O primeiro está relacionado ao erro na montagem do BHA posicionando o mandril na posição inferior, gerando um dano na base da janela quando a perfuração da perna lateral for feita. O segundo consiste na montagem dos pinos de cisalhamento do BHA. É através destes pinos que o CSLT e BD são assentados e desassentados no poço, e o CRDT é liberado. Caso um erro na montagem ocorra, por conta da mudança na carga de ruptura, o CSLT poderá não assentar ou a gerar peixe. O terceiro está relacionado ao alinhamento do CSLT, por meio do anel de indexação, na direção da janela; alinhar a face do CRDT na direção da chaveta do CSLT; e alinhar o MWD com a face do CRDT. Caso qualquer um destes três alinhamentos não seja feito, um erro na direção da janela pode ocorrer. O quarto está relacionado à informação dos torques de montagem ao sondador. Se a informação dos torques de montagem for errada peixe poderá ser gerado.

O supervisor MWD supervisiona as tarefas relacionadas ao MWD. A supervisão colabora para reduzir a probabilidade de erro do operador MWD, garantindo que a montagem do BHA seja feita de forma correta, o alinhamento sejam feitos de forma correta, e o teste do MWD seja executado e de forma correta.

O operador MWD tem a responsabilidade de realizar a montagem do MWD no BHA. Nesta tarefa foram identificados quatro possíveis erros de natureza humana por parte do operador MWD. O primeiro está relacionado ao erro na montagem do BHA, onde o operador MWD não executa a montagem de forma correta, como consequência, uma manobra será necessária para corrigir o erro. O segundo, na realização do teste do MWD, consiste do operador poder realizar o teste de forma incorreta ou não realizar o teste. O terceiro está relacionado ao erro no alinhamento do anel de indexação ou face do CRDT na direção

incorreta, ou erro no alinhamento do MWD com CRDT. Caso qualquer um destes três alinhamentos não seja feito, um erro na direção da janela pode ocorrer. Neste caso, como a janela foi aberta na tarefa 1.6, se o alinhamento não for feito de forma correta, outra janela poderá ser aberta indevidamente, ou três manobras poderão ser necessárias. O quarto está relacionado à informação dos torques de montagem ao sondador.

Na subtarefa 1.8.2 - Correr o BHA no poço e medir comprimento dos tubos de perfuração, o principal responsável é o sondador. Na realização desta subtarefa o sondador deve controlar a descida do BHA (velocidade e carga). Caso este controle não seja realizado poderá ocorrer uma ruptura prematura dos pinos de assentamento do CSLT ou BD, ou dano as ferramentas. O supervisor MLT supervisiona o controle da velocidade de descida. O sondador realiza também a contagem e medidas dos tubos garantindo que o BHA esteja na profundidade correta dentro do poço. Caso este controle não seja feito corretamente, o CSLT pode ser chocar com o fundo do poço, danificando as ferramentas, gerando uma manobra. O supervisor MLT e operador MLT realizam a supervisão da contagem dos tubos.

Subtarefa 1.8.3 - Reduzir a velocidade quando atravessar o ICC superior e aproximar do ICC de trabalho. O sondador é o principal responsável por esta subtarefa. Ele tem duas ações principais. A primeira é controlar a velocidade e carga ao atravessar o ICC superior e aproximar do ICC de trabalho. Este controle reduz a probabilidade de ocorrer uma ruptura prematura dos pinos de assentamento. A segunda ação é controlar a carga de torção ao atravessar o ICC superior e aproximar do ICC de trabalho. Realizando este controle, reduz-se a probabilidade de ruptura do pino que mantém o CRDT e DRT estável (rotação). Porém, se rompido, um estado final denominado peixe é gerado.

Subtarefa 1.8.4 – Gravar o peso de tração, compressão e neutro quando se aproximar do ICC de trabalho. Nesta subtarefa, o sondador tem como ação anotar os pesos de tração compressão e neutro da coluna. Estes valores serão utilizados quando o assentamento e desassentamento do CSLT e BD, e ruptura do pino que mantém o CRDT e DRT estável forem realizados.

Subtarefa 1.8.5 – Confirmar a orientação do CRDT com o MWD. Nesta subtarefa, o supervisor MWD em equipe com o operador MWD confirmam se a orientação do CRDT está conforme programado. Caso a confirmação não seja feita, uma outra janela poderá ser aberta.

Subtarefa 1.8.6 – Assentar o CSLT rompendo os pinos de cisalhamento. Esta subtarefa tem o envolvimento do supervisor MLT, operador MLT e sondador. O supervisor em equipe com o operador informam ao sondador a carga de ruptura necessária para romper os pinos de assentamento do CSLT e BD. Da mesma forma que na subtarefa 1.6.6, a carga necessária para

romper os pinos é somada ao peso de compressão gravado na sub tarefa 1.8.4 Porém este valor é especificamente a carga aplicada nas ferramentas (CSLT, BD e shear stud). Para saber qual será a carga aplicada no sistema de elevação necessária para atingir este valor, faz-se necessário adicionar o valor do peso de compressão gravado na sub tarefa 1.6.4.

Sub tarefa 1.8.7 – Tracionar a coluna para verificar se o CSLT está assentado. Esta sub tarefa consiste na ação do operador em aplicar uma carga de tração na coluna para verificar se o CSLT está devidamente assentado. Por se tratar de ação simples e comum, ela será descrita.

Sub tarefa 1.8.8 – Aplicar torque para romper pino e depois rotacionar à direita para desconectar o DRT. Nesta sub tarefa o sondador, por meio do sistema de rotação, aplica torque na coluna aplicando a carga necessária de ruptura do pino que mantém juntos o CRDT e DRT, e depois rotacionar para direita até liberar o DRT do CRDT. O supervisor MLT, junto com o operador MLT, informa ao sondador o valor desta carga e o numero de rotações necessárias, e supervisiona a aplicação. Caso a aplicação do torque seja diferente do programado, a não ruptura do pino poderá ocorrer gerando um estado denominado coluna presa.

Sub tarefa 1.8.9 – Manobrar a coluna com a fresa. Esta sub tarefa descreve a ação do sondador que, por meio do sistema de elevação, retira a coluna com o DRT do poço deixando o conjunto CSLT, BD e CRDT. Por se tratar de ação simples e comum, ela não será descrita.

Após a caracterização da tarefa, os cenários serão construídos, o desenvolvimento será feito por meio da ferramenta ESD (*Event Sequence Diagram*).

## 8.2 Modelagem dos cenários

Nesta seção, os eventos iniciadores identificados na caracterização das tarefas são desenvolvidos. O principal objetivo é identificar os possíveis estados finais do sistema. A modelagem será feita inicialmente por ESD que em seguida é convertida em árvore de eventos.

Os estados finais foram definidos da seguinte forma:

- **Sucesso:** Implica que a tarefa foi realizada conforme o programado;
- **Manobra:** Retirada da tubulação. Por conta da coluna não se encontrar na profundidade máxima, não é denominada manobra completa; **Manobra completa:** Retirada de toda a tubulação que esta no poço. A pesar de existir esta diferença, serão tratados como único;
- **Coluna Presa:** Implica em equipamento preso no poço junto com a coluna;

- **Erro na Direção da Janela:** Implica abertura da janela em uma direção diferente do objetivo;
- **Peixe:** Implica em material ou equipamento no poço sem a possibilidade de retirada pelo método convencional, i.e., recorrendo ao uso de técnicas de pescaria. Por se tratar de operação offshore, qualquer peixe será tratado como consequência severa.

Nos tópicos seguintes, as ESD serão primeiramente desenvolvidas, as quais descreve graficamente os cenários, permitindo desta forma um melhor entendimento por engenheiros. Após cada ESD, a respectiva árvore de eventos será descrita.

### 8.2.1 Montagem da coluna de condicionamento

Abaixo estão mostradas as ESD e as árvores de eventos desenvolvidas com base na análise da tarefa realizada na seção anterior.

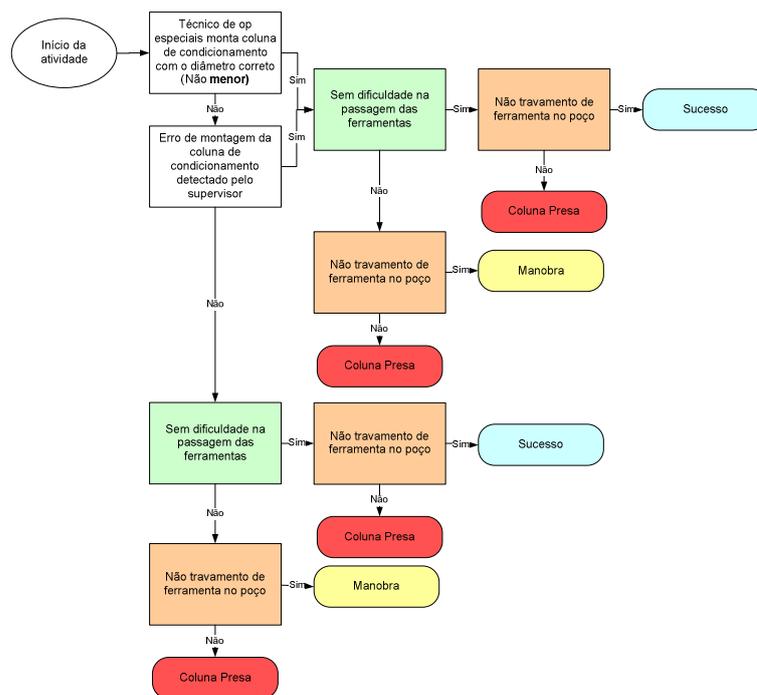


Figura 8-7: ESD para a atividade 1.4.1 (diâmetro menor)

Na Figura 8-7 é mostrada a ESD em que o evento iniciador é o erro do técnico de operações especiais na montagem da coluna de condicionamento do poço principal, no qual ele monta a coluna com um diâmetro menor que o programado. Este erro pode acarretar em uma dificuldade na passagem das ferramentas que serão introduzidas no poço após o condicionamento, criando um aumento na probabilidade de ocorrência do estado final manobra e travamento da ferramenta no poço (coluna presa). Caso o técnico execute de forma

correta a montagem ou se o erro na montagem for detectado pelo supervisor, o estado final será sucesso.

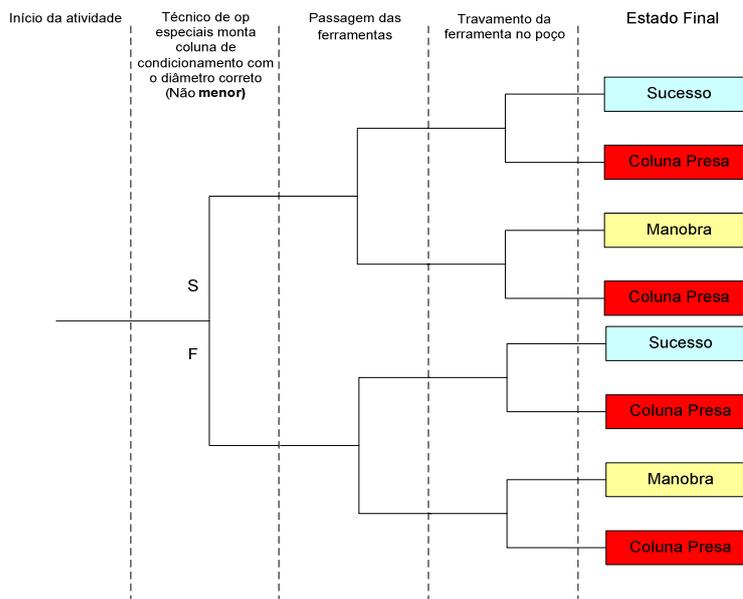
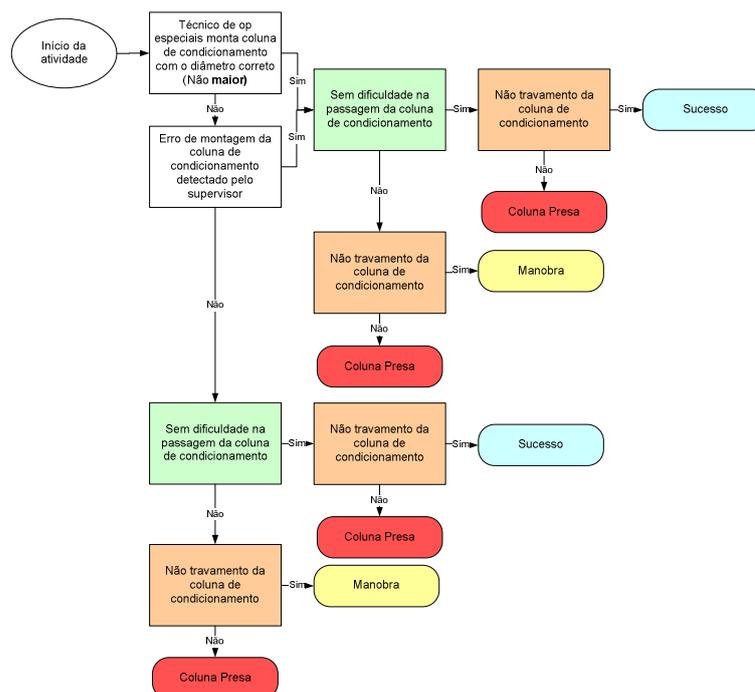


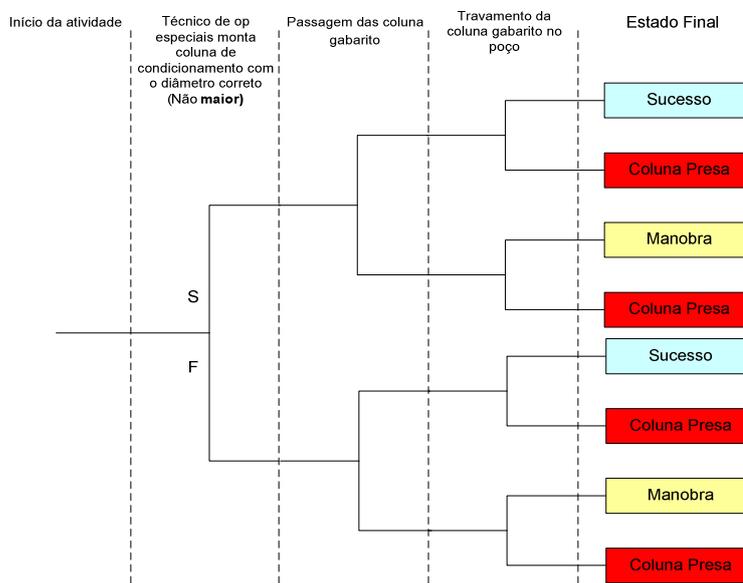
Figura 8-8: *Árvore de Eventos para a atividade 1.4.1 (diâmetro menor)*

Com base na ESD, a respectiva árvore de eventos é descrita, Figura 8-8. É possível notar que o supervisor não aparece na árvore de eventos. Isto decorre do fato da supervisão estar inserida na probabilidade do técnico de operações especiais errar dado que ele está ou não sendo supervisionado. Esta condição é introduzida no sistema por meio da rede Bayesiana, que será mostrada na secção que trata da modelagem da falha de equipamento ou erro humano.



**Figura 8-9: ESD para a atividade 1.4.1, 1.4.2 e 1.4.3 (diâmetro maior)**

Na Figura 8-9 é mostrada a ESD em que o evento iniciador é o erro do técnico de operações especiais na montagem da coluna de condicionamento do poço principal, onde ele monta a coluna com um diâmetro maior que o programado. Este erro pode acarretar numa dificuldade na passagem da própria coluna de condicionamento, que por este motivo pode gerar uma manobra. Outro estado final se trata da coluna presa, onde a coluna de condicionamento fica presa no poço, por conta do diâmetro externo da coluna de condicionamento ser maior que o diâmetro interno do poço. Caso o técnico execute de forma correta a montagem ou se o erro na montagem for detectado pelo supervisor, o estado final será sucesso.



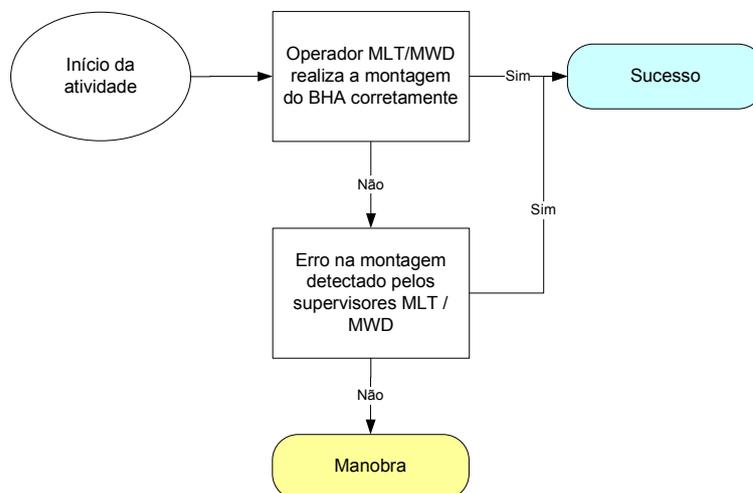
**Figura 8-10: Árvore de Eventos para a atividade 1.4.1, 1.4.2 e 1.4.3 (diâmetro maior)**

A Figura 8-10 mostra a árvore de eventos correspondente a ESD da Figura 8-9. Em relação à supervisão, a mesma justificativa anterior se aplica.

### 8.2.2 Montagem do BHA

Na Figura 8-11 está mostrada a ESD do cenário relativo à montagem do BHA. Por conta desta atividade se repetir em todo início de atividade, foi realizada uma modelagem genérica para qualquer BHA. Ou seja, este cenário foi modelado considerando-se a tarefa de montagem de um BHA típico. Desta forma, as particularidades de equipamentos e as diferenças nas tarefas de montagem que possam existir para diferentes tipos de BHA não são consideradas. Porém, de acordo como os especialistas da Petrobras, esta aproximação se justifica pela relativa homogeneidade entre os diferentes tipos de BHA usados em poços MLT.

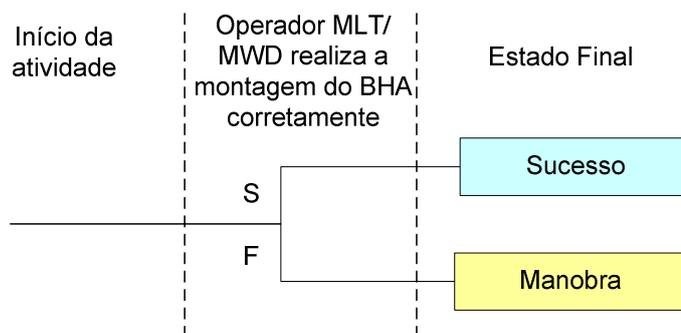
Em análise probabilística de risco isto é denominado agrupamento de eventos iniciadores, permitindo que o número de cenários tratados seja reduzido. Em consequência, esta ESD cobre as subtarefas 1.5.1, 1.6.1, 1.7.1 e 1.8.1.



**Figura 8-11: ESD para a atividade 1.5.1, 1.6.1, 1.7.1 e 1.8.1**

Para que a montagem do BHA seja bem sucedida, é necessário que ocorra um perfeito trabalho em equipe, onde cada envolvido possui responsabilidades específicas. Os supervisores MLT e MWD e os operadores MLT e MWD são os principais envolvidos nesta subtarefa. O supervisor MLT tem como atribuição supervisionar a montagem do BHA, observando se especificamente os equipamentos MLT estão sendo montados de forma correta. O supervisor MWD supervisiona as tarefas relacionadas ao MWD, a supervisão colabora reduzir a probabilidade de erro do operador MWD na montagem do respectivo BHA.

Para que a ESD acima sirva para modelar todos os cenários relativos à montagem dos diferentes tipos de BHA, a rede Bayesiana será também quantificada de forma genérica, ou seja, considerando a tarefa de montagem de um BHA típico. Por conta disto, a mesma ESD, árvore de eventos e rede Bayesiana se aplica para todas as subtarefas relacionadas à montagem do BHA.

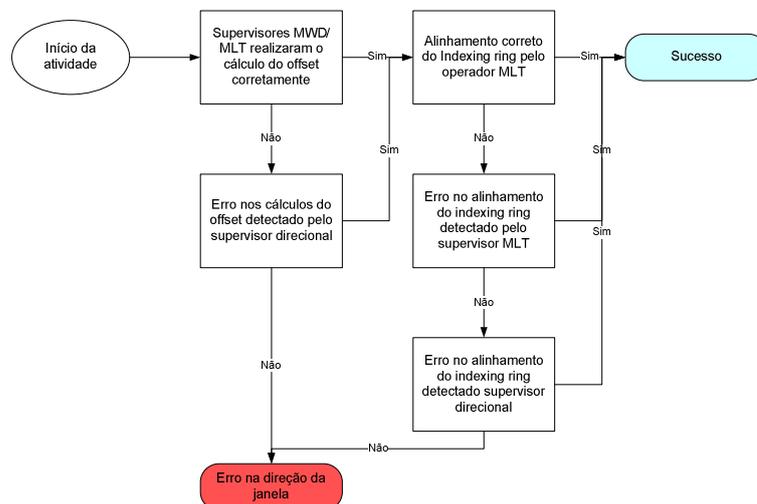


**Figura 8-12: Árvore de Eventos para as atividades 1.5.1, 1.6.1, 1.7.1 e 1.8.1**

Com base na ESD, a respectiva árvore de eventos é descrita, Figura 8-12. Como o erro na montagem é uma ação conjunta dos operadores, na rede Bayesiana os operadores serão tratados de forma detalhada, sendo introduzida na mesma rede a influência dos supervisores nos respectivos operadores.

### 8.2.3 Cálculo do offset e alinhamento pelo anel de indexação

Outra importante ação é a realização do cálculo do offset e, na seqüência, alinhamento dos equipamentos pelo anel de indexação. O cálculo é realizado a partir da obtenção dos dados de leitura ocorrido na sub tarefa 1.5.11. Com esta informação, o alinhamento é realizado nas montagens dos BHA das subtarefas 1.6.1 e 1.8.1. A importância desta sub tarefa está em sua consequência: caso o cálculo ou o alinhamento seja feito de forma incorreta, um erro na direção da janela poderá ocorrer.



**Figura 8-13:** ESD para a atividade 1.5.11, 1.6.1 e 1.8.1

A ESD da Figura 8-13, descreve o início da atividade de cálculo do offset, que por sua vez é realizado pelos supervisores MWD e MLT. Caso os supervisores errem no cálculo, o supervisor direcional pode detectar o erro. Caso não perceba ocorrerá um erro na direção da janela. Em seguida é realizado o alinhamento no anel de indexação pelo operador MLT descrito na ESD apresentada acima. Este alinhamento é feito no BHA quando for realizada a montagem do mesmo, na sub tarefa 1.6.1, que é a abertura do rat hole. Este alinhamento garante o posicionamento correto do whipstock e, como consequência, a abertura da janela na direção correta. Esta ação se repete na sub tarefa 1.8.1, montagem do BHA, e na tarefa 1.8, descida do CRDT. Este alinhamento garante que o CRDT vai direcionar a broca para a janela. Caso este alinhamento esteja incorreto, uma outra janela poderá ser aberta na direção errada.

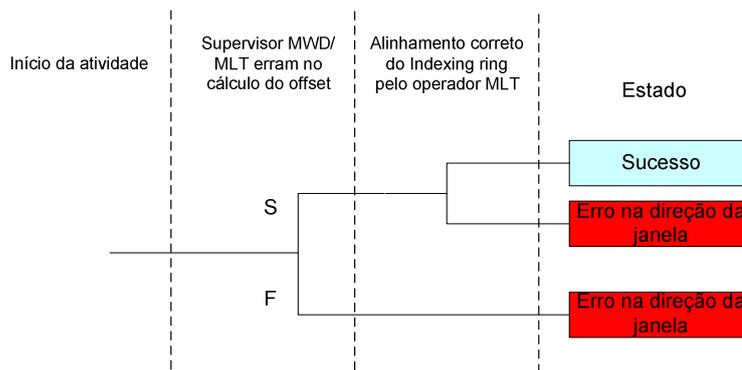


Figura 8-14: Árvore de Eventos 1.5.11, 1.6.1 e 1.8.1

Com base na ESD, a respectiva árvore de eventos é descrita, Figura 8-14. A detecção pelo supervisor direcional, descrito na ESD, será introduzido na rede Bayesiana, onde a modelagem do erro dos supervisores MWW e MLD será feita. Da mesma forma ocorrerá com o operador MLT que realiza o alinhamento no anel de indexação. Porém, como veremos, ele sofre a influencia do supervisor MLT quanto direcional.

8.2.4 Teste do MWD

Abaixo é apresentada a ESD referente ao teste do MWD. Na fase de abertura da janela, o MWD é utilizado em todos as tarefas. Ele tem a função de informa a direção de uma determinada linha de referencia, definindo a direção da janela, posicionado o whipstock e CRDT, que possuem a função de direcionar a fresa (whipstoick) e broca (CRDT) nas subtarefa abertura da janela e perfuração do lateral, respectivamente. Nota-se, portanto, a sua importância para o sucesso do processo de construção do poço MLT. O teste do MWD é realizado antes de cada montagem de BHA (subtarefas 1.5.1, 1.6.1, 1.7.1 e 1.8.1). A solicitação da leitura é feita sempre que a orientação da chave ou face do gancho é solicitada (subtarefas 1.5.6, 1.5.10, 1.5.11, 1.6.5, 1.7.4, 1.7.6 e 1.8.4).

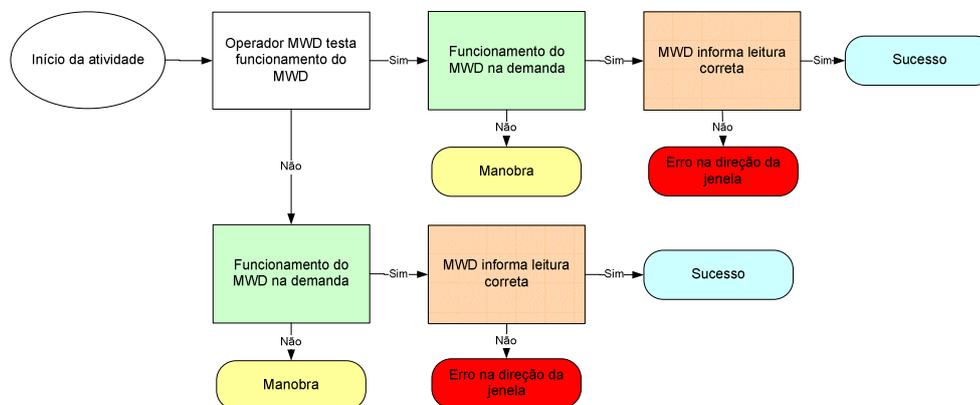
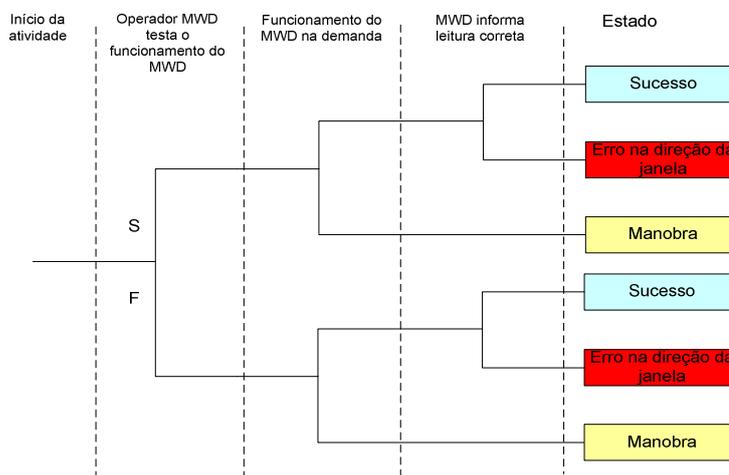


Figura 8-15: ESD para as atividades 1.5.1, 1.5.6, 1.5.10, 1.5.11, 1.6.1, 1.6.5, 1.7.1, 1.7.4, 1.7.6, 1.8.1 e 1.8.4

Na ESD da Figura 8-15, o operador MWD realiza o teste do MWD antes do MWD ser posicionado no BHA. Na seqüência, o BHA (com o MWD) é introduzido no poço. Ao ser solicitado, o MWD precisa operar na demanda, pois, caso isto não ocorra, uma manobra será necessária. Caso ele opere, o MWD deve informar a leitura correta. Se a leitura estiver errada, um erro na direção da janela poderá ocorrer.

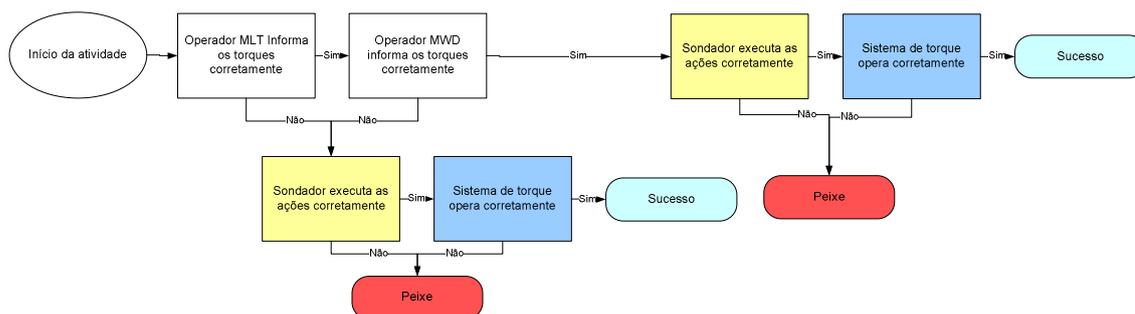


**Figura 8-16:** *Árvore de Eventos 1.5.1, 1.5.6, 1.5.10, 1.5.11, 1.6.1, 1.6.5, 1.7.1, 1.7.4, 1.7.6, 1.8.1 e 1.8.4*

Na Figura 8-16 é apresentada a respectiva árvore de eventos. Nela é importante ressaltar uma importante característica. Note que na árvore de eventos, o operador MWD realiza o teste MWD. Porém, a realização do teste não exclui por completo a possibilidade de não funcionamento do MWD na demanda e, em seguida, da correta informação da leitura. O teste do MWD reduz estas probabilidades. Este tipo de cenário não é tratado utilizando a árvore de falhas, uma vez que as probabilidades introduzidas são em geral independentes dos eventos anteriores. Na rede Bayesiana, porém, este tipo de cenário é tratado explicitamente.

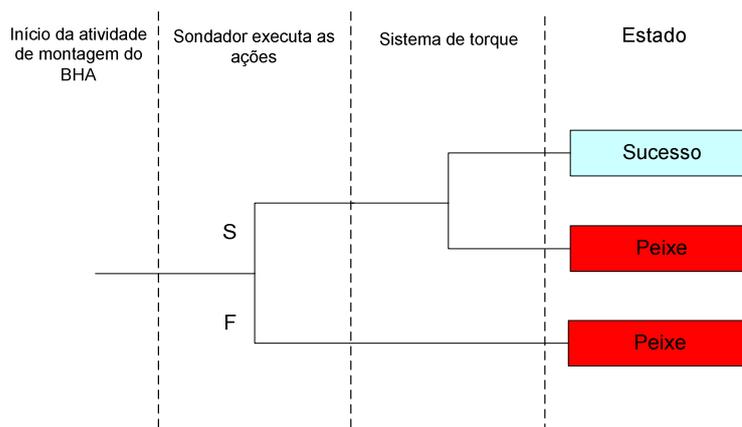
### 8.2.5 Sondador realiza o torque de montagem do BHA

Na Figura 8-17 é apresentada a ESD onde é modelado a seqüência de eventos para a realização da aplicação do torque de montagem do BHA. Os torques de montagem são aplicados nas subtarefas 1.5.1, 1.6.1, 1.7.1 e 1.8.1. Esta é uma ação conjunta dos operadores MLT e MWD com o sondador.



**Figura 8-17: ESD para as atividades 1.5.1, 1.6.1, 1.7.1 e 1.8.1**

Toda montagem de BHA segue esta seqüência, onde os operadores MLT e MWD informam para o sondador os valores dos torques referentes ao respectivo equipamento, i.e., operador MLT informa os torques dos equipamentos MLT e o operador MWD informa o torque do equipamento MWD. Caso estas informações sejam corretas (note é que necessário que ambos, operador MLT e operador MWD, informem correto), o sondador deve executar as ações de forma correta. Executando de forma correta, o sistema de torque deve responder conforme solicitação. O sistema de torque, por conter um sistema de leitura, deve estar calibrado para que o torque desejado seja de fato aplicado. É possível perceber que a informação incorreta fornecida pelos operadores não acarretará de imediato em um estado indesejado. Isto ocorre por ser possível à correção da informação recebida por parte do sondador. Esta correção não sendo feita. O sondador executará de forma errada gerando um peixe. Para este cenário, considera-se que o torque aplicado não deve ser maior ou menor que o necessário.



**Figura 8-18: Árvore de Eventos 1.5.1, 1.6.1, 1.7.1 e 1.8.1**

### 8.2.6 Sondador realiza a contagem dos tubos

Na Figura 8-19 é apresentada a ESD onde é modelado a atividade de contagem dos tubos de perfuração. Nesta tarefa, o sondador realiza a contagem, enquanto que o supervisor MLT e operador MLT supervisionam a contagem. A contagem das juntas é realizada sempre que um BHA é descido no poço. Desta forma, a ESD descreve as subtarefas, 1.5.2, 1.6.2, 1.7.2 e 1.8.2.

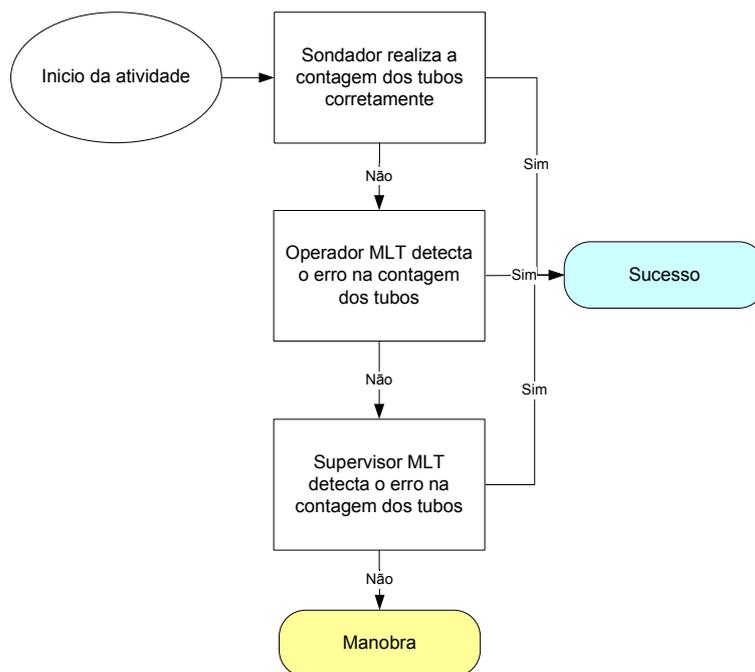


Figura 8-19: ESD para as atividades 1.5.2, 1.6.2, 1.7.2 e 1.8.2

Sempre que um BHA é descido no poço, a contagem dos tubos faz-se necessário uma vez que esta é a única forma de controle da profundidade. Para esta fase, o operador e supervisor têm a função de verificar se a contagem esta correta. Desta forma, impedido a propagação do cenário. Caso contrário, a execução de manobra torna-se necessária.

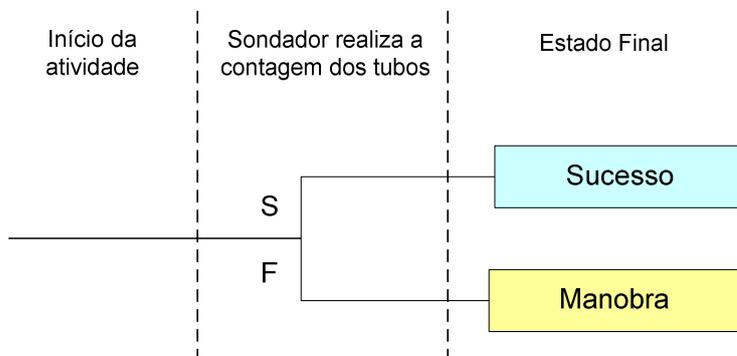


Figura 8-20: Árvore de Eventos 1.5.2, 1.6.2, 1.7.2 e 1.8.2

A ESD foi convertida em uma árvore de eventos, Figura 8-20. A influencia do operador e supervisor MLT, será introduzida na rede Bayesiana.

### 8.3 Coleta dos Dados

Os dados coletados foram obtidos por meio da elicitación da opinião do especialista. A elicitación da opinião do especialista data do início dos anos 80 e está enraizado no início dos estudos da cognição humana e emergiu dos problemas surgidos em Análise Probabilística de riscos (PRA), (Booker & McNamara, 2004). Ela surgiu da necessidade de se obter informação sobre métricas de confiabilidade de equipamentos não ensaiados.

Muitas vezes existe uma grande dificuldade em obter dados de confiabilidade, algumas delas são: falta de um banco de dados específicos, falta de dados genéricos, por que os perigos evidenciados nunca foram tratados anteriormente; em relação à confiabilidade humana, por ela ser uma área de estudo recente, um banco de dados aplicado ao problema desejado é ainda algo inédito para grande maioria dos campos de atuação. Neste contexto faz-se necessário o uso da opinião do especialista para elicitar sobre uma probabilidade em questão.

Uma análise formal da opinião do especialista tem como um objetivo preliminar, estimar os valores possíveis de um dado parâmetro incerto e representar corretamente a incerteza associada a ele na luz do atual estado do conhecimento disponível na comunidade científica (Zio, 1996). É sabido que o especialista não são unicamente os que fazem parte da comunidade científica. Ayyub (2001) define um especialista como uma pessoa experiente, com treinamento e conhecimento em alguma área específica.

Ayyub define ainda o significado da opinião, segundo ele a opinião pode significar julgamento ou crença que é baseada em uma informação incerta ou conhecimento.

Diversas metodologias têm sido propostas na literatura, uma das que se destaca é a Nadler & Campello de Souza (2001). O método de Nadler e Campello promove no especialista um autoconhecimento quanto as suas crenças de forma gradativa (refinamento), e também fornece métricas matemáticas para avaliar a qualidade do questionário de educação e as opiniões dadas. Contudo, a técnica possui uma restrição no número de mínimos de questões a ser respondida, levando em alguns casos a inviabilidade da aplicação da técnica, quando o número de questionários é grande.

Para este trabalho, 114 probabilidades foram necessárias para alimentar o modelo. Tomando como base o tempo médio de 7,98 minutos, que é o tempo necessário para que uma probabilidade seja educada utilizando o método de Nadler e Campello, levaria algo em torno de 15 horas para que todas as probabilidades fossem educadas, tornando a aplicação deste método extremamente cara. Neste ponto, o trabalho de Firmino et al. (2005) tem avançado, tornando o questionário mais enxuto, possibilitando uma redução de 40% no número de questões a ser respondida (26 questões).

Apesar da existência de bons métodos de educação, neste trabalho foi optado por utilizar o método de elicitação direta. Isto ocorreu principalmente por conta do alto custo envolvido na educação destas probabilidades, se um método mais aprimorado tal como Nadler & Campello de Souza (2001) e Firmino et al. (2005) fosse utilizado. Outro fato está relacionado aos principais focos deste trabalho, que é a caracterização e qualificação dos cenários, e

desenvolvimento de um método integrado via redes Bayesianas para análise probabilística de riscos.

Diante disto, um engenheiro com vinte e oito anos de experiência em exploração de petróleo, treze anos de experiência na tecnologia multilateral, e sessenta poços multilaterais perfurados, foi selecionado como sendo especialista habilitado para ser elicitado.

#### **8.4 Modelagem das falhas (erro), Quantificação e Avaliação**

Em geral a modelagem das falhas são feitas por uso de árvore de falhas, onde a probabilidade do evento topo é acoplada no respectivo evento pivô da árvore de eventos. Porém neste trabalho todos os eventos pivôs serão modelados pelo uso de redes Bayesianas, que serão acoplados também em uma rede Bayesiana. Neste trabalho, somente a confiabilidade humana foi tratada por meio da modelagem da falha, i.e., os equipamentos não foram tratados em maior detalhe, sendo utilizada a probabilidade de falha ou sucesso somente a nível pivô.

A conversão da árvore de falhas em redes Bayesianas foi apresentada anteriormente, seção 6.8, e o tratamento da confiabilidade humana via redes Bayesianas, vide Menêzes & Droguett, (2005).

Os fatores de desempenho tratados nesta modelagem foram descritos e justificados na seção 7.3.

Os fatores de desempenhos dos técnicos, que são: técnico de coluna, operador MLT e operador MWD, foram definidas como sendo os mesmos. Esta consideração se baseou no fato de que o contexto das atividades realizadas por eles, não apresentam uma diferença significativa, i.e. a complexidade da tarefa, as condições ambientais são bem próximas. Além da elicitação das probabilidades por parte dos especialistas, ser extremamente difícil na distinção entre operadores.

Os fatores de desempenho do sondador foram tratados como sendo os mesmos para as diferentes atividades executadas. Isto ocorreu também para os técnicos. Esta aproximação foi feita devido à dificuldade do especialista em expressar de forma probabilística esta diferença, que segundo ele é bastante sutil.

Nas seções secundárias abaixo, será apresentada a RB e a respectiva tabela de probabilidade de cada nó presente na rede.

8.4.1 Montagem da coluna de condicionamento

Na Figura 8-21, a modelagem da falha do técnico de operações especiais é feita, em função dos FFD. Nela, é apresentada a rede Bayesiana dos FFD do técnico de coluna relativo à atividade de montagem da coluna de condicionamento.

As probabilidades relativas ao erro do técnico de coluna em realizar a montagem da coluna de condicionamento são a mesma para os dois cenários, i.e., montar com o diâmetro menor ou maior.

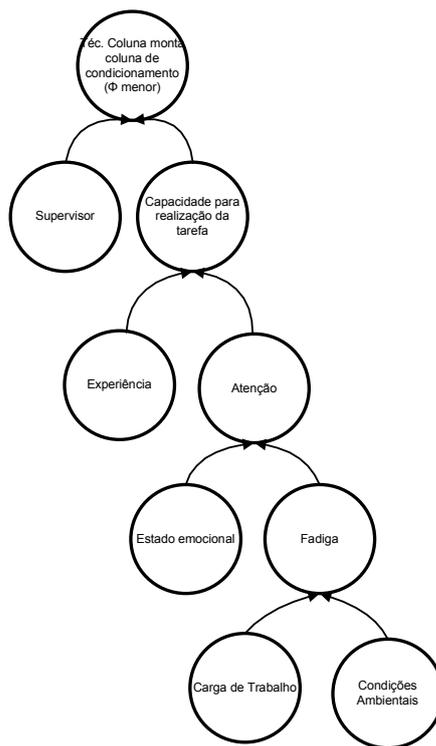


Figura 8-21:RB para a modelagem do erro do técnico de operações especiais (diâmetro maior)

Tabela 8-6:TPC do técnico de coluna dado supervisor operações especiais (SOE) e capacidade (CA)

SOE, CA	Técnico de coluna	
	Sucesso	Erro
<b>Sucesso, Adequada</b>	0,995	0,005
<b>Sucesso, Inadequada</b>	0,800	0,200
<b>Erro, Adequada</b>	0,900	0,100
<b>Erro, Inadequada</b>	0,300	0,700

Tabela 8-7:Tabela de probabilidades dos nós folha

Nó	Probabilidade de erro ou desfavorável
Sup. de operações especiais	0,05
Experiência	0,20
Estado Emocional	0,60
Carga de trabalho	0,30
Condições Ambientais	0,20

Se o técnico tem experiência adequada e está com um nível de atenção adequado, é assumido que o operador esta com 100% da capacidade adequada. Por outro lado, se ele

possui uma experiência inadequada e está com um nível de atenção também inadequado, é assumido que o operador esta com 100% da capacidade inadequada.

**Tabela 8-8: TPC da capacidade dado experiência (EX) e atenção e vigilância (AT)**

EX, AT	Capacidade	
	Adequada	Inadequada
Adequada, Adequada	1,00	0,00
Adequada, Inadequada	0,80	0,20
Inadequada, Adequada	0,80	0,20
Inadequada, Inadequada	0,00	1,00

**Tabela 8-9: TPC da atenção e vigilância dado estado emocional (EE) e fadiga (FA)**

EE, FA	Atenção e vigilância	
	Adequada	Inadequada
Adequada, Ñ Presente	0,95	0,05
Adequada, Presente	0,70	0,30
Inadequada, Ñ Presente	0,85	0,15
Inadequada, Presente	0,60	0,40

**Tabela 8-10: TPC da fadiga dado carga de trabalho (CT) e condições ambientais (CA)**

CT, CA	Fadiga	
	Ñ Presente	Presente
Adequada, Ñ Presente	0,90	0,10
Adequada, Presente	0,80	0,20
Inadequada, Ñ Presente	0,70	0,30
Inadequada, Presente	0,60	0,40

Abaixo, é apresentado o nó passagem das ferramentas e a respectiva tabela de probabilidade condicional (TPC), este nó é dependente do anterior, técnico de coluna monta a coluna de condicionamento menos.



**Figura 8-22: RB para a modelagem da falha passagem da ferramenta dado montagem da coluna gabarito menor(MCGMe)**

**Tabela 8-11: TPC da passagem da ferramenta dado montagem da coluna gabarito menor(MMe)**

MMe	Passagem das ferramentas	
	Sucesso	Falha
Sucesso	0,99	0,01
Falha	0,95	0,05

Abaixo, é apresentado o nó travamento da ferramenta e a respectiva tabela de probabilidade condicional (TPC), este nó é dependente do anterior, passagem das ferramentas.



Figura 8-23: RB para a modelagem da falha travamento das ferramentas no poço

Tabela 8-12: TPC do travamento da ferramenta (TF) dado passagem da ferramenta (PF)

PF	Travamento da ferramenta	
	Sucesso	Falha
Sucesso	0,99	0,01
Falha	0,90	0,10

A tabela de probabilidade condicional do erro do técnico de coluna dado à supervisão e a capacidade para realizar a tarefa é a mesma mostrada anteriormente. Uma vez que não existem motivos que levem a acreditar que o erro na montagem da coluna de condicionamento, com um diâmetro menor ou maior, tenham origens distintas. Por conta, foi realizada uma simulação para as duas redes, uma vez que os valores atribuídos aos nós são os mesmos.

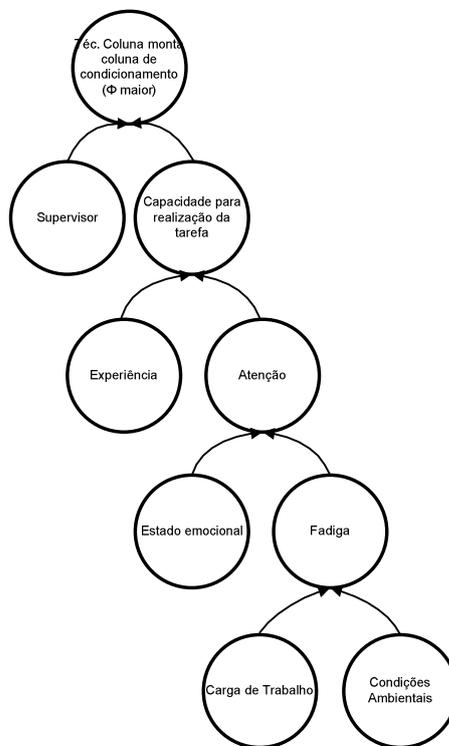


Figura 8-24: RB para modelagem da falha do técnico de operações especiais (diâmetro menor)

Tabela 8-13: TPC do técnico de coluna dado supervisor operações especiais (SOE) e capacidade (CA)

SOE, CA	Técnico de coluna	
	Sucesso	Erro
Sucesso, Adequada	0,995	0,005
Sucesso, Inadequada	0,800	0,200
Erro, Adequada	0,900	0,100
Erro, Inadequada	0,300	0,700

Tabela 8-14: Tabela de probabilidades dos nós folha

Nó	Probabilidade de erro ou desfavorável
Sup. de operações especiais	0,05
Experiência	0,20
Estado Emocional	0,60

Carga de trabalho	0,30
Condições Ambientais	0,20

Tabela 8-15: TPC da capacidade dado experiência (EX) e atenção e vigilância (AT)

EX, AT	Capacidade	
	Adequada	Inadequada
Adequada, Adequada	1,00	0,00
Adequada, Inadequada	0,80	0,20
Inadequada, Adequada	0,80	0,20
Inadequada, Inadequada	0,00	1,00

Tabela 8-16: TPC da atenção e vigilância dado estado emocional (EE) e fadiga (FA)

EE, FA	Atenção e vigilância	
	Adequada	Inadequada
Adequada, Ñ Presente	0,95	0,05
Adequada, Presente	0,70	0,30
Inadequada, Ñ Presente	0,85	0,15
Inadequada, Presente	0,60	0,40

Tabela 8-17: TPC da fadiga dado carga de trabalho (CT) e condições ambientais (CA)

CT, CA	Fadiga	
	Ñ Presente	Presente
Adequada, Ñ Presente	0,90	0,10
Adequada, Presente	0,80	0,20
Inadequada, Ñ Presente	0,70	0,30
Inadequada, Presente	0,60	0,40

Abaixo são apresentadas as probabilidades de falha do técnico de coluna (para os dois cenários) e algumas análises de sensibilidade.

Com base nestas probabilidades, o técnico de operações especiais tem uma probabilidade de 3% de errar a montagem da coluna gabarito.

Caso a fadiga esteja presente no operador, sob estas condições ele possui uma probabilidade de 4,1% de errar a montagem do BHA. Representando um aumento de 36,7% na probabilidade de erro em relação ao estado normal.

Se o supervisor não estiver presente ou estiver supervisionando de forma inadequada, a probabilidade do técnico de operações especiais realizar a montagem da coluna de condicionamento de forma incorreta sobe para 15,6%, representando um aumento de 420% na probabilidade de erro em relação ao estado normal em relação ao estado normal.

Se o técnico de operações especiais não tiver experiência ou treinamento adequado para a realização da atividade, a probabilidade de erro sobe para 7,7%, representando um aumento de 157% na probabilidade de erro em relação ao estado normal.

Abaixo, é apresentado o nó passagem da coluna e a tabela de probabilidade condicional. Este nó é dependente do anterior, técnico de coluna monta coluna de condicionamento com o diâmetro maior.



**Figura 8-25: RB para modelagem da falha passagem da coluna dado montagem da coluna de condicionamento menor**

**Tabela 8-18: TPC da passagem da coluna dado montagem da coluna de condicionamento menor(MMa)**

MMa	Passagem da coluna	
	Sucesso	Falha
Sucesso	0,99	0,01
Falha	0,95	0,05

Abaixo, é apresentado o nó travamento da coluna e a respectiva tabela de probabilidade condicional. Este nó é dependente do anterior, passagem da coluna.



**Figura 8-26: RB para modelagem da falha travamento da ferramenta dado passagem da ferramenta**

**Tabela 8-19: TPC do travamento da coluna (TC) dado passagem da coluna (PC)**

PC	Travamento da coluna	
	Sucesso	Falha
Sucesso	0,99	0,01
Falha	0,90	0,10

#### 8.4.2 Montagem do BHA

A Figura 8-27 modela via RB a ação do operador MLT em realizar a montagem do BHA em função dos FFD. O operador MLT realiza esta atividade sob a supervisão do supervisor MLT, que tem a função de impedir que o erro na montagem ocorra.

Abaixo serão apresentadas, as tabelas de probabilidade condicionais dos nós representados na RB do operador MLT.

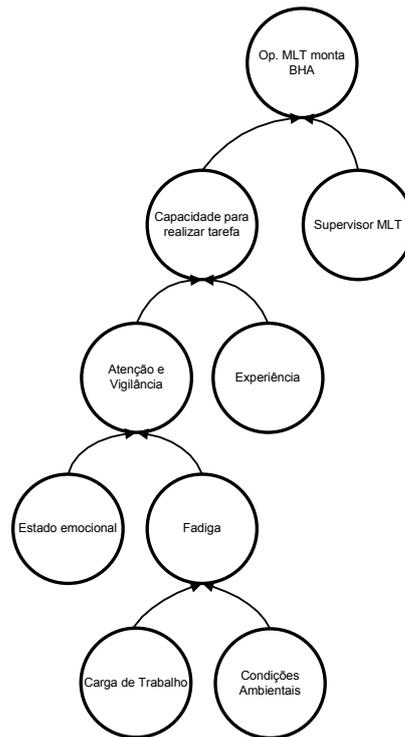


Figura 8-27: RB para modelagem do erro do operador MLT na montagem do BHA

Tabela 8-20: TPC do operador MLT dado supervisor MLT (SMLT) e capacidade (CA)

SMLT, CA	Operador MLT	
	Sucesso	Erro
Sucesso, Adequada	0,99	0,01
Sucesso, Inadequada	0,95	0,05
Erro, Adequada	0,95	0,05
Erro, Inadequada	0,05	0,95

Tabela 8-21: Tabela de probabilidades dos nós folha da RB operador MLT na montagem do BHA

Nó	Probabilidade de erro ou desfavorável
Sup. Multilateral	0,01
Experiência	0,10
Estado Emocional	0,60
Carga de trabalho	0,20
Condições Ambientais	0,10

Tabela 8-22: TPC da capacidade dado experiência (EX) e atenção e vigilância (AT)

EX, AT	Capacidade	
	Adequada	Inadequada
Adequada, Adequada	1,00	0,00
Adequada, Inadequada	0,90	0,10
Inadequada, Adequada	0,10	0,90
Inadequada, Inadequada	0,00	1,00

Tabela 8-23: TPC da atenção e vigilância dado estado emocional (EE) e fadiga (FA)

EE, FA	Atenção e vigilância	
	Adequada	Inadequada
Adequada, Ñ Presente	0,95	0,05
Adequada, Presente	0,70	0,30
Inadequada, Ñ Presente	0,80	0,20
Inadequada, Presente	0,60	0,40

Tabela 8-24: TPC da fadiga dado carga de trabalho (CT) e condições ambientais (CA)

CT, CA	Fadiga	
	Ñ Presente	Presente
Adequada, Ñ Presente	0,98	0,02
Adequada, Presente	0,80	0,20
Inadequada, Ñ Presente	0,50	0,50
Inadequada, Presente	0,10	0,90

Com base nestas probabilidades, o operador MLT tem uma probabilidade de 1,5% de errar a montagem do BHA.

Caso a fadiga esteja presente no operador, sob estas condições ele possui uma probabilidade de 1,6% de errar a montagem do BHA. Representando um aumento de 6,7% na probabilidade.

A Figura 8-28 modela via RB a ação do operador MWD em realizar a montagem do BHA. O operador MWD realiza esta atividade sob a supervisão do supervisor MWD, que tem a função de impedir que o erro na montagem ocorra.

Abaixo serão apresentadas, as tabelas de probabilidade condicionais dos nós representados na RB do operador MWD.

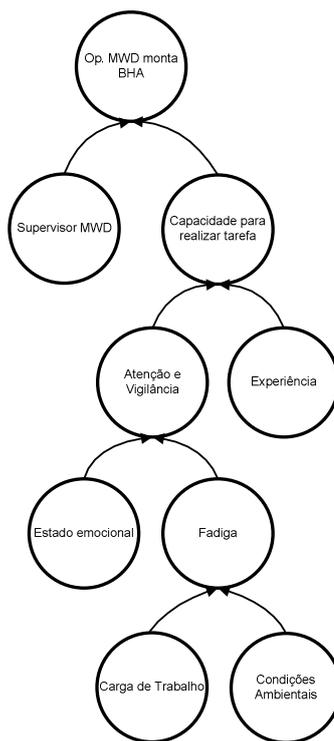


Figura 8-28: RB para modelagem do erro do operador MWD na montagem do BHA

Tabela 8-25: TPC do operador MWD dado supervisor MWD (SMWD) e capacidade (CA)

SMWD, CA	Operador MWD	
	Sucesso	Erro
Sucesso, Adequada	0,99	0,01
Sucesso, Inadequada	0,90	0,10
Erro, Adequada	0,50	0,50

<b>Erro, Inadequada</b>	0,05	0,95
-------------------------	------	------

**Tabela 8-26: Tabela de probabilidades dos nós folha da RB operador MWD na montagem do BHA**

<b>Nó</b>	<b>Probabilidade de erro ou desfavorável</b>
Sup. Multilateral	0,05
Experiência	0,05
Estado Emocional	0,60
Carga de trabalho	0,02
Condições Ambientais	0,10

**Tabela 8-27: TPC da capacidade dado experiência (EX) e atenção e vigilância (AT)**

<b>EX, AT</b>	<b>Capacidade</b>	
	<b>Adequada</b>	<b>Inadequada</b>
<b>Adequada, Adequada</b>	<b>1,00</b>	0,00
<b>Adequada, Inadequada</b>	0,70	0,30
<b>Inadequada, Adequada</b>	0,10	0,90
<b>Inadequada, Inadequada</b>	0,00	<b>1,00</b>

**Tabela 8-28: TPC da atenção e vigilância dado estado emocional (EE) e fadiga (FA)**

<b>EE, FA</b>	<b>Atenção e vigilância</b>	
	<b>Adequada</b>	<b>Inadequada</b>
<b>Adequada, Ñ Presente</b>	0,95	0,05
<b>Adequada, Presente</b>	0,70	0,30
<b>Inadequada, Ñ Presente</b>	0,80	0,20
<b>Inadequada, Presente</b>	0,60	0,40

**Tabela 8-29: TPC da fadiga dado carga de trabalho (CT) e condições ambientais (CA)**

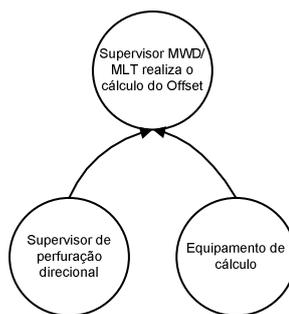
<b>CT, CA</b>	<b>Fadiga</b>	
	<b>Ñ Presente</b>	<b>Presente</b>
<b>Adequada, Ñ Presente</b>	0,98	0,02
<b>Adequada, Presente</b>	0,80	0,20
<b>Inadequada, Ñ Presente</b>	0,50	0,50
<b>Inadequada, Presente</b>	0,10	0,90

Com base nestas probabilidades, o operador MWD tem uma probabilidade de 4,2% de errar a montagem do BHA.

Caso a fadiga esteja presente no operador, sob estas condições ele possui uma probabilidade de 5,1% de errar a montagem do BHA. Representando um aumento de 21,4% na probabilidade.

#### 8.4.3 Cálculo do offset e alinhamento pelo anel de indexação

Na Figura 8-29, a modelagem da tarefa supervisores MWD e MLT realizam o cálculo do offset é apresentada. Nela, os supervisores são supervisionados pelo supervisor direcional. A realização da tarefa depende também do equipamento de cálculo. A respectiva tabela de probabilidade condicional também é apresentada.



**Figura 8-29:** RB para modelagem do erro do supervisor MWD e MLT realizando o cálculo do offset

**Tabela 8-30:** TPC dos supervisores MWD e MLT dado o supervisor direcional e equipamento de cálculo

SD, EC	Supervisores MWD e MLT	
	Sucesso	Erro
<b>Sucesso, Sucesso</b>	0,98	0,02
<b>Sucesso, Falha</b>	0,00	<b>1,00</b>
<b>Erro, Sucesso</b>	0,95	0,05
<b>Erro, Falha</b>	0,00	<b>1,00</b>

**Tabela 8-31:** TP dos nós folha da RB supervisor MWD e MLT realizando o cálculo do offset

Nó	Probabilidade de erro ou falha
Sup. Direcional (SD)	0,01
Equipamento de cálculo (EC)	0,0001

Com base nas probabilidades apresentadas, a probabilidade dos supervisores MWD e MLT cometerem um erro na realização do cálculo é de 2%.

Assumindo que o supervisor direcional não está presente ou está supervisionando de forma inadequada, a probabilidade de erro dos supervisores MWD/MLT na realização do cálculo do offset aumenta para 5%, representando um aumento de 150% na probabilidade de erro. Isto a importância da supervisão na realização desta atividade.

A Figura 8-30 modela via RB a ação do operador MLT realizar o alinhamento por meio do anel de indexação (entre o MWD e a chaveta de orientação do whipstock). O operador MLT realiza esta atividade sob a supervisão do supervisor MLT e direcional, o direcional também supervisiona o supervisor MLT, impedindo que ele passe para o operador alguma orientação errada. A influência destes dois supervisores sob a realização da tarefa pelo operador está introduzida na tabela de probabilidade condicional do nó *equipe de supervisão*.

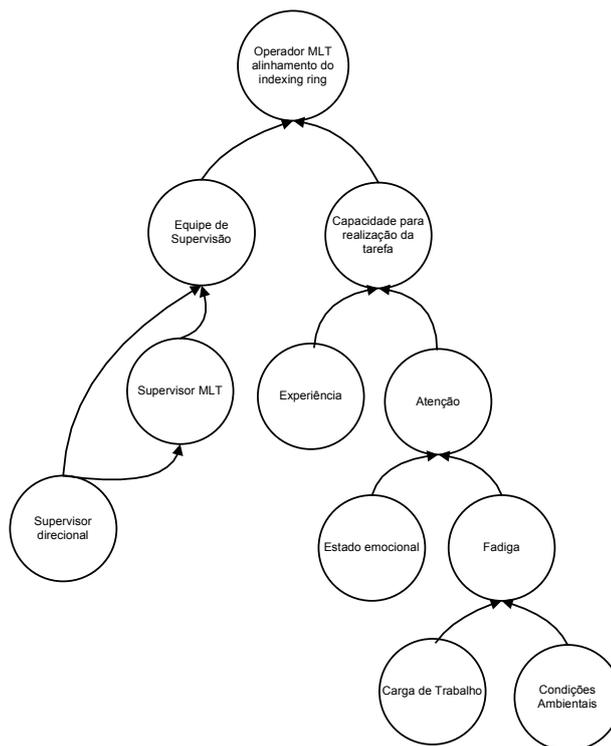


Figura 8-30: RB para modelagem do erro do operador MLT realiza o alinhamento pelo anel de indexação

Tabela 8-32: TPC do operador MLT dado equipe de supervisão (ES) e capacidade (CA)

ES, CA	Operador MLT	
	Sucesso	Erro
<b>Sucesso, Adequada</b>	0,95	0,05
<b>Sucesso, Inadequada</b>	0,90	0,10
<b>Erro, Adequada</b>	0,90	0,10
<b>Erro, Inadequada</b>	0,01	0,99

Tabela 8-33: TP dos nós folha da RB operador MLT realiza o alinhamento pelo anel de indexação

Nó	Probabilidade de erro ou desfavorável
Sup. Direcional (SD)	0,05
Experiência	0,05
Estado Emocional	0,60
Carga de trabalho	0,20
Condições Ambientais	0,10

Na Tabela 8-34 é apresentada a tabela de probabilidade condicional do nó equipe de supervisão, note que ela cumpre com o seu papel, se pelo menos um dos supervisores estiver presente e supervisionando de forma adequada. Possui o raciocínio análogo a uma porta lógica E de uma árvore de falha, onde ambos supervisores devem errar para que a equipe de supervisão erre.

Tabela 8-34: TPC da equipe de supervisão dado supervisor direcional (SD) e supervisor MLT (SMLT)

SD, SMLT	Equipe de supervisão	
	Sucesso	Erro
<b>Sucesso, Sucesso</b>	<b>1,00</b>	0,00
<b>Sucesso, Erro</b>	<b>1,00</b>	0,00
<b>Erro, Sucesso</b>	<b>1,00</b>	0,00
<b>Erro, Erro</b>	0,00	<b>1,00</b>

Tabela 8-35: TPC do supervisor MLT dado o supervisor direcional (SD)

SD	Supervisor MTL	
	Sucesso	Erro
Sucesso	0,99	0,01
Falha	0,98	0,02

Tabela 8-36: TPC da capacidade dado experiência (EX) e atenção e vigilância (AT)

EX, AT	Capacidade	
	Adequada	Inadequada
Adequada, Adequada	1,00	0,00
Adequada, Inadequada	0,70	0,30
Inadequada, Adequada	0,98	0,02
Inadequada, Inadequada	0,00	1,00

Tabela 8-37: TPC da atenção e vigilância dado estado emocional (EE) e fadiga (FA)

EE, FA	Atenção e vigilância	
	Adequada	Inadequada
Adequada, Ñ Presente	0,95	0,05
Adequada, Presente	0,70	0,30
Inadequada, Ñ Presente	0,80	0,20
Inadequada, Presente	0,60	0,40

Tabela 8-38: TPC da fadiga dado carga de trabalho (CT) e condições ambientais (CA)

CT, CA	Fadiga	
	Ñ Presente	Presente
Adequada, Ñ Presente	0,98	0,02
Adequada, Presente	0,80	0,20
Inadequada, Ñ Presente	0,50	0,50
Inadequada, Presente	0,10	0,90

Com base nestas probabilidades, o operador MLT tem uma probabilidade de 15% de errar o alinhamento no anel de indexação.

Caso a fadiga esteja presente no operador, sob estas condições ele possui uma probabilidade de 21% de errar o alinhamento no anel de indexação. Representando um aumento de 40% na probabilidade.

#### 8.4.4 Teste do MWD

A Figura 8-31 modela via RB a ação do operador MWD realizar o teste do MWD. O operador realiza esta atividade sob a supervisão do supervisor MWD. As tabelas de probabilidades condicionais são apresentadas em seguida.

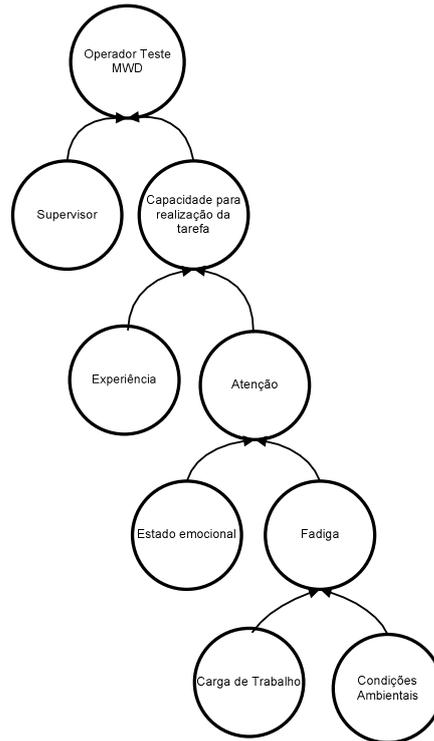


Figura 8-31: RB para modelagem do erro do operador MWD testa o MWD

Tabela 8-39: TPC do operador MWD dado Supervisor MWD (SMWD) e capacidade (CA)

SMWD, CA	Operador MWD	
	Sucesso	Erro
Sucesso, Adequada	0,99	0,01
Sucesso, Inadequada	0,10	0,90
Erro, Adequada	0,98	0,02
Erro, Inadequada	0,00	1,00

Tabela 8-40: TP dos nós folha da RB operador MWD testa o MWD

Nó	Probabilidade de erro ou desfavorável
Supervisor MWD	0,05
Experiência	0,02
Estado Emocional	0,60
Carga de trabalho	0,02
Condições Ambientais	0,10

Tabela 8-41: TPC da capacidade dado experiência (EX) e atenção e vigilância (AT)

EX, AT	Capacidade	
	Adequada	Inadequada
Adequada, Adequada	1,00	0,00
Adequada, Inadequada	0,70	0,30
Inadequada, Adequada	0,0001	0,9999
Inadequada, Inadequada	0,00	1,00

Tabela 8-42: TPC da atenção e vigilância dado estado emocional (EE) e fadiga (FA)

EE, FA	Atenção e vigilância	
	Adequada	Inadequada
Adequada, Ñ Presente	0,95	0,05
Adequada, Presente	0,70	0,30
Inadequada, Ñ Presente	0,80	0,20
Inadequada, Presente	0,60	0,40

**Tabela 8-43: TPC da fadiga dado carga de trabalho (CT) e condições ambientais (CA)**

CT, CA	Fadiga	
	Ñ Presente	Presente
Adequada, Ñ Presente	0,98	0,02
Adequada, Presente	0,80	0,20
Inadequada, Ñ Presente	0,50	0,50
Inadequada, Presente	0,10	0,90

O operador MWD tem uma probabilidade de 7,9% de errar no teste do MWD.

Caso a fadiga esteja presente no operador, sob estas condições ele possui uma probabilidade de 12,7% no teste. Representando um aumento de 60,8% na probabilidade.

Na Figura 8-32 é apresentado nó funcionamento do MWD na demanda, ele é dependente da execução correta pelo operador MWD do teste do MWD. A tabela de probabilidade condicional deste nó é mostrada abaixo.



**Figura 8-32: RB para modelagem da falha na demanda do MWD dado o teste do MWD**

**Tabela 8-44: TPC do travamento da coluna (TC) dado passagem da coluna (PC)**

Teste	Funcionamento do MWD	
	Sucesso	Falha
Sucesso	0,999	0,001
Erro	0,998	0,002

Na Figura 8-33 é apresentado nó referente ao MWD informar a leitura corretamente, ele é dependente do funcionamento do MWD na demanda. A tabela de probabilidade condicional deste nó é mostrada abaixo.



**Figura 8-33: RB para modelagem da falha do MWD em informar a leitura correta**

**Tabela 8-45: TPC do travamento da coluna (TC) dado passagem da coluna (PC)**

Funcionamento	MWD informa leitura	
	Sucesso	Falha
Sucesso	0,999	0,001
Erro	0,00	<b>1,00</b>

#### 8.4.5 Sondador realiza o torque de montagem do BHA

A Figura 8-34 modela via RB a ação do sondador em executar a tarefa de aplicar o torque de montagem do BHA. Para esta atividade, o sondador depende de forma direta da

qualidade da informação recebida dos operadores MLT e MWD, e dos FFD. Abaixo, serão apresentados os nós e as respectivas tabelas de probabilidades condicionais.

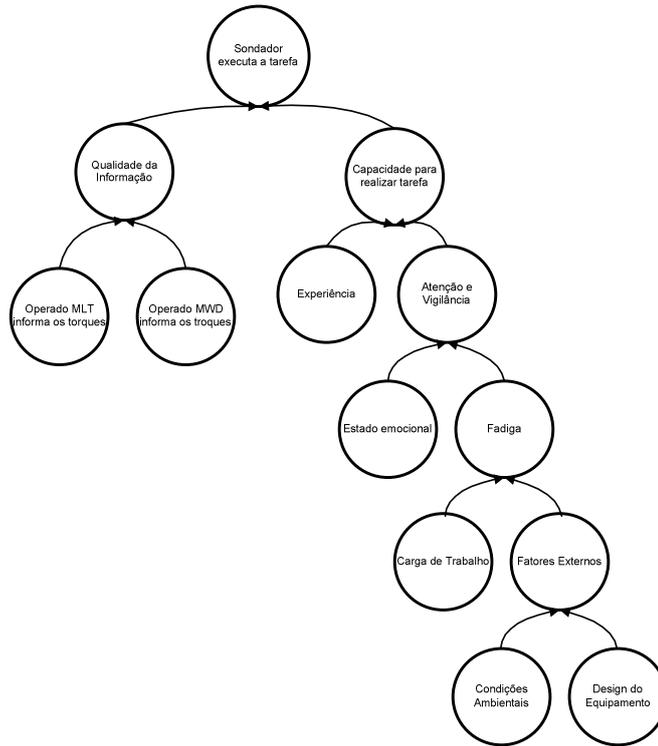


Figura 8-34: RB para modelagem do erro do sondador montagem do BHA (torque)

Tabela 8-46: TPC do sondador (So) dado Qualidade da Informação recebida (QI) e Capacidade para realizar a tarefa (CA)

QI, AT	Sondador	
	Sucesso	Erro
Adequada, Adequada	0,99	0,01
Adequada, Inadequada	0,92	0,08
Inadequada, Adequada	0,92	0,08
Inadequada, Inadequada	0,40	0,60

Tabela 8-47: TP dos nós folha da RB do sondador montagem do BHA (torque)

Nó	Probabilidade de erro ou desfavorável
Operador MLT	0,05
Operador MWD	0,01
Experiência	0,01
Estado Emocional	0,10
Carga de trabalho	0,01
Design do equipamento	0,10
Condições Ambientais	0,10

Tabela 8-48: TPC da capacidade dado experiência (EX) e atenção e vigilância (AT)

EX, AT	Capacidade	
	Adequada	Inadequada
Adequada, Adequada	0,995	0,005
Adequada, Inadequada	0,001	0,999
Inadequada, Adequada	0,500	0,500
Inadequada, Inadequada	0,0001	0,9999

Na Figura 8-35 o nó é uma representação da porta lógica OU. Ela modela a condição onde a qualidade da informação recebida pelo sondador é inadequada se um errar, o outro errar ou ambos errarem (operador MLT e MWD), i.e., se qualquer um dos dois informarem os torques incorretos, a qualidade da informação é inadequada.

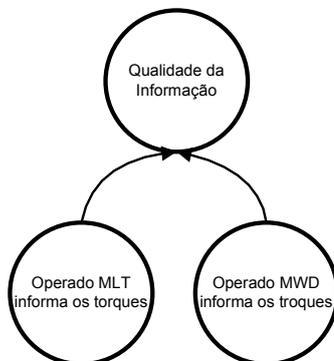


Figura 8-35: RB para modelagem da informação recebida pelo sondador

Tabela 8-49: TPC da qualidade da informação dado operador MLT e operador MWD

OMLT, OMWD	Qualidade da informação	
	Adequada	Ñ Adequada
Sucesso, Sucesso	1,00	0,00
Sucesso, Erro	0,00	1,00
Erro, Sucesso	0,00	1,00
Erro, Erro	0,00	1,00

Tabela 8-50: TPC da atenção e vigilância dado estado emocional (EE) e fadiga (FA)

EE, FA	Atenção e vigilância	
	Adequada	Inadequada
Adequada, Ñ Presente	0,95	0,05
Adequada, Presente	0,90	0,10
Inadequada, Ñ Presente	0,90	0,10
Inadequada, Presente	0,80	0,20

Tabela 8-51: TPC da fadiga dado carga de trabalho (CT) e condições ambientais (CA)

CT, CA	Fadiga	
	Ñ Presente	Presente
Adequada, Ñ Presente	0,995	0,005
Adequada, Presente	0,900	0,100
Inadequada, Ñ Presente	0,850	0,150
Inadequada, Presente	0,600	0,400

Tabela 8-52: TPC dos fatores externo dado Design do Equipamento (DE) e Condições Ambientais (CA)

DE, CA	Fatores Externo	
	Adequada	Inadequada
Adequada, Adequada	1,00	0,00
Adequada, Inadequada	0,20	0,80
Inadequada, Adequada	0,40	0,60
Inadequada, Inadequada	0,00	1,00

O Sondador tem uma probabilidade de 9% de erra na aplicação dos torques de montagem do BHA.

Caso o operador MWD informe o torque errado, o sondador ainda tem uma probabilidade de erra na aplicação dos torques de 50%, isto ocorre por existir sondadores que são experientes e estão atentos o suficiente para perceber que a informação recebida está errada, fazendo a correção necessária.

Se o design do equipamento não for adequado, a probabilidade de erro do sondador sobe para 25%.

Na Figura 8-36 é apresentado nó sistema de torque, ele é dependente da execução correta pelo sondador na aplicação do torque de montagem. A tabela de probabilidade condicional deste nó é mostrada abaixo.



**Figura 8-36: RB para modelagem da falha do sistema de torque dado sondador**

**Tabela 8-53: TPC do sistema de torque dado sondador (So)**

Sondador	Sistema de torque	
	Adequada	Inadequada
Sucesso	0,90	0,10
Erro	0,00	<b>1,00</b>

#### 8.4.6 Sondador realiza a contagem dos tubos

A rede Bayesiana abaixo apresenta o cenário onde o sondador realiza a contagem dos tubos, uma equipe de supervisão (supervisor MLT e operador MLT) confere a contagem de forma que a confiabilidade da tarefa aumente. A RB e as tabelas de probabilidade condicional dos respectivos nós são apresentados na seqüência.

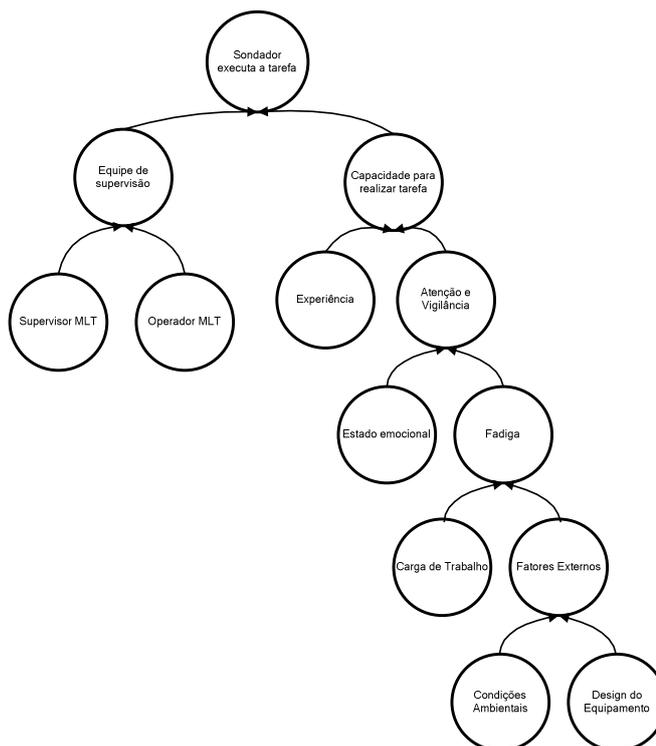


Figura 8-37: RB para modelagem do erro do sondador realiza a contagem dos tubos

Tabela 8-54: TPC do sondador (So) dado Equipe de Supervisão (ES) e Capacidade para realizar a tarefa (CA)

ES, CA	Sondador	
	Sucesso	Erro
Adequada, Adequada	0,99	0,01
Adequada, Inadequada	0,92	0,08
Inadequada, Adequada	0,92	0,08
Inadequada, Inadequada	0,4	0,6

Tabela 8-55: TP dos nós folha da RB sondador realiza a contagem dos tubos

Nó	Probabilidade de erro ou desfavorável
Supervisor MLT	0,01
Operador MLT	0,05
Experiência	0,001
Estado Emocional	0,10
Carga de trabalho	0,99
Design do equipamento	0,10
Condições Ambientais	0,10

Tabela 8-56: TPC da capacidade dado experiência (EX) e atenção e vigilância (AT)

EX, AT	Capacidade	
	Adequada	Inadequada
Adequada, Adequada	1,00	0,00
Adequada, Inadequada	0,50	0,50
Inadequada, Adequada	0,50	0,50
Inadequada, Inadequada	0,00	1,00

Este nó é uma representação da porta lógica E. Ela modela a condição onde a equipe de supervisão só é inadequada se ambos errarem (operador MLT e MWD), i.e., se os dois

supervisionarem a contagem dos tubos de forma errada, significando que pelo menos um é necessário.

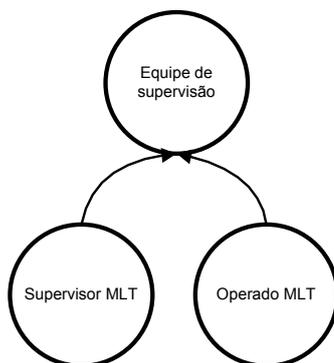


Figura 8-38: RB para modelagem do erro da equipe de supervisão

Tabela 8-57: TPC da equipe de supervisão dado supervisor MLT e operador MLT

SMLT, OMLT	Equipe de supervisão	
	Adequada	Ñ Adequada
Sucesso, Sucesso	1,00	0,00
Sucesso, Erro	1,00	0,00
Erro, Sucesso	1,00	0,00
Erro, Erro	0,00	1,00

Tabela 8-58: TPC da atenção e vigilância dado estado emocional (EE) e fadiga (FA)

EE, FA	Atenção e vigilância	
	Adequada	Inadequada
Adequada, Ñ Presente	0,95	0,05
Adequada, Presente	0,90	0,10
Inadequada, Ñ Presente	0,90	0,10
Inadequada, Presente	0,80	0,20

Tabela 8-59: TPC da fadiga dado carga de trabalho (CT) e condições ambientais (CA)

CT, CA	Fadiga	
	Ñ Presente	Presente
Adequada, Ñ Presente	0,995	0,05
Adequada, Presente	0,900	0,10
Inadequada, Ñ Presente	0,850	0,15
Inadequada, Presente	0,600	0,40

Tabela 8-60: TPC dos fatores externo dado Design do Equipamento (DE) e Condições Ambientais (CA)

DE, CA	Fatores Externo	
	Adequada	Inadequada
Adequada, Adequada	1,00	0,00
Adequada, Inadequada	0,20	0,80
Inadequada, Adequada	0,40	0,60
Inadequada, Inadequada	0,00	1,00

O Sondador tem uma probabilidade de 2,4% de erra na contagem dos tubos.

Caso o supervisor MLT não esteja presente ou não esteja atento na contagem dos tubos, a probabilidade de erro sobe para 6,2%, representado um aumento de 158%.

## 8.5 Estimação da Probabilidade de Ocorrência dos Cenários

Nesta seção os cenários serão modelados, e as respectivas tabelas de probabilidades dos estados finais serão apresentadas. Os cenários foram modelados de forma que a dependência parcial seja mantida, i.e., um dado evento depende do predecessor imediato.

Na tabela de probabilidades, o valor 0 indica a impossibilidade de ocorrência do cenário, este valor é baseado na experiência operacional do especialista consultado e corroborado por membros da equipe de engenheiros da operadora de petróleo consultada neste trabalho.

Na seção foram identificados cenários que acarretassem no comprometimento das operações de construção de poços multilaterais. Esses cenários foram caracterizados qualitativamente em termos da seqüência de eventos que levassem a distintas conseqüências operacionais, tais como sucesso, manobra e peixe. Para tanto, a técnica de árvore de eventos foi empregada.

As árvores de eventos descritas na seção “modelagem dos cenários” são transformadas em redes bayesianas. Tal procedimento oferece a possibilidade de adequadamente modelar a dependência completa entre os eventos, i.e. em geral, para efeito de quantificação, na modelagem por árvores de eventos, os eventos são tratados de forma independentes. Na rede Bayesiana um evento é dependentes de todos os seus predecessores, tornando o resultado da probabilidade do estado final mais próximo da realidade.

### 8.5.1 Montagem da coluna de condicionamento

A rede Bayesiana abaixo apresenta o cenário onde o técnico de coluna realiza a montagem da coluna de condicionamento com um diâmetro menor que o necessário, aumentando desta forma a probabilidade de ocorrer uma dificuldade na passagem das ferramentas que conseqüentemente aumenta a probabilidade de ocorre o travamento das ferramentas no poço. A combinação deste três eventos pivôs possibilita a ocorrência de três estados finais, sucesso, manobra ou coluna presa.

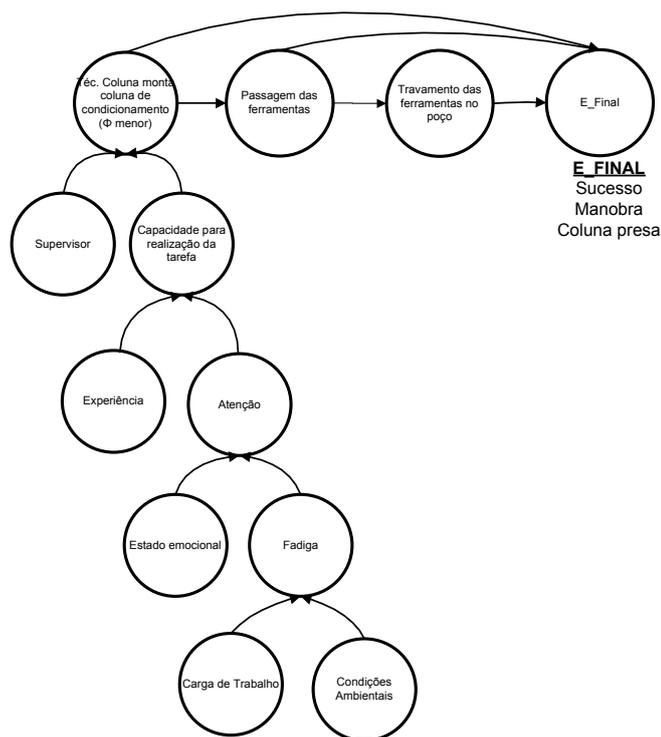


Figura 8-39: RB referente a árvore de eventos Figura 8-8

A Tabela 8-61 descreve por meio da TPC o estado final da seqüência de eventos dada o estado dos eventos técnico de coluna, passagem das ferramentas e travamento das ferramentas. Como apresentado na árvore de eventos, o estado final é sucesso se os três eventos pivôs forem sucesso, ou se o técnico de coluna errar, a passagem da ferramenta e o travamento das ferramentas forem sucesso. O estado final será manobra se o técnico de coluna for sucesso, a passagem da ferramenta for falha e travamento da ferramenta for sucesso, ou se o técnico de coluna errar, a passagem da ferramenta for falha, e o travamento da ferramenta for sucesso. Todas as outras combinações que tenham o travamento da ferramenta como falha, levará o sistema ao estado final “coluna presa”.

Tabela 8-61: TPC do Estado Final (E\_Final) dado Técnico de Coluna (TC), Passagem da Ferramenta (PF) e Travamento da Ferramenta (TF)

E_Final					
TC	PF	TF	Sucesso	Manobra	Coluna P.
S	S	S	1,00	0,00	0,00
S	S	F	0,00	0,00	1,00
S	F	S	0,00	1,00	0,00
S	F	F	0,00	0,00	1,00
E	S	S	1,00	0,00	0,00
E	S	F	0,00	0,00	1,00
E	F	S	0,00	1,00	0,00
E	F	F	0,00	0,00	1,00

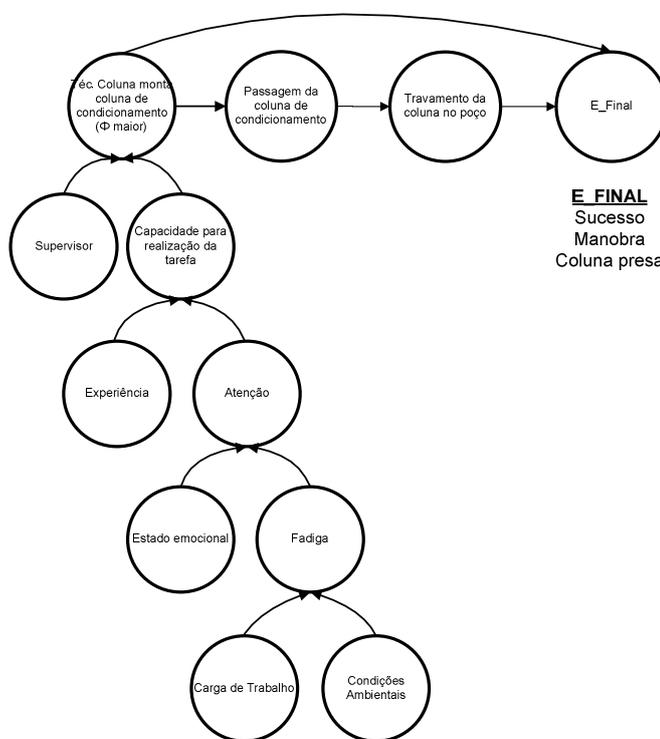
Com base nos dados apresentados, a probabilidade dos estados finais: sucesso, manobra e coluna presa são:

Sucesso: **97,80%**

Manobra: **1,1%**

Coluna presa: **1,1%**

A rede Bayesiana abaixo apresenta o cenário onde o técnico de coluna realiza a montagem da coluna de condicionamento com um diâmetro maior que o necessário, aumentando desta forma a probabilidade de ocorrer uma dificuldade na passagem da própria coluna de condicionamento, que conseqüentemente aumenta a probabilidade de ocorre o travamento da coluna de condicionamento no poço. A combinação deste três eventos pivôs possibilita a ocorrência de três estados finais, sucesso, manobra ou coluna presa.



**Figura 8-40: RB referente a árvore de eventos Figura 8-10**

A Tabela 8-62 descreve por meio da TPC o estado final da seqüência de eventos dado o estado dos eventos pivôs técnico de coluna, passagem da coluna e travamento da coluna. Como apresentado na árvore de eventos, o estado final é sucesso se os três eventos pivôs forem sucesso ou se o técnico de coluna errar e a passagem da coluna e travamento da coluna forem sucesso. O estado final será manobra se o técnico de coluna for sucesso, a passagem da coluna for falha e o travamento da coluna for sucesso ou se o técnico de coluna errar a passagem da ferramenta for falha o travamento da ferramenta for sucesso. Todas as outras

combinações que tenham o travamento da ferramenta como falha, levará o sistema ao estado final “coluna presa”.

**Tabela 8-62: TPC do Estado Final (E\_Final) dado Técnico de Coluna (TC), Passagem da Coluna (PC) e Travamento da Coluna (TC)**

E_Final					
TC	PC	TC	Sucesso	Manobra	Coluna P.
S	S	S	1,00	0,00	0,00
S	S	F	0,00	0,00	1,00
S	F	S	0,00	1,00	0,00
S	F	F	0,00	0,00	1,00
E	S	S	1,00	0,00	0,00
E	S	F	0,00	0,00	1,00
E	F	S	0,00	1,00	0,00
E	F	F	0,00	0,00	1,00

Com base nos dados apresentados, a probabilidade dos estados finais: sucesso, manobra e coluna presa são:

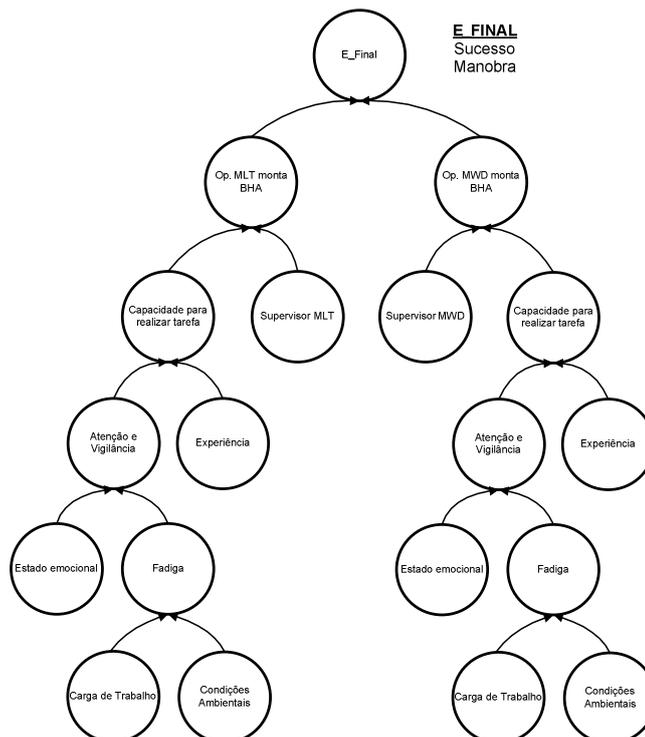
Sucesso: **87,3%**

Manobra: **2,2%**

Coluna presa: **10,5%**

### 8.5.2 Montagem do BHA

A rede Bayesiana abaixo apresenta o cenário onde os operadores MLT e MWD realizam a montagem do BHA, esta é uma ação conjunta dos dois operadores onde os estados finais possíveis são sucesso e manobra.



**Figura 8-41: RB referente a árvore de eventos Figura 8-12**

A Tabela 8-63 descreve por meio da TPC a representação da porta lógica OU. Ela modela a condição onde o estado final é manobra, se um errar, o outro errar ou ambos errarem (operador MLT e MWD), i.e., se qualquer um dos dois errarem na montagem do BHA o estado final será manobra.

**Tabela 8-63: TPC do Estado Final (E\_Final) dado Operador MLT (OMLT) e Operador MWD (OMWD)**

OMLT, OMWD	E_Final	
	Sucesso	Manobra
Sucesso, Sucesso	1,00	0,00
Sucesso, Erro	0,00	1,00
Erro, Sucesso	0,00	1,00
Erro, Erro	0,00	1,00

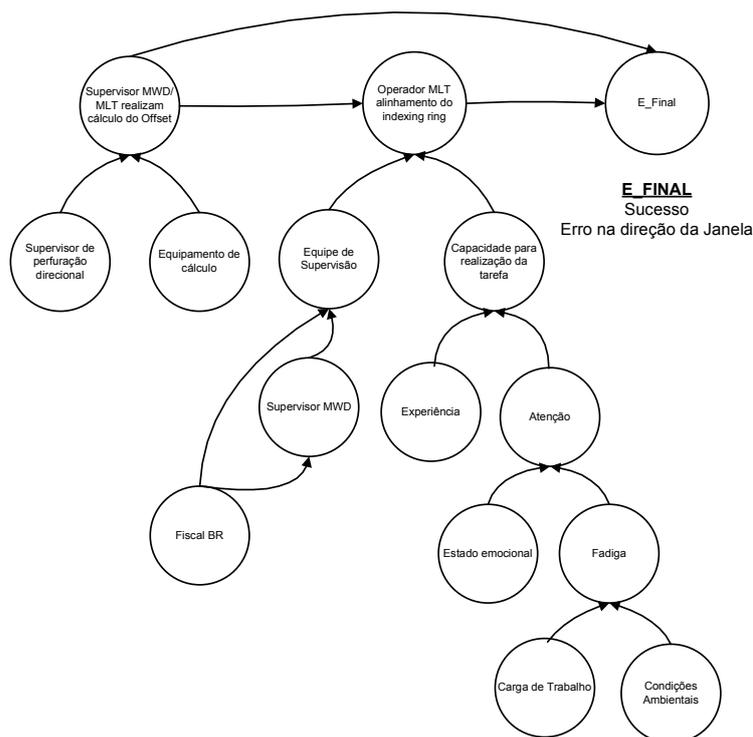
Com base nos dados apresentados, as probabilidades dos estados finais: sucesso e manobra são:

Sucesso: **92%**

Manobra: **8%**

### 8.5.3 Cálculo do offset e alinhamento pelo anel de indexação

A rede Bayesiana abaixo apresenta o cenário onde os supervisores realizam o cálculo do offset, ocorrendo este erro um erro na direção da janela ocorrerá, na seqüência, com base na informação recebida dos supervisores, o operador MLT realiza o alinhamento no anel de indexação, ocorrendo o erro no alinhamento, um erro na direção de janela ocorrerá. O sucesso só é atingido se os supervisores realizarem o cálculo de forma correta e o operador MLT realizar o alinhamento de forma correta.



**Figura 8-42:** RB referente a árvore de eventos **Figura 8-14:** Árvore de Eventos 1.5.11, 1.6.1 e 1.8.1

A Tabela 8-64 descreve por meio da TPC o estado final da seqüência de eventos dado o estado dos eventos supervisores MLT e MWD realizam o cálculo do offset, e operador MLT realiza o alinhamento pelo anel de indexação. Como apresentado na árvore de eventos, o estado final é sucesso se somente se os dois eventos forem sucesso. É possível perceber que este cenário poderia ser descrito por uma árvore de falha, porém por representar uma seqüência temporal, i.e., a etapa seguinte só começa quando a etapa anterior termina, a árvore de eventos se torna mais apropriada. A TPC é a representação da porta lógica OU. Ela modela a condição onde o estado final é erro na direção da janela, se um errar, o outro errar ou ambos errarem (supervisores MLT e MWD e operador MLT), i.e., se qualquer um dos dois errarem.

**Tabela 8-64:** TPC do Estado Final (E\_Final) dado supervisores MLT e MWD (Ss), e operador MLT (OMLT)

Ss, OMLT	E_Final	
	Sucesso	Erro na direção da janela
<b>Sucesso, Sucesso</b>	<b>1,00</b>	0,00
<b>Sucesso, Erro</b>	0,00	<b>1,00</b>
<b>Erro, Sucesso</b>	0,00	<b>1,00</b>
<b>Erro, Erro</b>	0,00	<b>1,00</b>

Com base nos dados apresentados, a probabilidade dos estados finais: sucesso, manobra e coluna presa são:

Sucesso: **90,63%**

Erra na direção da janela: **9,37%**

8.5.4 Teste do MWD

A rede Bayesiana abaixo apresenta o cenário onde o operador MWD realiza o teste do MWD, caso o teste não seja realizado, ou seja, realizado de forma incorreta, aumenta a probabilidade de não funcionamento do MWD na demanda, que na seqüência temporal pode informar a leitura de forma incorreta. A combinação deste três eventos possibilita a ocorrência de três estados finais, sucesso, manobra ou erro na direção da janela.

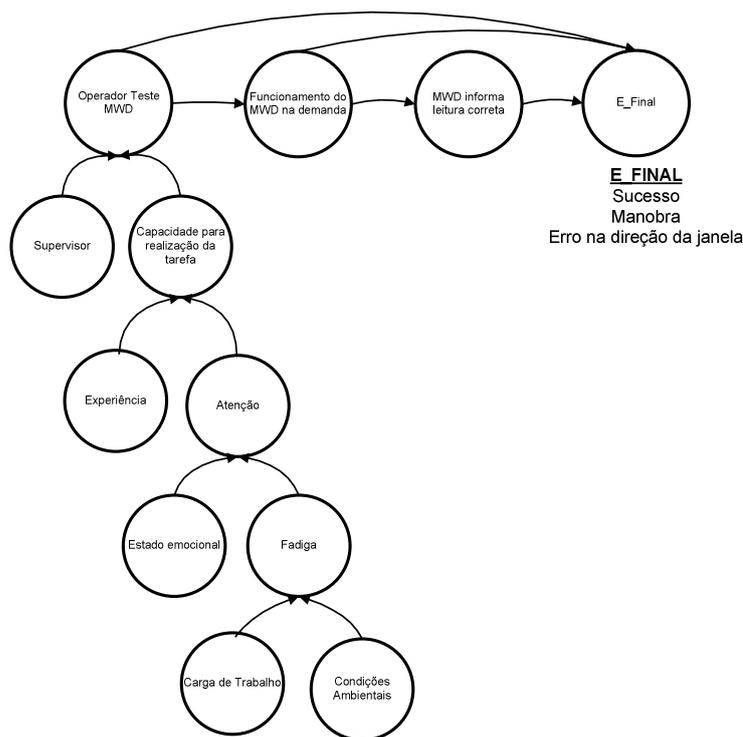


Figura 8-43: RB referente a árvore de eventos Figura 8-16

A Tabela 8-65 descreve por meio da TPC, o estado final da seqüência de eventos dado o estado dos eventos o operador MWD realiza o teste do MWD, funcionamento do MWD na demanda e informar a leitura. Como apresentado na árvore de eventos, o estado final é sucesso se os três eventos forem sucesso, ou se o operador MWD errar, funcionamento do MWD na demanda e informar a leitura forem sucesso. O estado final será manobra se o funcionamento do MWD na demanda for “falha”. As outras combinações possíveis têm como estado final erro na direção da janela.

Tabela 8-65: TPC do Estado Final (E\_Final) dado operador MWD (OMWD), funcionamento do MWD na demanda (MWDD) e informar a leitura (IL)

			E_Final		
OMWD	MWDD	IL	Sucesso	Manobra	Erro na direção da janela
S	S	S	1,00	0,00	0,00
S	S	F	0,00	0,00	1,00
S	F	S	0,00	1,00	0,00
S	F	F	0,00	1,00	0,00

<b>E</b>	<b>S</b>	<b>S</b>	<b>1,00</b>	0,00	0,00
<b>E</b>	<b>S</b>	<b>F</b>	0,00	0,00	<b>1,00</b>
<b>E</b>	<b>F</b>	<b>S</b>	0,00	<b>1,00</b>	0,00
<b>E</b>	<b>F</b>	<b>F</b>	0,00	<b>1,00</b>	0,00

Com base nos dados apresentados, a probabilidade dos estados finais: sucesso, manobra e erro na direção da janela são:

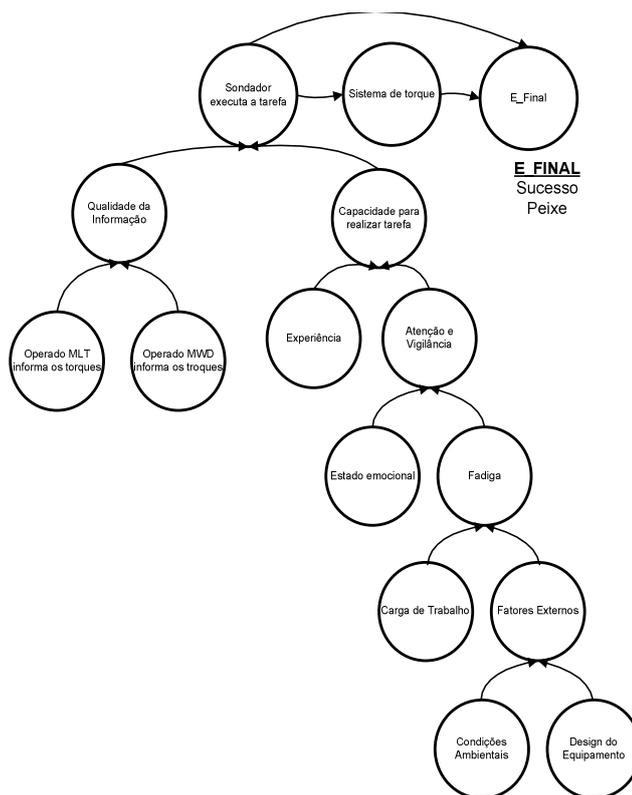
Sucesso: **99,68%**

Manobra: **0,112%**

Erro na direção da janela: **0,208%**

### 8.5.5 Sondador realiza o torque de montagem do BHA

A rede Bayesiana abaixo apresenta o cenário onde o sondador realiza a tarefa de montagem do BHA, especificamente aplicando o torque de montagem. Na seqüência temporal, o sistema de torque responde a ação realizada pelo sondador. A combinação deste dois eventos possibilita a ocorrência de dois estados finais, sucesso ou peixe.



**Figura 8-44: RB referente a árvore de eventos Figura 8-18**

A Tabela 8-66 descreve por meio da TPC o estado final da seqüência de eventos dado o estado dos eventos sondador executa a tarefa de torque de montagem do BHA, e sistema de torque. Como apresentado na árvore de eventos, o estado final é sucesso se somente se os dois eventos forem sucesso. È possível perceber que este cenário poderia ser descrito por uma

árvore de falha, porém por representar uma seqüência temporal, i.e., a etapa seguinte só começa quando a etapa anterior termina, a árvore de eventos se torna mais apropriada. A TPC é a representação da porta lógica OU. Ela modela a condição onde o estado final é peixe, se um errar (falhar), o outro errar (falhar) ou ambos errar e falhar (sondador e sistema de torque), i.e., se qualquer um dos dois for o insucesso.

**Tabela 8-66: TPC do Estado Final (E\_Final) dado Sondador (S), e Sistema de Torque (ST)**

S, ST	E_Final	
	Sucesso	Peixe
Sucesso, Sucesso	1,00	0,00
Sucesso, Falha	0,00	1,00
Erro, Sucesso	0,00	1,00
Erro, Falha	0,00	1,00

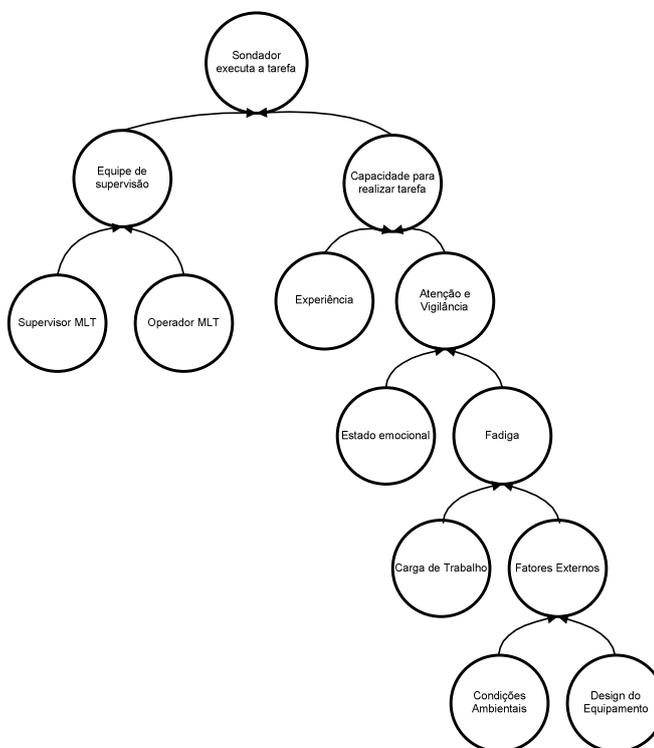
Com base nos dados apresentados, a probabilidade dos estados finais: sucesso, manobra e coluna presa são:

Sucesso: **87,7%**

Peixe: **12,3%**

### 8.5.6 Sondador realiza a contagem dos tubos

Abaixo, é apresentada a rede para a atividade de contagem dos tubos pelo sondador.



**Figura 8-45: RB para modelagem do erro do sondador realiza a contagem dos tubos**

O Sondador tem uma probabilidade de 2,4% de errar na contagem dos tubos.

Caso o supervisor MLT não esteja presente ou não esteja atento na contagem dos tubos, a probabilidade de erro sobe para 6,2%, representando um aumento de 158%.

O erro na contagem dos tubos pode gerar diversos estados finais indesejados, tais como: manobra; dano a ferramenta, gerando peixe ou coluna presa; Por conta disto se faz importante a modelagem.

## 9 RESULTADOS E CONCLUSÕES

- Na elicitación do especialista, a probabilidade informada por ele, sobre o estado emocional estar em um estado desfavorável, foi bastante alta, 60%. Isto demonstra que o estado emocional de fato é algo relevante para um estudo mais aprofundado;

- O técnico de operações especiais tem uma probabilidade de 3% de errar a montagem da coluna gabarito. Se a fadiga estiver presente, a probabilidade de erro sobe para 4,1%, representando um aumento de 36,7% na probabilidade de erro em relação ao estado normal. Se o supervisor não estiver presente ou estiver supervisionando de forma inadequada, a probabilidade sobe para 15,6%, representando um aumento de 420% em relação ao estado normal. Se o técnico de operações especiais não tiver experiência ou treinamento adequado para a realização da atividade, a probabilidade de erro sobe para 7,7%, representando um aumento de 157% na probabilidade de erro em relação ao estado normal;

- O operador MLT tem uma probabilidade de 1,5% de errar a montagem do BHA. Caso a fadiga esteja presente no operador, sob estas condições ele possui uma probabilidade de 1,6% de errar a montagem do BHA. Representando um aumento de 6,7% na probabilidade.

- O operador MWD tem uma probabilidade de 4,2% de errar a montagem do BHA. Caso a fadiga esteja presente, a probabilidade de erro sobe para 5,1%. Representando um aumento de 21,4% na probabilidade;

- A probabilidade dos supervisores MWD e MLT errarem o cálculo do offset é de 2%. Assumindo que o supervisor direcional não está presente ou está supervisionando de forma inadequada, a probabilidade de erro dos supervisores MWD e MLT na mesma atividade aumenta para 5%. Representando um aumento de 150%;

- O operador MLT tem uma probabilidade de 15% de errar o alinhamento no anel de indexação. Caso a fadiga esteja presente, a probabilidade de erro sobe para 21%. Representando um aumento de 40%;

- O operador MWD tem uma probabilidade de 7,9% de errar no teste do MWD. O operador estando fadigado, a probabilidade de erro sobe para 12,7%. Representando um aumento de 60,8%;

- O Sondador tem uma probabilidade de 9% de erra na aplicação dos torques de montagem do BHA. Se o design do equipamento não for adequado, a probabilidade de erro do sondador sobe para 25%.

- O Sondador tem uma probabilidade de 2,4% de erra na contagem dos tubos. Caso o supervisor MLT não esteja presente ou não esteja atento na contagem dos tubos, a probabilidade de erro sobe para 6,2%, representado um aumento de 158%.

**Em relação aos cenários, as probabilidades dos estados finais são apresentadas abaixo:**

- As probabilidades dos estados finais para o cenário “montagem da coluna de condicionamento com diâmetro menor”:

Sucesso: **97,80%**

Manobra: **1,1%**

Coluna presa: **1,1%**

- As probabilidades dos estados finais para o cenário “montagem da coluna de condicionamento com diâmetro maior”:

Sucesso: **87,3%**

Manobra: **2,2%**

Coluna presa: **10,5%**

- As probabilidades dos estados finais para o cenário “montagem do BHA”:

Sucesso: **92%**

Manobra: **8%**

- As probabilidades dos estados finais para o cenário “cálculo do offset e alinhamento pelo anel de indexação”:

Sucesso: **90,63%**

Erra na direção da janela: **9,37%**

- As probabilidades dos estados finais para o cenário “teste do MWD”:

Sucesso: **99,68%**

Manobra: **0,112%**

Erro na direção da janela: **0,208%**

- As probabilidades dos estados finais para o cenário “sondador realiza o torque de montagem do BHA”:

Sucesso: **87,7%**

Peixe: **12,3%**

## ***RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS***

- Realizar uma análise de incerteza e sensibilidade das redes Bayesianas apresentadas;
- Integrar todas as tarefas em uma única rede. E desta forma, possibilitar uma análise probabilística de riscos integrada, colaborando para o gerenciamento do risco do sistema;
- Elaborar plano de contingência para os diversos cenários identificados, e desta forma poder se antecipar aos possíveis estados finais apresentados;
- Desenvolver a mesma análise para as outras fases de construção de poços multilaterais;
- Os estados finais forma apresentados unicamente de forma probabilística, i.e., não foram quantificados em termos de tempo ou dinheiro, por exemplo. Desta forma, para trabalhos futuros esta recomendações é feita;
- Fazer uso de estrutura da analise probabilística de riscos para ajudar na tomada de decisão. O uso de Redes Bayesianas viabiliza esta utilização.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ANEZIRIS, O. N.; HOUSIADAS, C.; STAKAKIS, M. & PAPAZOGLU, I.A. (2004) - Probabilistic Safety Analysis of a Greek Research Reactor. *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 31, P. 481–516.

AYYUB, B. (2001) – Elicitation of Expert Opinions for Uncertainty and Risks. CRC Press. Boca Raton, Florida.

BOBBIO, A.; PORTINALE, L.; MINICHINO, M. & CIANCAMERLA, E. (2001) - Improving the Analysis of Dependable Systems by Mapping Fault Trees into Bayesian Networks. *Reliability Engineering & System Safety*. Vol. 71, p. 249-260.

BOOKER, J.M. & MCNAMARA, L.A. (2004) - Solving Black Box Computation Problems Using Expert Knowledge Theory and Methods. *Reliability Engineering & System Safety*. Vol. 85. Pág. 331–340.

BOSWORTH, S.; EL SAYED, H. S.; ISMAIL, G.; OHMER, H.; STRACKE, M.; WEST, C. & RETNANTO, A. (1998) - *Key Issues in Multilateral Technology*. Oilfield Review. Schumberger. Winter. 14-17.

BURNS, D.J. (1991) - *Advanced Fault Tree Analysis in Offshore Applications*. In: **SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS** (11-14 November 1991: The Hague, Netherlands).

CAMPELLO DE SOUZA, F. M. (2002) - *Sistemas Probabilísticos*. Talus. Recife, Pernambuco.

CHANG & MOSLEH (2004) - Model-based human reliability analysis: prospects and requirements. *Reliability Engineering and System Safety*. Vol. 83, p.241–253.

CLICKMACAE (2005) - <http://www.clickmacae.com.br/?sec=85&pag=pagina&cod=24>. Acessado em 15 de março de 2005, as 12:00 horas.

DEMONG, K.; RIVENBARK, M. & BAILEY, E. R. (2000) – *Recent Case Histories of Offshore Dual Multilateral Completion Systems in the Middle East*. In: **SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS** (Out. 2000: Abu Dhabi, UAE).

DROGUETT, E.L. (2002) – *Modelos de Markov em Confiabilidade*. Material de aula. Departamento de Engenharia de Produção – Centro de Tecnologia e Geociência, Universidade Federal de Pernambuco. 64 páginas.

FIRMINO, P. R. & DROGUETT, E. L. (2004) - *Redes Bayesianas Para a Parametrização da Confiabilidade em Sistemas Complexos*. Recife. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Centro de Tecnologia e Geociência, Universidade Federal de Pernambuco. 90 páginas.

FIRMINO, P. R., MENÊZES, R. C. & DROGUETT, E. L. (2006) – Eliciting Engineering judgments in Human Reliability Assessment. Artigo submetido em 2005 para o *RAMS, 2006*.

GARRICK, B. J. & CHRISTIE, R.F. (2002) - Probabilistic risk assessment practices in the USA for nuclear power plants. *Safety Science*, Vol. 40, p. 177–201.

GARROUCH, A. A.; LABABIDI, H.M.S. & EBRAHIM, A. (2003) - *A Novel Expert System for Multilateral Well Completion*. In: **SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS** (Mai. 2004: Long Beach, California, USA).

HOLLNAGEL, E. (1998) - *Cognitive Reliability and Error Analysis Method*. Elsevier Science. England.

INPO (1985) - *A Maintenance Analysis of Safety Significant Events*. Atlanta, GA: Institute of Nuclear Power Operations.

ISMAIL, G.; FADA'Q, A.S.; KIKUCHI, S.; KHATIB, H. El. (2000) - *Ten Year Experience in Horizontal Application & Pushing the Limits of Well Construction Approach in Upper Zakum Field (Offshore Abu Dhabi)*. In: **SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS** (Out. 2000: Abu Dhabi, UAE).

KIRWAN, B. & AINSWORTH, L.K. (1993) – *A Guide to Task Analysis*. Taylor & Francis. Washington, DC

KUMAMOTO, H. & HENLEY, E.J. (1996) - *Probabilistic Risk Assessment and Management for Engineers and Scientists*, 2nd ed.

KORB, K. B. & NICHOLSON, A. E. (2003) - *Bayesian Artificial Intelligence*. Chapman & Hall/CRC. Florida.

- LABEAU, P.E., SMIDTS, C. & SWAMINATHAN, S. (2000) - Dynamic reliability: towards an integrated platform for probabilistic risk assessment. *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 68, p. 219–254.
- LAGE, A.; SOTOMAYOR, G.P.; VARGAS, A.C.; da SILVA, P.R.C.; LIRA, H.L. & SILVA FILHO, P. (2003) - *The First Underbalanced Multilateral Well Branches Drilled in Brazil, a Field Case History* - In: **SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS** (Fev. 2003: Fev. 2003: Amsterdam, Holanda).
- LEE, D.; BRANDAO, F.; LUCENA, G. S. H. & SILVA FILHO, P. (2003) - *A New Look for an Old Field – Multilateral, Underbalanced, Semi-Short Radius Drilling, Case Study: Installation of a Seven Leg Multilateral Well*. In: **SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS** (Fev. 2003: Amsterdam, Holanda).
- LIPP, M. N. (1996) - *Pesquisas Sobre o Stress no Brasil*. Ed. Papirus, São Paulo.
- LONGBOTTOM, J. R.; DALE, D.; WADDELL, K.; BRUHA, S. & ROBERTS, J. (1996) - *Development, Testing, and Field Case Histories of Multilateral Well Completion Systems*. In: **SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS** (Out. 1996: Adelaide, Australia).
- LONGBOTTOM, J. & HERRERA, I. (1997) - Multilateral Wells Can Multiply Reserve Potential. *The American Oil & Gas Reporter*. National Publishing Group Inc., Wichita, KS. 53.
- MARTZ, H. F. & WALLER, R. A. (1982) - *Bayesian reliability analysis*. 2 ed. Krieger Publishing Company. Florida.
- MCLELLAN, P.J. & HAWKES, C.D. (1998) - *Application of Probabilistic Techniques for Assessing Sand Production Instability Risks and Borehole*. In: **SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS** (Jul. 1998: Trondheim, Norway).
- MENÊZES, R. C. & DROGUETT, E. L. (2005) - *Uma Metodologia para a Avaliação da Confiabilidade Humana em Atividades de Substituição de Cadeias de Isoladores em Linhas de Transmissão*. Recife. 170p. (Mestrado-Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção / UFPE).
- MODARRES, M.; KAMINSKIY, M. & KRIVTSOV, V. (1999) - *Reliability Engineering and Risk Analysis*, New York.

MOSS, T. R. (1990) - Auditing Offshore Safety Risk Assessments. *Journal of Petroleum Technology*, Vol. 42. October. p.1241-1243

NAHAS, M. V.(2001) - Atividade física, Saúde e Qualidade de vida: conceitos e sugestões para um estilo de vida ativo.Midiograf. Londrina.

NADLER, G. C. & CAMPELLO, F. M. (2001) – *A Protocol for the Elicitation of Prior Distributions*. In: 2° International Symposium on Imprecise Probabilities and Their Applications. New York.

NEAPOLITAN, R. E. (2004) - *Learning Bayesian Networks*. Pearson Prentice Hall. New Jersey.

NIEHAUS, F. (2002) - Use of Probabilistic Safety Assessment (PSA) for nuclear installations *Safety Science*, Vol. 40, p. 153–176.

OBERKIRCHER, J.; SMITH, R. & THACKWRAY, I. (2003) - *Boon or Bane? A Survey of the First 10 years of Modern Multilateral Wells*. In: **SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS** (Out. 2003: Denver, Colorado, USA).

OTTERLOO, R. W. (1995) - Probabilistic Risk Assessment: An Historic Overview from Determinism to Probabilism. *Microelectronic Reliability*, Vol. 35, p. 1357-1362.

OSIF, B.A. & CONKLING, T.W. (1995) - *The Three Mile Island unid 2 decontamination and recovery collection*.

PAPAZOGLU I.A. & ANEZIRIS O.N., (2003) Master Logic Diagram: method for hazard and initiating event identification in process plants, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 97, 2003, p. 11-30.

PASICZNYK, A.M.; HOGG, W.C.; WILLIAMS, D.L.; CORDEIRO, C.M.P.; SOTOMAYOR, G.P.G; OLIVEIRA, R.L.L.; ALVES, I. & BLAETH, M. (1999) - *Case History of the World's First Level 5 Multilateral Completed from a Semisubmersible Rig*. In: **SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS** (Out. 1999: Houston, Texas, USA).

PEARL, J. (2000) - *Causality, Reasoning, and Inference*. Cambridge University Press. New York.

PIETERSEN, C.M. & ENGELHARD, W.F.J.M. (1991) – Offshore Safety Assessment. In: **SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS** (Nov. 1991: Holanda).

PERRYMAN, L.J., FOSTER, N.A.S. & NICHOLLS, D.R. (1995) - Using PRA in Support of Maintenance Optimization. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 61, p. 593-608.

RAMÍREZ, R.; FERNANDEZ, V. & BARRIOS, J. (2004) - *Multilateral Field Experience in Developing an Extra Heavy Crude-Oil Reservoir*. In: **SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS** (Mar. 2004: California, USA).

RASMUSON, D.M. (1992) - *A comparison of the small and large event tree approaches used in PRAs*. *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 37, p. 79–90.

RIVERA, N.; JENSEN, J. L.; SPIVEY, J. P. & JARDON, M. (2003) - *Economic Comparisons of Multilateral and Horizontal Wells in Water-Drive Reservoirs*. In: **SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS** (Mar. 2003: Oklahoma City, Oklahoma, USA).

RUMP, P.; BAIRAGI, R.; FRASER, J. & MUELLER, K. (2004) - *Multilateral / Intelligent Wells Improve Development of Heavy Oil Field – A case History*. In: **SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS** (Mar. 2004: Texas, USA).

SLACK, N.; CHAMBERS, S. & JOHNSTON, R. (2002) - *Administração da Produção*. Ed. Atlas S.A. São Paulo.

STAMATELATOS, M. et al., (2002a) – *Fault Tree Handbook with Aerospace Applications*. NASA Headquarters, Washington, DC.

STAMATELATOS, M. et al. (2002b) – *Probabilistic Risk Assessment Procedures Guide for NASA Managers and Practitioners*. NASA Headquarters, Washington, DC.

SWAIN, A. & GUTTMANN, H. E. (1983) - *Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications*. US Nuclear Regulatory Commission. Washington.

THOMAS, J.E. et al. (1996) - *Fundamentos de Engenharia de Petróleo*. Petrobras / SEREC / CEN-NOR, Rio de Janeiro.

VESELY, W.E. et al. (1981) – *Fault Tree Handbook*. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC.

VIEIRA, S. I. & SOBRINHO, S. (1995) - O Estresse e sua Prevenção. In: **MEDICINA BÁSICA DO TRABALHO**. Vol. IV, Curitiba: Genesis, p. 199 - 217.

VIJ, S.K.; NARASAIHAH, S.L.; WALIA, A. & SINGH, G. (1998) - *Multilaterals: An Overview and Issue Involved in Adopting This Technology*. In: **SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS** (Fev. 1998: New Delhi, India).

WICKENS, C. D., GORDON, S. E. & LIU, Y. (1997) - *An introduction to human factors engineering*. Addison Wesley Educational Publishers Inc.

ZIO, E., (1996) - On the use of the analytic hierarchy process in the aggregation of expert judgments. *Reliability Engineering and System Safety*. Vol.53. pág.127-1.