

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

Este exemplar corresponde a redação final  
da tese defendida por José Francisco  
dos Santos Corrêa e aprovada  
pela comissão julgadora em 11 / 12 / 1995

  
ORIENTADOR

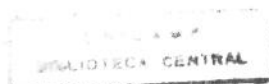
Dissertação Apresentada à  
Faculdade de Engenharia Mecânica  
como requisito parcial para a obtenção do  
Título de Mestre em Engenharia de Petróleo

**SISTEMA INTELIGENTE  
PARA APLICAÇÕES DE SOLUÇÕES AO  
BOMBEAMENTO MECÂNICO DE PETRÓLEO**

43/95

Autor : José Francisco dos Santos Corrêa  
Orientador : Armando Freitas da Rocha

Dezembro de 1995



UNIDADE: BC  
 CHAMADA:  
 T UNICAMP  
 C 817A  
 E.  
 MIO BC/27394  
 ROC. 067/96  
 C ☐ D ☒ X  
 RECO R\$ 11,50  
 ATA 23/01/96  
 CPD C M.00087270-7

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
 BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

C817s Corrêa, José Francisco dos Santos  
 Sistema inteligente para aplicações de soluções ao  
 bombeamento mecânico de petróleo / José Francisco dos  
 Santos Corrêa.--Campinas, SP: [s.n.], 1995.

Orientador: Armando Freitas da Rocha.  
 Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de  
 Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Engenharia do petróleo. 2. Inteligência artificial. 3.  
 Grafo (Sistema de computador). 4. Redes neurais  
 (Computação). 5. Sistemas difusos. I. Rocha, Armando  
 Freitas da. II. Universidade Estadual de Campinas.  
 Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

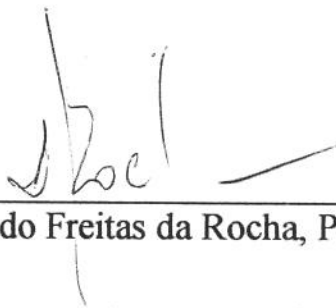
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

*A dissertação “**SISTEMA INTELIGENTE PARA APLICAÇÕES DE SOLUÇÕES AO BOMBEAMENTO MECÂNICO DE PETRÓLEO**” elaborada por José Francisco dos Santos Corrêa foi aceita pela Subcomissão de Pós-Graduação em Engenharia de Petróleo com requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Petróleo.*

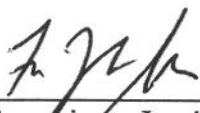
*Campinas, 11 de dezembro de 1995*

Banca Examinadora



---

Armando Freitas da Rocha, Ph.D.



---

Francisco José Soares Alhanati, Ph.D.



---

Lideniro Alegre, Ph.D.

Aos meus pais José Alves Corrêa (in memorian) e Sueli dos Santos Corrêa

e

À Maria Luiza minha esposa

## *AGRADECIMENTOS*

Ao Professor Armando Freitas da Rocha, pela orientação na elaboração deste trabalho.

A PETROBRÁS pela oportunidade de aprimoramento profissional proporcionada.

Aos colegas da PETROBRÁS, que de forma direta ou indireta colaboraram para a realização e conclusão deste trabalho.

Aos funcionários do DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO da UNICAMP, representados pela Sra. Fátima, pela dedicação e profissionalismo no atendimento às atividades de apoio ao curso de mestrado.

Aos colegas do curso de mestrado pelo companheirismo e pelas horas de convívio, em especial ao colega de profissão Kwon Il Choi pelas longas discussões sobre o assunto que resultou no presente trabalho.

A minha esposa Maria Luiza pelo carinho e colaboração durante este período de árduo trabalho.

## ***RESUMO***

O presente trabalho apresenta proposta de um sistema inteligente para a análise e apresentação de soluções a serem aplicadas em poços equipados com bombeamento mecânico. Este sistema engloba o tratamento de dados contidos em base de dados, a identificação de sintomas através de agentes especializados, a análise do conjunto de sintomas e a proposta de ações no sentido de corrigir problemas e otimizar o sistema bombeamento mecânico.

Conceitos de engenharia de petróleo como dimensionamento e verificação do sistema de bombeamento mecânico, análise Nodal, cálculo da carta dinamométrica de fundo, fluxo multifásico, propriedades dos fluidos, "Inflow Performance Relationship", Interferência de Gás, dentre outros, foram incorporados ao sistema e integrados por agentes inteligentes desenvolvidos a partir de conceitos de Inteligência Artificial, tais como, sistemas distribuídos, redes neurais simbólicas e lógica nebulosa.

O "Sistema Inteligente para Análise de Cartas Dinamométricas", atualmente em desenvolvimento através de convênio entre a PETROBRÁS e UNICAMP, tem seu campo de atuação ampliado pelo presente trabalho, através da incorporação dos conceitos citados.

## ***SUMMARY***

This work presents a proposal for a Sucker Rod Pumping Analysis Expert System, with the main characteristic of presenting diagnostics and solutions to sucker rod pumping problems. The system includes database treatment, symptoms identification, diagnosis and solutions proposals, performed by a group of agents specialized in sucker rod pumping problems solution and optimization.

Artificial Intelligence concepts such as distributed systems, neural nets and fuzzy logic, as long as Petroleum Engineering concepts such as design and verification of sucker rod pumping, nodal analysis, and pump dynagraph are used by the intelligent agents to broadly analyse the sucker rod pumping system.

The use of the above concepts in this work, enlarges the PETROBRÁS UNICAMP project “Sistema Inteligente para análise de Cartas Dinamométricas” scope in the treatment of sucker rod pumping problems.

## Índice

|                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------|----|
| 1. Introdução                                                | 1  |
| 1.1 Objetivos                                                | 1  |
| 1.2 O poço de petróleo equipado com SBM                      | 3  |
| 1.2.1 Fases                                                  | 3  |
| 1.2.2 Rotina diária                                          | 4  |
| 1.3 A otimização do SBM                                      | 5  |
| 1.3.1 Dados necessários                                      | 5  |
| 1.3.1.1 Características mecânicas de subsuperfície           | 5  |
| 1.3.1.2 Características mecânicas de superfície              | 5  |
| 1.3.1.3 Características operacionais                         | 6  |
| 1.3.1.4 Características do fluido produzido                  | 6  |
| 1.3.1.5 Características do reservatório produtor             | 6  |
| 1.3.1.6 Testes e medições                                    | 7  |
| 1.3.2 Tratamento dos dados                                   | 8  |
| 1.4 Estado da arte da análise do bombeamento mecânico        | 10 |
| 1.4.1 A análise inteligente do SBM na literatura             | 10 |
| 1.4.2 Sistemas em uso ou em fase de implantação na PETROBRÁS | 13 |
| 1.4.3 O SICAD                                                | 14 |
| 1.4.3.1 Estrutura conceitual                                 | 14 |
| 1.4.3.2 Controle local                                       | 15 |
| 1.4.3.3 Escritório central                                   | 16 |
| 1.4.3.4 Possibilidades de uso                                | 16 |
| 1.5 Contribuição do presente trabalho                        | 17 |
| 2. Concepção adotada                                         | 18 |
| 2.1 Estrutura conceitual do sistema proposto                 | 18 |
| 2.2 Conceitos de IA envolvidos                               | 20 |
| 2.2.1 Lógica nebulosa                                        | 20 |
| 2.2.1.1 Aspectos teóricos                                    | 20 |
| 2.2.1.2 Aplicação ao problema                                | 21 |
| 2.2.2 Redes neurais simbólicas                               | 24 |
| 2.2.2.1 Aspectos teóricos                                    | 24 |
| 2.2.2.2 Aplicação ao problema                                | 25 |
| 2.2.3 Reconhecimento de padrões                              | 26 |
| 2.2.3.1 Aspectos teóricos                                    | 26 |
| 2.2.3.2 Aplicação ao problema                                | 27 |
| 2.2.4 Sistemas distribuídos                                  | 29 |
| 2.2.4.1 Aspectos teóricos                                    | 29 |
| 2.2.4.2 Aplicação ao problema                                | 30 |

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| 2.2.5 Sistema Kards                                                   | 35 |
| 2.2.5.1 Aspectos teóricos                                             | 35 |
| 2.2.5.2 Aplicação ao problema                                         | 35 |
| 2.2.5.2.1 Armário de dados                                            | 36 |
| 2.2.5.2.2 Armário de RNS                                              | 40 |
| 2.2.5.2.3 Armário de diagnósticos/ações                               | 47 |
| 2.2.5.2.4 Armário de configuração do sistema                          | 53 |
| 2.2.5.2.5 Armário de defaults                                         | 53 |
| 2.2.5.2.6 Outros armários                                             | 53 |
| 2.3 Modelos matemáticos utilizados                                    | 54 |
| 2.3.1 Estimativas do curso efetivo, dos esforços e da potência no SBM | 54 |
| 2.3.2 Esforços medidos                                                | 59 |
| 2.3.3 Pressão de fundo em fluxo                                       | 60 |
| 2.3.4 Capacidade de produção do reservatório                          | 61 |
| 2.3.5 Análise nodal                                                   | 62 |
| 2.4 Agentes externos                                                  | 63 |
| 3. Implementação do sistema                                           | 66 |
| 3.1 Base de dados                                                     | 66 |
| 3.1.1 Descrição                                                       | 66 |
| 3.1.2 Classificação dos dados                                         | 81 |
| 3.1.2.1 Dados independentes                                           | 81 |
| 3.1.2.1.1 Dados imprescindíveis                                       | 81 |
| 3.1.2.1.2 Dados com default                                           | 82 |
| 3.1.2.1.3 Dados “perecíveis”                                          | 83 |
| 3.1.2.2 Dados “dependentes”                                           | 83 |
| 3.2 Definição dos padrões para CDF e CDS                              | 84 |
| 3.2.1 Efeitos isolados                                                | 84 |
| 3.2.1.1 Normal                                                        | 84 |
| 3.2.1.2 Pancada de fluido                                             | 85 |
| 3.2.1.3 Interferência de gás                                          | 86 |
| 3.2.1.4 Vazamento nas válvulas                                        | 87 |
| 3.2.1.5 Problemas na coluna de tubos                                  | 88 |
| 3.2.1.6 Batidas na bomba                                              | 89 |
| 3.2.1.7 Pistão preso por areia                                        | 90 |
| 3.2.2 Efeitos superpostos                                             | 90 |
| 3.2.3 Cargas na superfície                                            | 92 |
| 3.2.3.1 Pistão preso                                                  | 92 |
| 3.2.3.2 Haste partida                                                 | 93 |
| 3.2.4 Comentários                                                     | 93 |
| 3.3 Base de conhecimento                                              | 94 |
| 3.3.1 Supervisores                                                    | 94 |
| 3.3.1.1 Supervisor 0:                                                 | 94 |
| 3.3.1.2 Supervisor 1:                                                 | 95 |

|                                                   |     |
|---------------------------------------------------|-----|
| 3.3.1.3 Supervisor 2                              | 96  |
| 3.3.1.4 Supervisor 3:                             | 97  |
| 3.3.1.4.1 Supervisor_3a                           | 98  |
| 3.3.1.4.2 Supervisor_3b                           | 99  |
| 3.3.2 Agentes                                     | 99  |
| 3.3.2.1 Referentes aos sintomas                   | 99  |
| 3.3.2.1.1 Interferência de gás                    | 99  |
| 3.3.2.1.2 Atrito                                  | 101 |
| 3.3.2.1.3 Unidade de bombeamento                  | 103 |
| 3.3.2.1.4 Potência do motor da UB                 | 107 |
| 3.3.2.1.5 Tensão nas hastes                       | 108 |
| 3.3.2.1.6 Teste de produção X vazão potencial     | 110 |
| 3.3.2.1.7 Eficiência Volumétrica:                 | 111 |
| 3.3.2.1.8 Posição da bomba                        | 112 |
| 3.3.2.1.9 Pressão de Sucção                       | 114 |
| 3.3.2.1.10 Taxa de compressão da bomba            | 115 |
| 3.3.2.1.11 Parafina                               | 116 |
| 3.3.2.1.12 Obstrução da Sucção da Bomba por Scale | 117 |
| 3.3.2.1.13 Obstrução da Sucção da Bomba por Areia | 118 |
| 3.3.2.1.14 Corrosão na coluna de hastes           | 119 |
| 3.3.2.2 Referentes ao reconhecimento de padrões   | 120 |
| 3.3.2.2.1 Normal:                                 | 120 |
| 3.3.2.2.2 Pancada de fluido                       | 122 |
| 3.3.2.2.3 Interferência de gás                    | 123 |
| 3.3.2.2.4 Bloqueio de gás:                        | 124 |
| 3.3.2.2.5 Vazamento da válvula de passeio:        | 126 |
| 3.3.2.2.6 Vazamento da válvula de pé:             | 127 |
| 3.3.2.2.7 Haste partida                           | 128 |
| 3.3.2.2.8 Pistão preso:                           | 129 |
| 3.3.2.3 Referentes a diagnose                     | 130 |
| 3.3.2.3.1 Problemas na carta dinamométrica        | 131 |
| 3.3.2.3.2 Queda de produção                       | 132 |
| 3.3.2.3.3 Pressão de sucção alta                  | 133 |
| 3.3.2.3.4 Eficiência volumétrica baixa            | 134 |
| 3.3.2.3.5 Acúmulo severo de parafina              | 135 |
| 3.3.2.3.6 Obstrução severa da sucção              | 135 |
| 3.3.2.3.7 Corrosão severa                         | 136 |
| 3.3.2.3.8 Unidade de bombeamento subdimensionada  | 136 |
| 3.3.2.3.9 Motor subdimensionado                   | 137 |
| 3.3.2.3.10 Coluna de hastes subdimensionada       | 137 |
| 3.3.2.4 Referentes às ações                       | 139 |
| 3.3.2.4.1 Intervenção de sonda.                   | 139 |
| 3.3.2.4.1.1 Interv_0                              | 140 |
| 3.3.2.4.1.2 Interv_1                              | 141 |
| 3.3.2.4.1.3 Interv_2                              | 142 |
| 3.3.2.4.1.4 Interv_3                              | 143 |
| 3.3.2.4.1.5 Interv_4                              | 144 |
| 3.3.2.4.1.6 Interv_5                              | 145 |



|                                                        |     |
|--------------------------------------------------------|-----|
| 3.3.2.4.1.7 Interv_6                                   | 146 |
| 3.3.2.4.1.8 Interv_7                                   | 147 |
| 3.3.2.4.2 Reduzir curso/cpm.                           | 148 |
| 3.3.2.4.2.1 Reduz_0                                    | 148 |
| 3.3.2.4.2.2 Reduz_1                                    | 149 |
| 3.3.2.4.2.3 Reduz_2                                    | 150 |
| 3.3.2.4.2.4 Reduz_3                                    | 151 |
| 3.3.2.4.3 Aumentar curso/cpm.                          | 152 |
| 3.3.2.4.4 Outros agentes                               | 153 |
| 4. Exemplos de utilização do sistema                   | 154 |
| 4.1 Caso 1                                             | 154 |
| 4.1.1 Dados do poço                                    | 154 |
| 4.1.2 Definição dos sintomas                           | 159 |
| 4.1.2.1 Agente Atrito                                  | 159 |
| 4.1.2.2 Agente Interferência de gás                    | 160 |
| 4.1.2.3 Agente Unidade de bombeamento                  | 161 |
| 4.1.2.4 Agente motor                                   | 163 |
| 4.1.2.5 Agente Tensão nas hastes                       | 164 |
| 4.1.2.6 Agente Teste de produção X vazão potencial     | 165 |
| 4.1.2.7 Agente Eficiência Volumétrica                  | 166 |
| 4.1.2.8 Agente Pressão de Sucção                       | 167 |
| 4.1.2.9 Agente Taxa de compressão da bomba             | 168 |
| 4.1.2.10 Agente Parafina                               | 169 |
| 4.1.2.11 Agente Obstrução da Sucção da Bomba por Scale | 170 |
| 4.1.2.12 Obstrução da Sucção da Bomba por Areia        | 171 |
| 4.1.2.13 Agente Corrosão na coluna de hastes           | 172 |
| 4.1.3 Análise da carta dinamométrica                   | 173 |
| 4.1.3.1 Pancada de fluido                              | 174 |
| 4.1.4 Definição dos diagnósticos                       | 177 |
| 4.1.4.1 Agente problemas na carta                      | 178 |
| 4.1.4.2 Agente Queda de produção                       | 179 |
| 4.1.4.3 Agente Pressão de sucção alta                  | 180 |
| 4.1.4.4 Agente Eficiência volumétrica baixa            | 181 |
| 4.1.4.5 Agente Obstrução da sucção da bomba            | 182 |
| 4.1.4.6 Agente Unidade de bombeamento subdimensionada  | 183 |
| 4.1.4.7 Agente Coluna de hastes subdimensionada        | 184 |
| 4.1.5 Agentes do grupo ações                           | 185 |
| 4.1.5.1 Agente Intervenção de sonda - Interv 1         | 185 |
| 4.1.5.2 Reduzir curso/cpm - Reduz 1                    | 186 |
| 4.2 Caso 2                                             | 188 |
| 4.2.1 Dados do poço                                    | 188 |
| 4.2.2 Definição dos sintomas                           | 193 |
| 4.2.2.1 Agente Atrito                                  | 193 |
| 4.2.2.2 Agente Interferência de gás                    | 194 |
| 4.2.2.3 Agente Unidade de bombeamento                  | 195 |

|                                                        |     |
|--------------------------------------------------------|-----|
| 4.2.2.4 Agente motor                                   | 197 |
| 4.2.2.5 Agente Tensão nas hastes                       | 198 |
| 4.2.2.6 Agente Teste de produção X vazão potencial     | 199 |
| 4.2.2.7 Agente Eficiência Volumétrica                  | 200 |
| 4.2.2.8 Agente Pressão de Sucção                       | 201 |
| 4.2.2.9 Agente Taxa de compressão da bomba             | 202 |
| 4.2.2.10 Agente Parafina                               | 203 |
| 4.2.2.11 Agente Obstrução da Sucção da Bomba por Scale | 204 |
| 4.2.2.12 Obstrução da Sucção da Bomba por Areia        | 205 |
| 4.2.2.13 Agente Corrosão na coluna de hastes           | 206 |
| 4.2.3 Análise da carta dinamométrica                   | 206 |
| 4.2.3.1 Agente Normal                                  | 207 |
| 4.2.4 Definição dos diagnósticos                       | 210 |
| 4.2.4.1 Agente Pressão de sucção alta                  | 211 |
| 4.2.4.2 Agente Eficiência volumétrica baixa            | 212 |
| 4.2.4.3 Agente Unidade de bombeamento subdimensionada  | 213 |
| 4.2.4.4 Agente Coluna de hastes subdimensionada        | 214 |
| 4.2.5 Definição das ações                              | 215 |
| 4.2.5.1 Reduzir curso/cpm - Reduz 1                    | 215 |
| 4.2.5.2 Reduzir curso/cpm - Reduz 2                    | 216 |
| 4.3 Caso 3                                             | 219 |
| 4.3.1 Dados do poço                                    | 219 |
| 4.3.2 Definição dos sintomas                           | 224 |
| 4.3.2.1 Agente Atrito                                  | 224 |
| 4.3.2.2 Agente Interferência de gás                    | 225 |
| 4.3.2.3 Agente Unidade de bombeamento                  | 226 |
| 4.3.2.4 Agente motor                                   | 228 |
| 4.3.2.5 Agente Tensão nas hastes                       | 229 |
| 4.3.2.6 Agente Teste de produção X vazão potencial     | 230 |
| 4.3.2.7 Agente Eficiência Volumétrica                  | 231 |
| 4.3.2.8 Agente Pressão de Sucção                       | 232 |
| 4.3.2.9 Agente Taxa de compressão da bomba             | 233 |
| 4.3.2.10 Agente Parafina                               | 234 |
| 4.3.2.11 Agente Obstrução da Sucção da Bomba por Scale | 235 |
| 4.3.2.12 Obstrução da Sucção da Bomba por Areia        | 236 |
| 4.3.2.13 Agente Corrosão na coluna de hastes           | 237 |
| 4.3.3 Análise da carta dinamométrica                   | 238 |
| 4.3.3.1 Normal                                         | 238 |
| 4.3.4 Definição dos diagnósticos                       | 241 |
| 5. Conclusões                                          | 243 |
| 6. Considerações finais                                | 244 |
| Referências bibliográficas                             | 245 |

## Índice de figuras

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1-1- Sistema bombeamento mecânico (SBM)                        | 1  |
| Figura 1-2 - Carta dinamométrica típica de superfície                 | 8  |
| Figura 1-3 - Nível de fluido no anular                                | 9  |
| Figura 1-4 - Estrutura conceitual do SICAD                            | 14 |
| Figura 1-5 - Controle local do SICAD                                  | 15 |
| Figura 1-6 - Escritório central do SICAD                              | 16 |
| Figura 1-7 - Possibilidade de usos dos subsistemas do SICAD           | 17 |
| Figura 2-1 - Estrutura conceitual do sistema proposto                 | 18 |
| Figura 2-2 - Classificação de um elemento em um conjunto nebuloso     | 20 |
| Figura 2-3 - Funções de pertinência                                   | 20 |
| Figura 2-4 - RNS para definir o atrito no SBM                         | 22 |
| Figura 2-5 - Rede neural simbólica, representação esquemática         | 25 |
| Figura 2-6 - RNS para definir o atrito no SBM                         | 26 |
| Figura 2-7 - Pontos da CDF                                            | 27 |
| Figura 2-8 - Padrão para a CDF pancada de fluido                      | 28 |
| Figura 2-9 - Estrutura conceitual do sistema proposto                 | 30 |
| Figura 2-10 - Supervisor 1                                            | 31 |
| Figura 2-11 - Supervisor 2                                            | 32 |
| Figura 2-12 - Supervisor 3                                            | 32 |
| Figura 2-13 - Armário de dados                                        | 36 |
| Figura 2-14 - Armário de redes                                        | 40 |
| Figura 2-15 - Armário de diagnósticos/ações                           | 47 |
| Figura 2-16 - Armário de configuração do sistema                      | 53 |
| Figura 2-17 - Norma API RP11L                                         | 54 |
| Figura 2-18 - Parâmetros da norma API RP11L                           | 55 |
| Figura 2-19 - Correlação para o curso efetivo do pistão               | 55 |
| Figura 2-20 - Correlação para a carga máxima nas hastes               | 56 |
| Figura 2-21 - Correlação para a carga mínima nas hastes               | 56 |
| Figura 2-22- Diagrama de Goodman modificado                           | 57 |
| Figura 2-23 - Correlação para o torque máximo                         | 57 |
| Figura 2-24 - Correlação para o ajuste do torque                      | 58 |
| Figura 2-25 - Correlação para a potência na cabeça da UB              | 58 |
| Figura 2-26 - Curva de torque no redutor                              | 59 |
| Figura 2-27 - Curva de torque do redutor com desbalanceamento         | 59 |
| Figura 2-28 - Cargas na profundidade da bomba                         | 60 |
| Figura 2-29 - Nível dinâmico virtual                                  | 61 |
| Figura 2-30 - Diferencial de pressão no poço                          | 61 |
| Figura 2-31 - Curva de performance do poço                            | 62 |
| Figura 2-32 - Análise nodal                                           | 63 |
| Figura 2-33 - Agente para redimensionar o SBM                         | 64 |
| Figura 2-34 - Agente para animações                                   | 65 |
| Figura 3-1- Padrões de carta dinamométrica normal                     | 85 |
| Figura 3-2 - Padrão para carta dinamométrica com pancada de fluido    | 86 |
| Figura 3-3 - Padrão para carta dinamométrica com interferência de gás | 87 |

|                                                                                   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 3-4 - Padrão para carta dinamométrica com vazamento nas válvulas           | 88  |
| Figura 3-5 - Padrão para carta dinamométrica com problemas na coluna de tubos     | 89  |
| Figura 3-6 - Padrão para carta dinamométrica com batidas na bomba                 | 89  |
| Figura 3-7 - Padrão para carta dinamométrica indicando pistão preso               | 90  |
| Figura 3-8 - Padrões para cartas dinamométricas com superposição de efeitos       | 92  |
| Figura 3-9 - Padrão para carta dinamométrica de superfície com pistão preso       | 92  |
| Figura 3-10 - Padrão para carta dinamométrica de superfície com haste partida     | 93  |
| Figura 3-11 - Supervisor 0                                                        | 95  |
| Figura 3-12 - Supervisor 1                                                        | 96  |
| Figura 3-13 - Supervisor 2                                                        | 97  |
| Figura 3-14 - Supervisor 3a                                                       | 98  |
| Figura 3-15 - Supervisor 3b                                                       | 99  |
| Figura 3-16 - Agente interferência de gás                                         | 101 |
| Figura 3-17 - Agente Atrito                                                       | 103 |
| Figura 3-18 - Agente Unidade de bombeamento                                       | 106 |
| Figura 3-19 - Agente Motor                                                        | 108 |
| Figura 3-20 - Agente Hastes de bombeamento                                        | 110 |
| Figura 3-21 - Agente Teste de produção X Vazão potencial                          | 111 |
| Figura 3-22 - Agente Eficiência volumétrica                                       | 112 |
| Figura 3-23 - Critérios para classificar a profundidade da bomba                  | 113 |
| Figura 3-24 - Agente Posicionamento da bomba                                      | 114 |
| Figura 3-25 - Agente Pressão de sucção                                            | 115 |
| Figura 3-26 - Agente Taxa de compressão                                           | 116 |
| Figura 3-27 - Agente Parafina                                                     | 117 |
| Figura 3-28 - Agente Scale                                                        | 118 |
| Figura 3-29 - Agente Areia                                                        | 119 |
| Figura 3-30 - Agente Corrosão                                                     | 120 |
| Figura 3-31 - Padrão para carta dinamométrica normal                              | 120 |
| Figura 3-32 - Agente padrão normal                                                | 121 |
| Figura 3-33 - Padrão para carta dinamométrica com pancada de fluido               | 122 |
| Figura 3-34 - Agente padrão pancada de fluido                                     | 123 |
| Figura 3-35 - Padrão para carta dinamométrica com interferência de gás            | 123 |
| Figura 3-36 - Agente padrão Interferência de gás                                  | 124 |
| Figura 3-37 - Padrão bloqueio de gás                                              | 124 |
| Figura 3-38 - Agente padrão bloqueio de gás                                       | 126 |
| Figura 3-39 - Padrão para carta dinamométrica com vazamento na válvula de passeio | 127 |
| Figura 3-40 - Agente padrão vazamento na válvula de passeio                       | 127 |
| Figura 3-41 - Padrão para carta dinamométrica com vazamento da válvula de pé      | 128 |
| Figura 3-42 - Agente padrão vazamento na válvula de pé                            | 128 |
| Figura 3-43 - Padrão para carta dinamométrica com haste partida                   | 129 |
| Figura 3-44 - Agente haste partida                                                | 129 |
| Figura 3-45 - Padrão para carta dinamométrica com pistão preso                    | 129 |
| Figura 3-46 - Agente pistão preso                                                 | 130 |
| Figura 3-47 - Agente problemas na carta                                           | 132 |
| Figura 3-48 - Agente queda de produção                                            | 133 |
| Figura 3-49 - Agente pressão de sucção alta                                       | 134 |
| Figura 3-50 - Agente EV baixa                                                     | 135 |
| Figura 3-51 - Agente obstrução da sucção                                          | 136 |

|                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 3-52 - Agente UB subdimensionada                                        | 137 |
| Figura 3-53 - Agente HB subdimensionada                                        | 138 |
| Figura 3-54 - Agente Interv_0                                                  | 140 |
| Figura 3-55 - Agente Interv_1                                                  | 141 |
| Figura 3-56 - Agente Interv_2                                                  | 142 |
| Figura 3-57 - Agente Interv_3                                                  | 143 |
| Figura 3-58 - Agente Interv_4                                                  | 144 |
| Figura 3-59 - Agente Interv_5                                                  | 145 |
| Figura 3-60 - Agente Interv_6                                                  | 146 |
| Figura 3-61 - Agente Interv_7                                                  | 147 |
| Figura 3-62 - Agente Reduz_0                                                   | 148 |
| Figura 3-63 - Agente Reduz_1                                                   | 149 |
| Figura 3-64 - Agente Reduz_2                                                   | 150 |
| Figura 3-65 - Agente Reduz_3                                                   | 151 |
| Figura 3-66 - Agente Aumenta curso/cpm                                         | 152 |
| Figura 4-1- Condições mecânicas do poço - CAM 76                               | 154 |
| Figura 4-2 - Características da UB, do fluido e do reservatório do poço CAM 76 | 155 |
| Figura 4-3- Testes de produção e registros de nível dinâmico do poço CAM 76    | 156 |
| Figura 4-4 - Testes de campo e verificação pela norma API RP11L do CAM 76      | 157 |
| Figura 4-5 - Carta dinamométrica de superfície do poço CAM 76                  | 158 |
| Figura 4-6 - Carta dinamométrica de fundo do poço CAM 76                       | 158 |
| Figura 4-7 - Agente Atrito                                                     | 159 |
| Figura 4-8 - Agente Interferência de gás                                       | 160 |
| Figura 4-9 - Agente Unidade de bombeamento                                     | 162 |
| Figura 4-10 - Agente Motor                                                     | 163 |
| Figura 4-11 - Agente Haste de bombeamento                                      | 164 |
| Figura 4-12 - Agente Teste de produção X vazão potencial                       | 165 |
| Figura 4-13- Agente Eficiência volumétrica                                     | 166 |
| Figura 4-14 - Agente Pressão de sucção                                         | 167 |
| Figura 4-15- Agente Taxa de compressão                                         | 168 |
| Figura 4-16- Agente Parafina                                                   | 169 |
| Figura 4-17- Agente Scale                                                      | 170 |
| Figura 4-18- Agente Areia                                                      | 171 |
| Figura 4-19- Agente Corrosão                                                   | 172 |
| Figura 4-20 - Carta de fundo do poço CAM 76                                    | 173 |
| Figura 4-21 - Agente padrão pancada de fluido                                  | 174 |
| Figura 4-22 - Análise preliminar do CAM 76                                     | 176 |
| Figura 4-23- Agente problemas na carta                                         | 178 |
| Figura 4-24 - Agente queda de produção                                         | 179 |
| Figura 4-25- Agente pressão de sucção alta                                     | 180 |
| Figura 4-26 - Agente EV baixa                                                  | 181 |
| Figura 4-27 - Agente obstrução da sucção                                       | 182 |
| Figura 4-28 - Agente UB subdimensionada                                        | 183 |
| Figura 4-29- Agente HB subdimensionada                                         | 184 |
| Figura 4-30 - Agente Interv 1                                                  | 185 |
| Figura 4-31 - Agente Reduz 1                                                   | 186 |
| Figura 4-32 - Relatório do SIBOM                                               | 187 |
| Figura 4-33 - Condições mecânicas atuais do poço CAM 93                        | 188 |

|                                                                                 |     |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 4-34 - Características da UB, do fluido e do reservatório do poço CAM 93 | 189 |
| Figura 4-35 - Testes de produção e registros de nível dinâmico do poço CAM 93   | 190 |
| Figura 4-36 - Testes de campo e verificação pela norma API RP11L do CAM 93      | 191 |
| Figura 4-37 - Carta dinamométrica de superfície do poço CAM 93                  | 192 |
| Figura 4-38 - Carta dinamométrica de fundo do poço CAM 93                       | 192 |
| Figura 4-39 - Agente Atrito                                                     | 193 |
| Figura 4-40 - Agente Interferência de gás                                       | 194 |
| Figura 4-41 - Agente Unidade de bombeamento                                     | 196 |
| Figura 4-42 - Agente Motor                                                      | 197 |
| Figura 4-43 - Agente Haste de bombeamento                                       | 198 |
| Figura 4-44 - Agente Teste de produção X vazão potencial                        | 199 |
| Figura 4-45- Agente Eficiência volumétrica                                      | 200 |
| Figura 4-46 - Agente Pressão de sucção                                          | 201 |
| Figura 4-47- Agente Taxa de compressão                                          | 202 |
| Figura 4-48- Agente Parafina                                                    | 203 |
| Figura 4-49- Agente Scale                                                       | 204 |
| Figura 4-50- Agente Areia                                                       | 205 |
| Figura 4-51- Agente Corrosão                                                    | 206 |
| Figura 4-52 - Agente Normal                                                     | 207 |
| Figura 4-53 - Resultados da análise preliminar do poço CAM 93                   | 209 |
| Figura 4-54- Agente pressão de sucção alta                                      | 211 |
| Figura 4-55 - Agente EV baixa                                                   | 212 |
| Figura 4-56 - Agente UB subdimensionada                                         | 213 |
| Figura 4-57- Agente HB subdimensionada                                          | 214 |
| Figura 4-58 - Agente Reduz 1                                                    | 215 |
| Figura 4-59 - Agente Reduz 2                                                    | 216 |
| Figura 4-60 - Diagnósticos do poço CAM 93                                       | 217 |
| Figura 4-61 - Redimensionamento do poço CAM 93                                  | 218 |
| Figura 4-62 - Condições mecânicas do poço CAM 40                                | 219 |
| Figura 4-63 - Características da UB do fluido e do reservatório do poço CAM 40  | 220 |
| Figura 4-64 - Testes de produção e registros de nível dinâmico do poço CAM 40   | 221 |
| Figura 4-65 - Testes de campo e verificação pela norma API RP11L do CAM 40      | 222 |
| Figura 4-66- Cartas dinamométricas de superfície e de fundo do poço CAM 40      | 223 |
| Figura 4-67 - Agente Atrito                                                     | 224 |
| Figura 4-68 - Agente Interferência de gás                                       | 225 |
| Figura 4-69 - Agente Unidade de bombeamento                                     | 227 |
| Figura 4-70 - Agente Motor                                                      | 228 |
| Figura 4-71 - Agente Haste de bombeamento                                       | 229 |
| Figura 4-72 - Agente Teste de produção X vazão potencial                        | 230 |
| Figura 4-73- Agente Eficiência volumétrica                                      | 231 |
| Figura 4-74 - Agente Pressão de sucção                                          | 232 |
| Figura 4-75- Agente Taxa de compressão                                          | 233 |
| Figura 4-76- Agente Parafina                                                    | 234 |
| Figura 4-77- Agente Scale                                                       | 235 |
| Figura 4-78- Agente Areia                                                       | 236 |
| Figura 4-79- Agente Corrosão                                                    | 237 |
| Figura 4-80 - Agente Normal                                                     | 239 |
| Figura 4-81 - Resultados da análise preliminar do poço CAM 40                   | 240 |

Índice de tabelas

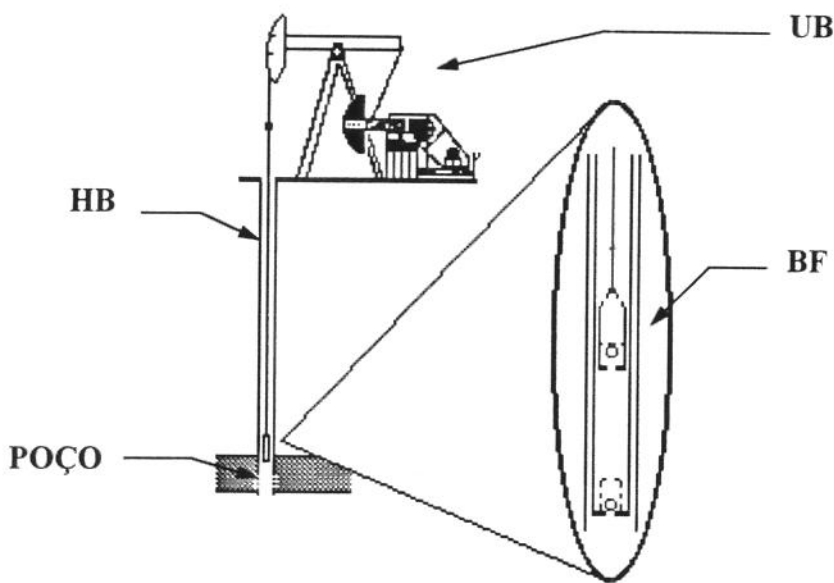
|                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 2-1 - Diagnósticos ( $D_i$ ) e ações dos agentes do grupo 3  | 33  |
| Tabela 2-2 - Análise das ações conflitantes                         | 34  |
| Tabela 2-3 - Solução para o conflito entre ações                    | 35  |
| Tabela 3-1 - Dados imprescindíveis                                  | 81  |
| Tabela 3-2 - Dados com default                                      | 82  |
| Tabela 3-3 - Dados perecíveis                                       | 83  |
| Tabela 3-4 - Dados dependentes                                      | 83  |
| Tabela 3-5 - “Triggers” do agente intervenção                       | 139 |
| Tabela 3-6 - “Triggers” do Agente Reduzir curso/cpm                 | 148 |
| Tabela 3-7 - “Triggers” do agente aumentar curso/cpm                | 152 |
| Tabela 4-1 - Limiares de ativação dos agentes do grupo diagnósticos | 177 |
| Tabela 4-2 - Limiares de ativação dos agentes do grupo diagnósticos | 210 |
| Tabela 4-3 - Limiares de ativação dos agentes do grupo diagnósticos | 241 |



# 1. Introdução

## 1.1 Objetivos

O sistema bombeio mecânico (SBM) é formado por três partes bem distintas que atuam de forma integrada, são elas: a unidade de bombeamento (UB), as hastes de bombeamento (HB) e a bomba de fundo (BF). Esse método de produção de petróleo é amplamente utilizado nas áreas petrolíferas terrestres do país e do mundo.



**Figura 1-1- Sistema bombeamento mecânico (SBM)**

Sua utilização se dá de forma bem característica envolvendo as seguintes fases:

**Projeto:** Nesta fase seus componentes são dimensionados tendo por base apenas estimativas da profundidade da bomba e da vazão a ser produzida.

**Acompanhamento:** Os valores estimados durante a fase de projeto devem ser confrontados com os valores reais medidos no sistema em operação. Em função do afastamento em relação aos valores previstos, ações corretivas devem ser adotadas. Esta fase envolve as manutenções preventiva e corretiva, na primeira são adotadas ações no sentido de otimizar o SBM enquanto na segunda são adotadas ações no sentido de corrigir falhas graves.



Na fase de projeto, a precariedade de informações invariavelmente leva ao dimensionamento do sistema com elevado coeficiente de segurança, resultando no superdimensionamento do mesmo. Isto exige que, a medida que as informações sobre o poço se tornem cada vez mais conhecidas, o SBM seja analisado e tenha suas características alteradas no sentido de adequa-lo às reais necessidades do poço.

A grande quantidade de poços e a complexidade da análise necessária, fazem com que a adequação do SBM às reais necessidades seja feita apenas parcialmente. Diferentes comportamentos verificados em cada SBM em função de diferentes características observadas em cada poço, dificultam a adoção de soluções genéricas.

Esses fatos fazem com que a eficiência do BM seja prejudicada por constantes falhas de produção, muitas vezes sem que seja possível identificar precisamente as causas.

Sendo um sistema complexo que se caracteriza por envolver grande quantidade de informações, apresentar comportamentos diferentes em função das características do poço, envolver elevado índice de empirismo e exigir um acompanhamento rigoroso, é um campo bastante adequado para a aplicação de técnicas de IA.

A aplicação de técnicas de IA na análise inteligente de um SBM tem sido objeto de diversos trabalhos, dentre os quais se destacam o *Sistema para Diagnóstico de Falhas em Bombeamento Mecânico-SDFBM* [41], desenvolvido como projeto interno da Petrobrás, na então Região de Produção da Bahia, com o objetivo de diagnosticar falhas no Bombeamento Mecânico(BM) e o *Sistema Inteligente para análise de Cartas Dinamométricas-SICAD* [1,2], projeto conjunto desenvolvido entre UNICAMP/DEP/FEEM e Petrobrás, sob coordenação dos professores Armando F. Rocha e Celso K. Morooka. Como a maioria dos sistemas noticiados pela literatura sobre o assunto, ambos dão grande ênfase ao diagnóstico mas não se referem às ações necessárias para que o poço retorne à condição ótima de operação.

A participação nos projetos citados nos encorajou a apresentar uma proposta de análise para o SBM cuja implementação depende do desenvolvimento de um sistema computacional baseado na aplicação de técnicas de IA e cujo objetivo é não apenas diagnosticar um SBM mas, principalmente, propor terapias voltadas tanto para a correção de falhas como para a otimização.

Acreditamos que a utilização de um sistema com essas características possibilitará o aumento da eficiência do SBM, pois permitirá que as análises sejam feitas de forma mais completa e mais rápida, trazendo como consequência a redução das falhas de produção e uma melhor adequação dos equipamento às reais necessidades do poço.

Existem atualmente cerca de 4000 poços de petróleo equipados com Bombeamento Mecânico no país, 800 dos quais no estado da Bahia. A redução do custo operacional a ser obtida nesses poços, pode alcançar valores bastante significativos se levarmos em conta que os responsáveis pelo seu acompanhamento, poderão não apenas atuar com maior agilidade na solução das falhas, mas também atuar preventivamente através de um acompanhamento mais intenso do poço.

O presente trabalho propõe um sistema inteligente para análise do SBM, que visa atender aos seguintes objetivos:

- Indicar diagnósticos e terapias para o Bombeamento Mecânico de petróleo
- Reduzir o tempo necessário para análise de um SBM

## 1.2 O poço de petróleo equipado com SBM

### 1.2.1 Fases

Após ser perfurado e definida sua economicidade, o poço de petróleo inicia sua vida produtiva evoluindo através das seguintes fases:

1. **Definição do método de bombeamento:** o método é definido com base na disponibilidade dos recursos já existentes na área geográfica (eletrificação, estradas, etc...) e na expectativa de volume a ser produzido pelo poço. Dentre os métodos de elevação de petróleo disponíveis nas áreas de petróleo do país, bombeamento centrífugo submerso (BCS), gás lift (GL), bombeamento mecânico (BM), e bombeamento de cavidades progressivas (BCP), os dois últimos se destacam como os que mais rapidamente podem ser instalados. São portanto utilizados na maioria dos campos onde não existe disponibilidade de gás para o GL e a expectativa de vazão contra indica o BCS. O BCP tem sua aplicação restrita a poços com pequena profundidade e baixas vazões. Embora de instalação mais complexa do que o BCP, o BM é largamente utilizado pela sua versatilidade e confiabilidade.
2. **Especificação dos equipamentos:** Com base na expectativa de produção e na profundidade da formação rochosa que armazena o petróleo, são definidos os equipamentos que comporão o sistema de bombeamento mecânico (SBM) que será instalado (unidade de bombeamento, coluna de hastes, tipo e diâmetro da bomba, potência do motor, base de assentamento da unidade, diâmetro da coluna de tubos, etc...).
3. **Fase produtiva:** Com a instalação completada inicia a fase produtiva propriamente dita do SBM. Os primeiros testes de produção permitem avaliar o volume de fluido que será possível obter do poço. A capacidade de bombeamento instalada é dimensionada tendo por base um fluido ideal, geralmente água. O comportamento do sistema para um fluido gaseificado e com viscosidade bastante distinta da água somente passa a ser conhecido a partir desta fase.
4. **Definição das características do SBM:** O comportamento do SBM é caracterizado principalmente por tres parâmetros: volume de fluido produzido, nível de fluido no anular revestimento coluna de produção e diagrama das cargas medidas na superfície. Esta fase tem duração de algumas semanas e se encerra quando os valores medidos se estabilizam em um determinado valor considerado aceitável.
5. **Acompanhamento da produção:** Em função do elevado número de poços existentes em cada área, não é possível testar diariamente o volume produzido de cada poço, de tal forma que apenas o somatório do volume diário produzido do nó de produção é computado e comparado com um valor base. Eventuais quedas do valor desse somatório deflagram um processo de busca para identificar qual(is) SBM(s) está(ão)

contribuindo significativamente para essa queda. Além disso, mensalmente são realizadas medições dos parâmetros citados no item 4 acima. Em alguns casos, quando o comportamento do poço não apresenta variações significativas, é usual realizar apenas o teste de produção. Os demais testes são realizados apenas quando é observada variação de valor significativa no volume produzido.

6. **Localização de falhas de produção:** O processo de identificação de um SBM com problema, envolve visitas a cada poço, testes práticos no local e testes de produção fora de rotina. A velocidade na identificação do SBM problemático é função do conhecimento dos técnicos da área sobre as características peculiares de cada um.
7. **Manutenção corretiva:** A limitação dos recursos necessários para atender SBM's com problemas (sondas, equipes de manutenção etc...) tem por consequência uma fila de espera que é função tanto da disponibilidade de recursos como da complexidade do bombeamento (presença de gás no fluido, agentes corrosivos, propriedades do fluido, etc...) existente em um determinado campo produtor. Em campos com horizonte produtor muito profundo, elevada quantidade de gás e baixa produção de óleo, a fila de espera pode ser bastante longa. Cada vez que um poço sofre uma intervenção de sonda, o SBM tem suas características alteradas. Testes e medições devem ser realizados tanto para atualizar os padrões de referência como para verificar se os objetivos da intervenção/alteração foram alcançados.
8. **Otimização:** A medida que o SBM passa a apresentar um comportamento sem falhas, inicia-se a fase de otimização do mesmo. Nesta fase as características do equipamento instalado são modificadas para se aproximar das reais exigências do poço. Esta fase demanda um estudo mais aprofundado do SBM e do poço no qual se identifica as condições ótimas de bombeamento e a produção possível de ser obtida.

### 1.2.2 Rotina diária

Em um campo de petróleo, os poços estão necessariamente atravessando alguma das fases acima. Em campos ainda em início de desenvolvimento, predominam as fases de 1 a 4, nos campos mais antigos predominam as fases de 5 a 7. Em ambos os casos, a rotina diária é realizada por uma equipe de técnicos responsável pelas seguintes atividades:

- definir o método de bombeamento
- especificar, verificar disponibilidade e alocar os equipamentos necessários
- realizar testes iniciais, definir parâmetros padrões de cada poço
- definir e administrar escala de testes dos poços, acompanhar a produção total de cada nó
- identificar poços com falhas de produção
- administrar a fila de poços aguardando manutenção
- identificar o tipo de falha ocorrida, providenciar a manutenção corretiva adequada
- verificar disponibilidade e alocar equipamentos para eventuais substituições

Todas essas atividades dizem respeito às fases de 1 a 7. A fase 8 é invariavelmente preterida por exigir tempo e conhecimentos nem sempre disponíveis em uma área operacional.

### 1.3 A otimização do SBM

**A** otimização do SBM é obtida através do ajuste das capacidades limites dos equipamentos aos os valores mínimos necessários para obter a maior economicidade do poço, levando em conta tanto custos operacionais como de investimento.

#### 1.3.1 Dados necessários

As informações necessárias para a análise do SBM como atualmente realizada, são geradas por diversas fontes e estão sujeitas a um fluxo assíncrono de documentos. Essas informações podem estar explícitas ou implícitas nesses documentos. As primeiras são aquelas que estão citadas textualmente, como por exemplo a profundidade da bomba, enquanto as segundas são obtidas a partir do relato de uma operação, como por exemplo o conteúdo parafínico do fluido, inferido a partir do relato sobre o que foi encontrado quando da retirada da coluna de hastes.

Essas informações incluem dados dos equipamentos do SBM, dados do fluido produzido, dados do reservatório produtor petróleo além de resultados de testes.

##### 1.3.1.1 Características mecânicas de subsuperfície

As características mecânicas incluem as especificações dos seguintes equipamentos de subsuperfície e as profundidades do fundo e dos perfurados:

- Coluna de tubos: diâmetro, peso linear e quantidade
- Coluna de hastes: diâmetro e quantidade de cada haste
- Bomba: tipo, diâmetro do pistão, comprimento da camisa e profundidade
- Profundidade do fundo atual do poço
- Profundidade dos perfurados (região do poço em contato com o reservatório produtor)

Após a instalação/movimentação dos equipamentos de subsuperfície (coluna de tubos, coluna de hastes, bomba) é emitido um relatório contendo as especificações de cada um desses equipamentos, bem como detalhes das operações realizadas durante a instalação dos mesmos, por exemplo, até que profundidade foi investigado o fundo do poço ou em que profundidade foram realizadas as perfurações que comunicam o reservatório com o poço.

##### 1.3.1.2 Características mecânicas de superfície

As características de superfície incluem basicamente as especificações da unidade de bombeamento (UB):

- capacidade ao torque

- capacidade estrutural
- posição dos contrapesos e curso
- potência e amperagem do motor

Informações sobre a capacidade ao torque, capacidade estrutural, potência e amperagem do motor são obtidas do catálogo do equipamento e a posição dos contrapesos e curso da observação local.

### **1.3.1.3 Características operacionais**

- Velocidade de bombeamento
- Pressão no revestimento na superfície
- Pressão na coluna de tubos na superfície

A velocidade de bombeamento da UB, embora seja uma característica mecânica, será tratada neste trabalho como característica operacional, pela facilidade de alteração de seu valor através de variadores de frequência.

Os valores de pressão são obtidos a partir da leitura direta de manômetros, instalados no revestimento e na coluna de tubos do poço e o valor da velocidade de bombeamento é obtida através de observação visual.

### **1.3.1.4 Características do fluido produzido**

- Vazão medida no teste de produção
- Grau API do óleo produzido
- Percentual de água e sedimentos no fluido produzido (BSW)
- Proporção de gás produzido juntamente com o óleo (RGL)
- Presença de areia e agentes corrosivos

A vazão, embora não seja uma característica intrínseca do fluido, dada a abordagem adotada neste trabalho, será tratada como uma das características do mesmo. Seu valor é obtido a partir da medida direta de um tanque, enquanto que o grau API, o BSW e o RGL são obtidos por processos aproximados ou por estimativas. A presença de areia e agentes corrosivos é definida apenas qualitativamente a partir de informações fornecidas nos relatórios de intervenção no poço e de manutenção da bomba.

### **1.3.1.5 Características do reservatório produtor**

Para os objetivos que a abordagem adotada neste trabalho se propõe, apenas duas características do reservatório serão utilizadas:

- Pressão estática do reservatório
- IPR



A pressão estática do reservatório pode ser obtida a partir de medida direta, mas devido a necessidade de uma intervenção de sonda para a realização de tal medição, é usual a adoção valores aproximados, obtidos a partir do estudo e acompanhamento das pressões do reservatório. Além disso, a medida da pressão é realizada em profundidade diferente daquela dos perfurados, o que implica na sua correção com a utilização de valores aproximados de densidade relativa do fluido.

A IPR é obtida a partir dos valores da vazão de teste de produção, da pressão nos perfurados medida durante o teste de produção e da pressão estática. A pressão na profundidade dos perfurados é obtida através da aplicação de modelos matemáticos que fornecem valores aproximados.

Devido a essas dificuldades esses parâmetros são ainda pouco utilizados, apesar de sua grande importância para a otimização do SBM.

#### **1.3.1.6 Testes e medições**

Os seguintes parâmetros são obtidos através de testes e medições:

- Pressão na superfície na tubulação de produção e no anular entre o revestimento e a coluna de produção
- Nível de fluido medido no anular revestimento - coluna de produção
- Vazão do poço medida em teste de produção
- Registro das cargas na cabeça da UB
- Pressurização da coluna de produção

O teste de produção de um poço é realizado colocando-se o mesmo a produzir isoladamente para um tanque. Como usualmente esse poço produz em conjunto com outros através de uma linha de produção conjunta, as condições do teste não representam integralmente as condições normais de produção, resultando em um valor de vazão apenas aproximado da produção do poço.

O nível dinâmico é obtido a partir do registro acústico do nível de fluido e do número de luvas existentes na tubulação. A contagem do número de luvas até o nível de fluido permite obter uma estimativa da profundidade. Esse valor, apesar de ter sido medido em um determinado momento, é assumido como sendo constante.

O mesmo ocorre com o registro das cargas na cabeça da UB durante um ciclo de bombeamento, as quais são consideradas para os demais ciclos. A partir do diagrama representativo das cargas na cabeça da UB, podem ser inferidas as condições de operação da bomba. O processo envolvido nesta inferência é empírico, pois especialmente nos casos de poços profundos é bastante difícil obter alguma informação concludente. Tem sido usual a utilização de modelos matemáticos para, a partir do diagrama das cargas na superfície e das condições mecânicas, obter o correspondente diagrama para as cargas na profundidade da bomba, mais fácil de ser comparado com

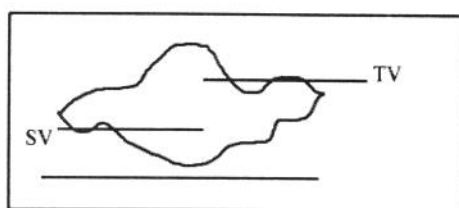
padrões conhecidos. Este recurso no entanto, também apresenta dificuldades de interpretação mormente nos casos de superposição de efeitos.

A pressurização da coluna de produção é obtida através do seu fechamento na superfície enquanto o SBM permanece em operação. Este procedimento permite avaliar a estanqueidade da bomba e da coluna de produção.

### 1.3.2 Tratamento dos dados

A seguir descrevemos a utilização de cada uma das informações acima mencionadas. Cabe ressaltar que muitas vezes essa informação deve ser trabalhada e ou criticada antes de ser utilizada.

- **Registro das cargas na cabeça da UB:** O registro dos valores das cargas ao longo do deslocamento da cabeça da UB, apresenta um comportamento cíclico e bastante característico, figura 2. Na comunidade de petróleo esse registro é conhecido como “carta dinamométrica de superfície” (CDS) denominação esta que adotaremos ao longo deste trabalho.



**Figura 1-2 - Carta dinamométrica típica de superfície**

Sua análise baseia-se na comparação visual com um registro adotado como padrão para aquele SBM. Eventualmente os valores máximos e mínimos das cargas são também analisados, bem como o comportamento das cargas nos testes das válvulas (linhas horizontais indicadas com as legendas TV e SV), o qual, caso apresente distorções, indica anomalias no comportamento da bomba.

O valor máximo da carga é comparado com a capacidade estrutural da UB como uma forma de avaliar se a mesma está sobrecarregada. Também a partir deste valor, através de cálculos aproximados, é obtida uma estimativa do torque a qual permite avaliar a sobrecarga da UB quanto ao torque.

- **Teste de produção:** No início da vida produtiva do poço, uma série de testes são realizados e destes é obtido um valor base com o qual serão comparados valores de futuros testes. Além disso é também utilizado o registro histórico dos testes, com o qual é verificada a tendência dos valores.

A partir das características mecânicas e de cálculos aproximados, é possível estimar o volume deslocado pela bomba e a eficiência volumétrica do SBM. Este parâmetro é utilizado como um indicativo da situação da bomba.

- **Nível de fluido no anular revestimento-coluna de produção:** O valor medido é comparado com a profundidade de assentamento da bomba. Esta comparação permite avaliar se está sendo produzido todo potencial do poço (nível com valor próximo daquele da profundidade da bomba).

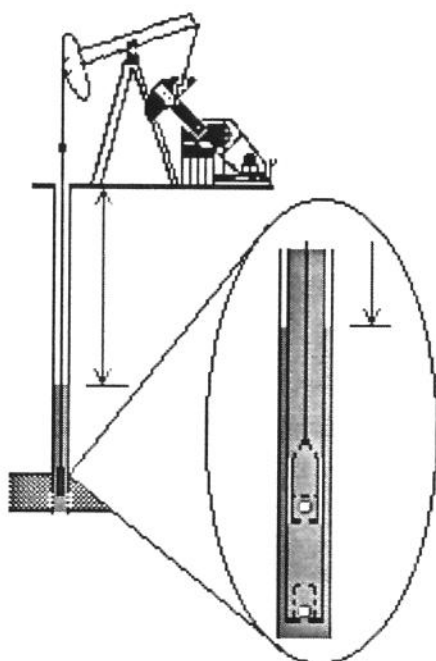


Figura 1-3 - Nível de fluido no anular

- **Características mecânicas:** As características mecânicas, tanto de superfície como do poço, são utilizadas para o cálculo de parâmetros teóricos do sistema. Isto é feito obedecendo procedimento normalizado através da norma API RP11L [4] a qual define toda a sistemática de cálculo para a estimativa das cargas na UB e nas HB, do torque na UB e do deslocamento volumétrico da bomba.  
Esses cálculos são realizados principalmente quando há necessidade de modificar alguma característica do SBM, sendo as mais comuns o curso e a velocidade de bombeamento da UB.

As demais informações, embora disponíveis na maioria dos casos, tem sua utilização bastante restrita em virtude principalmente da dificuldade de cálculo e da qualidade da mesma. A IPR é um exemplo bastante esclarecedor deste problema pois, para seu cálculo é necessário conhecer: a pressão de fluxo nos perfurados, a pressão estática do reservatório, a pressão de saturação do óleo, o percentual de água e sedimentos, a vazão de fluido bombeada. Não há condições econômicas de obter esses valores com precisão,



sendo necessário trabalhar com valores aproximados. Além disso, o cálculo da pressão de fluxo envolve a utilização de modelos matemáticos razoavelmente complexos cuja utilização ainda não é consensual.

#### 1.4 Estado da arte da análise do bombeamento mecânico

**A**s tentativas de modelar e analisar o SBM iniciaram-se ainda na época de sua implantação como método de bombeamento de petróleo. Os primeiros artigos técnicos sobre o assunto remontam a 1936 com a publicação do artigo “*An Oil-Well Pump Dynagraph*” de Walton E. Gilbert [19]. Neste artigo, é relatado o primeiro registro das cargas nas hastes na profundidade da bomba, o qual passou a ser denominado carta dinamométrica de fundo (CDF). Dessa época até os dias atuais, sucederam-se inúmeros artigos abordando praticamente todos os aspectos do SBM. A partir de 1966, com a publicação do artigo “*Computer Diagnosis of Downhole Conditions in Sucker Rod Pumping Wells*” de Sam G. Gibbs e A. B. Neely [18], a análise de SBM passou a dispor de modelo matemático para o cálculo das cargas de subsuperfície, o que permitiu o desenvolvimento de diversos sistemas computadorizados para a análise. Com o advento dos computadores portáteis tornou-se possível realizar a análise do SBM de forma mais rápida e mais barata. Até 1987 a análise do SBM, embora já computadorizada, era toda procedural, baseada na aplicação de modelos matemáticos, e principalmente, calcada na análise visual do diagrama das cargas de subsuperfície.

##### 1.4.1 A análise inteligente do SBM na literatura

**1987:** com a publicação do artigo “*EXPROD: Expert Advisor Program for Rod Pumping*” de W.L.Foley e J.G.Svinos [15] inicia-se a fase que se caracteriza pela aplicação de técnicas de inteligência artificial (IA) na análise do SBM. O EXPROD utilizava o reconhecimento de padrões de cartas dinamométricas através de métodos estatísticos associado a uma rede de regras de produção baseadas no conhecimento obtido de especialistas em SBM.

**1988:** Henryk J. Derek [13] apresenta sua tese de mestrado em ciências intitulada “*Sucker Rod Pumping Unit Diagnostics Using an Expert System and Pattern Recognition technique*”. Nesse trabalho é descrita a metodologia adotada para a aquisição do conhecimento junto a especialistas em SBM, bem como o conjunto de regras de produção desenvolvido.

**1989:** Em contrapartida ao reconhecimento de padrões por métodos estatísticos, J.F.Keating, R.E.Laine e J.W.Jennings [22] publicam o artigo “*Pattern Recognition Applied to Dynamometer Cards*” no qual descrevem uma técnica numérica para o reconhecimento de padrões de cartas dinamométricas, implementada no sistema denominado NUPRO.

**1990:** J.D.Rogers, C.G.Guffey e W.J.B.Oldham [38] em seu artigo "*Artificial Neural Networks for Identification of Beam Pump Dynamometer Load Cards*", propõem o reconhecimento de padrões utilizando técnicas de redes neurais numéricas, as quais se caracterizam por ser possível treina-las a partir de exemplos para classificar padrões.

O reconhecimento de padrões através de redes neurais, trouxe a luz a possibilidade de colocação de controladores inteligentes, monitorando continuamente a carta dinamométrica de cada poço. Essa idéia foi explicitada na "*Proposta de Construção de Hardware para Rede Neuronal com a Função de Detector e Analisador automático de Bombeio Mecânico*" apresentada por Fernando Tenório [44] da Universidade de Purdue, IN, USA e Lideniro Alegre para a Petrobrás em agosto de 1990.

Ainda em 1990, John G. Svinos [43] em trabalho apresentado no Southwestern Petroleum Short Course, intitulado "*Application of Expert System Technology to the Design of Rod Pumping Systems*", propõe a primeira tentativa de utilizar técnicas de IA, no caso sistemas especialistas baseado em regras de produção, para o dimensionamento do SBM. O produto recebeu o nome de RODSTAR, e está no mercado até hoje.

**1991:** O reconhecimento de padrões aplicado às cartas dinamométricas de fundo continua sendo o assunto mais estudado pela comunidade de IA e BM. O mesmo grupo que desenvolveu o sistema NUPRO [23] apresenta, no artigo "*Application of a Pattern-Matching Expert System to Sucker\_Rod, Dynamometer-Card Pattern Recognition*", um conjunto de 37 padrões para as cartas dinamométricas de fundo, utilizados para diagnosticar SBM.

P.Schirmer, J.C.Gray e P.Toutain [40] publicam o trabalho "*Use of Advanced Pattern-Recognitin and Knowledge-Based System in Analyzing Dynamometer Cards*", o qual inova ao utilizar os conceitos de Supervisão e Blackboard para estruturar e sincronizar o sistema especialista.

Wellington L. S. da Silva, Paulo R.R. Lopes, Maria S. de F. Pinho e Antônio G. dos Santos [41] apresentam um sistema especialista contruido em IBM-ESE para uso em main-frame, constituída de: biblioteca de dimensionamentos de SBM, banco de dados com histórico do poço, conjunto de rotinas em fortran e banco de cartas para comparação visual.

**1992:** O artigo "*Association of Statistical, Neural Network and Structural Techniques for Analysing Dynamometer Cards*" publicado por Patrice Shirmer, Olivier Bernard e Isabelle de Penguern [39], destaca, pela primeira vez, a utilização do conceito de Sistemas Distribuidos no problema da diagnose de SBM.

L.R.Linn, J.F.Lea, O.L.Bass, K.Asimenu [28], no Southwestern Petroleum Short Course apresentam o trabalho "*Beam Lift Expert Diagnostic System for Multiple Problem Identification*" no qual divulgam o sistema BLEX cuja característica principal é dispor de um conjunto de 99 cartas padrões utilizadas no reconhecimento de padrões.

**1993:** Neste ano é aplicado o conceito de funções nebulosas ao problema de reconhecimento padrões das carta dinamométricas. O trabalho "*A New Approach to*

*Identification of Beam Pump Dynamometer Card*” publicado por Jia-li Ge, Zhang Qi e Zhi-jian Pan [17] descreve a utilização de estratégia para reconhecimento de padrões baseada na teoria de cluster nebulosos.

G.M.Nazi, K.Ashenayi e J.F.Lea [33], publicam o artigo “*Application of Artificial Neural Network to Pump Card Diagnosis*”, no qual é descrita a utilização de rede neural híbrida utilizando perceptrons senoidais, treinada utilizando a técnica de “back propagation”.

E. R Martinez, W. J. Moreno, V.J. Castillo, J. A Moreno [31], publicam “*Rod Pumping Expert System*”, descrevendo o sistema “BOMEXPERT” contido de dois diferentes módulos. Um módulo de diagnóstico utiliza redes neurais numéricas para reconhecimento de padrão e classificação de cartas dinamométricas de fundo. O segundo módulo, para dimensionamento (design) emprega busca inteligente envolvendo algoritmos genéticos para configurar um sistema rápido e eficiente que produz simultaneamente diversas propostas de dimensionamento.

D. MacAllister [30], em seu artigo “*A Dynamometer Card Interpretation Expert System*”, descreve um protótipo de sistema inteligente, que interpreta o resultado de registros dinamométricos e diagnostica falhas na bomba. Para seu desenvolvimento foi utilizado o sistema (Shell) Leibniz que se diferencia dos sistemas de regras de produção usuais por permitir o uso de sistemas “conjunctive normal form” (CNF) da lógica proposicional.

Lideniro Alegre, Celso K. Morooka e Armando F da Rocha [1] no artigo “*Intelligent Diagnosis of Rod Pumping Problems*”, descrevem o SICAD, um sistema contruido utilizando conceitos de sistemas distribuídos, redes neurais simbólicas e lógica nebulosa para o qual propõem tres possíveis arquiteturas, uma das quais envolvendo a utilização de controlador local inteligente.

Kwon Il Choi [6], divulga em seminário interno da PETROBRÁS o trabalho “*Digitalização de cartas dinamométricas com determinação de cartas de fundo e diagnósticos automáticos por um sistema especialista*” no qual apresenta o sistema INFO, em uso na unidade da PETROBRÁS localizada no estado de Sergipe. Este sistema incorpora base de dados no formato DBF<sup>1</sup> e faz o reconhecimento de padrões da carta dinamométrica através de regras baseadas nas características geométricas da forma.

---

<sup>1</sup> Compatível com Borland DBase.

### 1.4.2 Sistemas em uso ou em fase de implantação na PETROBRÁS

A PETROBRÁS vem empreendendo um grande esforço no sentido de otimizar seus meios de produção buscando aumentar sua receita e reduzir seus custos. Nesse sentido, na área de produção de petróleo por bombeamento mecânico, diversos sistemas vem sendo pesquisados e desenvolvidos. Destacamos abaixo os sistemas mais significativos:

- **ÂNCORA:** Desenvolvido pelo autor em FORTRAN para computador de grande porte, faz análise da eficiência volumétrica de um SBM bombeando fluido gaseificado.
- **CARDIN:** Desenvolvido pelo autor em FORTRAN para computador de grande porte, faz análise de alguns parâmetros do SBM a partir de valores do registro dinamométrico (fornecidos ao sistema via teclado) e das características mecânicas.
- **CARTADIN:** Desenvolvido pelo autor em FORTRAN para computador de grande porte, também analisa apenas alguns parâmetros do SBM com a diferença de utilizar metodologia de análise da carta dinamométrica desenvolvida por Slonneger [42].
- **DYCO [32]:** Desenvolvido pela Divisão de Exploração do PETROBRÁS/CENPES em Pascal para uso em microcomputadores, calcula o registro dinamométrico de fundo a partir de seu correspondente na superfície.
- **SBM [29]:** Desenvolvido pela Divisão de Exploração do PETROBRÁS/CENPES em Pascal para uso em microcomputadores, permite analisar o sistema de bombeamento mecânico através da comparação de um registro dinamométrico obtido matematicamente com o registro real do poço. O registro matemático é obtido a partir de condições de fundo indicadas pelo usuário. Modificando essas condições o usuário faz diversas tentativas até obter um resultado semelhante ao registro real, obtendo assim um diagnóstico do poço por via indireta.
- **SDFBM [41]:** Protótipo desenvolvido em IBM-ESE para uso em computadores de grande porte, tornou-se inviável devido ao “downsizing” implantado na PETROBRÁS. No entanto, seus conceitos básicos foram utilizados no desenvolvimento do presente trabalho.
- **TORQUE:** Desenvolvido por Rutácio de Oliveira Costa [11], faz o cálculo torque no redutor da UB, permitindo a avaliação do comprometimento do mesmo.
- **CARTAS:** Desenvolvido por Kwon Il Choi como parte integrante do sistema INFO [6], permite a digitalização da CDS e o cálculo da carta dinamométrica de fundo (CDF). A partir de regras desenvolvida pelo autor a CDF é analisada e diagnosticada.
- **BAKER:** É um equipamento para controle local do SBM. Embora não seja um sistema inteligente, está bastante próximo da proposta de otimização adotada no sistema SICAD, para o controle do “pump-off” do poço.
- **SICAD:** Este sistema está em fase de testes e tem sua implantação prevista para 1996. Devido a importância deste sistema para o presente trabalho o mesmo será analisado em tópico específico.

Exceto pelo módulo CARTAS do sistema INFO [6], os sistemas citados não tem sido utilizados rotineiramente para analisar poços equipados com BM. Apenas alguns dos sistemas, desenvolvidos para aplicações específicas, e que permitem a análise parcial de algum aspecto do SBM são utilizados, e apenas em casos especiais. Este fato se deve tanto a dificuldade de disponibilizar recursos de informática para as áreas operacionais,

quanto ao desenvolvimento, incipiente ainda, de ferramentas que efetivamente analisem o BM. O SICAD vem sendo desenvolvido como um esforço no sentido de superar esses problemas,

### 1.4.3 O SICAD

#### 1.4.3.1 Estrutura conceitual

O SICAD (figura 4) é um sistema cujo propósito é o gerenciamento inteligente de poços de petróleo equipados com BM. Para tanto utiliza os conceitos de redes neurais simbólicas e lógica nebulosa. Utiliza duas famílias de redes neurais, uma para o reconhecimento de padrões (RNP) e outra para o raciocínio especializado (RNE). As RNP fazem o reconhecimento da forma da carta dinamométrica de fundo (CDF) e são as responsáveis pela ativação das RNE. Estas simulam o raciocínio do especialista em BM utilizando tanto a classificação da CDF fornecida pelas RNP como dados atuais e históricos do poço para diagnosticar as condições de bombeamento. Uma vez tendo sido definido o diagnóstico o SICAD pode executar ações corretivas locais, como por exemplo atuar sobre um variador de frequência e alterar as condições de bombeamento, aumentando ou diminuindo a velocidade de bombeamento [1,2], ligando e desligando o motor da UB.

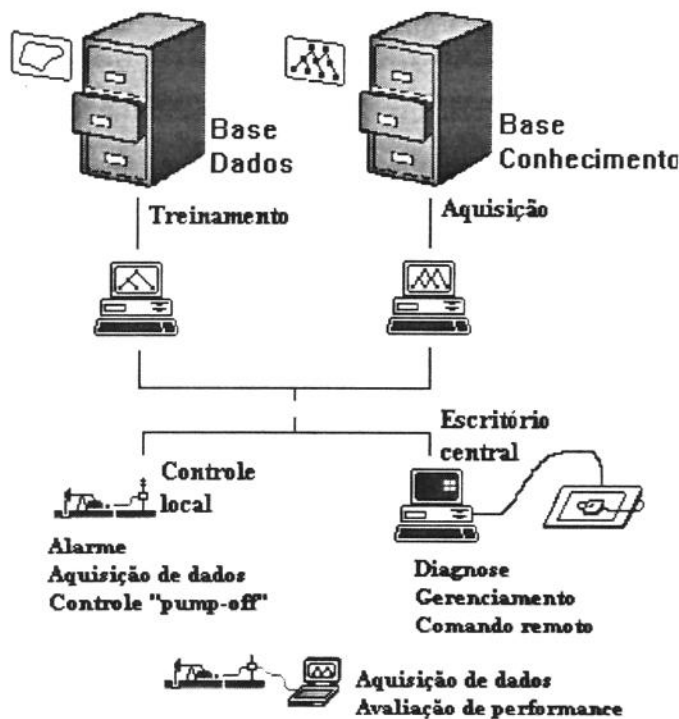
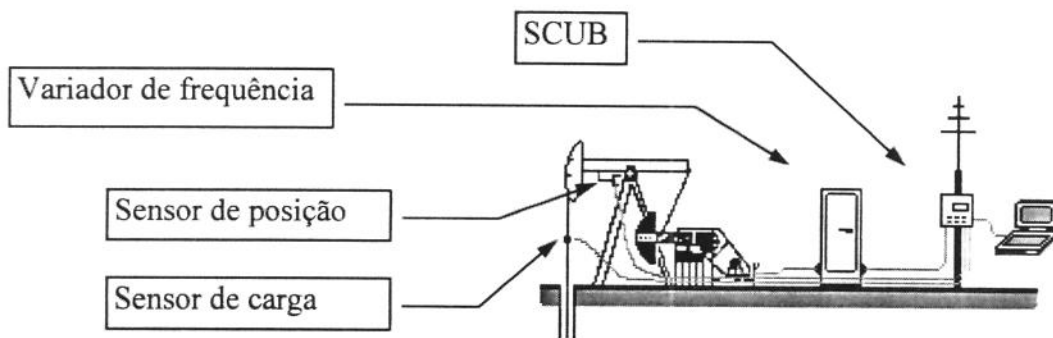


Figura 1-4 - Estrutura conceitual do SICAD

Conceitualmente o SICAD é dividido em dois grandes grupos: controle local e escritório central.

#### 1.4.3.2 Controle local

O Sistema Controlador de UB (SCUB) é um sistema inteligente que, conectado a sensores de carga e posição, faz a aquisição contínua das cargas na coluna de hastes em cada posição do ciclo de bombeamento (CDS) figura 5. É dotado de processamento que lhe permite realizar o cálculo da carta dinamométrica de fundo (CDF), de banco de dados próprio no qual são armazenadas informações sobre as características mecânicas do SBM (para o cálculo da CDF), e de um conjunto de padrões para a forma da CDF. Redes neurais [1,2] fazem o reconhecimento do padrão da CDF, analisam o comprometimento dos equipamentos do SBM e analisam as condições de bombeamento. Através de comunicação com o quadro de comando do motor da UB ou com variador de frequência, pode interromper a operação do SBM, no caso de falha grave, ou reduzir a velocidade de bombeamento no caso de ocorrer pump-off. A atualização dos dados do banco de dados pode ser feita através de comunicação com computador portátil ou com estações remotas via rádio.



**Figura 1-5 - Controle local do SICAD**



### 1.4.3.3 Escritório central

O sistema denominado “escritório central” realiza uma análise mais ampla e mais abrangente que a realizada no controlador local [1,2]. O acesso a dados atuais e históricos da base de dados do poço e à carta dinamométrica em tempo real (através de acesso via rádio ao SCUB instalado no poço) possibilita a utilização de RNEs mais sofisticadas com tratamento dos dados mais elaborados e diagnósticos mais abrangentes.

A comunicação entre o escritório central e o controle local permite que determinados parâmetros sejam atualizados sem a necessidade de deslocamento até o poço. O que permite que eventuais diagnósticos sejam implementados sem visita ao mesmo. Entretanto a possibilidade de digitalizar a CDS obtida com outros recursos, permite que mesmo os poços que não dispõem de SCUB instalado sejam objeto de análise no escritório central.

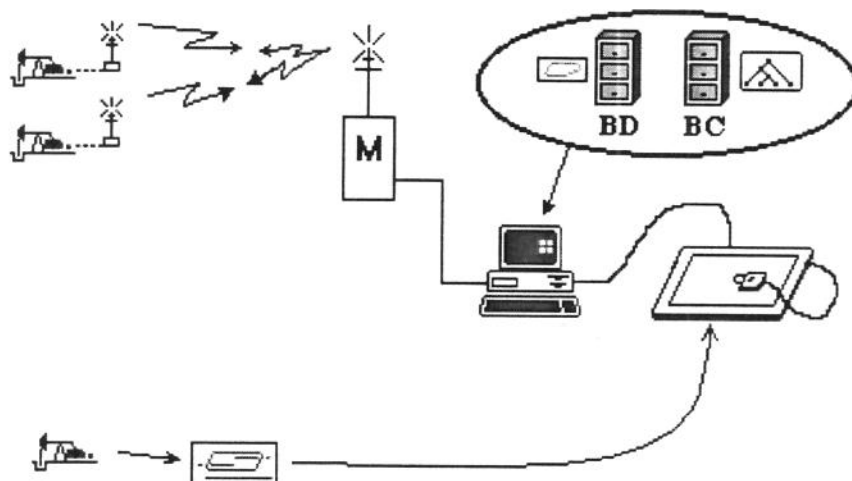
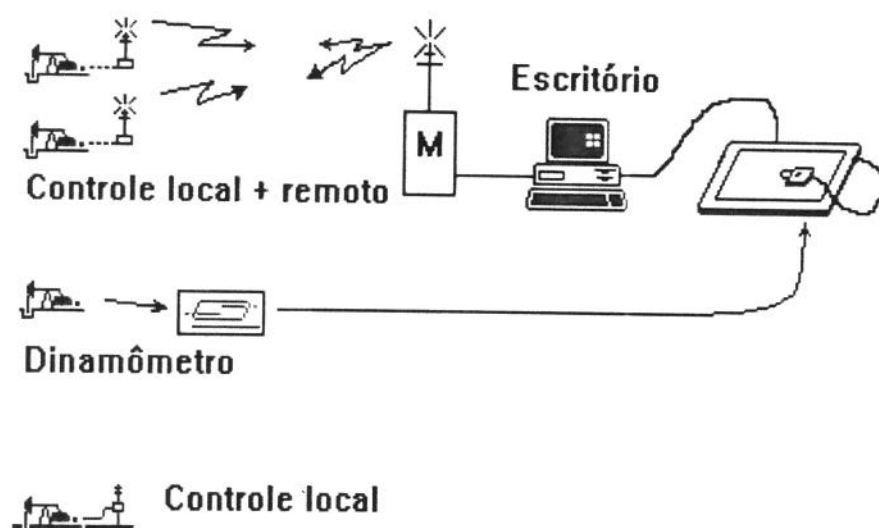


Figura 1-6 - Escritório central do SICAD

### 1.4.3.4 Possibilidades de uso

Os subsistemas do SICAD podem ser utilizados de diversas maneiras: atuação isolada, remota e central independente.

**Atuação isolada:** O sistema controlador de UB (SCUB) gerencia o SBM sem supervisão. Eventuais falhas são detectadas somente quando da visita ao poço. Esta arquitetura é interessante para poços de baixa produção localizados em áreas remotas. Nesses casos o ajuste do SBM às condições do poço é feita automaticamente pelo SCUB. Neste tipo de arquitetura a CDS é a fonte primária para a análise.



**Figura 1-7 - Possibilidade de usos dos subsistemas do SICAD**

**Atuação remota:** Através de comunicação via rádio, é possível a partir de uma estação remota, alterar o banco de dados do SCUB e atualizar parâmetros de bombeamento do SBM. É possível também fazer a aquisição da CDS a partir da estação remota, onde é feita uma análise mais elaborada visando a otimização SBM. Nesses casos os dados do poço são utilizados pelo sistema denominado de “**Escritório central**” do SICAD, no qual está codificado um conhecimento mais abrangente sobre a análise de SBM. Nesta arquitetura, a CDS, embora fundamental, não é a fonte primária e disparadora do processo de análise, diversos parâmetros podem também deflagar o processo.

**Atuação central independente:** Naqueles poços onde é inviável a instalação de SCUB’s a análise pode ser feita através da aquisição da CDS via dinamômetro. Este equipamento fornece a CDS em forma gráfica a qual pode ser digitalizada por scanner ou mesa digitalizadora, e processada na estação remota.

## 1.5 Contribuição do presente trabalho

O presente trabalho propõe uma ampliação para atuação do SICAD no tratamento dos problemas relacionados à gerência de um conjunto de poços equipados com SBM, através da implementação no escritório central, de uma família de RNEs baseadas no conceito de sistemas inteligentes distribuídos que, além do diagnóstico, propõem ações no sentido de corrigir falhas e otimizar o SBM. Este trabalho busca também disponibilizar recursos da engenharia de petróleo tais como a norma API RP11L, e a análise nodal, dentre outros, o que certamente melhorará a capacidade de análise do SICAD.



## 2. Concepção adotada

### 2.1 Estrutura conceitual do sistema proposto

Para que a análise do SBM possa ser realizada com sucesso, consideramos os requisitos abaixo como os mínimos necessários:

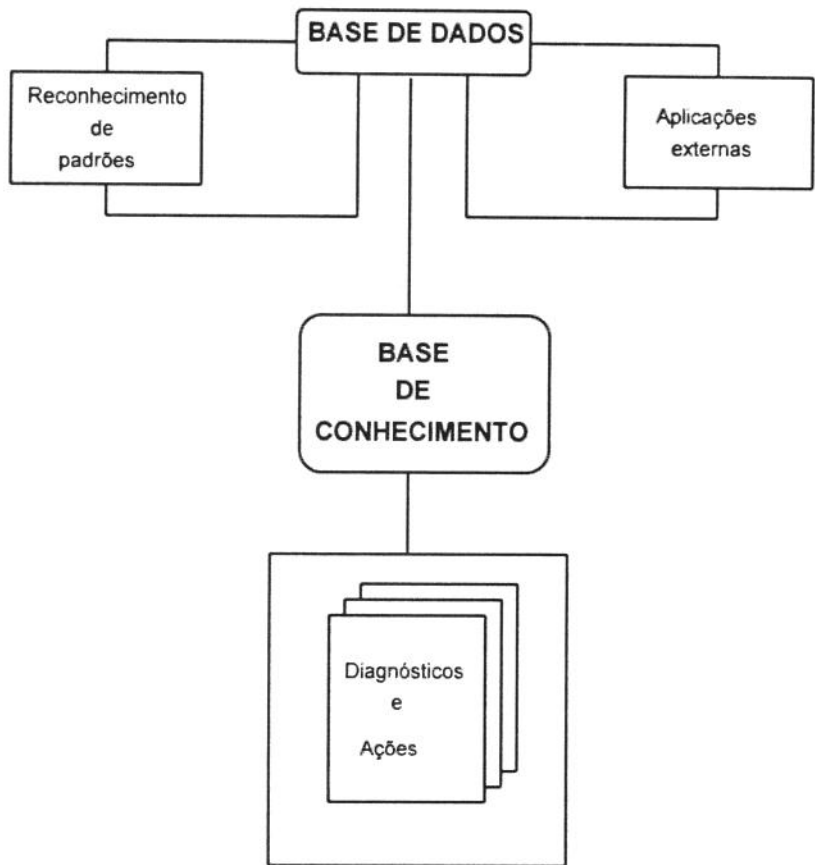


Figura 2-1 - Estrutura conceitual do sistema proposto

**BASE DE DADOS (BD):** Para que seja possível definir as características de um poço é preciso que um conjunto de informações esteja disponível. Dentre as informações pertinentes, podem ser destacadas as condições mecânicas e as operacionais, os resultados de intervenções, os resultados de testes de produção, os registros de cargas nas hastes, a profundidade do nível dinâmico, a pressão estática do reservatório, entre outras.

**APLICAÇÕES ESPECÍFICAS:** Diversas características operacionais dependem de cálculos que, em sua maioria, não são triviais. Para que o SBM possa ser considerado bem dimensionado, existe um procedimento de cálculo (norma API RP 11L) que deve ser realizado. A pressão de fundo em fluxo, na bomba ou nos perfurados, é outro parâmetro fundamental para a análise, cuja determinação depende da aplicação de correlações. A CDF por sua vez, para ser obtida depende também da utilização modelos matemáticos complexos. O mesmo ocorre com o cálculo da curva de torque, análise

nodal etc. Dessa forma, diversas aplicações específicas tiveram de ser incorporadas ao sistema.

**RECONHECIMENTO DE PADRÕES (RP):** O registro das cargas presentes nas hastes, na superfície ou no fundo, representa uma informação bastante relevante para a análise do sistema. Em alguns casos, apenas o formato da figura desenhada pelo registro é suficiente para definir o problema que está ocorrendo. Casos ocorrem também, em que apenas essa informação não é suficiente, sendo necessário uma análise mais profunda a partir de outras informações. O reconhecimento de padrões portanto é parte fundamental da análise do SBM. Sua implementação pode ser feita através de redes neurais, as quais podem ser treinadas para reconhecer tantos padrões quanto se queira e com grau ajustável de similaridade [1,2]. No presente caso foram utilizadas as redes já estava disponíveis no SICAD.

**BASE DE CONHECIMENTO (BC):** A simples identificação de um problema no SBM, não é suficiente para atender às necessidades operacionais de um campo de petróleo, onde as decisões, muitas vezes, envolvem cifras bastante elevadas. É necessário que ações corretivas sejam também propostas. Devido a complexidade envolvida na análise do SBM, para estabelecer os diagnósticos possíveis, foi necessário definir um conjunto de sintomas, determinados a partir da análise das características do poço colocadas na BD. Com base nesses sintomas, um conjunto de diagnósticos e suas correspondentes terapias serão determinados.

O desenvolvimento conceitual e posterior implementação da concepção acima exigiu a utilização de diversos conceitos, tanto na área de IA como na área de engenharia de petróleo. A organização desses conceitos de forma sistemática e adequada à heurística utilizada nas áreas operacionais que utilizam o SBM como método de elevação de petróleo, é também parte da proposta do presente trabalho.

## 2.2 Conceitos de IA envolvidos

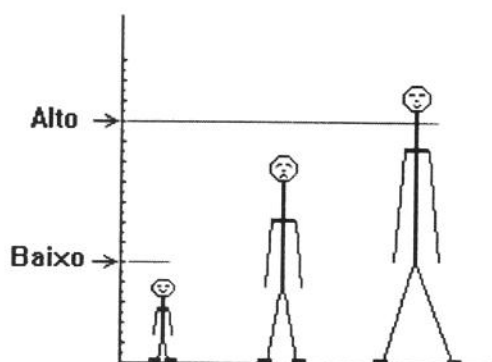
### 2.2.1 Lógica nebulosa

#### 2.2.1.1 Aspectos teóricos

- Conjuntos nebulosos

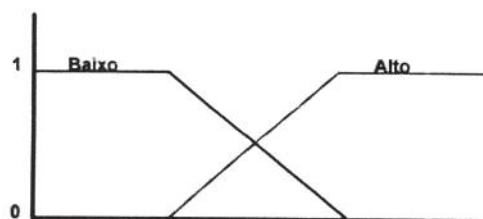
O conceito de conjuntos nebulosos [24] originou-se da generalização do conceito clássico da teoria dos conjuntos, segundo o qual existem apenas duas possibilidades em relação a pertinência ou não de um elemento a um determinado conjunto, ele pertence ou não pertence, ou, de outra forma, a classificação de um determinado elemento em relação a uma determinada característica tem apenas as possibilidades “sim” ou “não”, “possui” ou “não possui” a característica.

Na maioria dos casos que envolve a representação de situações do mundo real, a utilização desse conceito apresenta dificuldades, pois nem sempre é possível, ou útil, uma classificação tão simplista. O exemplo clássico da literatura é a classificação de um indivíduo quanto a sua altura. Os casos extremos não apresentam dificuldade, mas como classificar um indivíduo de porte intermediário, figura 2-2.



**Figura 2-2 - Classificação de um elemento em um conjunto nebuloso**

A solução desse problema pode ser obtida através da definição de funções representativas da pertinência (funções de pertinência) do elemento a uma determinada classificação, figura 2-3.



**Figura 2-3 - Funções de pertinência**

De fato este é um poderoso instrumento para representar conhecimento em um sistema computacional.

- **Operações entre conjuntos nebulosos**

As funções de pertinência (membership functions) são utilizadas para definir conjuntos nebulosos aos quais podem ser aplicadas às operações clássicas entre conjuntos, como união, intersecção etc..., permitindo que não apenas o conhecimento seja representado em uma máquina, mas também que esse conhecimento possa ser propagado matematicamente através de um conjunto de nodos e tratado como um valor de confiança para uma determinada hipótese (item anterior).

Todas as operações definidas pela teoria clássica de conjuntos são aplicáveis aos conjuntos nebulosos entretanto, visando aplicações específicas, diversos autores desenvolveram novas definições para essas operações clássicas [24,35].

#### **2.2.1.2 Aplicação ao problema**

Na análise do SBM, são muito utilizados conceitos abstratos desenvolvidos através de empirismo e até mesmo de intuição. A presença de atrito no SBM é um bom exemplo pois a representação do raciocínio necessário para sua determinação, utilizando apenas métodos convencionais, seria de difícil execução. Este tipo de conhecimento é em geral expresso na forma

*“Se  $SV_m$  é menor que  $SV_c$  então o atrito é severo”.*

O encadeamento de regras deste tipo é utilizado no raciocínio de tomada de decisão o qual pode ser formalizado com o auxílio dos conceitos de lógica nebulosa e de Redes Neurais Simbólicas (RNS), como mostrado na figura a seguir.

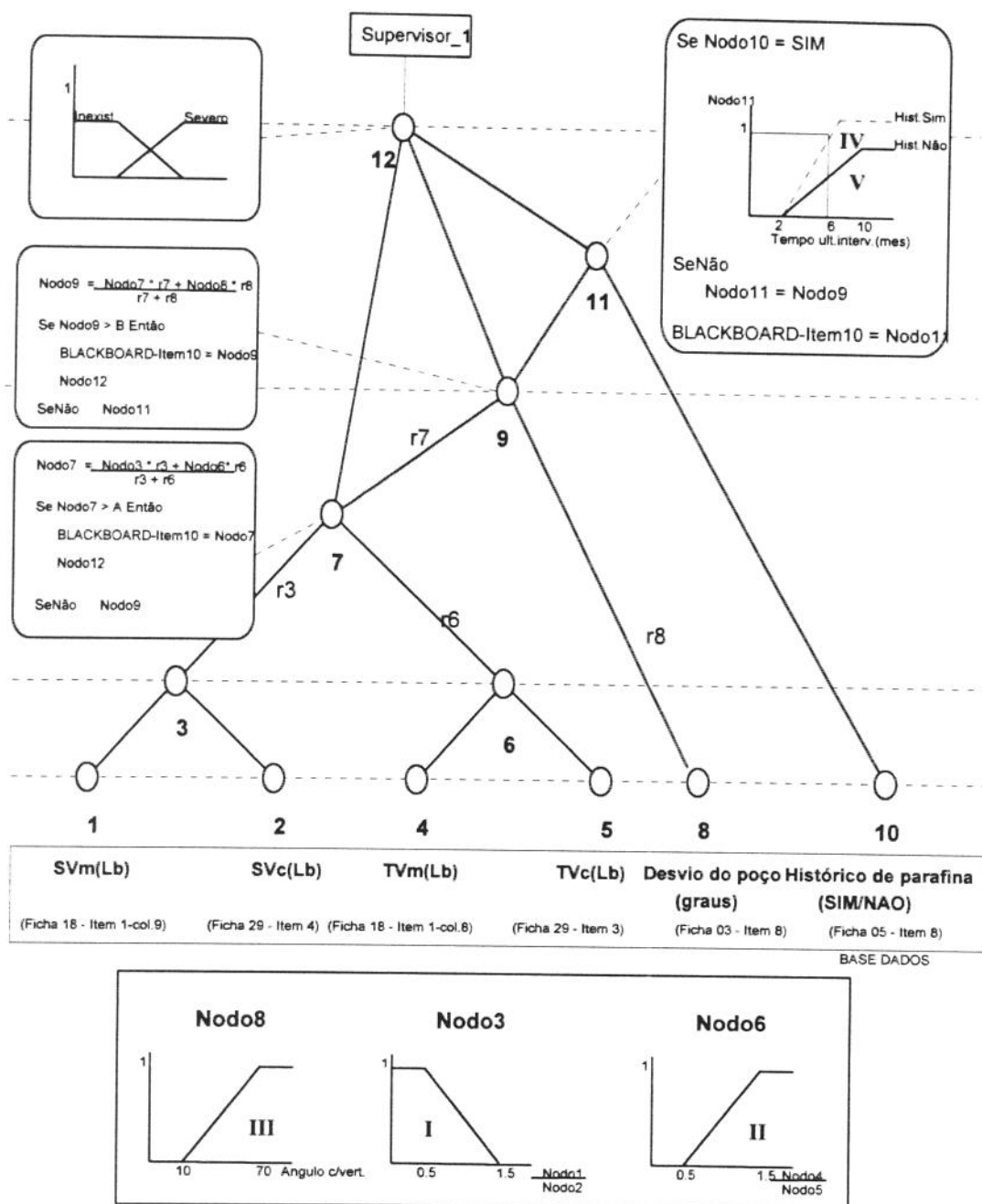


Figura 2-4 - RNS para definir o atrito no SBM

A regra acima é representada nesta rede pelos nodos 1,2 e 3 da RNS da figura. A função de pertinência I fornece um valor de confiança intermediário para a hipótese de atrito severo no nodo 3. Essa função representa o conceito de **menor** fornecido pelo especialista.

A regra:

*“Se TVm é maior que TVc então o atrito é severo”;*

é representada pelos nodos 4,5 e 6. A função de pertinência II fornece outro valor de confiança (intermediário) para a hipótese de atrito severo no nodo 6. Essa função representa o conceito de **maior** fornecido pelo especialista.

A regra:

*“Se  $SV_m$  é menor que  $SV_c$  e  $TV_m$  é maior que  $TV_c$  então o atrito é severo”;*

é representada pelos nodos 3,6 e 7. A média ponderada pelas relevâncias  $r_3$  e  $r_6$  fornece outro valor de confiança (intermediário) para a hipótese de atrito severo, ou seja:

$$AtritoSevero = \frac{\mu\{SV_m < SV_c\} \cdot RelevSV + \mu\{TV_m > TV_c\} \cdot RelevTV}{RelevSV + RelevTV}$$

onde

$\mu\{SV_m < SV_c\}$  e  $\mu\{TV_m > TV_c\}$  são obtidas das funções de pertinência I e II respectivamente.

Neste caso a operação lógica **E-consensual** foi representada pela média ponderada. Este recurso mostrou-se bastante apropriado para representar o raciocínio utilizado na maioria dos agentes.

Da mesma forma que nas duas regras anteriores, a parte consequente da regra não é encarada como uma verdade absoluta, como seria na lógica clássica, mas como uma verdade que tem uma incerteza medida pelo resultado da média ponderada. O uso da relevância por sua vez, permite representar a importância de cada parâmetro na avaliação da hipótese.

Se o valor de confiança na hipótese de atrito severo é menor que um determinado limiar fornecido pelo especialista, o desvio do poço é verificado:

Neste caso temos as regras:

*“Se o desvio do poço é grande então o atrito é severo”;*

A função de pertinência III representa o conceito de grande fornecido pelo especialista e permite obter o valor de confiança (intermediário) para a hipótese de atrito severo,

*“Se  $SV_m$  é maior que  $SV_c$  e  $TV_m$  é maior que  $TV_c$  E o desvio do poço não é grande e existe histórico de paraafinação então o atrito é severo”;*

Novamente a utilização da média ponderada pelas relevâncias mostrou-se bastante adequada para representar as operações lógicas “**E-consensuais**” utilizadas.

A possibilidade de modificar facilmente a definição das funções de pertinência, os valores das relevâncias e dos limiares, permite que o conhecimento representado seja facilmente alterado, tanto para adequar o sistema ao contexto em que o mesmo será

utilizado (campo de petróleo), como para incorporar modificações conceituais advindas da experiência adquirida com a realização sistemática de análises de SBM.

Finalmente, aplicando-se o processo de fuzificação é possível atribuir um valor linguístico para a hipótese, para tanto são utilizadas as funções de pertinência indicadas no nodo 12.

A mesma filosofia utilizada acima foi aplicada no desenvolvimento das demais redes, as quais estão descritos em detalhes no item 3.

## 2.2.2 Redes neurais simbólicas

### 2.2.2.1 Aspectos teóricos

A RNS permite a representação do raciocínio na medida em que a coleta das informações (evidências) aumenta ou diminui a confiança na hipótese por ela representada [35]. É representada graficamente como mostrado na figura abaixo, e constitui-se de pelo menos quatro camadas, quais sejam:

- de entrada, na qual são coletadas as evidências (E)
- de agregação (A), na qual as informações são processadas
- de decisão (D), na qual são tomadas decisões quanto a necessidade de mais informações
- de saída (S), na qual é atribuído o valor final da confiança na hipótese

Na camada de entrada, o primeiro nodo (E1) é definido como sendo o nodo disparador da rede e, é por este nodo que o processamento inicia. A cada nodo é atribuído um determinado código (método) que resulta em determinado valor de confiança para a hipótese, valor este que será propagado para os nodos subsequentes. Em função da importância do nodo (informação ou processamento) em relação a hipótese, um valor de **relevância** (r) lhe é atribuído. Se um determinado valor de **limiar** é atingido nos nodos de decisão (D) o processamento é dirigido para o nodo de saída (S), não sendo este o caso, mais evidências (E) são buscadas, como mostrado na figura abaixo.



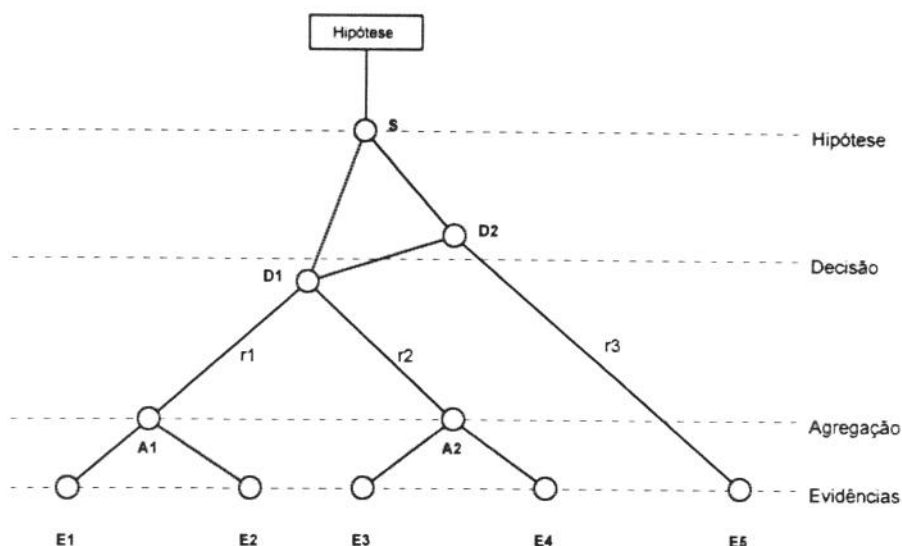


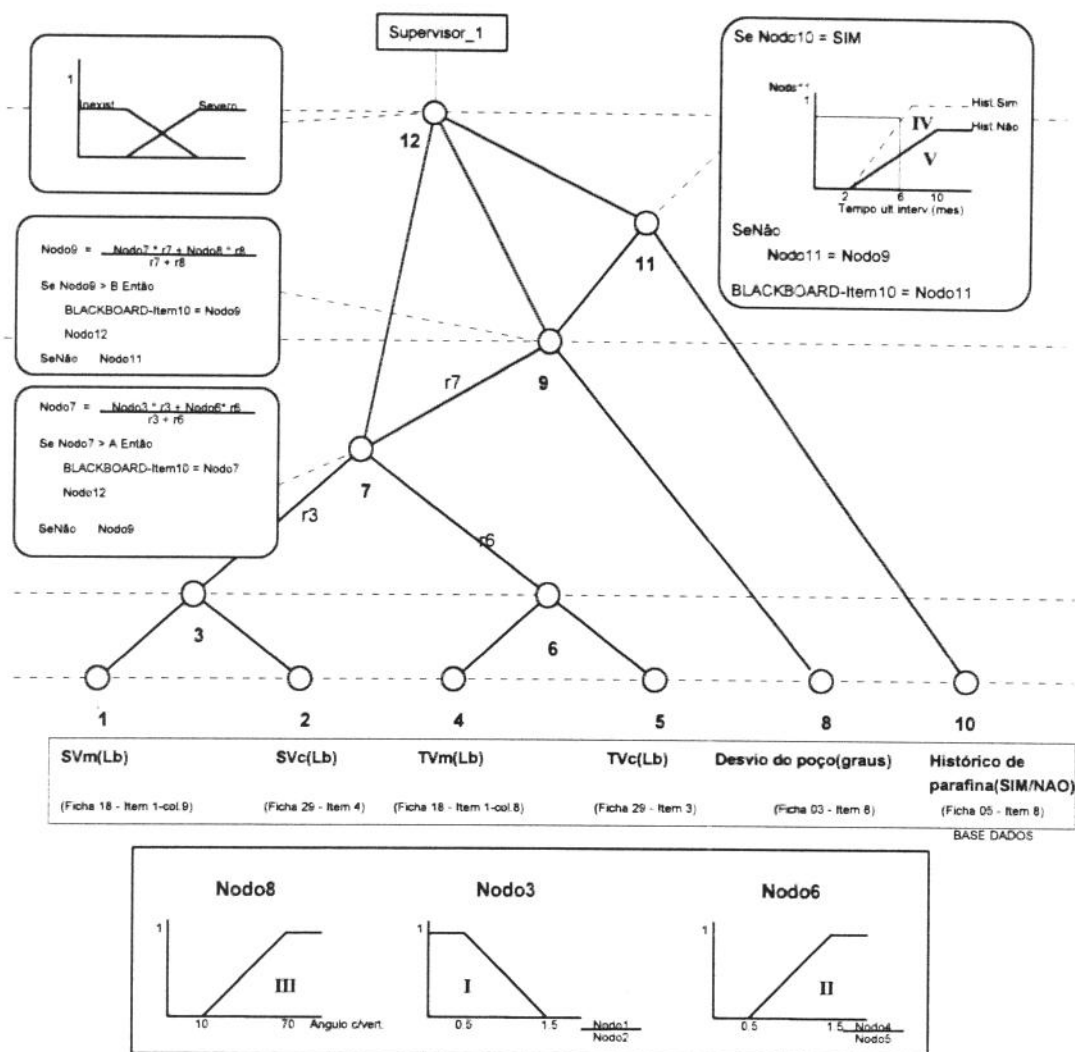
Figura 2-5 - Rede neural simbólica, representação esquemática

### 2.2.2.2 Aplicação ao problema

Na definição dos nós ou agentes responsáveis pela avaliação de cada sintoma a ser definido ou padrão a ser analisado, buscou-se codificar o raciocínio que o especialista<sup>2</sup> no assunto utiliza. O processo se resume em reunir informações (evidências) que apoiam ou contradizem o sintoma (hipótese). Essas informações são processadas e comparadas entre si de acordo com a heurística fornecida pelo especialista. Esse processamento envolve operações matemáticas, lógicas, leitura de dados em arquivos ou ainda chamada de aplicações específicas (macros ou arquivos executáveis).

O agente responsável por definir a severidade do atrito no sistema, novamente apresentado como exemplo, figura 2-6, o faz a partir da comparação entre as cargas medidas na coluna de hastes na superfície e as correspondentes cargas calculadas: carga medida no teste da válvula de pé ( **SVm**), carga calculada para o teste da válvula de pé ( **SVc**), carga medida no teste da válvula de passeio ( **TVm**), carga calculada para o teste da válvula de passeio ( **TVc** ). Se a confiança na hipótese de atrito severo é maior que um determinado **limiar** indicado pelo especialista (nodo 7), o processamento é encerrado e a confiança atual atribuída à hipótese (nodo 12). Caso contrário é verificado o desvio do poço e, se necessário o histórico de parafinação da coluna do poço. Os valores de **relevância** ( $r_i$ ) atribuídos às evidências tem seus valores definidos em função das características peculiares de cada campo de petróleo.

<sup>2</sup> No presente trabalho o autor atuou como especialista utilizando sua experiência no assunto.



**Figura 2-6 - RNS para definir o atrito no SBM**

## 2.2.3 Reconhecimento de padrões

### 2.2.3.1 Aspectos teóricos

O reconhecimento de padrões é um recurso largamente utilizado pelos seres humanos. É esse recurso que nos permite reconhecer pessoas, lugares, objetos, etc... , pois existe em nossa memória um conjunto de características (padrão) que é utilizado para classificar um determinado objeto de interesse (pessoa, objeto, local). A classificação do objeto de interesse é feita através da identificação de características singulares que distinguem um padrão de outro, um quadrado de um triângulo, um carro de uma casa, por exemplo. No caso específico da CDS, dada a grande variabilidade de sua forma e da dificuldade de estabelecer padrões bem definidos, optou-se , após Gibbs em 1965, por utilizar a CDF que apresenta variabilidade bastante reduzida, permitindo trabalhar com um número razoavelmente menor de padrões.

Existem diversas metodologias já utilizadas para a classificação da CDF em relação aos padrões (item 3.2) já consagrados na comunidade de SBM, item 1.4. (Keating, Laine & Jennings em 1989; Rogers, Guffey & OldHam em 1990; Keating, Laine & Jennings em

1991; Shirmer, Bernard & Penguern; Linn, Lea, Blass & Asimenu em 1992; Jia-li, Zhang & Zhi-jian; Nazi, Ashenayi & Lea; Martinez, Moreno, Castillo & Moreno; Alegre, Morooka & Rocha em 1993). No presente trabalho foi utilizada a metodologia proposta por Alegre, Morooka & Rocha em 1993 e posteriormente revista por Rocha em 1995 [1,2].

### 2.2.3.2 Aplicação ao problema

A CDF é formada por um conjunto de pontos dos quais é extraído o subconjunto de pontos significativos (PS) normalizados no intervalo 300-700. A normalização é necessária para tornar a análise independente da escala da CDF. Os PS são aqueles em que ocorre mudança significativa de direção em relação a seu predecessor. Esta estratégia tem por objetivo reduzir as informações redundantes contidas na CDF, conforme figura abaixo.

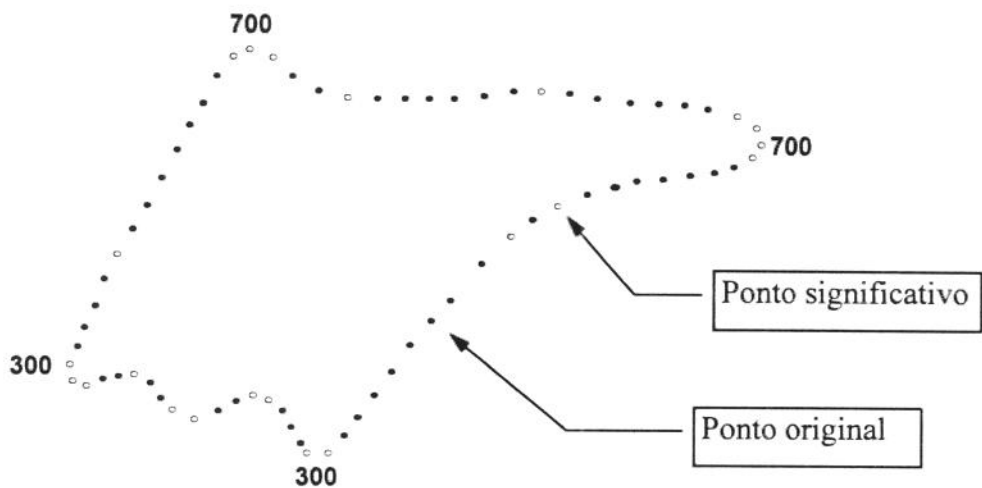


Figura 2-7 - Pontos da CDF

O padrão com o qual a CDF será comparada é construído graficamente pelo especialista através da definição dos seus pontos significativos como conjuntos nebulosos. Para tanto, o usuário deve fornecer o centro e o raio de tais conjuntos, conforme mostrado na figura 2-8. Além disso deve informar a relevância de cada ponto para o processo de decisão. Isto por que alguns pontos são geralmente mais característicos que outros para a definição do padrão.

A confiança (c) na hipótese de que um ponto significativo (s’<sub>i</sub>) da CDF seja idêntico a um determinado ponto do padrão (s<sub>i</sub>) pode ser calculada de duas maneiras diferentes:

$$c(s'_i \equiv s_i) = 1 - \frac{d_i}{2 \times w}$$

ou

$$c(s'_i \equiv s_i) = 1 - 3 \times \frac{d_i}{w}$$

Onde “ $d_i$ ” é a distância Euclidiana entre o ponto  $s'_i$  e o ponto  $s_i$  e “ $w$ ” o raio do círculo medido do ponto  $s_i$  até o ponto onde o valor da confiança é igual a 0.5.

A confiança na hipótese de que o conjunto de pontos significativos ( $SP_i$ ) da CDF seja idêntico ao conjunto de pontos de um determinado padrão ( $SP_j$ ) é calculada pela média ponderada das confianças de cada ponto:

$$c(SP_i \equiv SP_j) = \frac{\sum_i c(s'_i \equiv s_i) \times z_i}{\sum_i z_i}$$

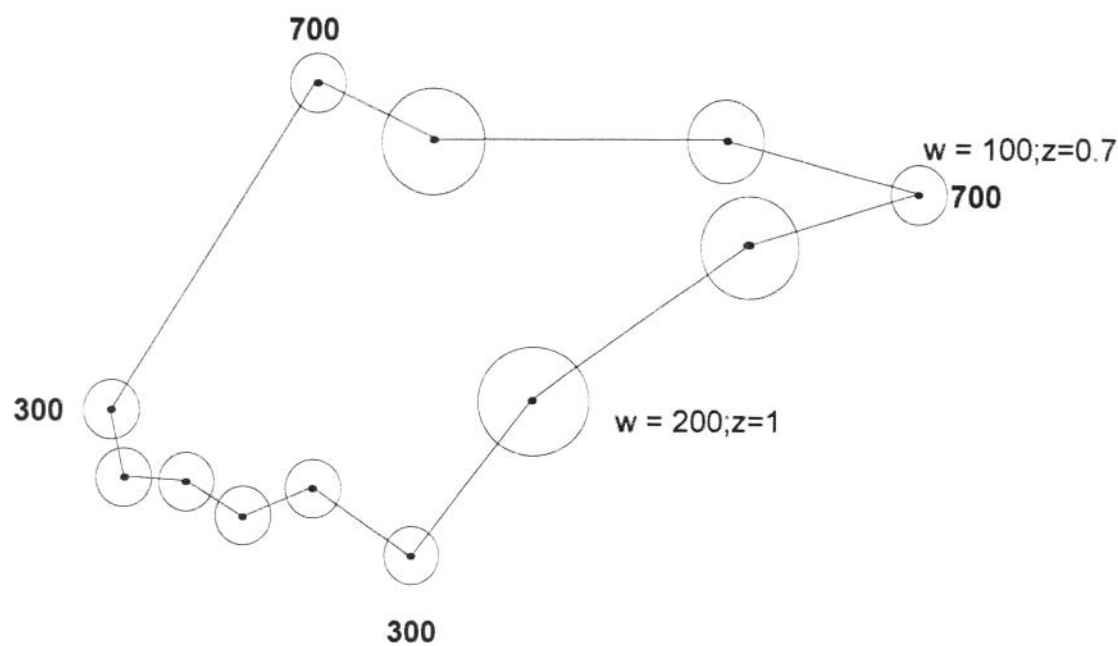


Figura 2-8 - Padrão para a CDF pancada de fluido

## **2.2.4 Sistemas distribuídos**

### **2.2.4.1 Aspectos teóricos**

Sistemas inteligentes distribuídos (SID), são definidos como uma coleção de agentes, inteligentes ou não, que interagem para juntos solucionar um determinado problema. Esta abordagem está baseada na possibilidade de dividir a tarefa a ser realizada em subtarefas e atribuí-las a agentes específicos do sistema, os quais darão soluções dentro de sua especialização. Essas subtarefas podem ser de qualquer natureza, envolvendo processamento inteligente ou não. A inteligência do sistema é caracterizada mais pela maneira como os agentes interagem, do que propriamente pela inteligência intrínseca de cada um [36]. Para atingir o objetivo global do sistema, os agentes trocam informações entre si e executam suas tarefas segundo uma determinada ordem, a qual pode ser variável em função das características da tarefa.

Um conjunto de agentes que interagem com sucesso na solução de uma tarefa complexa, podem ser considerados como um agente institucional composto por agentes primários. Uma rede pode ser considerada como um agente institucional composto de agentes primários (nodos), e, um conjunto de redes pode formar um agente institucional composto de redes especializadas atuando como agentes primários, o que caracteriza a recursividade do conceito de SD.

O fluxo de informações entre os agentes pode ser realizado por endereçamento direto, o que implica em que pelo menos um dos agentes deve conhecer o endereço exato do outro (correio), e por divulgação de mensagens, o que possibilita que cada agente selecione a(s) mensagem(s) de seu interesse. Usualmente essa divulgação é feita através de quadro de avisos (blackboard) ao qual todos os agentes tem acesso. As redes são uma maneira de implementar o sistema de endereçamento direto.

A depender do grau de liberdade (assincronia) presente no SID, podem ocorrer conflitos entre agentes, como por exemplo quando um utiliza informações fornecidas por outro(s) que já estão desatualizadas. Neste caso, o sistema deixa de funcionar como um conjunto coordenado de agentes. Essa dificuldade tem sido contornada com a utilização de agentes cuja tarefa é coordenar a atuação dos demais, garantindo um comportamento coerente dos agentes que solucionam o problema. Estes agentes serão aqui denominados de supervisores.

Um aprofundamento maior sobre este assunto poderá se obtido através da seguinte literatura: Chandreskaran, 1981 [7], Conry et al, 1991 [8]; Davis and Smith, 1983 [12]; Durfee and Montgomery, 1991 [14]; Fox, 1981 [16]; Hewit, 1977 [20]; Hewitt and Inman, 1981 [21]; Kornfeld and Hewit, 1981 [25]; Lesser and Corkill, 1981 [26]; Lesser, 1991 [27]; Minsky, 1985 [28].

2.2.4.2 Aplicação ao problema

Optou-se pela aplicação deste conceito na análise do SBM, principalmente pelos múltiplos aspectos envolvidos na mesma, e pela complexidade e especialização da análise pretendida.

A figura abaixo mostra a estrutura adotada. Tres grupos de agentes foram desenvolvidos. Os agentes classificados no grupo 1 que analisam os sintomas obtidos a partir dos dados contidos na BD. Os agentes classificados no grupo 2 que analisam os sintomas expressos pela carta dinamométrica. E agentes do grupo 3 que definem os diagnósticos e as ações pertinentes.

Cada um desses agentes é na realidade um agente institucional composto por um conjunto de agentes primários (nodos) organizados através de um sistema de troca de mensagens suportado por RNS. Os grupos de agentes, por sua vez, também podem ser considerados agentes institucionais compostos de agentes primários (redes) organizados através de um sistema de troca de mensagens suportado por blackboard. A esses agentes foi imposta uma ordem de ativação garantida por agentes supervisores, conforme figura abaixo.

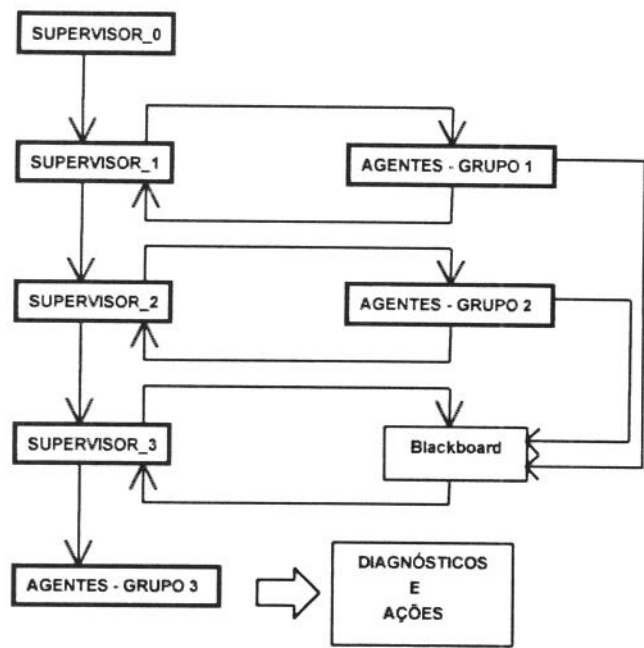


Figura 2-9 - Estrutura conceitual do sistema proposto

A tranferência de controle entre os supervisores ocorre de acordo com uma hierarquia pré-definida no sistema. Por outro lado, a ordem de ativação dos agentes pode ser alterada em função do contexto onde o sistema estiver sendo utilizado, no caso dos agentes do grupo 1. Em função das possíveis alternativas para a classificação da carta dinamométrica, no caso dos agentes do grupo 2, e em função dos sintomas no caso dos agentes do grupo 3. Esta característica define este sistema como contexto dependente.

O supervisor denominado “supervisor\_0”, tem por responsabilidade garantir que a BD tenha todos os dados necessários para que os demais agentes possam atuar. Caso seja detectada a falta de algum dado considerado imprescindível para a análise (item 2.3.5.2.1) a análise é abortada.

O supervisor denominado de “supervisor\_1” é quem garante a ordem com que os agentes do grupo 1 serão ativados, como mostrado na figura 2-10.

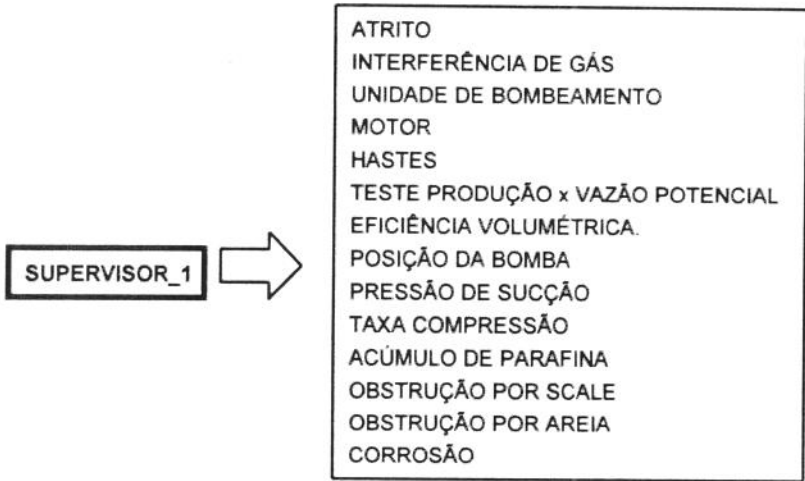
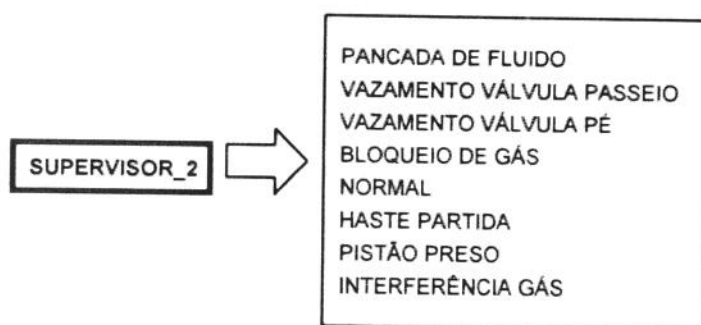


Figura 2-10 - Supervisor 1

Os agentes “unidade de bombeamento”, “motor”, “hastes”, fazem a análise do dimensionamento dos respectivos equipamentos. O agente “Teste produção X vazão potencial” avalia o teste em relação à vazão potencial do poço, o agente “eficiência volumétrica” avalia a eficiência volumétrica do SBM, o agente “posição da bomba” faz a classificação da posição da bomba em relação ao fundo e aos perfurados. A pressão de sucção é avaliada em relação a pressão requerida indicada pela análise nodal ( item 2.3.5). A taxa de compressão é avaliada em relação a taxa de compressão requerida para elevar a pressão na bomba da pressão de sucção até a pressão de descarga. Os agentes “acúmulo de parafina”, “obstrução por scale”, “obstrução por areia” e “corrosão”, avaliam respectivamente as hipóteses de acúmulo de parafina na coluna de tubos, e obstrução da sucção da bomba por scale ou por areia e corrosão nos equipamentos de fundo.

O supervisor denominado de “supervisor\_2” por sua vez, faz a ativação dos agentes responsáveis por complementar o processo de reconhecimento de padrões (RP) da CDF e CDS, conforme a figura a seguir.





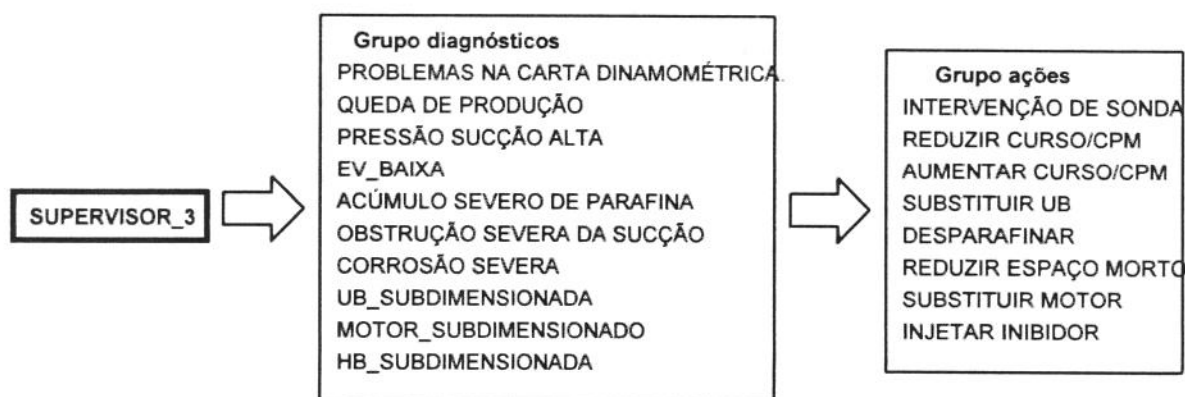
**Figura 2-11 - Supervisor 2**

O processo de RP pode identificar diversos padrões como possíveis para as CDF e CDS. A partir desse conjunto de padrões, o supervisor 2 ativa os correspondentes agentes que avaliarão, com base nos sintomas definidos pelos agentes do grupo 1, qual padrão é o mais adequado à situação. Apenas os agentes correspondentes aos padrões indicados pelo RP são ativados. Diferente do SICAD, neste caso foi adotado um processo de decisão para uma única falha. Esta decisão foi tomada em função da estratégia de análise adotada, a qual leva em conta que os problemas detectados na CDS e CDF também se manifestam em outros parâmetros, os quais são utilizados tanto pelos agentes do grupo 1 como do grupo 2 para refinar o processo de decisão, dispensando a análise de superposição de efeitos.

Os agentes classificados como do grupo 3 são divididos em dois subgrupos:

a) **diagnósticos** especializados para, em função de determinados sintomas, definir uma determinada hipótese (diagnóstico) e indicar uma solução (ação) pertinente ao sintoma que o ativou. Estes agentes são ativados em função do valor de confiança de um sintoma característico, denominado gatilho (trigger). Existe uma correspondência entre os sintomas e os agentes, expressa pelo próprio nome deste último, figura a seguir.

b) **ações**, que ativados pelos agentes anteriores, consultam dados da BD e do blackboard e através de heurística própria, indicam o procedimento (solução) a ser adotado.



**Figura 2-12 - Supervisor 3**



O supervisor 3 é o responsável por definir o diagnóstico e a(s) ação(ões) pertinentes. Através da seleção dos sintomas no blackboard, cujos valores estão acima de um limiar, define o subconjunto de disparadores, denominado aqui de subconjunto de anormalidades (SA). Estes disparadores ativam o subconjunto correspondente de agentes do grupo diagnósticos, responsáveis pela decisão de aceitar ou não a hipótese. Se aceita, o agente diagnóstico respectivo aciona o correspondente agente do grupo ações. Desta forma é montado um conjunto de diagnósticos e soluções para o(s) problema(s) identificado(s).

Para verificar os possíveis conflitos devido a diagnósticos e soluções antagônicas, montou-se a tabela a seguir para a análise da interação dos agentes:

**Tabela 2-1- Diagnósticos (D<sub>i</sub>) e ações dos agentes do grupo 3**

|    | Reduzir curso cpm | Aumentar curso cpm | Substituir UB | Desparafrinar | Intervir com sonda | Reduzir espaço morto | Substituir motor | Injetar inibidor scale |
|----|-------------------|--------------------|---------------|---------------|--------------------|----------------------|------------------|------------------------|
| 1  | D1                |                    | D9            | D10           |                    |                      |                  |                        |
| 2  |                   |                    |               |               |                    |                      | D22              |                        |
| 3  | D2                |                    |               | D11           | D13                |                      |                  |                        |
| 4  | D3                | D6                 |               |               | D14                |                      |                  |                        |
| 5  | D4                |                    |               |               | D15                | D19                  |                  |                        |
| 6  |                   | D7                 |               |               | D16                | D20                  |                  |                        |
| 7  |                   |                    |               | D12           |                    |                      |                  |                        |
| 8  |                   |                    |               |               | D17ab              |                      |                  |                        |
| 9  |                   |                    |               |               |                    |                      |                  | D23                    |
| 10 | D5                | D8                 |               |               | D18abc             | D21                  |                  |                        |

Nota: Diagnósticos D<sub>i</sub> descritos no item 2.2.5.2.3, pag 47.

1. UB subdimensionada
2. Motor subdimensionado
3. HB subdimensionada
4. Queda de produção
5. EV baixa
6. Pressão de sucção alta
7. Acúmulo severo de parafina
8. Obstrução severa da sucção da bomba
9. Corrosão severa
10. Problemas na carta dinamométrica

Das ações previstas, apenas as duas primeiras são conflitantes. Estas ações são propostas pelos agentes: 1, 3, 4, 5, 6 e 10. Eventuais conflitos ocorrerão então quando forem ativados simultaneamente os agentes: UB subdimensionada; HB subdimensionada; EV baixa; Queda de produção; Pressão de sucção alta e Problemas na carta. Analisando a combinação dois a dois dos agentes (tabela 2-2), observamos que determinados agentes nunca serão ativados simultaneamente, por restrições técnicas e teóricas, como é o caso dos pares: “EV baixa” e “Pressão de sução alta”; “Queda de produção” e “Pressão de sucção alta”. A ativação simultânea de outros pares poderá ser evitada pelo ajuste adequado das funções nebulosas pertinentes, como por exemplo no caso dos pares: “EV

baixa”e “Problemas na carta (vazamento nas válvulas)” e “Queda de produção” e “Problemas na carta (vazamento nas válvulas)”, cuja ativação dependerá fundamentalmente da definição de pressão baixa.

**Tabela 2-2 - Análise das ações conflitantes**

| AÇÃO              | INDICADA PELO AGENTE   | SE                                                                                                                     |
|-------------------|------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| REDUZ CURSO/CPM   | UB subdimensionada     | Atrito baixo                                                                                                           |
|                   | HB subdimensionada     |                                                                                                                        |
|                   | Queda de produção      | Pressão de sucção baixa                                                                                                |
|                   | EV baixa               |                                                                                                                        |
|                   | Problemas na carta     | Pressão de sucção baixa + Pancada de fluido                                                                            |
| AUMENTA CURSO/CPM | Queda de produção      | Pressão de sucção alta + Carta normal ou, com interferência de gás ou, com bloqueio de gás ou, vazamento nas válvulas. |
|                   | Pressão de sucção alta | EV alta                                                                                                                |
|                   | Problemas na carta     | Vazamento nas válvulas.                                                                                                |

Possíveis conflitos ocorrerão também quando da ativação simultânea dos agentes: UB subdimensionada, HB subdimensionada e Queda de produção e ou Pressão de sucção alta e ou Problemas na carta. Para a solução desses conflitos, adotou-se a seguinte estratégia: impor uma ordem de ativação dos agentes, garantindo que primeiro serão ativados os agentes de escopo mais abrangente e as soluções indicadas por estes são desabilitadas nos agentes hierarquicamente inferiores (tabela 2-3). Essa ordem é garantida pelo supervisor 3. A ordem estabelecida foi a seguinte:

- 1) Problemas na carta dinamométrica
- 2) Queda de produção
- 3) Pressão de sucção alta
- 4) Eficiência volumétrica baixa
- 5) Acúmulo severo de parafina
- 6) Obstrução severa da sucção da bomba
- 7) Corrosão severa
- 8) Unidade de bombeamento subdimensionada
- 9) Motor subdimensionado
- 10) Hastes de bombeamento subdimensionadas

**Tabela 2-3 - Solução para o conflito entre ações**

| No agente              | o diagnóstico | desabilita  |
|------------------------|---------------|-------------|
| Problemas na carta     | D5            | D6,D7       |
|                        | D8            | D1,D2,D3,D4 |
|                        | 18a           | D3          |
| Queda de produção      | D6            | D1, D2, D4  |
|                        | D3            | D7          |
| Pressão de sucção alta | D7            | D1,D2, D4   |

Outras estratégias poderão ser utilizadas, como por exemplo a ordenação dos agentes levando em conta critérios de custo.

## 2.2.5 Sistema Kards

### 2.2.5.1 Aspectos teóricos

O sistema Kards é um ambiente computacional para o desenvolvimento e utilização de aplicações em redes neurais simbólicas, que incorpora recursos da programação orientada a objetos (POO), gerenciador de base de dados, sistema para análise de textos<sup>3</sup> e sistema para reconhecimento de padrões [37].

Sua filosofia está baseada no conceito de armário, gavetas, fichas e itens, que são tratados como objetos aos quais podem ser associados métodos computacionais como por exemplo indexação, cálculo, decisão.

Os objetos básicos do Kards são as fichas e as redes. Esses objetos são constituídos respectivamente de itens e de nodos (neurônios) aos quais podem ser associados macros escritas em linguagem própria do sistema. Esse recurso torna o Kards um poderoso sistema para o desenvolvimento de aplicações em IA baseadas no paradigma de redes neurais simbólicas.

### 2.2.5.2 Aplicação ao problema

O sistema objeto do presente trabalho foi implementado no Kards utilizando parte dos conceitos desenvolvidos para o SICAD (item 1.4.3) em especial os recursos de comunicação com o SCUB que foi utilizado integralmente e a base de dados, aproveitada parcialmente.

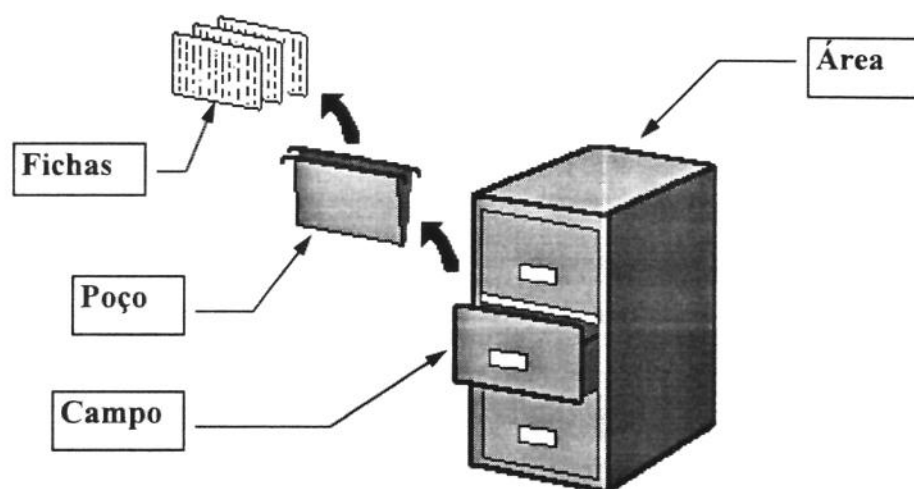
<sup>3</sup> “Utiliza conceitos de redes neurais simbólicas e linguagens para aprender o dicionário de termos utilizados em base de dados escrita em linguagem natural e identificar frases que obedeçam a sintaxe definida pelo usuário.”

De acordo com a filosofia do Kards foram criados os seguintes armários:

- Armário de dados
- Armário de redes
- Armário de diagnósticos/ações
- Armário de configuração do sistema
- Armário de defaults
- Outros armários

#### 2.2.5.2.1 Armário de dados

A estrutura de BD utilizada no sistema foi desenvolvida a partir de duas fontes: a estrutura conceitual definida e o sistema SICAD. Alguns aspectos abordados exigiram dados inexistentes na BD atual do SICAD, por esta razão a mesma teve de sofrer alguns acréscimos. A estruturação foi feita de acordo com a filosofia já existente nas áreas operacionais, onde as áreas constituem o(s) armário(s), as gavetas os campos de petróleo e as pastas os poços, figura abaixo.



**Figura 2-13 - Armário de dados**

O conteúdo da pastas (fichas) foi organizado de forma a manter a coerência com a estrutura já existente nos arquivos convencionais das áreas.

Foram utilizados tres tipos de fichas: normal, planilha, texto. A seguir descrevemos o conteúdo definido para a BD do ponto de vista conceitual, o detalhamento completo da BD poderá ser encontrado no item 3.1.

Os dados contidos na BD foram classificados de acordo com sua importância para a análise em, imprescindíveis, com default, perecíveis, e dependentes:

1. **Imprescindíveis:** São dados que, se não existirem na BD tornam a análise impossível de ser realizada (profundidade da bomba, diâmetro do pistão, etc...). Estes dados são verificados pelo supervisor\_0 antes da análise ser iniciada, se pelo menos um não for localizado o mesmo abortará a análise.
2. **Perecíveis:** São dados que tem sua vida útil controlada também pelo supervisor\_0 (testes de pressurização, teste de produção, registros de nível dinâmico, etc...). Aqueles dados cuja idade não é compatível com sua durabilidade são apresentados ao usuário que é instado a escolher entre prosseguir ou não com a análise.
3. **Admitem default:** São dados que, se inexistentes na BD, são substituídos por valor default.
4. **Dependentes:** São dados resultantes de cálculos realizados sobre dados “independentes” por macros, aplicações específicas e eventualmente agentes da BC.

**Ficha 01-Identificação:** Contém a identificação do poço, seu nome, horizonte produtor e nó da rede de dutos ao qual está conectado.

**Ficha 02-Condições mecânicas<sup>4</sup>:** Contém as características mecânicas do SBM: coluna de produção, bomba de fundo, hastes de bombeamento.

**Ficha 03-Condições mecânicas(continuação)<sup>2</sup>:** Contém as características mecânicas referentes ao poço: revestimento, perfurados.

**Ficha 04-Unidade de bombeamento<sup>2</sup>:** Contém os dados referentes às características da UB e do motor.

**Ficha 05-Fluido produzido:** Contém as características do fluido produzido, tais como vazão, percentual de água e sedimentos, históricos de parafinação, produção de areia, acúmulo de scale, corrosão, entre outros.

**Ficha 06-Registro de pressão estática<sup>2</sup>:** Contém os dados referentes ao último registro de pressão estática realizado, bem como dados de reservatório como por exemplo pressão de saturação do óleo, temperatura de fundo.

**Ficha 07-Histórico de testes de produção<sup>2,3</sup>:** Contém os valores de vazão, BSW e pressão do tubo na superfície medido nos 7 últimos testes de produção realizados no poço.

**Ficha 08-Registro de nível dinâmico<sup>2,3</sup>:** Contém os resultados obtidos nos 7 últimos registros de nível dinâmico. Esta ficha, diferente da do SICAD, foi elaborada para permitir o cálculo da vazão de gás ventilada pelo revestimento e a pressão de fundo em fluxo nos perfurados e sucção da bomba.

---

<sup>4</sup> Contém dados imprescindíveis para análise.

**Ficha 09-Histórico de Intervencões:** Permite armazenar datas e códigos referentes a serviços realizados e motivos das últimas 7 intervenções.

**Ficha 10-Testes de pressurização<sup>5</sup>:** Contém os resultados de testes práticos e de procedimentos de uso corrente nas áreas operacionais tais como teste de pressurização da coluna de tubos, verificação do fluxo na válvula de prova, ajuste do espaço morto da bomba.

**Ficha 11-Parâmetros aquisição:** Contém os dados necessários para a digitalização e incorporação de CDS ao sistema.

**Ficha 12-Constantes do MCI:** Contém os parâmetros de “set point” para o SCUB.

**Ficha 13-Redes-MCI:** Contém os padrões para a identificação das CDF a serem utilizados pelo SCUB.

**Ficha 14-Cartas Padrões:** Contém o conjunto de padrões<sup>6</sup> a serem utilizados no RP realizado no “escritório central”, para classificação da CDS e CDF. Para a fase atual do presente trabalho foram definidos os seguintes padrões (maior detalhamento pode ser encontrado no item 3.3):

- **Para a CDF:**

1. **Normal:** Representa a situação em que o SBM opera sem problemas.
2. **Pancada de fluido:** A submergência da bomba está comprometida ou sua sucção está obstruída.
3. **Interferência de gás:** Indica a existência de gás livre na bomba, o que compromete a eficiência de bombeamento do SBM.
4. **Bloqueio de gás:** É um caso severo de interferência de gás onde a taxa de compressão é insuficiente para comprimir o gás livre presente na bomba, resultando na interrupção do bombeamento.
5. **Vazamento da válvula de passeio:** Indica que existe vazamento na válvula de passeio ou no pistão da bomba.
6. **Vazamento da válvula de pé:** Indica que existe vazamento na válvula de pé.

- **Para a CDS:**

1. **Pistão preso:** Indica a situação em que não há deslocamento do pistão dentro da bomba.
2. **Haste partida:** Indica que a coluna de hastes sofreu ruptura desconectando-se do pistão.

**Ficha 15-Classificação das cartas<sup>2,3</sup>:** Contém o resultado da classificação das CDF e CDS em relação aos padrões existentes na ficha 14.

---

<sup>5</sup> contém dados perecíveis (vida útil é monitorada).

<sup>6</sup> formas geométricas características de determinada situação de bombeamento do SBM.

**Ficha 16-Diagnóstico da situação do poço:** Contém os códigos referentes aos 10 últimos diagnósticos efetuados no SBM.

**Ficha 17-Comentários sobre os diagnósticos:** Contém os comentários do usuário referentes a cada um dos 10 diagnósticos da ficha anterior. Estes comentários serão utilizados pelo gerente do sistema com fonte para correções e atualizações do mesmo.

**Ficha 18-Parâmetros da carta de superfície<sup>2,3</sup>:** Contém os valores característicos referentes à CDS como curso, velocidade de bombeamento, constante de mola do dinamômetro, cargas máxima, mínima, e nos testes das válvulas de passeio e de pé.

**Ficha 19-Parâmetros da carta de fundo:** Idêntica à ficha anterior para os dados da CDF.

**Ficha 20-Carta de fundo - Pontos significativos:** Contém os pontos significativos (normalizados) das 10 últimas CDF.

**Ficha 21-Aquisição-Scanner:** Esta ficha reúne um conjunto de macros que permite a digitalização via scanner da CDS obtida através de dinamômetro convencional<sup>7</sup>. Faz a aquisição da CDS, calcula a CDF, normaliza e determina os pontos significativos<sup>8</sup> de ambas as cartas.

**Ficha 22-Aquisição-MCI:** Realiza as mesmas operações que a ficha anterior para a carta fornecida pelo SCUB.

**Ficha 23-Aquisição-Mesa Digitalizadora:** Atuação idêntica a da ficha 21 para a CDS digitalizada via mesa digitalizadora.

**Ficha 24-Carta real de superfície:** Armazena os pontos reais (não normalizados) das 10 últimas CDS digitalizadas.

**Ficha 25-Carta real de fundo:** Armazena os pontos reais das correspondentes 10 últimas CDF.

**Ficha 26-Carta de Torque:** Armazena os pontos reais das correspondentes 10 últimas curvas de torque.

**Ficha 27-Norma API RP 11L:** Contém os resultados da norma aplicada ao SBM como deslocamento volumétrico, carga e torque máximos tensões máxima e admissível, calculados através de aplicação específica desenvolvida neste trabalho especialmente para o sistema.

---

<sup>7</sup> Dinamômetro: dispositivo hidráulico que fornece registro gráfico (diagrama) da carga vs. posição da cabeça da UB.

<sup>8</sup> Ponto significativo da carta dinamométrica: ponto onde ocorre mudança significativa de direção em relação ao anterior.



**Ficha 28-Análise nodal:** Contém o resultado da aplicação da análise nodal (item 2.3.5) ao SBM: produtividade do poço [47], vazões máxima e potencial do poço, pressão de sucção, curso e velocidade de bombeamento correspondentes.

**Ficha 29-Cargas estáticas teóricas e outros dados:** Contém dados como cargas teóricas esperadas nos testes das válvulas de pé e passeio, pressão de descarga na bomba, profundidade do nível dinâmico virtual<sup>9</sup>, profundidade ideal para a bomba.

**Ficha 30-Blackboard:** Contém os valores de confiança referentes a cada sintoma (hipótese) do poço, calculados pelos agentes subordinados aos supervisores 1 e 2.

**Ficha 31-Ordem-Análise:** Contém indicadores da atualização da BD, do blackboard e do último diagnóstico. Contém também a ordem e quais agentes serão ativados pelos supervisores 1 e 3.

**Ficha 32-Pendências:** Contém as pendências (dados inexistentes na BD) indicadas pelo supervisor 0.

**Ficha 33-Pontos significativos da carta de superfície:** Contém os pontos significativos (normalizados) das 10 últimas CDS.

2.2.5.2.2 Armário de RNS

As redes fazem parte do armário da estrutura da aplicação desenvolvida no kards [37]. Da mesma forma que as ações programadas e as macros as definições das RNS são colocadas em uma gaveta que contém as pastas referentes a cada RNS, cada ação programada e cada macro, figura abaixo.

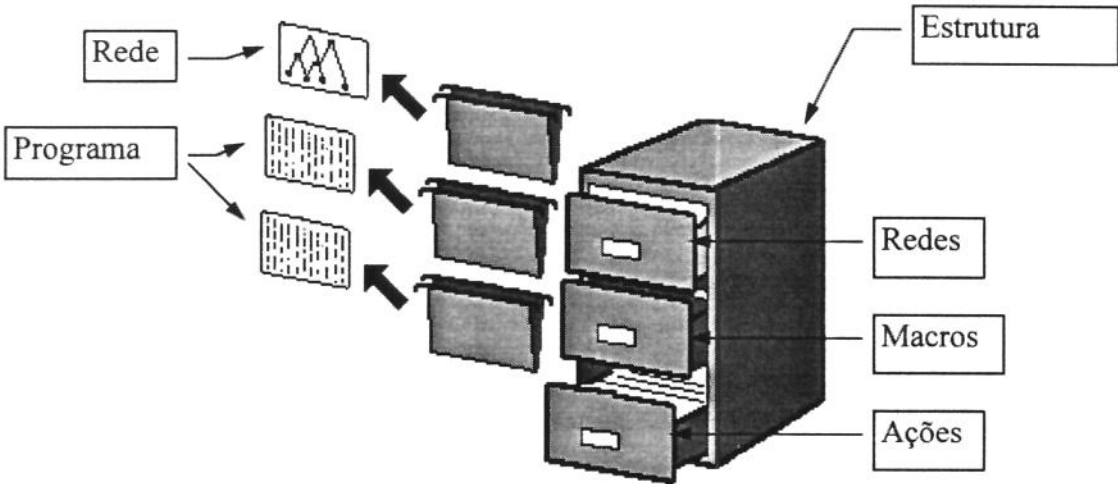


Figura 2-14 - Armário de redes

<sup>9</sup> Nível de líquido correspondente à pressão de sucção calculada a partir do registro do nível dinâmico.

No presente trabalho foram desenvolvidas as RNS cuja descrição conceitual apresentamos a seguir (a descrição detalhada das RNS encontra-se no item 3.3):

- **RNS de ativação (supervisores)**

1. **Supervisor\_0:** Verifica se todos os dados classificados como imprescindíveis estão presentes na BD. Os dados inexistentes são identificados e apresentados ao usuário como pendência a ser providenciada, e a análise é abortada. Estando a BD completa, passa a ser verificada a atualidade dos dados classificados como perecíveis. Se existirem, os dados desatualizados são apresentados como pendência ao usuário o qual é solicitado a decidir se a análise deve prosseguir. Após esta etapa o controle é transferido para o supervisor\_1.
2. **Supervisor\_1:** Verifica se o blackboard (indicador na ficha 31 da BD) já está atualizado. Em caso positivo, transfere o controle para o supervisor\_2, e em caso negativo procede a ativação dos agentes do grupo 1, seguindo a sequência contida no item 3 da ficha 31 da BD. A possibilidade de definir quais agentes serão ativados e em que ordem, torna o sistema contexto dependente, permitindo que procedimentos de análises específicos sejam definidos. Ao término da ativação de todos os agentes, o blackboard conterá o quadro de sintomas atual do SBM.
3. **Supervisor\_2:** Verifica se a classificação da carta está já atualizada, caso positivo, transfere imediatamente o controle para o supervisor\_3, caso contrário procede a ativação dos agentes do grupo 2 previamente indicados quando da classificação da CDF e CDS realizada pelo RP. Serão ativados apenas os agentes indicados, e a hipótese referente ao padrão que resultar com maior valor de confiança será atribuída ao quadro de sintomas do SBM, completando a coleta de evidências para a análise, a qual será realizada pelos agentes ativados pelo supervisor\_3.
4. **Supervisor\_3:** Lê os valores de confiança referente aos sintomas: 1) situação da UB; 2) situação do motor; 3) situação da HB; 4) Teste de produção X vazão potencial; 5) Eficiência volumétrica; 6) Pressão de sucção; 7) acúmulo de parafina na coluna; 8) sucção da bomba obstruída por scale; 9) sucção da bomba obstruída por areia; 10) corrosão; 11) classificação da carta dinamométrica. Os sintomas acima, a depender de seu valor de confiança, atuam como “disparador” de agentes responsáveis por definir um diagnóstico. O supervisor 3 identifica quais sintomas estão abaixo de determinados valores (limiares de ativação) e ativa os agentes. Cada um dos agentes ativados define um diagnóstico que será utilizado como “disparador” de um agente responsável por definir a ação correspondente. O supervisor 3 lê o conjunto de diagnósticos e soluções e, apresenta os apresenta em forma de texto.

- **RNS referentes aos sintomas**

1. **Interferência de gás:** Este agente tem por função definir a severidade da interferência de gás no sistema. Esta informação será utilizada para definir as funções de pertinência a serem utilizadas pelos agentes Unidade de bombeamento, Potência do motor da UB, Tensão nas hastes e Eficiência volumétrica. Calcula um valor de confiança para a hipótese de interferência de gás severa.
2. **Atrito:** Os mesmos parâmetros de carga utilizados no agente anterior, se aplicam a este para determinar o atrito na coluna de hastes. O raciocínio é semelhante, mas voltado para a identificação de atrito. Calcula um valor de confiança para a hipótese de atrito severo.
3. **Unidade de bombeamento:** Cada UB possui um valor limite de carga para que possa operar em condições seguras (capacidade estrutural). Da mesma forma ocorre para o torque (capacidade ao Torque). Este agente analisa o dimensionamento da UB a partir de diversos parâmetros do sistema, levando em conta os dois sintomas definidos acima. Calcula um valor de confiança para a hipótese de UB subdimensionada.
4. **Potência do motor da UB:** Este agente compara a potência requerida, calculada pela norma API RP11L, com a potência do motor instalado na UB. Em função do atrito e da interferência de gás presentes no SBM o motor instalado é classificado quanto ao seu dimensionamento. Calcula um valor de confiança para a hipótese de motor subdimensionado.
5. **Tensão nas hastes:** As evidências analisadas neste caso, tensão máxima e admissível são ambos parâmetros obtidos a partir da norma API RP11L, ambos teóricos. O atrito e interferência permitem a adequação desses resultados a condições não previstas pela norma. Calcula um valor de confiança para a hipótese de HB subdimensionada.
6. **Teste de produção X vazão potencial:** Compara o teste de produção com a vazão potencial determinada pela análise nodal ou com a vazão histórica. Dá um valor de confiança para a hipótese de que o poço está produzindo todo seu potencial.
7. **Eficiência volumétrica:** Compara o teste de produção com o deslocamento volumétrico da instalação determinado pela norma API RP 11L. Atribui um valor de confiança para a hipótese de que a instalação está produzindo o valor máximo possível para as condições de bombeamento. Em função da confiança atribuída à interferência de gás no sistema, são selecionadas as funções de pertinência que calcularão o valor de confiança da hipótese referida.
8. **Posição da bomba:** A tarefa deste agente é classificar a profundidade da bomba, com relação às profundidades do Topo e Base do intervalo perfurado e com a profundidade do fundo atual do poço.

**9. Pressão de sucção:** A depender da capacidade de produção do poço (reservatório), expressa por sua IPR (Inflow Performance Relationship) [47] e da capacidade de produção do equipamento instalado, existe uma pressão de sucção e uma vazão em que o sistema se estabiliza [9]. Esses parâmetros, pressão de sucção requerida e vazão desejada são fornecidas pelo agente análise nodal. Este agente compara a pressão de sucção requerida com a pressão de sucção calculada a partir do registro de nível dinâmico e atribui um valor de confiança para a hipótese de pressão de sucção baixa.

**10. Taxa de compressão:** Este agente exprime a relação entre a taxa de compressão disponível na bomba (volume deslocado pelo pistão ÷ volume total) e a taxa de compressão requerida (pressão de descarga ÷ pressão de sucção) [34], levando em conta a influência da presença de gás no sistema expressa pelo valor de confiança calculado pelo agente interferência de gás. Essa relação é expressa na forma de um valor de confiança para a hipótese de taxa de compressão alta.

**11. Parafina:** Calcula o valor de confiança para a hipótese de acúmulo severo de parafina na coluna, a partir da informação do usuário sobre o histórico de acúmulo de parafina e do tempo decorrido desde a última intervenção no poço. Caso não exista histórico é adotado um tempo médio definido pelo usuário e calculado um valor de confiança a partir de uma função de pertinência também definida pelo usuário.

**12. Obstrução da sucção da bomba por scale:** O valor de confiança para a hipótese de obstrução da sucção da bomba por acúmulo de scale é determinada principalmente a partir da informação do usuário sobre o histórico de deposição de scale. Caso não exista histórico, considera-se que a possibilidade de existência de scale é reduzida; por outro lado, se há histórico o tempo decorrido desde a última substituição da bomba é utilizado para o cálculo do valor de confiança.

**13. Obstrução da sucção da bomba por areia:** Calcula o valor de confiança para a hipótese de o poço ter areia acumulada obstruindo a sucção da bomba. Esse cálculo leva em conta a informação do usuário sobre o histórico de areia, o tempo decorrido desde a última limpeza realizada e a distância entre a bomba e o fundo atual do poço.

#### • RNS referentes ao reconhecimento de padrões

Embora existam variações dentro dos grupos de padrões (anexo B), neste trabalho utilizamos apenas os padrões genéricos que nos parecem mais importantes. Quanto à identificação das variações dos padrões e dos padrões com efeitos superpostos, acreditamos depender de uma experiência na análise do SBM, ainda por ser adquirida.

**1. Normal:** Esta situação ocorre associada às seguintes evidências: baixa interferência de gás, pressão de sucção baixa e eficiência volumétrica alta. Os valores de confiança nas hipóteses correspondentes são utilizados, juntamente com o valor de confiança fornecido pelo RP para este padrão, para determinar

o valor de confiança na hipótese de SBM em situação normal. Se o valor de confiança contido no Blackboard for inferior ao valor final obtido nesse cálculo, seu conteúdo é atualizado. Este procedimento garante a aceitação da hipótese (classificação) com maior confiança.

2. **Pancada de fluido:** Esta situação ocorre associada às seguintes evidências: baixa pressão de sucção, baixa interferência de gás, e sucção da bomba obstruída. Utilizando raciocínio semelhante ao caso anterior, é calculado o valor de confiança para a hipótese de pancada de fluido no SBM. Da mesma forma que no agente anterior, se este valor for superior ao já existente no Blackboard o mesmo será adotado para compor o quadro de sintomas do SBM.
3. **Interferência de gás:** A forma da CDF associada a esta situação não tem características geométricas bem definidas, e pode, com frequência, ser confundida com pancada de fluido, mormente naqueles casos em que a coluna de tubos não está ancorada. A forma adotada para este padrão difere da adotada para a pancada de fluido apenas pela maior suavidade do traçado. A evidência mais importante associada a esta situação de bombeamento é a fornecida pelo agente do grupo 1 interferência de gás.
4. **Bloqueio de gás:** Este padrão é uma variação do anterior (interferência de gás) que ocorre associado às seguintes evidências: nível dinâmico virtual na profundidade da bomba e interferência de gás elevada, baixa taxa de compressão na bomba e baixa eficiência volumétrica.
5. **Vazamento na válvula de passeio:** Este padrão ocorre relacionado com o resultado negativo do teste de pressurização e com baixa interferência de gás. O resultado do teste de pressurização positivo no curso ascendente é uma indicação de que não há vazamento na válvula de passeio, desacreditando o padrão. Caso o teste indique vazamento, é verificada a interferência de gás, a qual aumenta ou diminui a confiança no padrão dependendo se for alta ou baixa. Caso o teste tenha resultado positivo é atribuída confiança nula para a hipótese de CDF com vazamento na válvula de passeio.
6. **Vazamento na válvula de pé:** Neste caso é aplicado raciocínio idêntico ao anterior.
7. **Pistão preso:** A ocorrência de pistão preso está associada à interrupção ou queda muito acentuada da produção, a altos valores da carga medida no teste da válvula de passeio e baixos valores no teste da válvula de pé. Estas evidências são utilizadas para calcular o valor de confiança nesta hipótese.
8. **Haste partida:** A ocorrência desta situação está associada à interrupção ou queda muito acentuada da produção, e a valores semelhantes de cargas medidas nos testes das válvulas de passeio e de pé. Neste caso e no anterior, a CDS reflete com bastante clareza o problema, não havendo portanto necessidade de utilizar a CDF a qual, devido ao modelo matemático utilizado



para obtê-la não ser adequado para este caso, pode apresentar uma forma de difícil identificação.

- **RNS referentes a diagnose**

1. **UB subdimensionada:** Este agente define a causa porque a UB está subdimensionada. Verifica se a mesma reside na existência de atrito excessivo ou se na má especificação da UB. No caso de atrito excessivo, determina se este se deve a acúmulo de parafina ou é intrínseco do poço, recomendando no primeiro caso a remoção da parafina e no segundo a substituição da UB. A substituição é recomendada também no caso da má especificação.
2. **Motor subdimensionado:** Apenas recomenda a substituição do motor.
3. **HB subdimensionada:** Verifica se o atrito é elevado no sistema. Caso positivo verifica qual a razão do mesmo, caso negativo recomenda reduzir a capacidade de bombeamento. No caso de a razão do atrito elevado ser acúmulo de parafina na coluna, recomenda a desparafinação, ou é assumido que o atrito é intrínseco do poço e recomenda a intervenção de sonda no poço para substituir a coluna.
4. **Queda de produção:** Verifica se a pressão de sucção é alta. Caso positivo investiga a eficiência volumétrica para verificar se a razão da queda se deve ao equipamento ou ao poço. Se a pressão é baixa, recomenda reduzir curso/cpm. No caso de eficiência volumétrica alta, assume que o problema se localiza no poço e investiga a carta dinamométrica. Se a pressão é alta assume que é possível obter maior produção do poço e recomenda aumentar curso/cpm. Se a carta dinamométrica indica situação normal, interferência de gás, bloqueio de gás ou vazamento em uma das válvulas, a recomendação será aumentar curso/cpm, para qualquer outra classificação da carta dinamométrica será intervenção de sonda no poço. Neste caso o agente “intervenção de sonda” deverá investigar qual a classificação da carta para recomendar o procedimento adequado.
5. **EV baixa:** Verifica a pressão de sucção. Se for alta, investiga a taxa de compressão, se esta for baixa conclui que o problema é interferência de gás e recomenda reduzir o espaço morto da bomba. Se a taxa for alta investiga a carta dinamométrica, se esta indicar situação normal ou bloqueio de gás, conclui que existe incongruência nos dados. Senão, assume que o problema está na bomba e recomenda intervenção de sonda. Neste caso também o agente “intervenção de sonda” deverá investigar qual a classificação da carta para recomendar o procedimento adequado.
6. **Pressão de sucção alta:** Verifica se a eficiência volumétrica é alta. Caso positivo, assume que o SBM está mal especificado e recomenda aumentar curso e velocidade de bombeamento, caso negativo, investiga a taxa de compressão. Se esta é alta, verifica se a razão da pressão de sucção alta se deve ao equipamento ou ao poço. No caso de taxa baixa, recomenda reduzir o espaço morto da bomba. Se a taxa é alta, assume que o problema se localiza no poço e investiga a carta dinamométrica. Se a carta dinamométrica indica situação normal ou bloqueio de gás, conclui que existe incongruência nos dados. Para as outras classificações possíveis assume que o problema está na

bomba e recomenda intervenção de sonda. Da mesma forma, o agente “intervenção de sonda” deverá aqui também investigar qual a classificação da carta para recomendar o procedimento adequado.

7. **Acúmulo severo de parafina:** Apenas recomenda desparafinação da coluna.
8. **Obstrução severa na sucção da bomba:** Define se a obstrução se deve a scale, areia ou detritos e recomenda intervenção de sonda. O agente “Intervenção de sonda” de posse da razão da obstrução e indica o procedimento adequado.
9. **Corrosão severa:** Apenas alerta sobre a possibilidade de danos ao equipamento de fundo.
10. **Problemas na carta dinamométrica:** Verifica a classificação da carta dinamométrica e, se a classificação for pistão preso ou haste partida, simplesmente recomenda a intervenção de sonda. Se a classificação for vazamento da válvula de pé ou passeio, recomenda aumentar curso/cpm para compensar o vazamento. Sendo pancada de fluido, investiga a pressão de sucção para definir se o problema é relativo ao poço ou ao equipamento. Pressão alta indica obstrução da sucção da bomba, então o agente recomenda intervenção de sonda. No caso de pressão baixa, assume que a capacidade do poço foi ultrapassada e recomenda reduzir curso/cpm. Se a classificação da carta for bloqueio ou interferência de gás, investiga a taxa de compressão. Caso esta seja alta, recomenda intervenção de sonda, se for baixa é recomenda a redução do espaço morto da bomba.

#### • Referentes às ações

1. **Intervenção de sonda:** Prepara o documento de solicitação da intervenção no poço. Pode receber solicitações dos diversos agentes do grupo 3 subgrupo diagnósticos. É constituído por 8 agentes aqui denominados de sub-agentes, dos quais 7 são especializados para determinados diagnósticos, e um especializado para atuar como supervisor, ativando os outros em função do diagnóstico (anexo C.2.4.1) .
2. **Reduzir curso/cpm:** prepara o documento de solicitação de diminuição do curso e/ou velocidade de bombeamento do poço. Tem estrutura semelhante ao anterior diferindo apenas quanto ao número de sub-agentes, que neste caso é 4 (anexo C.2.4.2.) .
3. **Aumentar curso/cpm:** prepara o documento de solicitação de aumento do curso e/ou velocidade de bombeamento do poço. Da mesma forma que nos anteriores, recebe solicitação de diversos agentes, no entanto é constituído de apenas 1 agente (anexo C.2.4.3) .
4. **Outros agentes:** Os agentes Reduzir espaço morto, Substituir UB, Substituir motor e Injetar inibidor são de constituição bastante simples. Tem por função apenas apresentar o procedimento para a execução das tarefas a eles relacionadas.



### 2.2.5.2.3 Armário de diagnósticos/ações

O armário de diagnósticos/ações foi estruturado da forma indicada na figura abaixo:

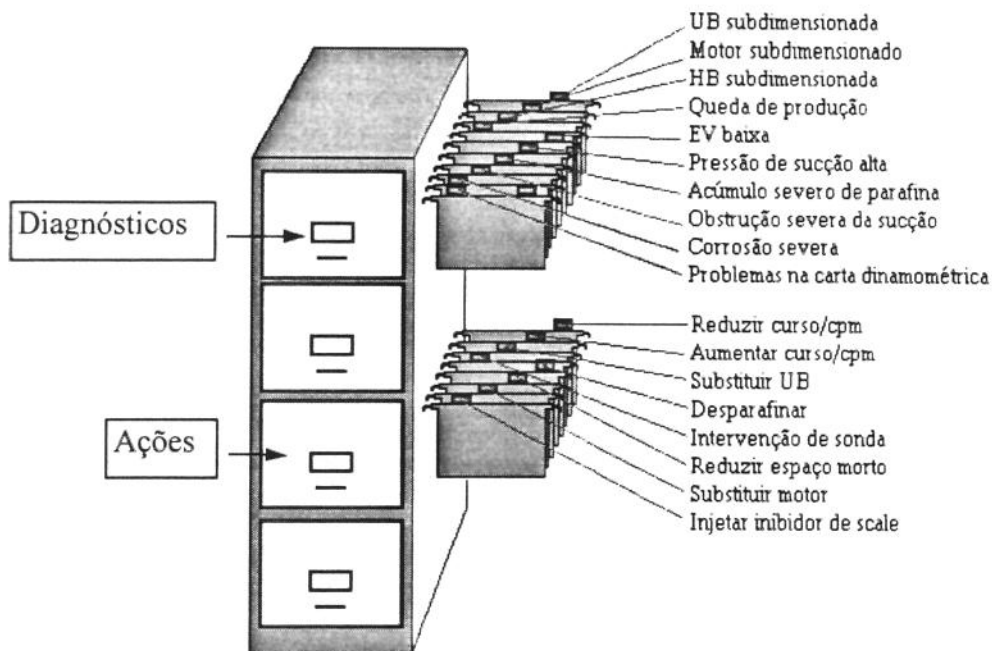


Figura 2-15 - Armário de diagnósticos/ações

Foram utilizadas apenas fichas do tipo texto, contendo cada uma um texto referente a um diagnóstico ou ação. A seguir encontram-se descritos os diagnósticos e as ações implementados:

- **Diagnósticos referentes a Problemas na carta dinamométrica**

**D5** - "Pancada de fluido devido capacidade de bombeamento superior a capacidade do poço." - ocorre para pressão de sucção baixa.

**D8** - "Vazamento de uma ou ambas válvulas."

**D18a** - "Haste partida ou pistão preso."

**D18b** - "Pancada de fluido" devido a obstrução na sucção da bomba. - ocorre para pressão de sucção alta.

**D18c** - "Interferência ou bloqueio de gás devido a deficiência de separação de gás na bomba". - ocorre para taxa de compressão alta.

**D21** - “Bloqueio ou interferência de gás devido a taxa de compressão inadequada.” - ocorre para taxa de compressão baixa.

- **Diagnósticos referentes a Queda de produção**

**D3** - “Queda de produção em razão de Capacidade de bombeamento incompatível com a capacidade de produção do poço.” - ocorre para pressão de sucção baixa.

**D6** - “Queda de produção em razão de capacidade de bombeamento inadequada ou interferência de gás ou vazamento nas válvulas.” - ocorre para pressão de sucção alta + carta normal ou interferência de gás ou bloqueio de gás ou vazamento nas válvulas.

**D14** - “Queda de produção em razão de pancada de fluido ou interrupção da produção devido a haste partida ou pistão preso.” - ocorre para pressão de sucção alta + pancada de fluido ou haste partida ou pistão preso.

- **Diagnósticos referentes a Pressão de sucção alta**

**D7** - “Pressão de sucção alta em razão de capacidade de bombeamento incompatível com a capacidade de produção do poço.” - ocorre para EV alta.

**D16a** - “Pressão de sucção alta em razão de pancada de fluido ou, haste partida ou pistão preso.” - ocorre para EV baixa + pancada de fluido e ou haste partida e ou pistão preso.

**D16b**- “Pressão de sucção alta em razão de vazamento em uma das válvulas.” - ocorre para EV baixa + vazamento em uma das válvulas.

**D20** - “Pressão de sucção alta em razão de taxa de compressão inadequada.” - ocorre para taxa de compressão baixa.

- **Diagnósticos referentes a Eficiência volumétrica baixa**

**D4** - “EV baixa em razão de Capacidade de bombeamento incompatível com a capacidade de produção do poço.” - ocorre para pressão de sucção baixa.

**D15a** - “EV baixa em razão de pancada de fluido ou, haste partida ou pistão preso.” - ocorre para pressão de sucção alta +pancada de fluido ou haste partida ou pistão preso.

**D15b** - “EV baixa em razão de vazamento em uma das válvulas.” - ocorre para pressão de sucção alta +vazamento em uma das válvulas.

**D19** - “EV baixa” em razão de taxa de compressão inadequada.” - ocorre para taxa de compressão baixa + carta normal ou interferência de gás ou bloqueio de gás.

- **Diagnósticos referentes a Acúmulo severo de parafina**

**D12** - “Coluna parafinada.”

- **Diagnósticos referentes a Obstrução severa da sucção da bomba**

**D17a** - “Sucção da bomba obstruída por areia.” - ocorre para areia alta.

**D17b** - “Sucção da bomba obstruída por scale ou detritos.” - ocorre para scale alto.

- **Diagnósticos referentes a Corrosão severa**

**D23** - “Corrosão severa nos equipamentos de fundo.” - ocorre para corrosão alta.

- **Diagnósticos referentes a UB subdimensionada**

**D1** - “UB subdimensionada em razão de Capacidade de bombeamento incompatível com a especificação da UB.” - ocorre para atrito elevado.

**D9** - “UB subdimensionada em razão de atrito elevado devido a condição natural do poço.” - ocorre para atrito elevado + parafina inexistente.

**D10** - “UB subdimensionada em razão de atrito elevado devido acúmulo de parafina.” - ocorre para atrito elevado + parafina severa.

- **Diagnósticos referentes a Motor subdimensionado**

**D22** - “Motor subdimensionado.”

- **Diagnósticos referentes a HB subdimensionada**

**D2** - “HB subdimensionada em razão de Capacidade de bombeamento incompatível com a especificação da UB.” - ocorre para atrito elevado.

**D11** - “HB subdimensionada em razão de atrito elevado devido acúmulo de parafina.” - ocorre para atrito elevado + parafina severa.

**D13** - “HB subdimensionada em razão de atrito elevado devido a condição natural do poço.” - ocorre para atrito elevado + parafina inexistente.

- **Ações referentes a Intervenção de sonda**

**A1** - “Circular para remover areia; Instalar filtro de areia; Utilizar bomba Spec-2” - ocorre para os diagnósticos D18b, D14, D16a, D15a, e para areia alta, e ainda para pistão preso e areia alta.

**A2** - “Circular para remover detritos” - ocorre para os diagnósticos D18b, D14, D16a, D15a, para areia baixa e scale baixo.

**A3** - “Utilizar inibidor de scale” - ocorre para os diagnósticos D18b, D14, D16a, D15a e para areia baixa e scale alto.

**A4** - “Instalar separador de gás de fundo” - ocorre para para o diagnóstico D18c e para separador de gás inexistente e profundidade ideal para a bomba menor que profundidade da base dos perfurados.

**A5** - “Retirar separador de gás de fundo” - ocorre para o diagnóstico D18c e para separador de gás existente e profundidade ideal para a bomba maior que profundidade da base dos perfurados.

**A6** - “Substituir separador de gás de fundo” - ocorre para o diagnóstico D18c e para separador de gás existente e profundidade ideal para a bomba menor que profundidade da base dos perfurados.

**A7** - “Utilizar bomba sem pescador” - ocorre para para o diagnóstico D18c e para separador de gás inexistente e profundidade ideal para a bomba maior que profundidade da base dos perfurados.

**A8** - “Redimensionar HB com FS menor” - ocorre para o diagnóstico D13 e para HB grau D.

**A9** - “Substituir HB grau C por HB grau D” - ocorre para o diagnóstico D13 e para HB diferente de grau D e corrosão baixa.

**A10** - “Substituir HB grau C por HB grau K; Redimensionar HB com FS menor; utilizar luvas de aço inox” - ocorre para o diagnóstico D13 e para HB diferente de grau D e corrosão baixa.

**A11** - “Desgaste normal da HB; instalar HB de mesma especificação” - ocorre para diagnóstico D18a, para Atrito baixo e corrosão baixa.e para Atrito alto , poço sem desvio,e parafina baixa.

**A12** - “Redimensionar HB com FS menor; utilizar luvas de aço inox” - ocorre para diagnóstico D18a, para Atrito baixo e corrosão alta e HB grau K .

**A13** - “Substituir HB grau C por HB grau K; utilizar luvas de aço inox” - ocorre para diagnóstico D18a, para Atrito baixo e corrosão alta e HB diferente de grau K .

**A14** - “Instalar centralizadores na HB” - ocorre para diagnóstico D18a, para Atrito alto e poço com desvio acentuado .

**A15** - “Instalar desparafinadores (scrapers) na HB” - ocorre para diagnóstico D18a, para Atrito alto , poço sem desvio,e parafina alta.

**A16** - “Substituir bomba com pistão preso” - ocorre para diagnóstico D18a.

- **Ações referentes a Reduzir curso/cpm**

**A17** - “Não é possível reduzir o curso, substituir UB” - ocorre para diagnóstico D1 e para curso = curso mínimo da UB.

**A18** - “Redimensionar SBM usando curso máximo e reduzindo cpm” - ocorre para diagnóstico D1 e para curso  $\neq$  curso mínimo da UB e interferência de gás alta.

**A19** - “Redimensionar SBM reduzindo curso e aumentando cpm” - ocorre para diagnóstico D1 e para curso  $\neq$  curso mínimo da UB e interferência de gás baixa..

**A20** - “Na próxima intervenção redimensionar HB” - ocorre para diagnóstico D2 e para cpm  $\neq$  cpm mínimo da UB e para, cpm  $\neq$  cpm mínimo e curso = curso máximo da UB.

**A21** - “Redimensionar SBM reduzindo cpm e aumentando curso” - ocorre para diagnóstico D2 e para cpm  $\neq$  cpm mínimo da UB e curso  $\neq$  curso máximo da UB.

**A22** - “Reduzir cpm” - ocorre para os diagnósticos D3, D5, D7 e para cpm  $\neq$  cpm mínimo da UB.

**A23** - “Reduzir curso” - ocorre para os diagnósticos D3, D5, D7 e para cpm = cpm mínimo da UB e curso  $\neq$  curso mínimo da UB.

**A24** - “Colocar SBM sob regime” - ocorre para os diagnósticos D3, D5, D7 e para cpm = cpm mínimo da UB e curso = curso mínimo da UB.

- **Ações referentes a Aumentar curso/cpm**

**A25** - “Redimensionar SBM para curso maior” - ocorre para os diagnósticos D4, D6, D8, D15b, D16b e para curso = curso máximo da UB.

**A26** - “Não é possível aumentar curso ou cpm, substituir UB” - ocorre para os diagnósticos D4, D6, D8, D15b, D16b e para curso  $\neq$  curso máximo da UB e cpm = cpm máximo da UB.

**A27** - “Redimensionar SBM para cpm maior” - ocorre para os diagnósticos D4, D6, D8, D15b, D16b, para curso  $\neq$  curso máximo da UB, e cpm  $\neq$  cpm máximo da UB.

- **Ações referentes a Substituir UB**

**A28** - “Substituir UB” - ocorre para o diagnóstico D9.

- **Ações referentes a Substituir motor**

**A29** - “Substituir motor” - ocorre para o diagnóstico D22.

- **Ações referentes a Desparafrinar coluna de tubos**

**A30** - “Desparafrinar coluna de tubos (circular óleo quente)” - ocorre para os diagnósticos D10, D11, D12.

- **Ações referentes a Reduzir espaço morto**

**A31** - “Reduzir espaço morto (aumentar taxa de compressão)” - ocorre para os diagnósticos D19, D20, D21.

- **Ações referentes a Injetar inibidor de scale**

**A32** - “Injetar inibidor de corrosão” - ocorre para o diagnóstico D23.

#### 2.2.5.2.4 Armário de configuração do sistema

O sistema incorpora um conhecimento básico obtido a partir da experiência do autor. Por outro, lado as funções de pertinência, os limiares e as relevâncias utilizadas nos diversos agentes que constituem o sistema, representam um outro conhecimento que depende fundamentalmente da experiência operacional dos técnicos que utilizarão o mesmo.

Os valores referentes a esses parâmetros foram armazenados em um armário com as características indicadas na figura abaixo:

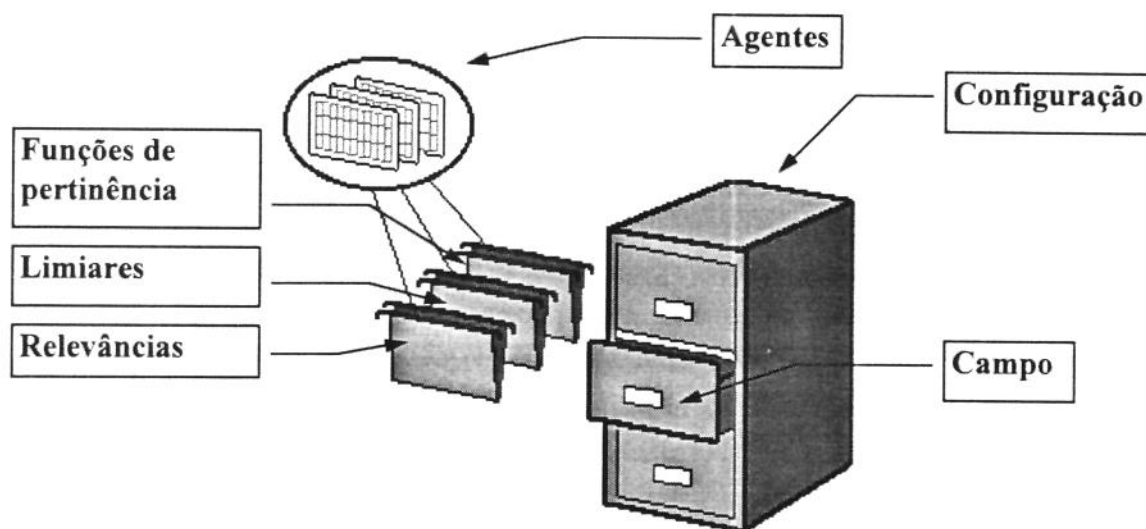


Figura 2-16 - Armário de configuração do sistema

Cada pasta é constituída por fichas do tipo planilha, sendo cada ficha correspondente a um agente, e cada célula da planilha correspondente a um nodo da RNS. Dessa forma a localização do limiar, relevância ou função de pertinência ficou bastante facilitada. Como mostrado na figura, é possível implementar configurações diferentes para cada campo, o que vem caracterizar ainda mais o sistema como contexto dependente.

#### 2.2.5.2.5 Armário de defaults

Segue a mesma filosofia do armário de configuração, portanto não será aqui descrito.

#### 2.2.5.2.6 Outros armários

Os dois outros armários do sistema, "Padr" e "Help" são parte integrante do Kards. O primeiro foi brevemente mencionado quando da descrição das RNS, já que nele são armazenadas as macros utilizadas nas mesmas.



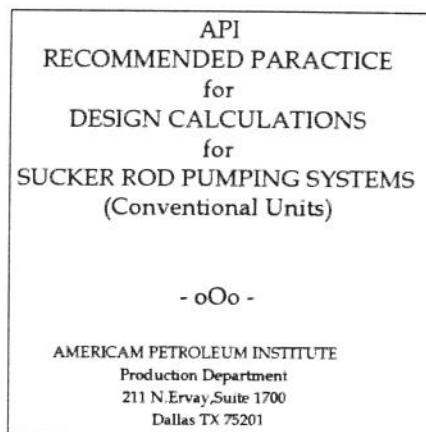
O armário denominado “help” contém os textos de ajuda do sistema, dentro da filosofia amplamente consagrada nos softwares comumente encontrados no mercado.

## 2.3 Modelos matemáticos utilizados

### 2.3.1 Estimativas do curso efetivo, dos esforços e da potência no SBM

Em 1954, um grupo de usuários e fabricantes de equipamentos para BM dos Estados Unidos da América, tomou para si o estudo em profundidade da maioria dos problemas associados a este método. Para controlar e direcionar o trabalho foi constituída uma organização sem fins lucrativos chamada Sucker Rod Pumping Research Incorporated. Para os trabalhos de pesquisa foram contratados os serviços do Midwest Research Institute de Kansas City USA [10].

Os resultados desse projeto foram cedidos pela Sucker Rod Pumping Research Incorporated para o American Petroleum Institute, que publicou dentre outras tantas, a norma (figura 24) para o dimensionamento e verificação de um SBM baseada nas correlações obtidas a partir de testes realizados durante a fase de pesquisa do projeto.

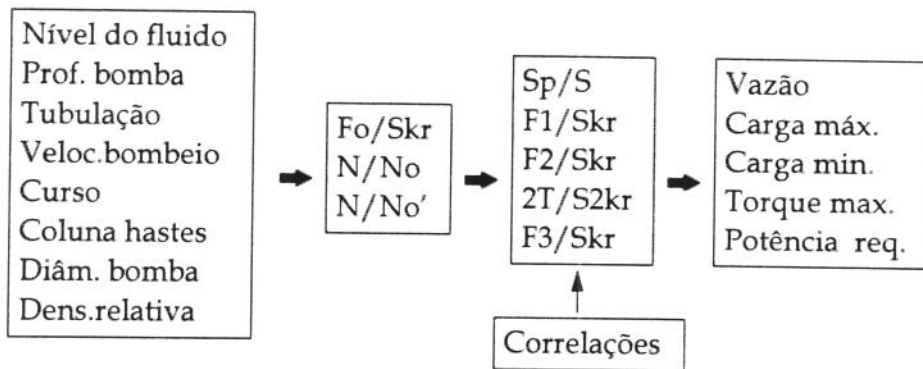


**Figura 2-17 - Norma API RP11L**

O método de dimensionamento adotado baseia-se na utilização de parâmetros adimensionais relacionados aos parâmetros físicos do SBM [4]:

|                              |        |
|------------------------------|--------|
| Curso efetivo do pistão      | - Sp   |
| Carga máxima na haste polida | - PPRL |
| Carga mínima na haste polida | - MPRL |
| Torque máximo                | - PT   |
| Potência na haste polida     | - PRHP |

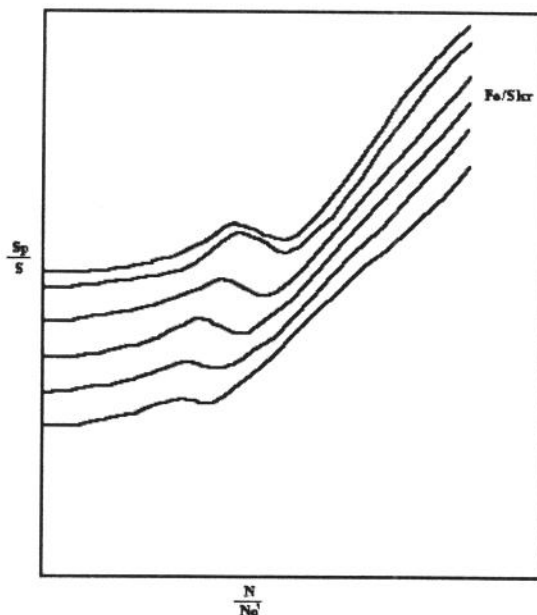
Para cada um dos parâmetros acima foram criados parâmetros adimensionais específicos cujos valores são obtidos de correlações matemáticas (figura 25):



**Figura 2-18 - Parâmetros da norma API RP11L**

As correlações estão colocadas em forma de gráficos:

- curso efetivo do pistão



**Figura 2-19 - Correlação para o curso efetivo do pistão**

- cargas na UB

Carga máxima:

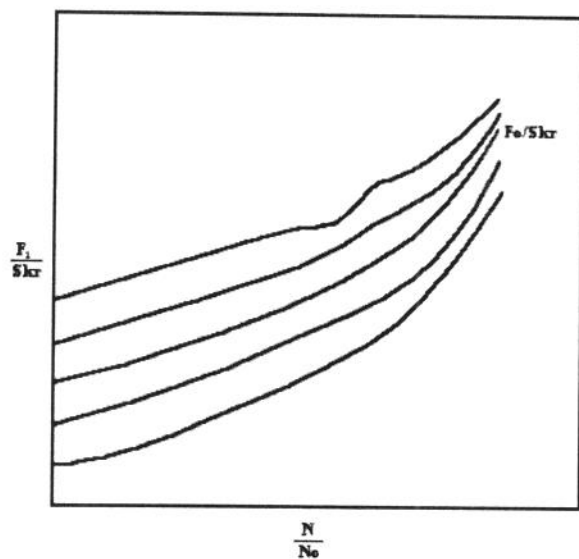


Figura 2-20 - Correlação para a carga máxima nas hastes

Carga mínima:

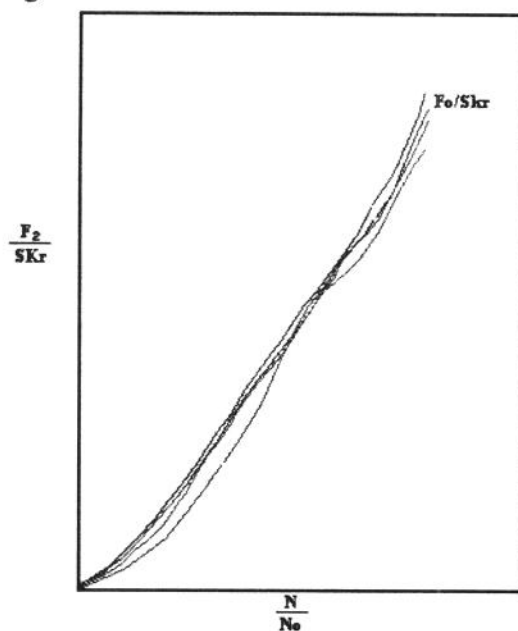


Figura 2-21 - Correlação para a carga mínima nas hastes

- Tensão nas HB

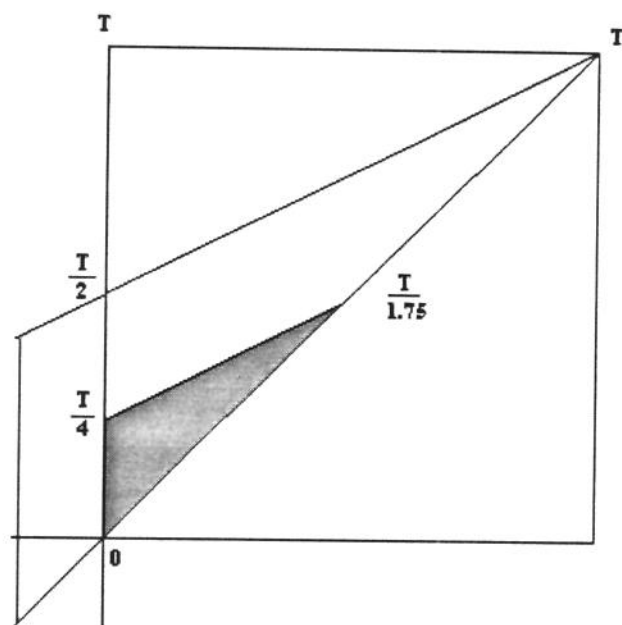


Figura 2-22- Diagrama de Goodman modificado

- torque máximo no redutor da UB

Torque máximo para  $Wrf/Skr = 0.3$ :

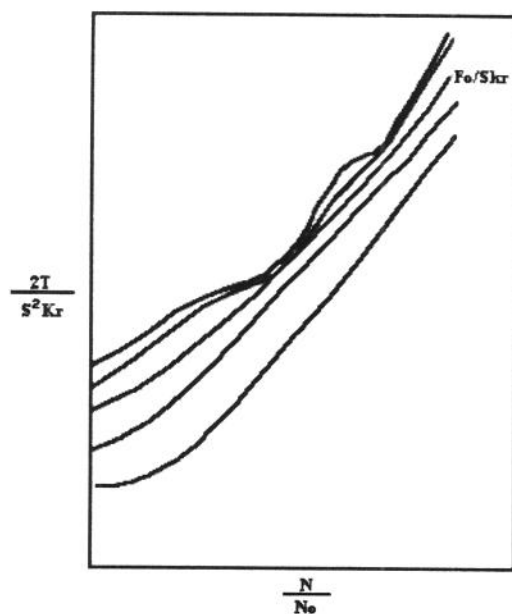
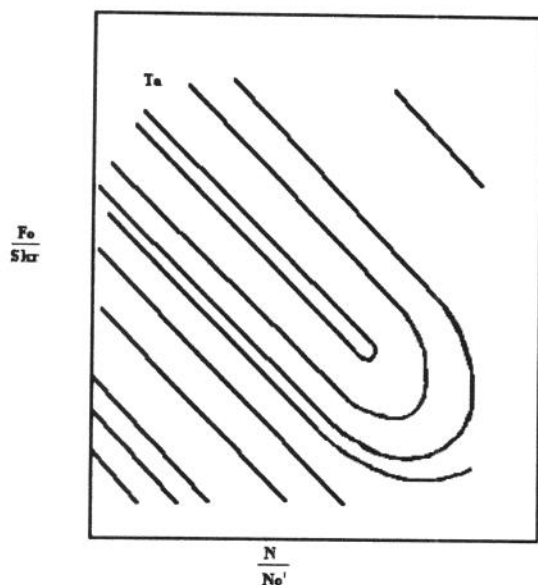


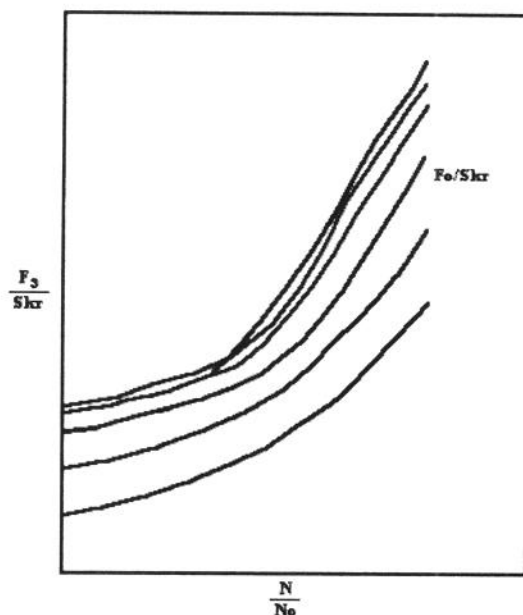
Figura 2-23 - Correlação para o torque máximo

- Correção do torque para  $Wrf/Skr \neq 0.3$



**Figura 2-24 - Correlação para o ajuste do torque**

- Potência requerida na cabeça da UB



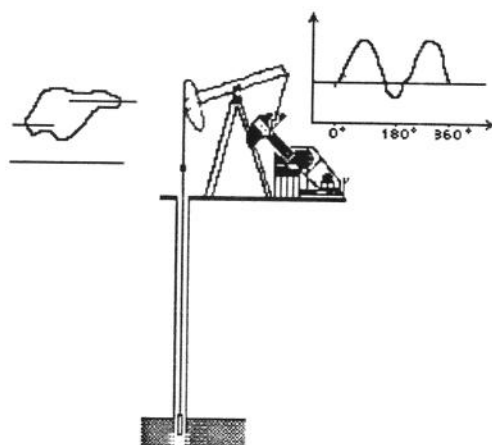
**Figura 2-25 - Correlação para a potência na cabeça da UB**

O procedimento descrito por essa norma foi codificado pelo autor em Visual Basic® em duas versões, com e sem interface com o usuário. A primeira é utilizada apenas para verificação e é transparente para o usuário, a segunda permite também o dimensionamento e interage com o usuário (item 2.5).

### 2.3.2 Esforços medidos

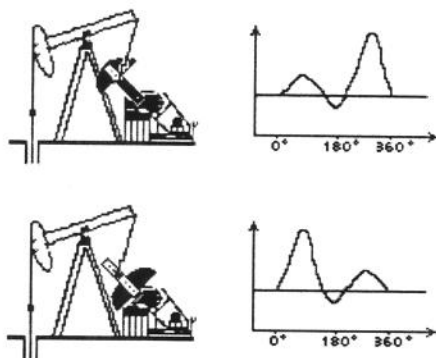
- curva de torque no redutor da UB;

A partir da CDS e das características mecânicas e operacionais do SBM é possível obter o valor do torque no redutor em cada ponto do ciclo de bombeamento, figura 2-26. Esta informação é importante na medida em que a partir dela é possível visualizar eventuais pontos do ciclo em que o torque no redutor ultrapassa o valor da capacidade ao torque do mesmo, figura 2-27.



**Figura 2-26 - Curva de torque no redutor**

Em função do posicionamento dos contrapesos da UB os picos da curva de torque podem ser deslocados indicando que o sistema está desbalanceado:

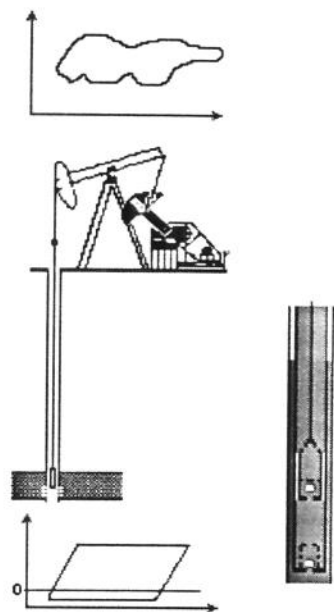


**Figura 2-27 - Curva de torque do redutor com desbalanceamento**

- Cálculo das cargas na profundidade da bomba

A partir da CDS e das características mecânicas e operacionais do SBM é possível obter também a CDF, a qual pode ser encarada como o sinal original de uma mensagem

enviada da bomba através das hastes até um receptor na superfície (dinamômetro ou célula de carga).



**Figura 2-28 - Cargas na profundidade da bomba**

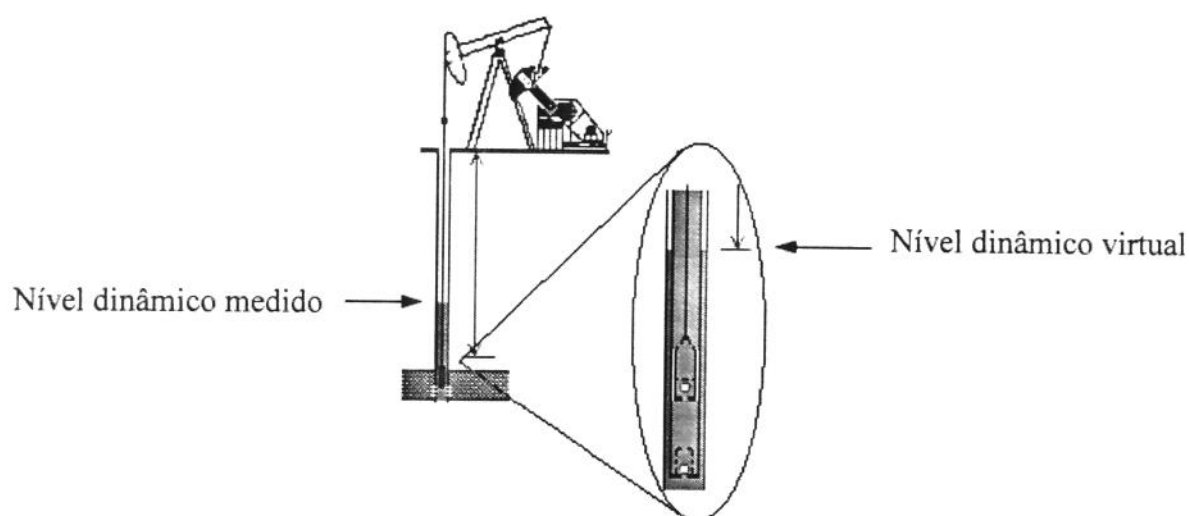
Tanto o cálculo do torque como das cargas na profundidade da bomba foram incorporados ao sistema através da utilização do programa em FORTRAN fornecido pelo Eng. Manuel Barreto Filho [5] para uso do SICAD.

**2.3.3 Pressão de fundo em fluxo**

O cálculo da pressão de fundo em fluxo está baseado na profundidade do nível do fluido no espaço anular entre o revestimento e a coluna de tubos, medida em geral através do uso de registradores acústicos de baixa precisão, e na vazão de gás estimada, ventilado do mesmo espaço anular, em geral através de balanço de massa. Essas informações, juntamente com a pressão no revestimento na superfície e a densidade do líquido e do gás, são utilizadas em correlações que permitem o cálculo aproximado da pressão em qualquer profundidade.

A pressão de fundo em fluxo é utilizada tanto para determinar a capacidade de produção do reservatório (IPR) como para verificar a submersão da bomba. Para que o bombeamento ocorra de forma eficiente é necessário que a bomba permaneça submersa no líquido. A determinação dessa submersão diretamente a partir da profundidade do nível medido é prejudicada pela interferência do gás que esta sendo ventilado já que o registrador é sensível à espuma. Por esta razão, definimos neste trabalho o conceito de nível dinâmico virtual, o qual é calculado a partir da pressão de sucção desconsiderando a presença de gás (item 2.5.1 ficha 28):



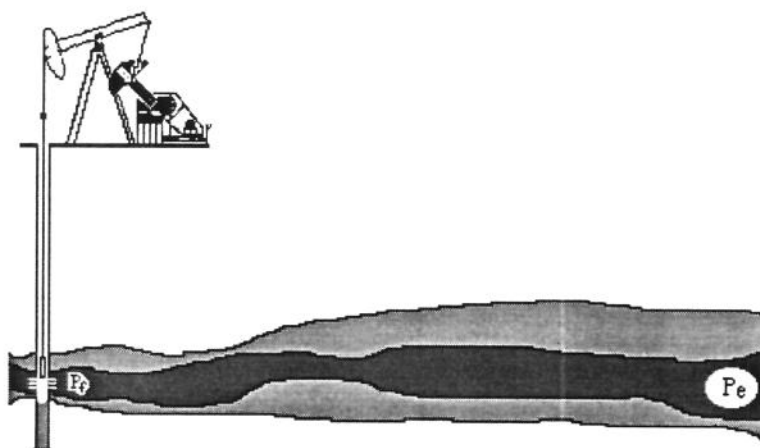


**Figura 2-29 - Nível dinâmico virtual**

O cálculo da vazão de gás no revestimento e da pressão de fundo em fluxo foram incorporados ao sistema através da adaptação para Visual Basic de rotinas escritas em FORTRAN cedidas pelo Eng. Attilio Alberto Triggia [45,46].

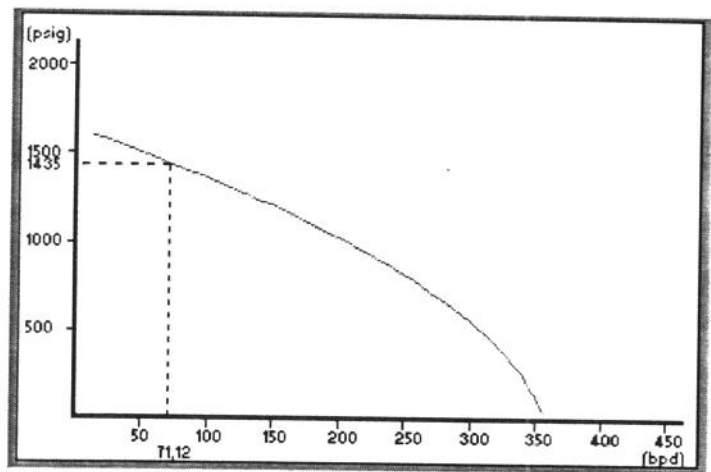
#### **2.3.4 Capacidade de produção do reservatório**

A maior ou menor facilidade com que o óleo e a água tem para fluir do interior do reservatório até o poço é expressa pela relação entre a vazão medida e o diferencial de pressão entre a pressão estática e a pressão de fluxo.



**Figura 2-30 - Diferencial de pressão no poço**

Essa relação é linear para fluido constituído predominantemente por líquido ou expressa por uma correlação [47] no caso de fluido gaseificado, figura abaixo.



**Figura 2-31 - Curva de performance do poço**

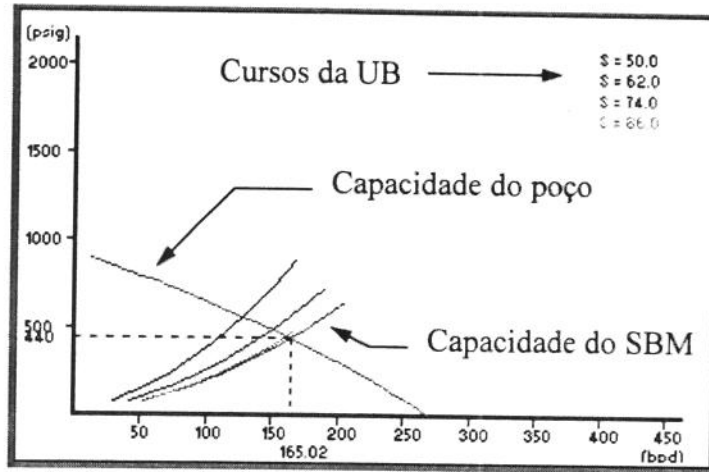
### 2.3.5 Análise nodal

A análise nodal é um procedimento já utilizado em outros métodos de elevação de petróleo, no entanto apenas recentemente começou a ser aplicado ao BM [3]. Sua utilização envolve grande quantidade de conceitos, a maioria representados por correlações de diversos autores.

Basicamente a análise nodal no BM pode ser encarada como a intersecção das curvas de capacidade do poço com a curva de capacidade do SBM. Em virtude da presença de gás no fluido bombeado, o SBM terá sua performance dependente da pressão de sucção na bomba, da qual também depende a performance do reservatório.

A capacidade do reservatório (poço) é representada pela curva de IPR (item acima). A capacidade do SBM é também representada por uma curva traçada nos mesmos eixos da IPR, cujos pontos representam a máxima vazão do SBM, dentro de uma faixa definida de velocidades de bombeamento, para cada curso da UB e para cada valor de pressão de sucção, figura 2-32.

O ponto de cruzamento entre as duas curvas representa o ponto de equilíbrio do sistema reservatório-SBM. Para esse ponto estarão portanto definidos: o curso e velocidade de bombeamento da UB, a pressão de sucção e a vazão (item 2.2.5.2.1 - ficha 28) .



**Figura 2-32 - Análise nodal**

O procedimento para a análise nodal foi também codificado pelo autor em Visual Basic® em duas versões. A primeira permite apenas aceitação ou recusa por parte do usuário, enquanto que a segunda permite uma interação bem maior, permitindo ao usuário alteração dos parâmetros do SBM [9].

## 2.4 Agentes externos

**S**ão definidas como agentes externos, os diversos objetos desenvolvidos especificamente para incorporar os modelos matemáticos necessários ao sistema e outros desenvolvidos para aumentar sua funcionalidade. Dentre estes, destacamos dois objetos que caracterizam cada um, aspectos que, apesar de não estarem relacionados diretamente com a análise propriamente dita, são recursos importantes como auxiliares na implementação das ações e no aperfeiçoamento dos técnicos:

- **Redimensionamento do SBM:** Este objeto foi desenvolvido especialmente para este trabalho em Visual Basic com o objetivo de permitir o redimensionamento do SBM sempre que necessário. Incorpora todos os procedimentos da norma API RP 11L e as facilidades de recursos gráficos.

**S I B O M - Redimensionamento[API RP 11 L]**

Arquivo Sobre...

**Unidade de Bombeio**

Cadastro de UB's

Cursos(pol.)

Velocidade de bombeio(spm).....=

Potência do motor(hp).....=

**Tubulação**

Tubos

☐ Ancorado ?

**Poço**

TESTE

**Resultados**

Torque Máx. - Capac. ao Torque da UB

Carga Máx. - Capac. Estrut. da UB

Pot.Requerida - Motor

Tensão Máx. - Tensão Adm.

Desloc.Volum. - Vazão desejada

**Hastes e Bomba**

Tabela 4.1

| Grau Haste | Fator Serviço | Bomba Tipo | Camisa (ft) | Profund. (m) |
|------------|---------------|------------|-------------|--------------|
| C          | 1             |            |             |              |

Fluido

| Grau API | BSW(%) | SGW  | Nível(m) |
|----------|--------|------|----------|
| 35       | 100    | 1.05 |          |

Vazão desejada(m3/d).....=

Efic. Volumétrica (%).....=

Permite alterar dados da Hastes e bomba(Tabela 4.1 da API RP11L).

10-24-1995 18:11.00

Figura 2-33 - Agente para redimensionar o SBM

- **Animações:** São diversos objetos, ao término da análise será ativado aquele relacionado à situação detectada no SBM. No caso, ao tempo da redação deste trabalho, apenas o objeto que representa a situação do bombeamento normal está disponível. O objetivo deste recurso é atender ao caracter tutorial do qual consideramos fundamental dotar o sistema.

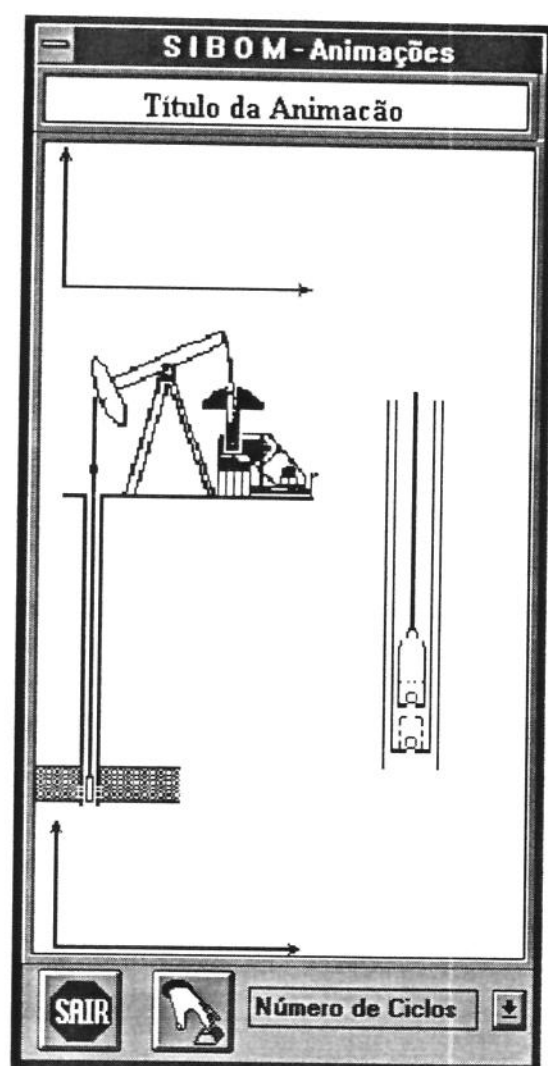


Figura 2-34 - Agente para animações

### 3. Implementação do sistema

#### 3.1 Base de dados

##### 3.1.1 Descrição

A estrutura base de dados utilizada no sistema foi desenvolvida a partir de duas fontes: a BC desenvolvida e o sistema SICAD. Alguns aspectos abordados na BC (item 2.7) exigiram dados inexistentes na BD atual do SICAD, por esta razão a mesma teve de sofrer alguns acréscimos.

Foram utilizados tres tipos de fichas: normal, planilha, texto. A seguir descrevemos o conteúdo definido para a BD na forma como foi codificado no sistema Kards:

Fichas

- 01-Identificação
- 02-Condições mecânicas<sup>10</sup>
- 03- Condições mecânicas (continuação)<sup>1</sup>
- 04-Unidade de bombeamento<sup>1</sup>
- 05-Fluido produzido
- 06-Registro de pressão estática<sup>1</sup>
- 07-Histórico de testes de produção<sup>1,11 2</sup>
- 08-Registro de nível dinâmico<sup>1,2</sup>
- 09-Histórico de Intervenções
- 10-Testes de pressurização<sup>2</sup>
- 11-Parâmetros aquisição
- 12-Constantes do MCI
- 13-Redes-MCI
- 14-Cartas Padrões
- 15-Classificação das cartas<sup>1,2</sup>
- 16-Diagnóstico da situação do poço
- 17-Comentários sobre os diagnósticos
- 18-Parâmetros da carta de superfície<sup>1,2</sup>
- 19-Parâmetros da carta de fundo
- 20-Carta de fundo - Pontos significativos
- 21-Aquisição-Scanner
- 22-Aquisição-MCI
- 23-Aquisição-Mesa Digitalizadora
- 24-Carta real de superfície<sup>1,2</sup>
- 25-Carta real de fundo
- 26-Carta de Torque
- 27-Norma API RP 11L
- 28-Análise nodal
- 29-Cargas estáticas teóricas e outros dados

<sup>10</sup> Contém dados fundamentais para análise.

<sup>11</sup> Contém dados perecíveis (vida útil é monitorada).

- 30-Blackboard
- 31-Ordem-Análise
- 32-Pendências
- 33-Carta de superfície - Pontos significativos

## **Ficha 01 - IDENTIFICAÇÃO**

- 1- POÇO:
- 2- ESTAÇÃO:
- 3- NÓ:
- 4- ZONA:
- 5-CAMPO:

## **FICHA 02 - CONDIÇÕES MECÂNICAS**

- 1- DATA:

### **• COLUNA DE PRODUÇÃO**

- 2- CÓDIGO:
- 3- QTDADDE:
- 4- D.INT(POL.):
- 5- PACKER(M):
- 6- TUBING ANCHOR(M):
- 7- SEPARADOR DE GÁS DE FUNDO(TIPO/NÃO):

### **• BOMBA DE FUNDO**

- 8- CÓDIGO API:
- 9- FOLGA(10E-3POL.):
- 10- PESCADOR (SIM/NAO):
- 11- PROFUNDIDADE (M):
- 12- ESPAÇO MORTO(POL.3):

### **• HASTES**

- 13- 1":
- 14- 7/8":
- 15- 3/4":
- 16- 5/8":
- 17- GRAU(C;D OU K):
- 18- CLASSE(1;2 OU 3):
- 19- FATOR SERVIÇO:
- 20- TIPO LUVA(E/D):

### **• HASTE POLIDA**

- 21- DIAMETRO(POL):
- 22- COMPRIMENTO(PES):



**Observação:**

1. Código da coluna: código-DE-tipo-peso linear-classe-DI-drift-torque máx-área da secção reta;
2. Código da bomba: código-DE-DI-tipo-camisa-niple sup.-niple inf.-vol.espaço morto com pescador-vol.espaço morto sem pescador-vol.niple ext.

**Ficha 03 - CONDIÇÕES MECÂNICAS (CONTINUAÇÃO)**

1- LIMPO ATÉ (M):

2- NA DATA:

• **REVESTIMENTO**

3- CÓDIGO:

4- DIÂMETRO INTERNO(POL):

5- SAPATA(M):

6- PEIXE(M):

7- CABECA DE PRODUÇÃO:

8- DESVIO EM RELAÇÃO VERTICAL(GRAUS):

• **PERFURADOS**

9- TOPO(M):

10- BASE(M):

**Observação:**

1. Código do revestimento: código-diâmetro nominal-peso linear-DI-drift-DE.

**Ficha 04 - UNIDADE DE BOMBEAMENTO**

1- CÓDIGO:

2- CURSO(POL):

3- VELOCIDADE DE BOMBEAMENTO(CPM):

4- POSIÇÃO DOS CONTRAPESOS:

5- MOMENTO MÁXIMO DE CONTRABALANCEIO (LB.IN):

6- DESBALANCEAMENTO ESTRUTURAL (LB):

• **MOTOR**

7- TIPO(E/D):

8- POTÊNCIA(HP):

9- CORRENTE NOMINAL(A):

**Observação:**

1. Código da UB: código-fabricante-modelo-torque máx-capacidade estrutural-curso máx .

**Ficha 05 - FLUIDO PRODUZIDO**

- 1- PRODUÇÃO BRUTA(M3/DIA):
- 2- BSW(%):
- 3- DENSIDADE RELATIVA DA ÁGUA:
- 4- GRAU API:
- 5- RGL(M3/M3):
- 6- DENSIDADE RELATIVA DO GÁS:
- 7- SALINIDADE(PPM):
- 8- HISTÓRICO DE PARAFINAÇÃO(S/N):
- 9- HISTÓRICO DE FORMAÇÃO DE SCALE(S/N):
- 10- PRESENÇA DE H2S(S/N):
- 11- PRESENÇA DE CO2(S/N):
- 12- PRESENÇA DE AREIA(S/N):
- 13- FATOR DE RATEIO:
- 14- VISCOSIDADE 1 (CP):
- 15- TEMPERATURA 1 (°F):
- 16- VISCOSIDADE 2 (CP):
- 17- TEMPERATURA 2 (°F):

**Ficha 06 - REGISTRO DE PRESSÃO ESTÁTICA**

- 1- PRESSÃO MEDIDA(KGF/CM2):
- 2- PROFUNDIDADE(M):
- 3- DATA DO REGISTRO:
- **DADOS DO RESERVATÓRIO**
- 4- TAXA DE DECLÍNIO(%):
- 5- PRESSÃO DE SATURAÇÃO(PSI):
- 6- TEMPERATURA DE FUNDO(F):

**Ficha 07 -Testes de produção(Ficha planilha)**

|            | DATA | Q (m³/d) | BSW(%) | PTUB(psi) |
|------------|------|----------|--------|-----------|
| 1          |      |          |        |           |
| 2          |      |          |        |           |
| 3          |      |          |        |           |
| 4          |      |          |        |           |
| 5          |      |          |        |           |
| 6          |      |          |        |           |
| 7          |      |          |        |           |
| Q_ATUAL    |      |          |        |           |
| Q_ANTERIOR |      |          |        |           |
| QAT/QANT   |      |          |        |           |

**FICHA 08 -Registros de nível dinâmico (Ficha planilha)**

|                | DATA | PR1(psi) | NÍVEL1(m) | PR2(psi) | NÍVEL2(m) | ΔT(min.) |
|----------------|------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
| 1              |      |          |           |          |           |          |
| 2              |      |          |           |          |           |          |
| 3              |      |          |           |          |           |          |
| 4              |      |          |           |          |           |          |
| 5              |      |          |           |          |           |          |
| 6              |      |          |           |          |           |          |
| 7              |      |          |           |          |           |          |
| ND atual       |      |          |           |          |           |          |
| ND anterior    |      |          |           |          |           |          |
| ND AT/AN       |      |          |           |          |           |          |
| Psuc/Pwft(psi) |      |          |           |          |           |          |
| Qg(m³/d)       |      |          |           |          |           |          |

**Observação:**

- Psuc - pressão de fundo em fluxo calculada na sucção da bomba;
- Pwft - pressão de fundo em fluxo calculada nos perfurados;
- Qg - vazão de gás ventilada no anular revestimento coluna de tubos.

**FICHA 09 -Histórico de Intervenções (Ficha planilha)**

|   | DATA | TIPO | DIAG | DATA I | MOT R | SIT A |
|---|------|------|------|--------|-------|-------|
| 1 |      |      |      |        |       |       |
| 2 |      |      |      |        |       |       |
| 3 |      |      |      |        |       |       |
| 4 |      |      |      |        |       |       |
| 5 |      |      |      |        |       |       |
| 6 |      |      |      |        |       |       |
| 7 |      |      |      |        |       |       |

#### **Ficha 10 - TESTES DE PRESSÃO**

- 1- PRESSURIZA NO CURSO ASCENDENTE(SIM/NÃO):
- 2- PRESSURIZA NO CURSO DESCENDENTE(SIM/NÃO):

- **AJUSTE DO ESPAÇO MORTO DA BOMBA**

- 3- CHECADO(SIM/NAO):
- 4- ESPAÇAMENTO ENTRE SV E TV (POL.):

- **VÁLVULA DE PROVA(KEROTESTE)**

- 5- POÇO ESTÁ PRODUZINDO? (SIM/NAO):
- 6- FLUXO COM GÁS? (SIM/NAO):

- **OBSERVAÇÕES SOBRE A ÁREA DO POÇO**

- 7- OBS:

- **ATUALIZAÇÃO DESTA FICHA**

- 8- DATA<sup>12</sup>:

#### **Ficha 11 - PARÂMETROS PARA AQUISIÇÃO DE CARTAS<sup>13</sup>**

- 1- SENSIBILIDADE: 1
- 2- PASSO X: 1
- 3- DG1: .31
- 4- DG2: .70
- 5- DG3: 1.5
- 6- DG4: 5.6
- 7- GRID X: 0.01
- 8- GRID Y: 0.01

---

<sup>12</sup> uso interno do sistema para controlar atualidade dos dados.

<sup>13</sup> uso interno do sistema para obter conjunto de pontos significativos da CDS ou CDF.

## **Ficha 12 - CONSTANTES PARA O MCI**

- 1- CARGA MÁXIMA ADMISSÍVEL (C<sub>MAXA</sub>):
- 2- CARGA MÍNIMA ADMISSÍVEL (C<sub>MINA</sub>):
- 3- CARGA MÍNIMA DE ALARME (C<sub>MINAL</sub>):
- 4- FOC ( C<sub>MAXFC</sub> - C<sub>MINFC</sub> ):
- 5- C<sub>PMMAX</sub>:
- 6- C<sub>PMMIN</sub>:

### **• CÁLCULO**

- 7- FOMINA ( X% FOC ):

### **• OUTROS DADOS**

- 8- CALIB. CARGA:
- 9- CALIB. CURSO:
- 10- CARGA ESTRUT. MAX:
- 11- CARGA ESTRUT. MIN:

## **Ficha 13 - PERCEPTRONS - MCI**

- 1:
- 2:
- 3:
- 4:
- 5:
- 6:
- 7:
- 8:
- 9:
- 10:
- 11:
- 12:
- 13:
- 14:

#### **Ficha 14 - PADRÕES(PERCEPTRONS)**

- **CARTA DE FUNDO**

1- PANCADA FLUIDO:

2- VAZ.VAL.PASSEIO:

3- VAZ.VALV.PÉ:

4- BLOQUEIO GÁS:

5- NORMAL:

6- INTERFER. GÁS:

6-

7-

8-

- **CARTA DE SUPERFÍCIE**

9: HASTE PARTIDA:

10: PISTÃO PRESO:

11:

12:

13-

14-

#### **Ficha 15 - CLASSIFICAÇÃO DA CARTA DE FUNDO(\*)**

1:

2:

3:

4:

5:

6:

7:

8:

9:

10:

- **ATUALIZAÇÃO DESTA FICHA**

11-DATA:

#### **Observação:**

1. Código da classificação: certeza@padrão|certeza@padrão|... .

Ficha 16 - DIAGNÓSTICO DA SITUAÇÃO DO POÇO

- 1:
- 2:
- 3:
- 4:
- 5:
- 6:
- 7:
- 8:
- 9:
- 10:

Observação:

1. Código do diagnóstico: Di/.../Ai/.../fim

Ficha 17 - COMENTÁRIOS SOBRE OS DIAGNÓSTICOS

- 1:
- 2:
- 3:
- 4:
- 5:
- 6:
- 7:
- 8:
- 9:
- 10:

Ficha 18 - Parâmetros da carta de superfície(Ficha planilha)

|    | DATA | S min.<br>(pol) | Curso<br>(pol.) | CPM | Cte. mola<br>(Lb/pol.) | DPI | PPRLm<br>(Lb) | MPRLm<br>(Lb) | Tvm<br>(Lb) | Svm<br>(Lb) |
|----|------|-----------------|-----------------|-----|------------------------|-----|---------------|---------------|-------------|-------------|
| 1  |      |                 |                 |     |                        |     |               |               |             |             |
| 2  |      |                 |                 |     |                        |     |               |               |             |             |
| 3  |      |                 |                 |     |                        |     |               |               |             |             |
| 4  |      |                 |                 |     |                        |     |               |               |             |             |
| 5  |      |                 |                 |     |                        |     |               |               |             |             |
| 6  |      |                 |                 |     |                        |     |               |               |             |             |
| 7  |      |                 |                 |     |                        |     |               |               |             |             |
| 8  |      |                 |                 |     |                        |     |               |               |             |             |
| 9  |      |                 |                 |     |                        |     |               |               |             |             |
| 10 |      |                 |                 |     |                        |     |               |               |             |             |

FICHA 19 - Parâmetros da carta de fundo(Ficha planilha)

|    | DATA | S min.<br>(pol) | Curso<br>(pol.) | CPM | Cte. mola<br>(Lb/pol.) | DPI | PPRLm<br>(Lb). | MPRLm<br>(Lb) | Tvm<br>(Lb) | Svm<br>(Lb) |
|----|------|-----------------|-----------------|-----|------------------------|-----|----------------|---------------|-------------|-------------|
| 1  |      |                 |                 |     |                        |     |                |               |             |             |
| 2  |      |                 |                 |     |                        |     |                |               |             |             |
| 3  |      |                 |                 |     |                        |     |                |               |             |             |
| 4  |      |                 |                 |     |                        |     |                |               |             |             |
| 5  |      |                 |                 |     |                        |     |                |               |             |             |
| 6  |      |                 |                 |     |                        |     |                |               |             |             |
| 7  |      |                 |                 |     |                        |     |                |               |             |             |
| 8  |      |                 |                 |     |                        |     |                |               |             |             |
| 9  |      |                 |                 |     |                        |     |                |               |             |             |
| 10 |      |                 |                 |     |                        |     |                |               |             |             |

Ficha 20 - PONTOS SIGNIFICATIVOS DA CARTA DE FUNDO

- 1:
- 2:
- 3:
- 4:
- 5:
- 6:
- 7:
- 8:
- 9:
- 10:

Observação:

- 1. Código dos pontos: xxx/yyy&...

Ficha 21- AQUISIÇÃO DE CARTAS - SCANNER

- 1- CÓDIGO DA CARTA:
- 2- CURSO:
- 3- CPM:
- 4- CONSTANTE DA MOLA:
- 5- DPI:

- PREPARA

- 6- DADOS:
- 7- FUNDEF:

- PROCESSAMENTO

- 8- PROCESSA CARTA:
- 9- MOSTRA CARTA DE SUPERFÍCIE:
- 10- INCORPORA CARTA DE SUPERFÍCIE?:



- 11- COMPRIME CARTA DE FUNDO:
- 12- INCORPORA CARTA DE FUNDO?:

## **Ficha 22 - AQUISIÇÃO DE CARTAS - MCI**

1- CÓDIGO DA CARTA:

- **ACIONA MCI**

- 2- CARTA DE SUPERFÍCIE:
- 3- CARTA DE FUNDO:
- 4- REFERENCIAS:
- 5- DIAGNÓSTICOS:
- 6- INCORPORA DADOS?:

## **Ficha23 - AQUISIÇÃO DE CARTAS - MESA**

1- CÓDIGO DA CARTA:

2- CURSO:

3- CPM:

4- CONSTANTE DA MOLA:

5- DPI:

- **PREPARA**

6- DADOS:

7- FUNDEF:

- **PROCESSAMENTO**

8- PROCESSA CARTA:

9- COMPRIME CARTA DE SUPERFÍCIE:

10- INCORPORA CARTA DE SUPERFÍCIE?:

11- COMPRIME CARTA DE FUNDO:

12- INCORPORA CARTA DE FUNDO?:

**Ficha 24 - CARTAS DINAMOMÉTRICAS DE SUPERFÍCIE**

- 1:
- 2:
- 3:
- 4:
- 5:
- 6:
- 7:
- 8:
- 9:
- 10:

**Ficha 25 - CARTAS DINAMOMÉTRICAS DE FUNDO**

- 1:
- 2:
- 3:
- 4:
- 5:
- 6:
- 7:
- 8:
- 9:
- 10:

**Ficha 26 - CARTAS DE TORQUE**

- 1:
- 2:
- 3:
- 4:
- 5:
- 6:
- 7:
- 8:
- 9:
- 10:

**Observação:**

- 1. As fichas acima contêm os pontos das referidas cartas. Itens de mesmo número referem-se à mesma carta dinamométrica.
- 2. Código dos pontos: xxx/yyy&... .

## **Ficha 27 - VERIFICAÇÃO PELA NORMA API RP11L**

- 1- PD(M3/D):
- 2- EV(%):
- 3- PTC(LB):
- 4- PPRLC(LB):
- 5- SMAX(PSI):
- 6- SMIN(PSI):
- 7- PRHP(HP):
- 8- NSN0:
- 9- NSN0L:
- 10- FOSKR:
- 11- OBSERVAÇÃO:

## **Ficha 28 - ANÁLISE NODAL**

### **• PRODUTIVIDADE DO RESERVATÓRIO (LINEAR/VOGEL)**

- 1- IPR(PSI/M2/D): .
- 2- QMAX.(M3/D):

### **• ANÁLISE NODAL**

- 3- VAZÃO POTENCIAL(M3/D):
- 4- PRESSÃO DE SUÇÃO REQUERIDA(PSI):
- 5- CPM:
- 6- CURSO(POL.):

### **• CONFIGURAÇÃO**

- 7- CPM MÍNIMO:
- 8- CPM MÁXIMO:
- 9- IPR LINEAR(SIM/NAO)(DEFAULT=VOGEL):

## **Ficha 29 - CARGAS ESTÁTICAS TEÓRICAS**

- 1- PESO DAS HASTES NO AR(LB):
- 2- EMPUXO SOBRE AS HASTES(LB):
- 3- CARGA NO TESTE DA VÁLVULA DE PASSEIO(LB):
- 4- CARGA NO TESTE DA VÁLVULA DE PÉ(LB):

### **• OUTROS DADOS**

- 5- PRESSÃO DE DESCARGA DA BOMBA(PSI):
- 6- NÍVEL DINÂMICO VIRTUAL(M)<sup>14</sup>:
- 7- PROFUNDIDADE IDEAL PARA BOMBA(M):
- 8- VISCOSIDADE MÉDIA DO FLUIDO(CP):

---

<sup>14</sup> Nível dinâmico teórico calculado a partir da pressão de sucção desconsiderando gás.

### Ficha 30 - BLACKBOARD

- 1- SITUAÇÃO DA UNIDADE DE BOMBEAMENTO:
- 2- SITUAÇÃO DO MOTOR DA UB:
- 3- SITUAÇÃO DA COLUNA DE HASTES:
- 4- TESTE DE PRODUÇÃO X VAZÃO POTENCIAL:
- 5- EFICIÊNCIA VOLUMÉTRICA:
- 6- POSIÇÃO DA BOMBA:
- 7- PRESSÃO DE SUÇÃO:
- 8- INTERFERÊNCIA DE GÁS NA BOMBA:
- 9- TAXA DE COMPRESSÃO DISPONÍVEL X REQUERIDA:
- 10- ATRITO NA COLUNA DE HASTES E BOMBA:
- 11- ACÚMULO DE PARAFINA NA COLUNA DE TUBOS:
- 12- SUÇÃO DA BOMBA OBSTRUIDA POR SCALE:
- 13- SUÇÃO DA BOMBA OBSTRUIDA POR AREIA:
- 14- CORROSÃO:
- 15- CLASSIFICAÇÃO DA CARTA DINAMOMÉTRICA:
- 16- CONFIANÇA DA CLASSIFICAÇÃO:

### Ficha 31 - ORDEM ANÁLISE

- **INDICAÇÃO DA ATUALIDADE DA BASE DE DADOS**
  - 1- BASE COMPLETA(SIM/NÃO):
  - 2- DATA DE REFERÊNCIA:
- **FLUXO DE ANÁLISE A SER SEGUIDO PELO SUPERVISOR\_1**
  - 3- 10/11/2/3/4/5/6/7/8/9/12/13/14/15/16
- **INDICAÇÃO DA ATUALIDADE DO BLACKBOARD**
  - 4- BLACKBOARD ATUALIZADO(SIM/NÃO):
- **INDICAÇÃO DA ATUALIDADE DA ANÁLISE DA CARTA DINAMOMÉTRICA**
  - 5- ITENS 15 E 16 DO BLACKBOARD ATUALIZADOS(SIM/NÃO):
- **FLUXO DE ANÁLISE A SER SEGUIDO PELO SUPERVISOR\_3**
  - 6-  
15&0.75/4&0.75/7&0.75/5&0.75/11&0.75/12&0.75/13&0.75/14&0.75/1&0.7  
2/4&0.75/3&0.75/fim
- **INDICAÇÃO DA ATUALIDADE DO DIAGNÓSTICO**
  - 7 - DIAGNÓSTICO ATUALIZADO(SIM/NÃO):

**Ficha 32 - PENDÊNCIAS**

Esta é uma ficha do tipo “texto” cuja função é conter as pendências relativas à Base de Dados.

**Observação:**

Exemplo de possível conteúdo:

&-Item 11 da Ficha CONDIÇÕES MECÂNICAS ->INEXISTENTE.&-Coluna 8 do Item 1 da Ficha PARÂMETROS DE CARTAS DE SUPERFÍCIE ->INEXISTENTE&-Coluna 9 do Item 1 da Ficha PARÂMETROS DE CARTAS DE SUPERFÍCIE ->INEXISTENTE

**Ficha 33 - PONTOS SIGNIFICATIVOS DA CARTA DE SUPERFÍCIE**

- 1:
- 2:
- 3:
- 4:
- 5:
- 6:
- 7:
- 8:
- 9:
- 10:

**Observação:**

- 1. Código dos pontos: xxx/yyy&...

3.1.2 Classificação dos dados

3.1.2.1 Dados independentes

São dados obtidos diretamente das características do poço. Dividem-se em :

3.1.2.1.1 Dados imprescindíveis

São dados que, se não existirem na BD, tornam a análise impossível de ser feita:

Tabela 3-1- Dados imprescindíveis

| Nome                                         | Localização              |
|----------------------------------------------|--------------------------|
| Código coluna de produção                    | Ficha 02-Item 2          |
| Código bomba de fundo                        | Ficha 02-Item 8          |
| Profundidade da bomba                        | Ficha 02-Item 11         |
| Hastes 1”                                    | Ficha 02-Item 13         |
| Hastes 7/8”                                  | Ficha 02-Item 14         |
| Hastes 3/4”                                  | Ficha 02-Item 15         |
| Hastes 5/8”                                  | Ficha 02-Item 16         |
| Fundo atual do poço                          | Ficha 03-Item 1          |
| Topo dos perfurados                          | Ficha 03-Item 9          |
| Base dos perfurados                          | Ficha 03-Item 10         |
| Pressão estática                             | Ficha 06-Item 1          |
| Profundidade do registro da pressão estática | Ficha 06-Item 2          |
| Vazão do teste de produção                   | Ficha 07-Item 2-coluna 2 |
| Profundidade do nível dinâmico               | Ficha 08-Item 2-coluna 3 |
| Teste de pressurização                       | Ficha 10-Itens 1 ou 2    |
| Data da última intervenção                   | Ficha 03-Item 2          |
| Diâmetro interno do revestimento             | Ficha 03-Item 4          |

### 3.1.2.1.2 Dados com default

São dados que, se não existirem na BD, é adotado um valor default.

**Tabela 3-2 - Dados com default**

| Nome                          | Localização              | Valor           |
|-------------------------------|--------------------------|-----------------|
| Pescador no pistão            | Ficha 02-Item 10         | “Sim”           |
| Grau da haste                 | Ficha 02-Item 17         | “C”             |
| Classe da hastes              | Ficha 02-Item 18         | 1               |
| Fator de serviço das hastes   | Ficha 02-Item 19         | 1               |
| Tipo de luva                  | Ficha 02-Item 20         | “D”             |
| Haste polida-diâmetro         | Ficha 02-Item 21         | 1.25            |
| Haste polida-comprimento      | Ficha 02-Item 22         | 18              |
| Desvio do poço                | Ficha 03-Item 8          | 0               |
| BSW(%) (1)                    | Ficha 07-Item 2-coluna 3 | Ficha 02-Item 2 |
| BSW(%) (2)                    | Ficha 02-Item 2          | 0               |
| Densidade rel. da água        | Ficha 05-Item 3          | 1.05            |
| Grau API do óleo              | Ficha 05-Item 4          | 35              |
| RGL                           | Ficha 05-Item 5          | 100             |
| Densidade rel. do gás         | Ficha 05-Item 6          | 0.75            |
| Histórico de parafinação      | Ficha 05-Item 8          | “Não”           |
| Histórico de scale            | Ficha 05-Item 9          | “Não”           |
| Presença de H <sub>2</sub> S  | Ficha 05-Item 10         | “Não”           |
| Presença de CO <sub>2</sub>   | Ficha 05-Item 11         | “Não”           |
| Presença de areia             | Ficha 05-Item 12         | “Não”           |
| Viscosidade 1                 | Ficha 05-Item 13         | 5               |
| Temperatura 1                 | Ficha 05-Item 14         | 70              |
| Viscosidade 2                 | Ficha 05-Item 15         | 4               |
| Temperatura 2                 | Ficha 05-Item 16         | 80              |
| Pressão de tubo na superfície | Ficha 07-Item 2-coluna 4 | 100             |
| Pressão no revestimento       | Ficha 08-Item 2-coluna 2 | 100             |
| Checamento do esp.morto       | Ficha 10-Item 3          | “Sim”           |
| Espaç. entre SV e TV          | Ficha 05-Item 4          | 1               |
| Volume do espaço morto        | Ficha 02-Item 12         | 10.4            |
| Separador de gás de fundo     | Ficha 02-Item 6          | “Não”           |
| Pressão de saturação          | Ficha 06-Item 5          | a ser definido  |
| Temperatura de fundo          | Ficha 06-Item 6          | grau geotérmico |

3.1.2.1.3 Dados “perecíveis”

São dados que tem vida útil limitada, e controlada pelo sistema.

Tabela 3-3 - Dados perecíveis

| Nome                   | Localização                          | Vida útil |
|------------------------|--------------------------------------|-----------|
| Teste de produção      | Ficha 07-Item 2-coluna 2             | 30 dias   |
| Nível dinâmico         | Ficha 08-Item 2-coluna 3             | 30 dias   |
| Teste de pressurização | Ficha 10-Itens 1 e 2                 | 15 dias   |
| Carta dinamométrica    | Ficha 24-Item 1 e<br>Ficha 18-Item 1 | 30 dias   |

Os valores de vida útil da tabela são valores exemplos. Cada área deve definir os prazos de validade de seus dados.

3.1.2.2 Dados “dependentes”

São dados obtidos a partir de cálculos realizados sobre dados “independentes” da BD. Os procedimentos de cálculo são executados por “macros” do Kards<sup>®</sup>, eventualmente, programas externos, e em alguns casos por objetos da BC.

Tabela 3-4 - Dados dependentes

| Nome                                                | Localização               |
|-----------------------------------------------------|---------------------------|
| Pressão de sucção                                   | Ficha 08-Item 11-coluna 1 |
| Vazão de gás no revestim.                           | Ficha 08-Item 12-coluna 1 |
| Padrões                                             | Ficha 14                  |
| Classificação da carta                              | Ficha 15                  |
| Diagnósticos                                        | Ficha 16                  |
| Parâmetros da carta superf.                         | Ficha 18                  |
| Carta dinamométrica superf.                         | Ficha 24                  |
| Carta dinamométrica fundo                           | Ficha 25                  |
| Carta de torque                                     | Ficha 26                  |
| Verif. pela norma APIRP11L                          | Ficha 27                  |
| Análise Nodal                                       | Ficha 28                  |
| Cargas teóricas                                     | Ficha 29                  |
| Blackboard                                          | Ficha 30                  |
| Indica existência do dados “imprescindíveis”        | Ficha 31-Item 1           |
| Data de referência dos dados “perecíveis”           | Ficha 31-Item 2           |
| Atualização do blackboard                           | Ficha 31-Item 4           |
| Atualização da classificação da carta dinamométrica | Ficha 31-Item 5           |
| Atualização do diagnóstico                          | Ficha 31-Item 6           |
| Pendências na BD                                    | Ficha 32                  |



## **3.2 Definição dos padrões para CDF e CDS**

O comportamento da carga vs. posição na CDF tende a refletir as condições de bombeamento presentes no SBM. A literatura (ver item 1.4.1) apresenta diversos padrões de CDF já identificados, cada qual associado a determinadas características do bombeamento. A existência dessas características pode ser confirmada analisando-se outras fontes de informação, em especial a BD do poço. Dessa forma é possível complementar a análise feita baseada apenas no reconhecimento de padrões, com a análise dos valores de determinados parâmetros obedecendo à heurística fornecida pelo especialista.

Em alguns casos, mais de um efeito está associado à CDF, apresentando a mesma uma forma que, em alguns trechos tende a representar um determinado problema e em outros um problema diferente.

A seguir apresentamos uma coleção de padrões compilados da literatura [23] e adaptados segundo a experiência do autor.

### **3.2.1 Efeitos isolados**

Nestes casos a forma da CDF indica que predomina um efeito principal, caracterizando apenas uma situação bem definida de bombeamento.

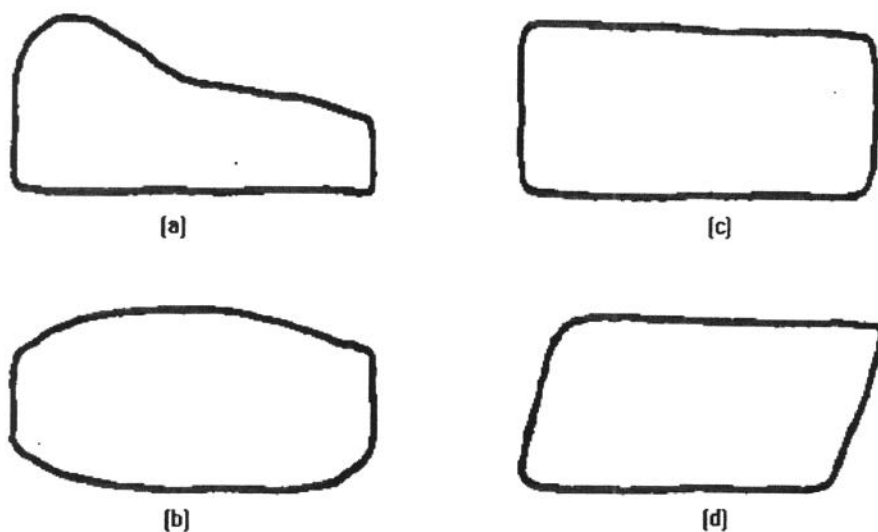
#### **3.2.1.1 Normal**

A depender de a coluna estar ancorada ou não, o bombeamento normal pode ser representado pela CDF como sendo um retângulo (figura 3-1b) ou um paralelogramo (figura 3-1d). Este padrão está associado às seguintes características:

1. Eficiência volumétrica alta (item 2. 7.2.1.7);
2. Baixa interferência de gás (item 2. 7.2.1.1);
3. Pressão de sucção baixa ou média (item 2.7.2.1.9);

Algumas variações podem ocorrer neste padrão (figura 3-1) cada qual com características adicionais próprias:

- (a) Normal com aceleração do fluido:  
Velocidade de bombeamento elevada;
- (b) Normal com atrito do fluido:  
Elevado atrito no sistema ( ver item 2.1.7.2.1.2);
- (c) Normal com coluna de tubos ancorada:  
Presença de dispositivo de ancoragem na coluna;
- (d) Normal com coluna não ancorada ou ancora falhando:



**Figura 3-1- Padrões de carta dinamométrica normal**

### 3.2.1.2 Pancada de fluido

Neste caso também, a depender de a coluna estar ancorada ou não, a CDF tende a apresentar uma determinada inclinação para a direita (figuras 3-2a, 3-2b, 3-2e). Este padrão está associado às seguintes características:

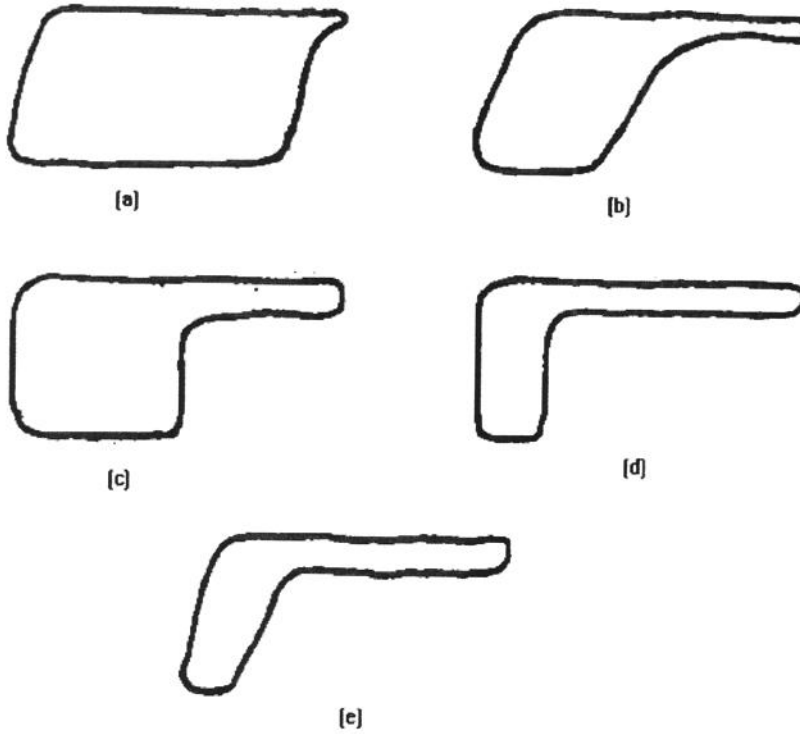
1. Baixa interferência de gás;
2. Pressão de sucção baixa;
3. Sucção da bomba obstruída por scale (item 2.7.2.1.12);
4. Sucção da bomba obstruída por areia (item 2.7.2.1.13);
5. Pressão de sucção alta associada com obstrução da sucção da bomba;

Variações possíveis neste padrão (figura 3-2) e suas características adicionais:

- (a) Pancada de fluido suave com coluna não ancorada:  
Eficiência volumétrica alta;
- (b) Pancada de fluido severa com coluna não ancorada:  
Eficiência volumétrica baixa;
- (c) Pancada de fluido severa com coluna ancorada;  
Eficiência volumétrica baixa;  
Presença de dispositivo ancorador na coluna;
- (d) Pump-off completo com coluna ancorada:  
Eficiência volumétrica bastante baixa;

Produção próxima de zero ou zero;  
Presença de dispositivo ancorador na coluna;

- (e) Pump-off completo com coluna não ancorada:  
Eficiência volumétrica bastante baixa;  
Produção próxima de zero ou zero;



**Figura 3-2 - Padrão para carta dinamométrica com pancada de fluido**

### 3.2.1.3 Interferência de gás

Neste caso a ancoragem da coluna de tubos tende a não influenciar significativamente a CDF.

Este padrão está associado às características:

1. Elevada interferência de gás;
2. Eficiência volumétrica baixa;

Variações possíveis neste padrão (figura 3-3):

- (a) Interferência de gás severa:  
Teste de pressurização negativo;  
Produção observada na superfície apresenta jato contínuo de óleo e gás;

(b) Interferência de gás moderada:

Teste de pressão indica dificuldade de pressurização;

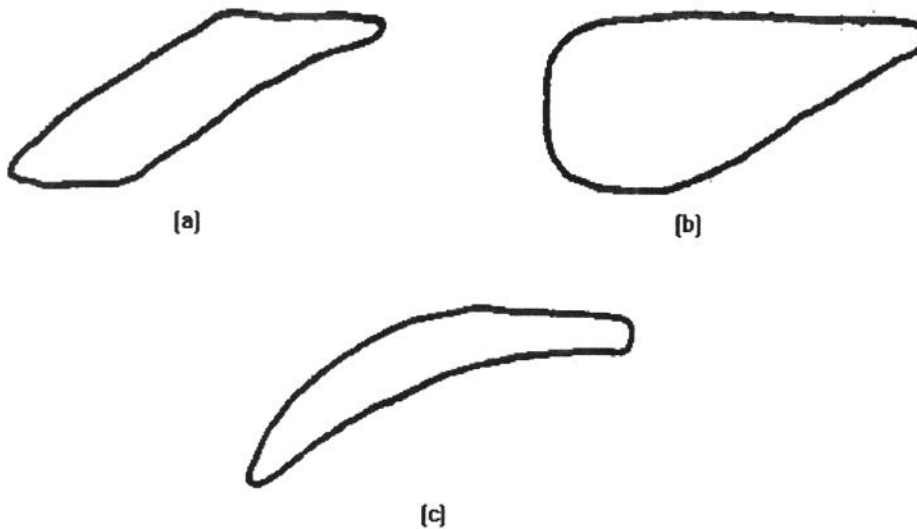
Produção observada na superfície apresenta jato golfadas de gás;

(c) Bloqueio de gás;

Ausência de produção;

Taxa de compressão baixa;

Nível dinâmico virtual na profundidade da bomba associado a pressão alta no revestimento na superfície;



**Figura 3-3 - Padrão para carta dinamométrica com interferência de gás**

#### **3.2.1.4 Vazamento nas válvulas**

A depender da profundidade da bomba e da coluna estar ancorada ou não, a CDF tende a apresentar distorção em seu lado esquerdo, em especial nos padrões referentes à vazamento na válvula de pé (figuras 3-4a, 3-4b, 3-4d, 3-4e). Este padrão está associado à:

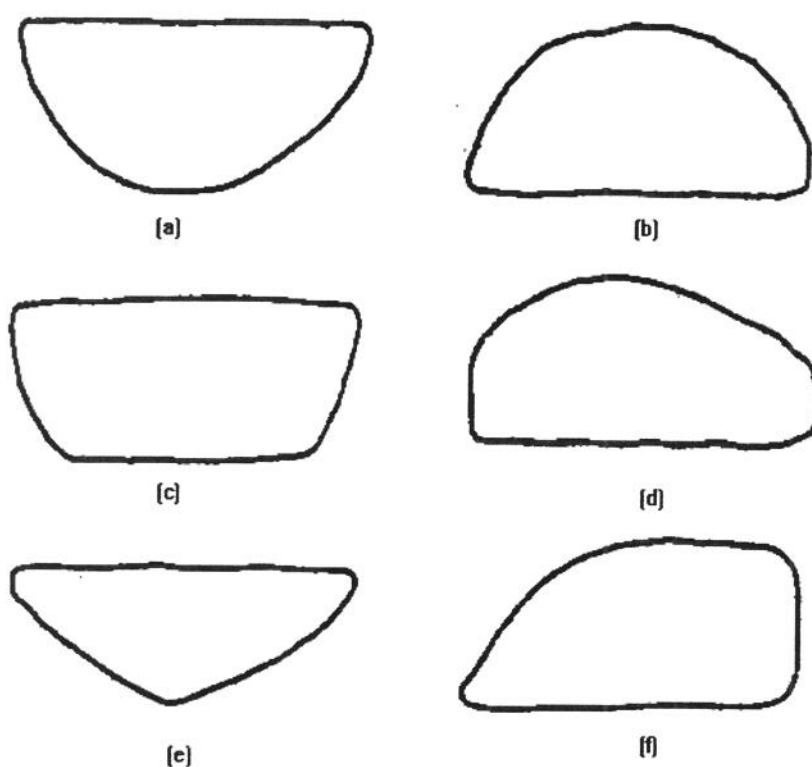
1. Teste de pressurização;
2. Baixa interferência de gás;

Variações possíveis neste padrão (figura 3-4):

(a,e) Vazamento severo na válvula de pé:

Teste de pressurização negativo no curso descendente;

- (b) Vazamento severo na válvula de passeio ou no pistão:  
Teste de pressurização negativo no curso ascendente;
- (c) Vazamento moderado na válvula de pé:  
Teste de pressurização negativo no curso descendente;
- (d) Vazamento moderado na válvula de passeio ou no pistão:  
Teste de pressurização negativo no curso ascendente;
- (f) Vazamento na válvula de passeio com coluna de tubos não ancorada:  
Teste de pressurização negativo no curso ascendente;

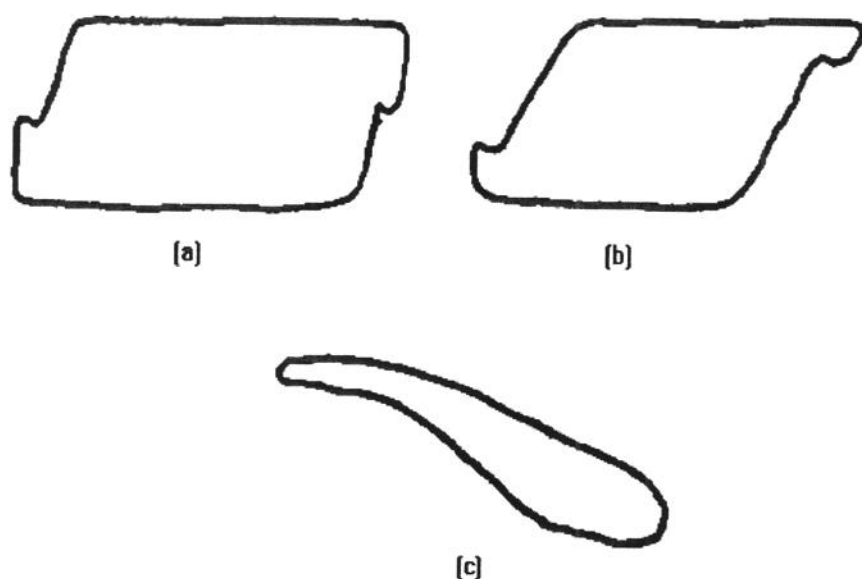


**Figura 3-4 - Padrão para carta dinamométrica com vazamento nas válvulas**

### 3.2.1.5 Problemas na coluna de tubos

Estes padrões são bastante específicos e, de maneira geral, apenas a forma da CDF é suficiente para o diagnóstico.

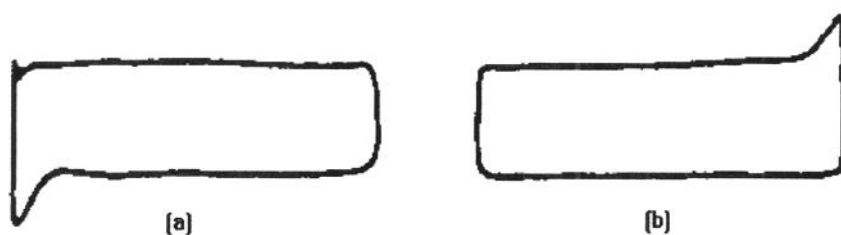
- (a,b) Ancoragem deficiente da coluna de tubos;
- ( c ) Ruptura na coluna de tubos;  
Este caso está associado à produção nula;



**Figura 3-5 - Padrão para carta dinamométrica com problemas na coluna de tubos**

### **3.2.1.6 Batidas na bomba**

Estes padrões também são bastante específicos e, de maneira geral, apenas a forma da CDF é suficiente para o diagnóstico. O primeiro (a) refere-se a batida no fundo e o segundo (b) à batida na parte superior da bomba (possível apenas nas bombas insertáveis).



**Figura 3-6 - Padrão para carta dinamométrica com batidas na bomba**

### 3.2.1.7 Pistão preso por areia

Este padrão está associado à:

1. Sucção da bomba obstruída por areia;
2. Produção nula;
3. Cargas elevadas;
4. Bomba posicionada próximo ao fundo;



**Figura 3-7 - Padrão para carta dinamométrica indicando pistão preso**

### 3.2.2 Efeitos superpostos

A existência de efeitos superpostos dificulta sobremaneira a classificação da CDF exigindo que a análise complementar ao reconhecimento de padrões seja bastante mais abrangente.

Cabe ressaltar que nestes casos praticamente não existem padrões com aplicação genérica. Cada área, ou mesmo cada campo deve apresentar seus padrões mais característicos, os quais serão identificados a medida que o processo de análise proposto neste trabalho seja implantado nas diversas áreas.

Os efeitos superpostos mais comuns estão relacionados com a interferência de gás e problemas na bomba ou nas hastes. Abaixo apresentamos alguns padrões divulgados pela literatura os quais nos pareceram adequados ao presente trabalho:

(a) Vazamento das válvulas e interferência de gás:

- Elevada interferência de gás;
- Eficiência volumétrica baixa;
- Teste de pressurização negativo;
- Pressão de sucção alta com submergência da bomba elevada;

(b,e) Vazamento das válvulas e bomba com desgaste moderado

- Tempo de uso prolongado;
- Eficiência volumétrica baixa;
- Teste de pressurização negativo;

Pressão de sucção alta com submergência da bomba elevada;  
Presença de areia no fluido produzido e ou;  
Presença de agentes corrosivos na fluido.

- (c,d) Desgaste total da bomba ou haste partida ou poço surgente:
- Cargas medidas com valor reduzido (mais característico na haste partida);
  - Pressão estática do reservatório elevada associada com RGL alta (característico do poço surgente);
  - Tempo de uso prolongado;
  - Eficiência volumétrica baixa;
  - Teste de pressurização negativo;
  - Pressão de sucção alta com submergência da bomba elevada;
  - Presença de areia no fluido produzido e ou;
  - Presença de agentes corrosivos na fluido.

**Nota:** As tres classificações podem apresentar a mesma forma

- (f) Vazamento da válvula de pé e interferência de gás:
- Elevada interferência de gás;
  - Eficiência volumétrica baixa;
  - Teste de pressurização negativo;
  - Pressão de sucção alta com submergência da bomba elevada;



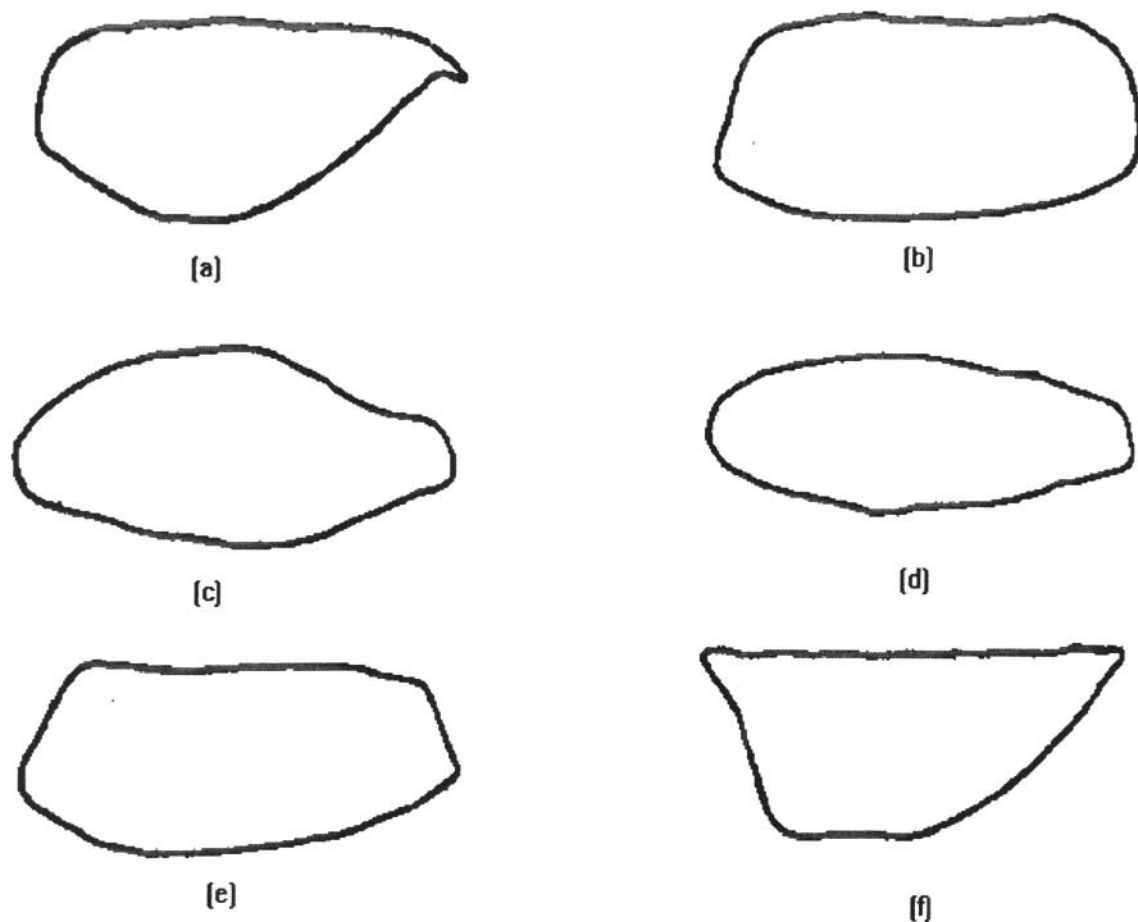


Figura 3-8 - Padrões para cartas dinamométricas com superposição de efeitos

### 3.2.3 Cargas na superfície

Estes padrões também são bastante específicos e, de maneira geral, apenas a forma da CDS é suficiente para o diagnóstico. Embora seja possível obter a correspondente CDF, a utilização da CDS nestes casos é mais recomendada, uma vez que o modelo matemático para o cálculo da CDF, além de desnecessário não leva em conta as características específicas desta situação.

#### 3.2.3.1 Pistão preso

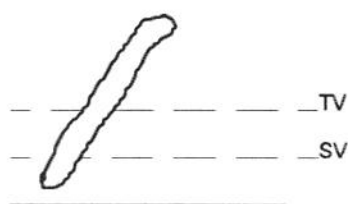


Figura 3-9 - Padrão para carta dinamométrica de superfície com pistão preso

3.2.3.2 Haste partida

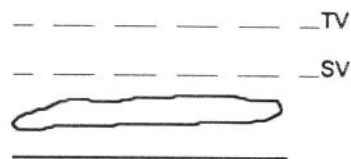


Figura 3-10 - Padrão para carta dinamométrica de superfície com haste partida

3.2.4 Comentários

A classificação da CDF (ou da CDS) em relação aos diversos padrões possíveis depende da eliminação daqueles que representam hipótese improváveis para a situação sob análise. Toda uma heurística própria deve ser utilizada para obter tal classificação. Atualmente, em função do uso ainda incipiente da CDF como instrumento de análise do SBM, ainda não existe um conhecimento empírico próprio em nossas áreas produtoras. Por esta razão foi necessário lançar mão das experiências relatadas na literatura e de análises teóricas como passo inicial para o desenvolvimento de “Know how” próprio.

Com o aumento da utilização da análise do SBM através de recursos sofisticados, como o proposto neste trabalho, a análise da CDF aí incluída, será possível desenvolver o “know-how” específico para cada área produtora. A progressiva incorporação desse conhecimento à sistemas inteligentes permitirá que a otimização do SBM seja facilmente alcançada.

### 3.3 Base de conhecimento

#### 3.3.1 Supervisores

##### 3.3.1.1 Supervisor 0:

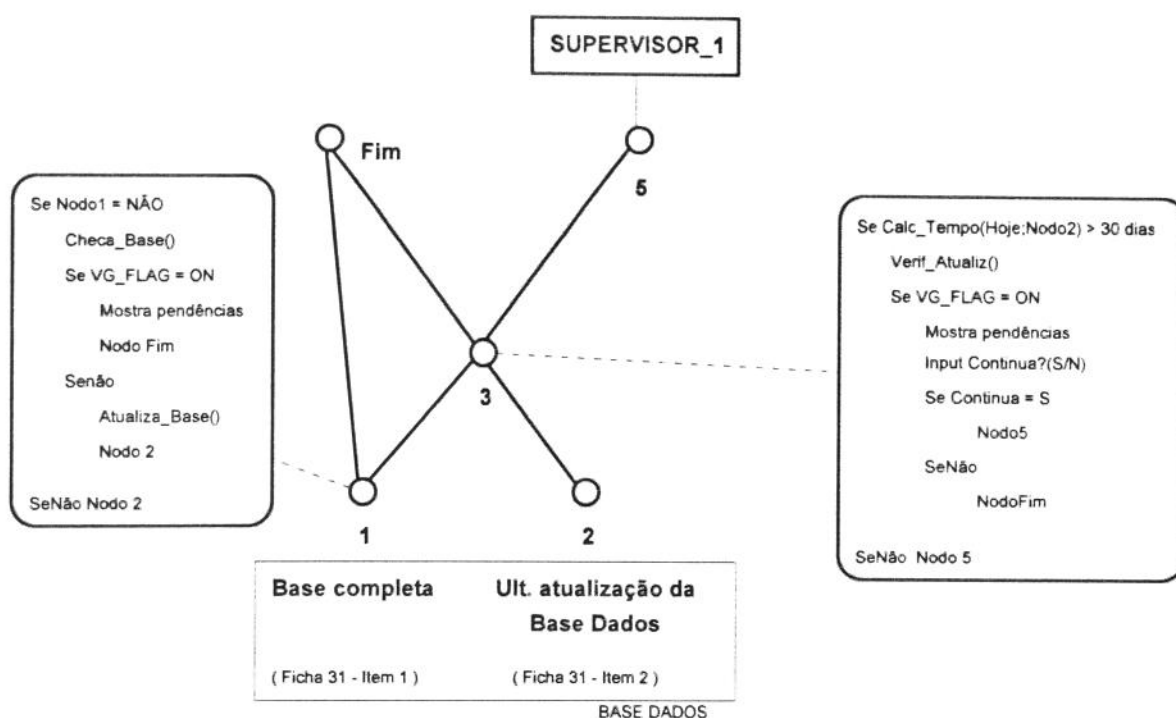
- Ao serem editados os itens da BD classificados como “imprescindíveis” (item 3.1.2.1.1), um método vinculado a cada item atualiza o item 1 da ficha 31 com o valor {NAO}. Este procedimento indica para o supervisor\_0 que a base de dados foi alterada, havendo portanto necessidade de verificar se existem condições para análise.
- Ao ser ativado, o SUPERVISOR\_0 verifica o valor atual do indicador de Base completa<sup>15</sup>. Se este for {NAO} o indicador da atualidade do BLACKBOARD<sup>16</sup> é setado para {NAO} e a macro responsável pela verificação dos itens “imprescindíveis” (*Checa\_Base( )*) é ativada. No caso da ausência de pelo menos um desses itens, o usuário é alertado e a análise abortada. Se a base estiver completa é feita a atualização dos dados dependentes (macro *Atualiza\_Base( )*) e o valor do item 1 da ficha 31 alterado para {SIM}. No caso do valor ser {SIM} é verificada a atualidade dos dados “perecíveis”.
- O item 2 da ficha 31 contém a data mais antiga de atualização dos dados “perecíveis”. Se o tempo decorrido entre essa data e a data atual for superior a 30 dias<sup>17</sup>, a macro responsável por verificar a atualidade dos dados é ativada (*Verif\_Atualiz( )*) e os dados desatualizados são apresentados ao usuário que é solicitado a continuar a análise ou abortá-la. O tempo decorrido entre a data de obtenção de cada um dos dados “perecíveis” e a data atual é calculado e os itens 1 e 2 da ficha 31 são atualizados, respectivamente com o valor {NAO} e a data de obtenção dos dados “perecíveis” mais antiga.

---

<sup>15</sup> Ficha 31 item 1 da BD.

<sup>16</sup> Ficha 31 item 4 da Base Dados.

<sup>17</sup> valor adotado como referência, valor real depende de definição do usuário.



**Figura 3-11 - Supervisor 0**

### 3.3.1.2 Supervisor 1:

- Verifica se o BLACKBOARD está atualizado( {SIM} no item 4 da ficha 31), se SIM transfere controle para o supervisor\_2.
- Ativa os agentes do grupo 1 de acordo com a ordem contida no indicador de fluxo de análise<sup>18</sup> da BD. Cada agente ativado registra sua mensagem no Blackboard (ficha 30 da BD) e devolve o controle para o supervisor 1.
- Ao terminar o fluxo de análise o indicador da atualidade do BLACKBOARD é setado para {SIM} e o controle é transferido para o supervisor 2.

<sup>18</sup> A ordem de análise esta contida no item 3 da ficha 31.

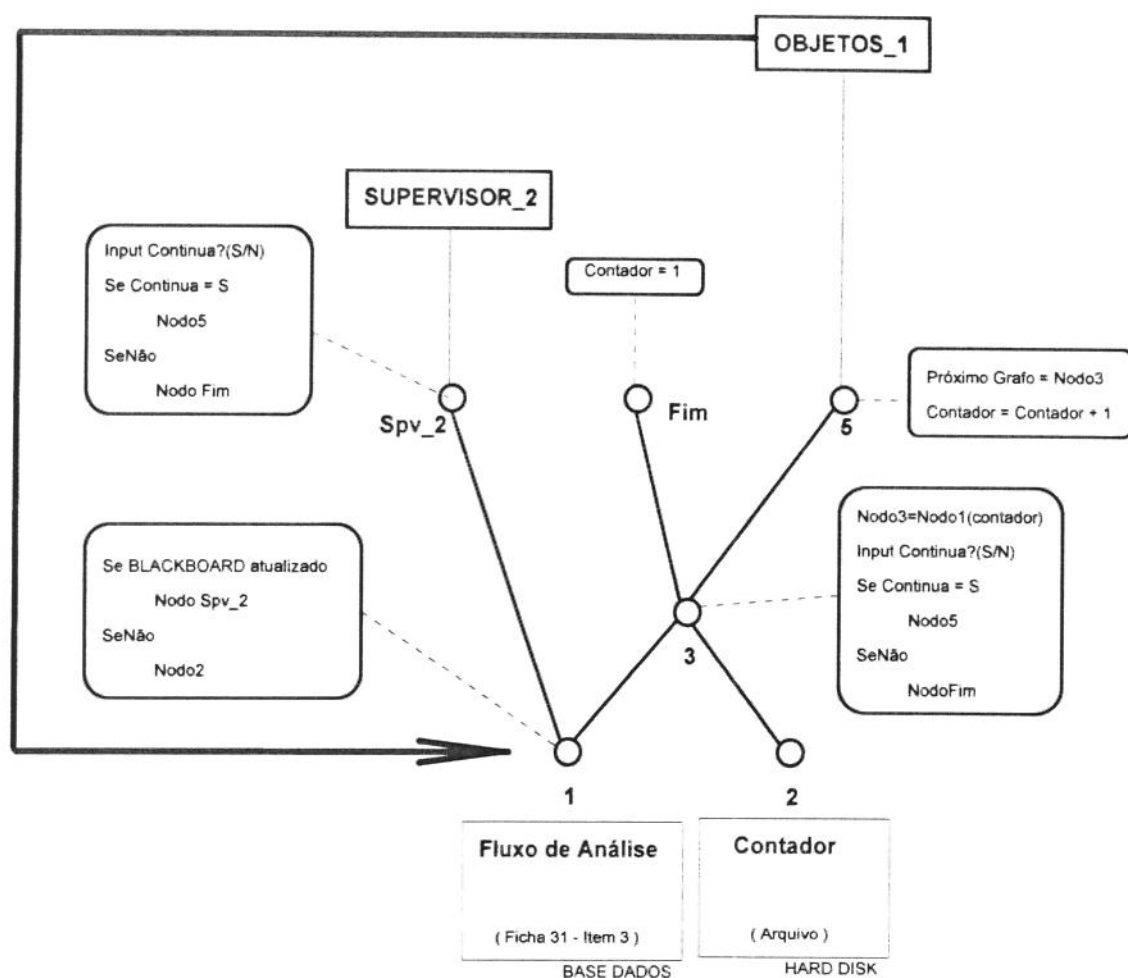


Figura 3-12 - Supervisor 1

### 3.3.1.3 Supervisor 2

- Verifica se os itens 15 e 16 do BLACKBOARD estão atualizados<sup>19</sup>, se SIM transfere o controle para o supervisor 3
- Lê a classificação da CDF e CDS no item 1 da ficha 15 e ativa os respectivos agentes do grupo 2. Cada agente calcula a certeza na sua hipótese e compara com o valor contido no item 16 do blackboard, caso seja superior atualiza o valor desse item.
- Após a ativação dos objetos passa o controle para o Supervisor 3.

<sup>19</sup> Item 5 da ficha 31.

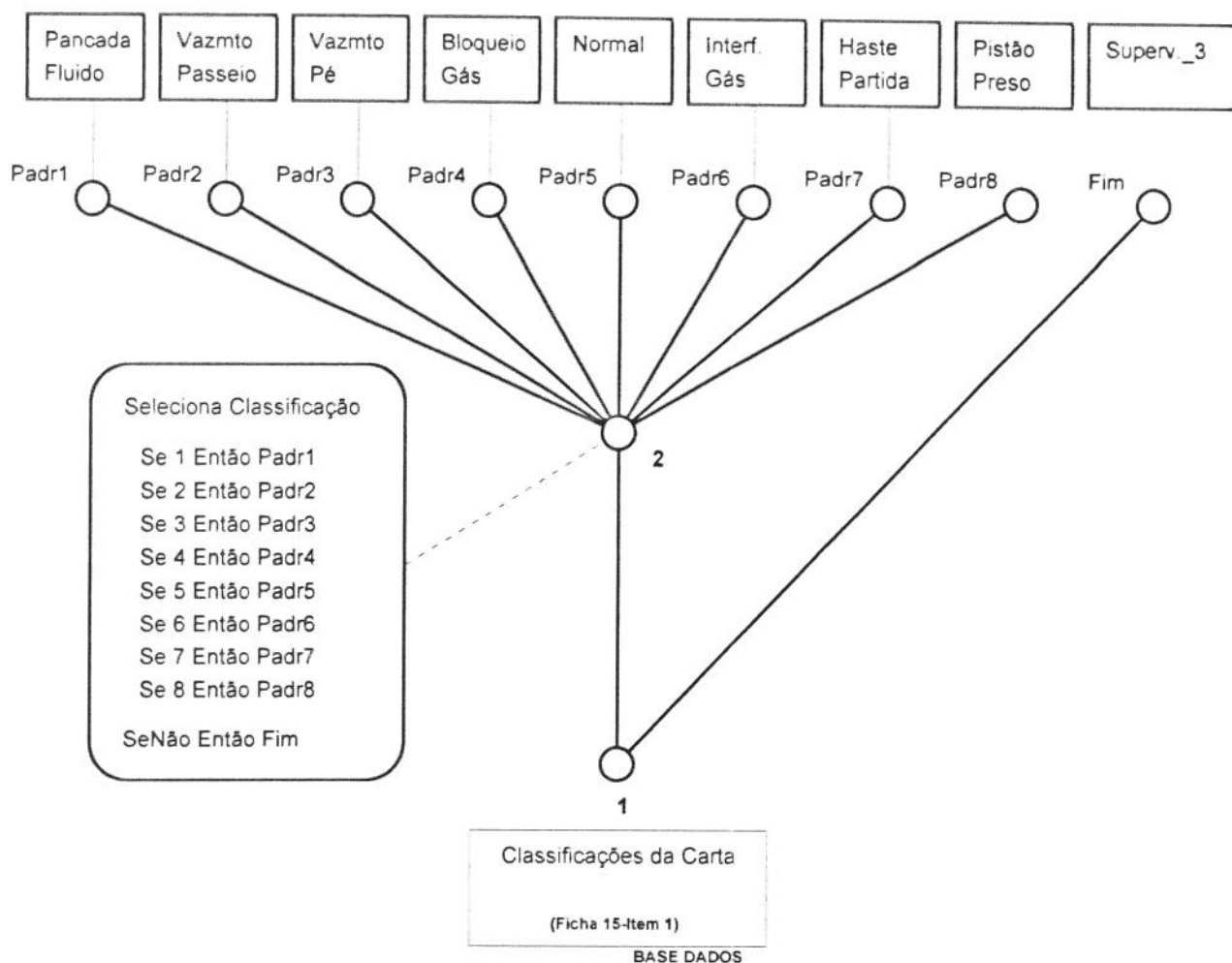


Figura 3-13 - Supervisor 2

#### 3.3.1.4 Supervisor 3:

- Verifica se o diagnóstico está atualizado<sup>20</sup>, se SIM não faz análise dos dados do BLACKBOARD e mostra o diagnóstico atual, se NAO,
- Lê no item 4 da ficha 31 a ordem de ativação e os correspondentes limiares de ativação dos agentes do grupo diagnóstico e ativa aqueles agentes cujo sintoma correspondente tenha valor de confiança superior ao limiar de ativação (supervisor 3a),
- Cada agente ativado retorna o código correspondente ao diagnóstico formando um conjunto de diagnósticos. Ao fim do ciclo de ativação dos agentes do grupo diagnósticos cada diagnóstico do conjunto é tomado como “trigger” para ativar os correspondentes agentes responsáveis pelas ações (Supervisor\_3b).

<sup>20</sup> Item 6 da ficha 31.

- Cada agente ativado retorna com o código da ação pertinente formando um conjunto de diagnósticos e ações correspondentes.
- Os códigos dos diagnósticos e ações são decodificados e um relatório é emitido.

### 3.3.1.4.1 Supervisor\_3a

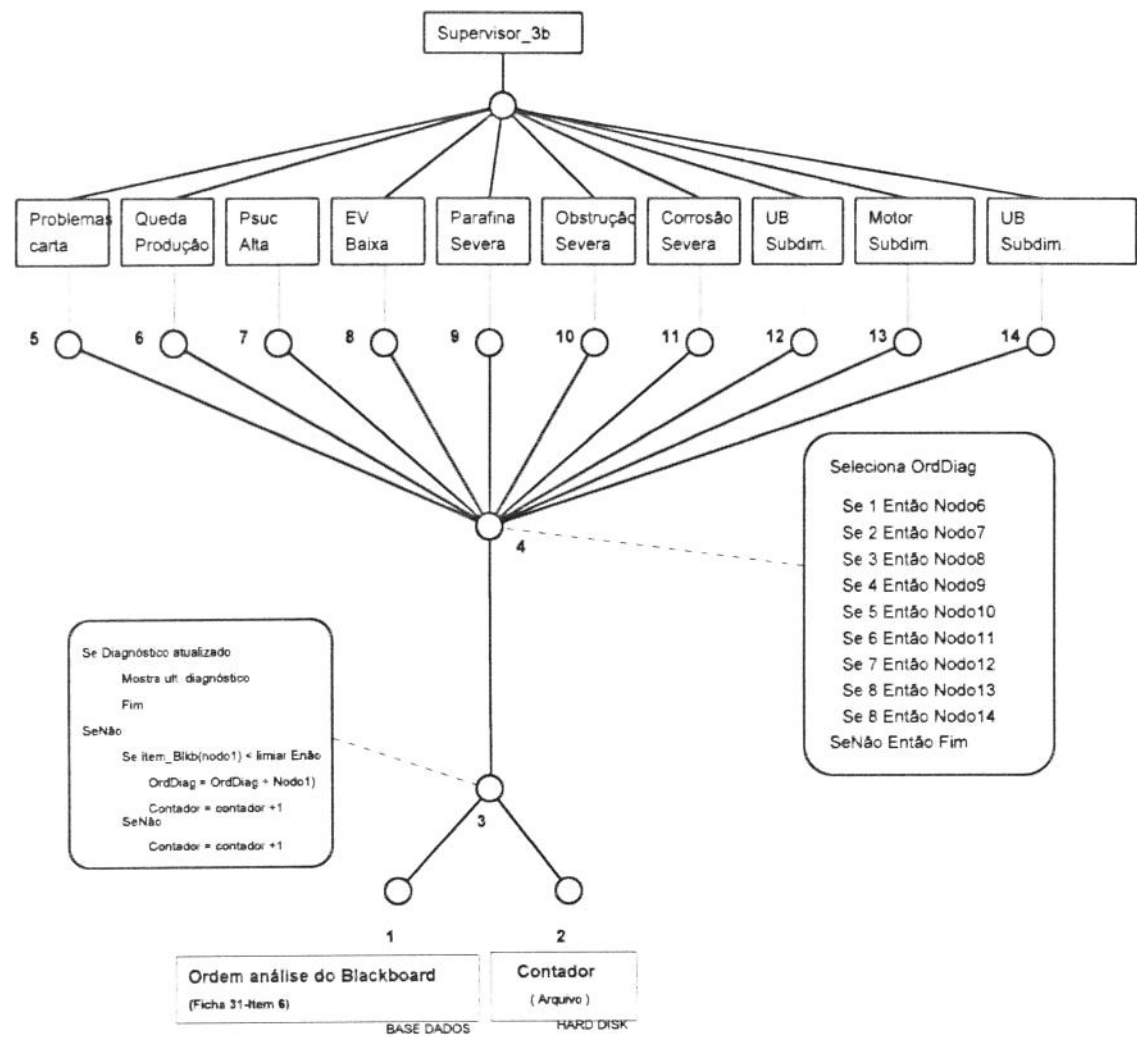


Figura 3-14 - Supervisor 3a

3.3.1.4.2 Supervisor\_3b

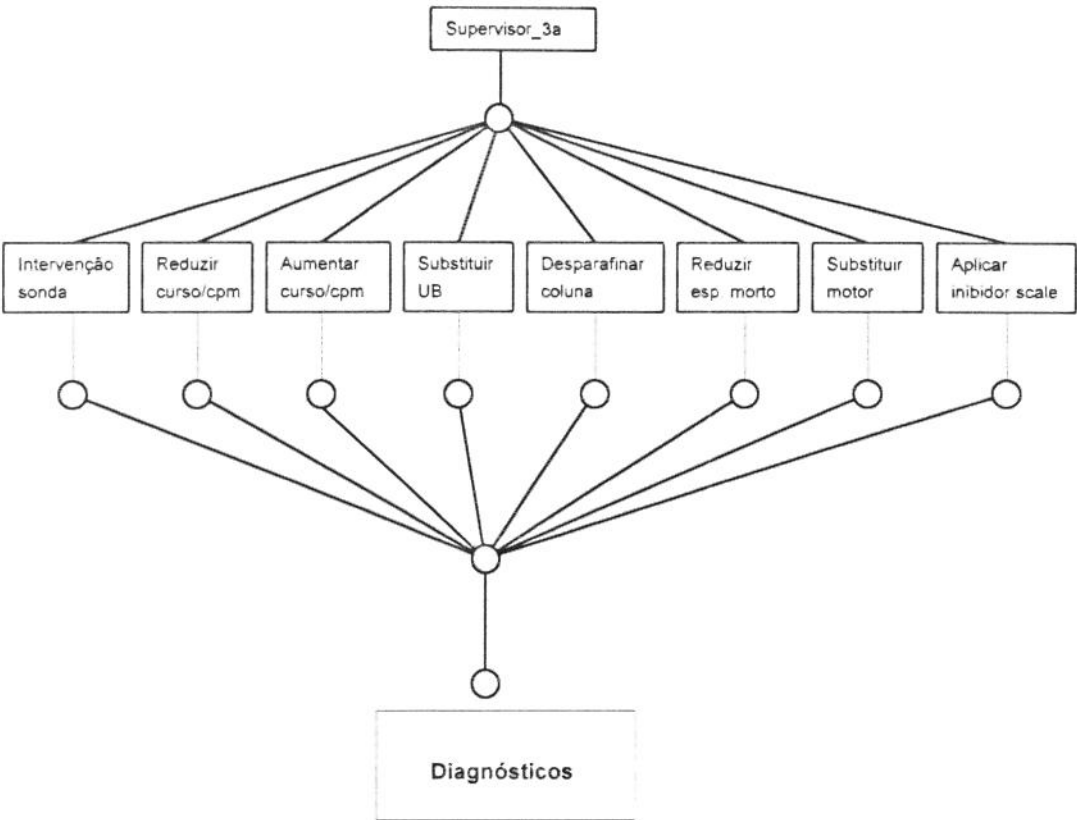


Figura 3-15 - Supervisor 3b

3.3.2 Agentes

3.3.2.1 Referentes aos sintomas

3.3.2.1.1 Interferência de gás

Este agente tem por função definir o valor de confiança na hipótese de interferência de gás severa no sistema.

A análise é feita a partir da comparação entre as cargas medidas na coluna de hastes na superfície e as correspondentes cargas calculadas. Estas últimas são calculadas para uma determinada densidade relativa do fluido no qual as hastes estão imersas. A diferença entre ambas permite concluir a respeito da densidade relativa real do fluido, e portanto classificar a severidade da interferência de gás. As cargas analisadas são as seguintes<sup>21</sup> : carga medida no teste da válvula de pé ( **SVm**) carga calculada para o teste da válvula

<sup>21</sup> Foram utilizadas cargas estáticas devido ao menor erro envolvido no cálculo dos parâmetros de referência.



de pé (SVc), carga medida no teste da válvula de passeio (TVm) , carga calculada para o teste da válvula de passeio (TVc; ). Além das cargas é também utilizada a informação sobre a quantidade de gás presente no fluido produzido (RGL).

A regra:

*“Se Svm é maior que Svc Então a interferência de gás é severa.”*

é representada pelos nodos 1, 2 e 3 da RNS da figura abaixo. A função de pertinência I fornece um valor de confiança intermediário para a hipótese de interferência de gás severa no nodo 3. Essa função representa o conceito de maior fornecido pelo especialista.

A regra:

*“Se Tvm é menor que Tvc Então a interferência de gás é severa.”*

é representada pelos nodos 4, 5 e 6. A função de pertinência II fornece outro valor de confiança (intermediário) para a hipótese de interferência de gás severa no nodo 6. Essa função representa o conceito de menor fornecido pelo especialista.

A regra:

*“Se Svm é maior que Svc E Se Tvm é menor que Tvc E RGL é alta Então a interferência de gás é severa.”*

é representada pelos nodos 3, 6, 7 e 8. A função de pertinência III representa o conceito de RGL alta fornecido pelo especialista e a média ponderada pelas relevâncias r3, r6 e r7 fornece o valor de confiança para a hipótese de interferência de gás severa, ou seja:

$$Interf\_Gas\_Severa = \frac{\mu\{Svm > Svc\} \cdot RelevSV + \mu\{Tvm < Tvc\} \cdot RelevTV + \mu\{RGL\} \cdot RelevRGL}{RelevSV + RelevTV + RelevRGL}$$

onde

$\mu\{Svm > Svc\}$ ,  $\mu\{Tvm < Tvc\}$  e  $\mu\{RGL\}$  são obtidas das funções de pertinência I, III e II respectivamente.

A representação dessas regras através de RNS assume a forma indicada na figura abaixo:

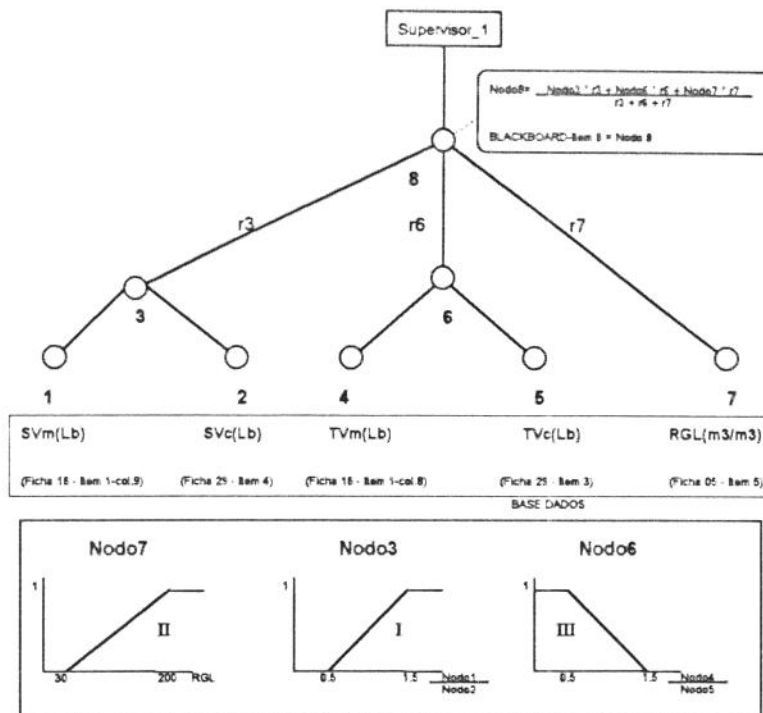


Figura 3-16 - Agente interferência de gás

### 3.3.2.1.2 Atrito

Os mesmos parâmetros de carga utilizados no objeto anterior, **Interferência de gás**, servem agora para determinar o atrito na coluna de hastes. O raciocínio é semelhante, apenas voltado para a hipótese de atrito severo:

A regra:

*“Se SVm é menor que SVc então o atrito é severo”;*

é representada pelos nodos 1, 2 e 3 da RNS da figura a seguir. A função de pertinência I fornece um valor de confiança intermediário para a hipótese de atrito severo no nodo 3. Essa função representa o conceito de menor, para este contexto, fornecido pelo especialista.

A regra:

*“Se TVm é maior que TVc então o atrito é severo”;*

é representada pelos nodos 4, 5 e 6. A função de pertinência II fornece outro valor de confiança (intermediário) para a hipótese de atrito severo no nodo 6. Essa função representa o conceito de maior, para este contexto, fornecido pelo especialista.

A regra:

*“Se  $SVm$  é menor que  $SVc$  e  $TVm$  é maior que  $TVc$  então o atrito é severo”;*

é representada pelos nodos 3, 6 e 7. A média ponderada pelas relevâncias  $r3$  e  $r6$ , representando a operação lógica **E**, fornece outro valor de confiança (intermediário) para a hipótese de atrito severo, ou seja:

$$AtritoSevero = \frac{\mu\{SVm < SVc\} \cdot RelevSV + \mu\{TVm > TVc\} \cdot RelevTV}{RelevSV + RelevTV}$$

onde

$\mu\{SVm < SVc\}$  e  $\mu\{TVm > TVc\}$  são obtidas das funções de pertinência I e II respectivamente, figura 3-17.

Se o valor de confiança atual na hipótese de atrito severo for maior que o limiar “A” fornecido pelo especialista, o valor de confiança é atribuído ao nodo 12 que atualiza o quadro de sintomas, Blackboard (ficha 30, item 2), caso contrário o desvio do poço é verificado:

Neste caso temos as regras:

*“Se o desvio do poço é grande então o atrito é severo”;*

a função de pertinência III representa o conceito de grande fornecido pelo especialista e permite obter o valor de confiança (intermediário) para a hipótese de atrito severo,

*“Se  $SVm$  é maior que  $SVc$  e  $TVm$  é maior que  $TVc$  E o desvio do poço é grande Então o atrito é severo”;*

são representadas pelos nodos 7, 8 e 9. A média ponderada pelas relevâncias  $r7$  e  $r8$ , representando novamente a operação lógica **E**, fornece novo valor de confiança para a hipótese de atrito severo, ou seja:

$$AtritoSevero = \frac{\mu|Nodo7 \cdot RelevNodo7 + \mu|Desvio \cdot RelevDesvio}{RelevNodo7 + RelevDesvio}$$

onde

$\mu|Nodo7$  é o valor de confiança obtido acima e  $\mu|Desvio$  é o valor de confiança obtido da função de pertinência III, figura 3-17.

Se o novo valor de confiança hipótese de atrito severo, for maior que o limiar “B” fornecido pelo especialista, seu valor é atribuído ao nodo 12 que atua como acima, caso contrário, o histórico de parafina é verificado.

Caso não exista histórico de parafinação da coluna, o valor atual de confiança é atribuído ao nodo 12. Caso exista histórico, é adotado um valor de confiança obtido a partir da

função de pertinência “IV” para um tempo arbitrado (configurável pelo usuário) de 6 meses. O valor resultante é atribuído ao nodo 12.

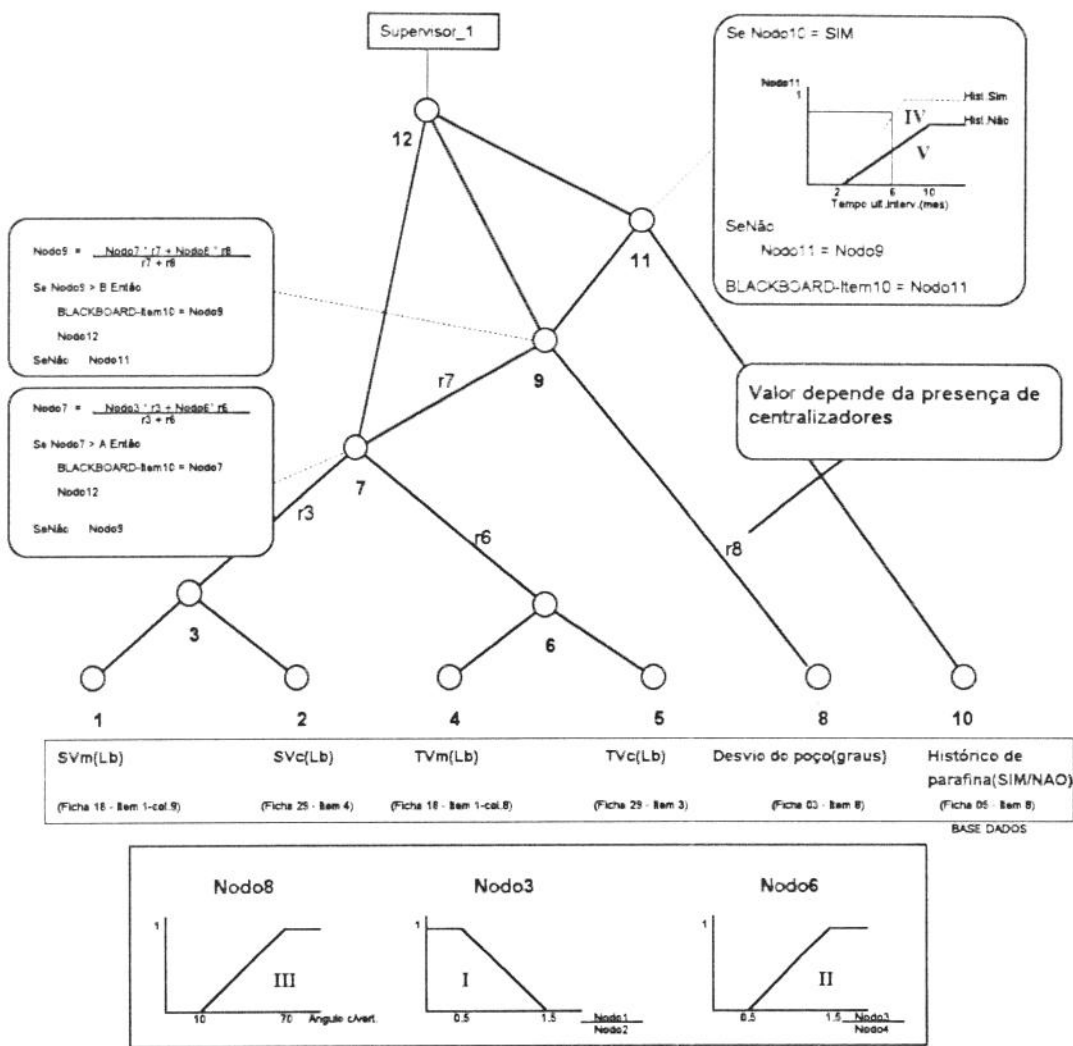


Figura 3-17 - Agente Atrito

### 3.3.2.1.3 Unidade de bombeamento

Cada unidade de bombeamento (UB) possui um valor limite de carga para que possa operar em condições seguras, esse valor é denominado "Capacidade estrutural". Os valores para as UB hoje em uso são os seguintes em 100Lb:

67 - 89 - 109 - 133 - 143 - 200 - 213 - 256 - 305

Da mesma forma ocorre para o torque, esse valor é denominado "Capacidade ao Torque". Os valores para as UB hoje em uso são os seguintes em 1000LbPol.

Este agente faz a análise a partir de diversos parâmetros do sistema e conclui sobre a hipótese UB subdimensionada.

A análise é feita a partir da comparação entre a carga máxima calculada pela norma API RP11L (**PPRLc**) e capacidade estrutural (**CapEst**) e o torque máximo calculado pela mesma norma (**PTc**) e a capacidade ao torque (**CapTorq**). A interferência de gás e o atrito são considerados com o objetivo de compensar a não adequação da norma para situações de elevado atrito e elevada interferência de gás.

A regra:

*“Se PPRLc é maior que CapEst E o atrito é alto Então a UB esta subdimensionada.”*

é representada pelos nodos 1, 2, 3 e 7 da RNS da figura 3-18 abaixo. Em função do valor de confiança na hipótese de atrito severo (item 3.3.2.1.2) é selecionada a função de pertinência (I, II, III) que representa o conceito de maior para este caso. A operação lógica **E** nesta regra está representada pela escolha da função de pertinência que representará o conceito de maior.

A regra:

*“Se PPRLc é maior que CapEst E a interferência de gás é baixa Então a UB esta subdimensionada.”*

é representada pelos nodos 4, 5, 6 e 8. De forma semelhante, em função do valor de confiança na hipótese de interferência de gás severa (item 3.3.2.1.1) é selecionada a função de pertinência (IV, V, VI) que representa o conceito de maior para este caso. A operação lógica **E** nesta regra está representada pela escolha da função de pertinência que representará o conceito de maior.

A junção das regras acima é feita através da média ponderada pelas relevâncias definidas respectivamente para o atrito e interverência de gás, a qual representa a operação lógica **E\*** (nodo 9).

*“Se PPRLc é maior que CapEst E o atrito é alto E\* a interferência de gás é baixa Então a UB está subdimensionada.”*

Raciocínio idêntico é feito para o torque máximo nos nodos 4, 5, 6, 10, 11, 12.

A regra:

*“Se  $PPRLc$  é maior que  $CapEst$  E o atrito é alto  $E^*$  a interferência de gás é baixa OU Se  $PTc$  é maior que  $CapTorq$  E o atrito é alto  $E^*$  a interferência de gás é baixa Então a UB está subdimensionada.”*

é representada no nodo 13 onde o nodo 9 contém o valor referente a parte da regra anterior à operação lógica **OU** e o nodo 12 a parte posterior. Para representar esta operação foi escolhida a operação de máximo ou seja:

$$UB \text{ subdimensionada} = \text{Max}[ \mu|\text{Nodo 9} , \mu|\text{Nodo 12} ]$$

onde

$\mu|\text{Nodo 9}$  e  $\mu|\text{Nodo 12}$  são obtidas como descrito acima.

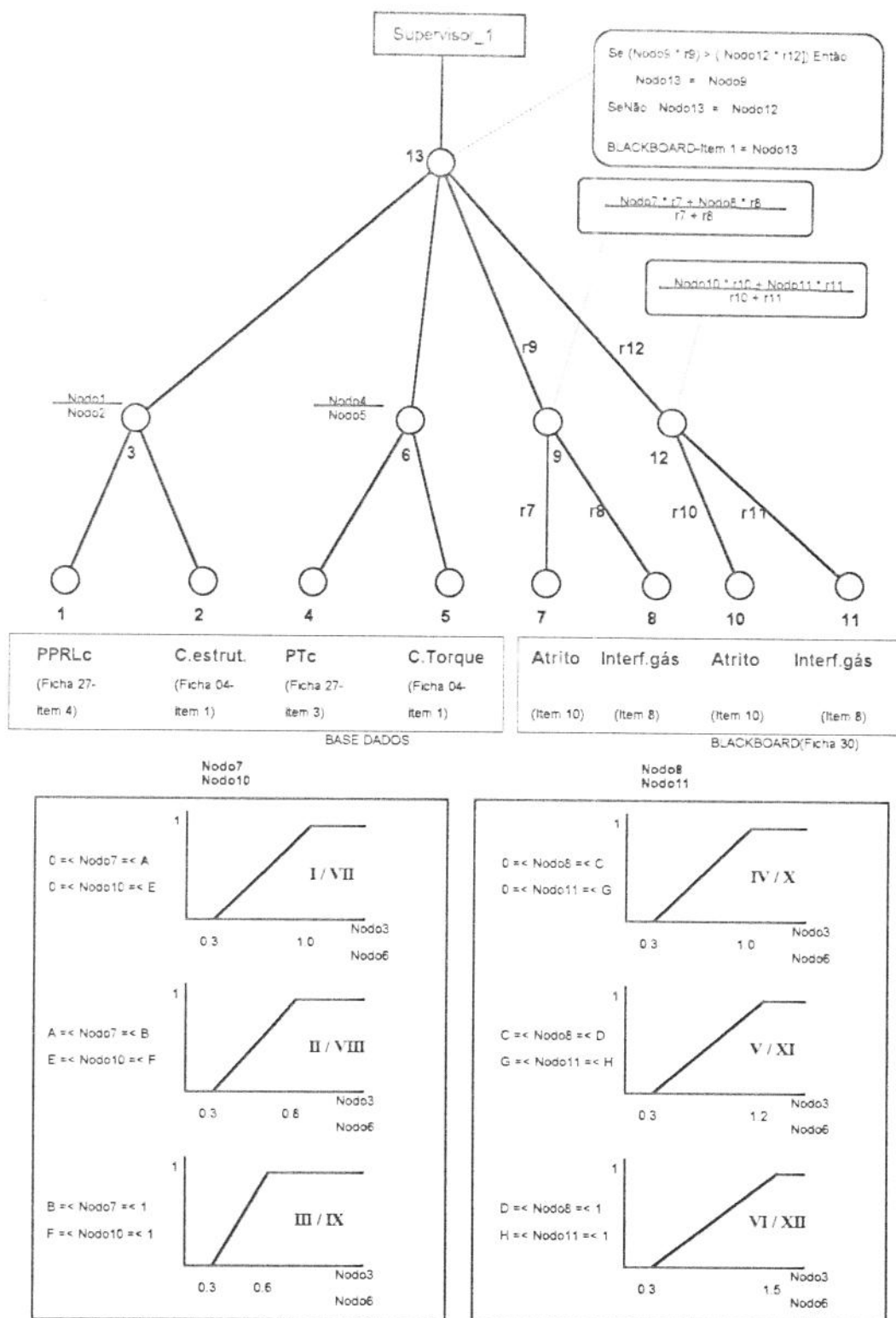


Figura 3-18 - Agente Unidade de bombeamento

#### 3.3.2.1.4 Potência do motor da UB

Este agente compara a potência requerida, calculada pela norma API RP111L ( $P_{otReq}$ ) com a potência do motor instalado na UB ( $P_{mot}$ ). Em função do atrito e da interferência de gás presentes no SBM é definido um valor de confiança para a hipótese de que o motor instalado está subdimensionado.

A regra:

*“Se  $P_{otReq}$  é maior que  $P_{mot}$  E o atrito é alto Então o motor está subdimensionado.”*

é representada pelos nodos 1, 2, 3 e 4 da RNS da figura 3-19 abaixo. Em função do valor de confiança na hipótese de atrito severo (item 3.3.2.1.2) é selecionada a função de pertinência (I, II, III) que representa o conceito de maior para este caso. A operação lógica E nesta regra está representada pela escolha da função de pertinência que representará o conceito de maior.

A regra:

*“Se  $P_{otReq}$  é maior que  $P_{mot}$  E a interferência de gás é baixa Então o motor está subdimensionado.”*

é representada pelos nodos 1, 2, 3 e 5. De forma semelhante, em função do valor de confiança na hipótese de interferência de gás severa (item 3.3.2.1.1) é selecionada a função de pertinência (IV, V, VI) que representa o conceito de maior para este caso. A operação lógica E nesta regra está representada pela escolha da função de pertinência que representará o conceito de maior.

A junção das regras acima é feita através da média ponderada pelas relevâncias definidas respectivamente para o atrito e interverência de gás, a qual representa a operação lógica  $E^*$  (nodo 6).

*“Se  $P_{otReq}$  é maior que  $P_{mot}$  E o atrito é alto  $E^*$  a interferência de gás é baixa Então o motor está subdimensionado.”*



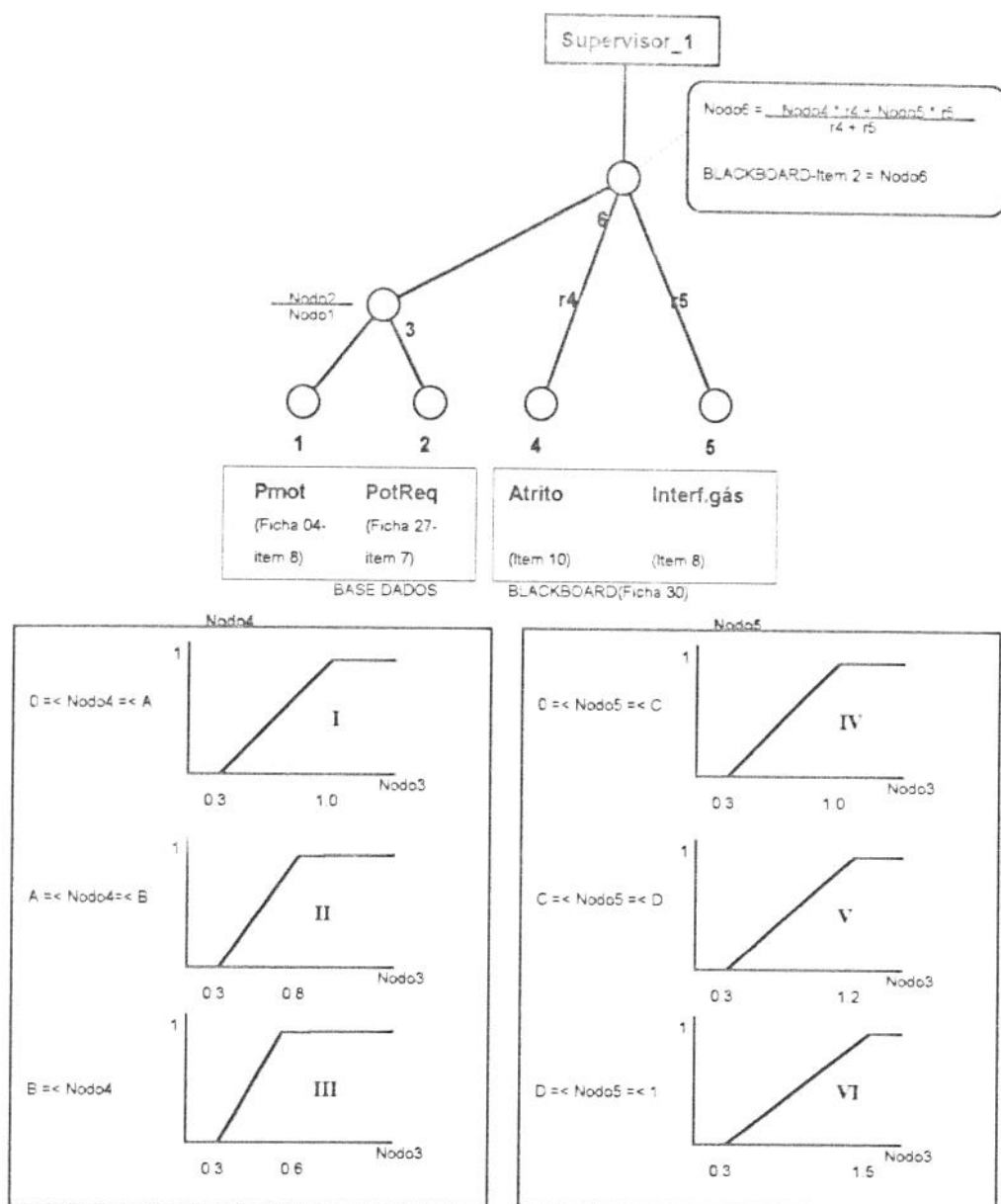


Figura 3-19 - Agente Motor

### 3.3.2.1.5 Tensão nas hastes

As evidências neste caso são ambos parâmetros obtidos a partir da norma API RP11L tensão máxima ( $S_{max}$ ) e tensão admissível ( $S_{adm}$ ), ambos teóricos portanto. O atrito e interferência permitem a adequação desses resultados à condições não previstas pela norma.

A regra:

*“Se  $S_{max}$  é maior que  $S_{adm}$  E o atrito é alto Então a coluna de hastes está subdimensionada.”*

é representada pelos nodos 1, 2, 3 e 4 da RNS da figura 3-20 abaixo. Em função do valor de confiança na hipótese de atrito severo (item 3.3.2.1.2) é selecionada a função de pertinência (I, II, III) que representa o conceito de maior para este caso. A operação lógica E nesta regra está representada pela escolha da função de pertinência que representará o conceito de maior.

A regra:

*“Se  $S_{max}$  é maior que  $S_{adm}$  E a interferência de gás é baixa Então a coluna de hastes está subdimensionada.”*

é representada pelos nodos 1, 2, 3 e 5. Em função do valor de confiança na hipótese de interferência de gás severa (item 3.3.2.1.1) é selecionada a função de pertinência (IV, V, VI) que representa o conceito de maior para este caso. A operação lógica E nesta regra está representada pela escolha da função de pertinência que representará o conceito de maior.

A junção das regras acima é feita através da média ponderada pelas relevâncias definidas respectivamente para o atrito e interverência de gás, a qual representa a operação lógica E\* (nodo 6).

*“Se  $S_{max}$  é maior que  $S_{adm}$  E o atrito é alto E\* a interferência de gás é baixa Então a coluna de hastes está subdimensionada.”*

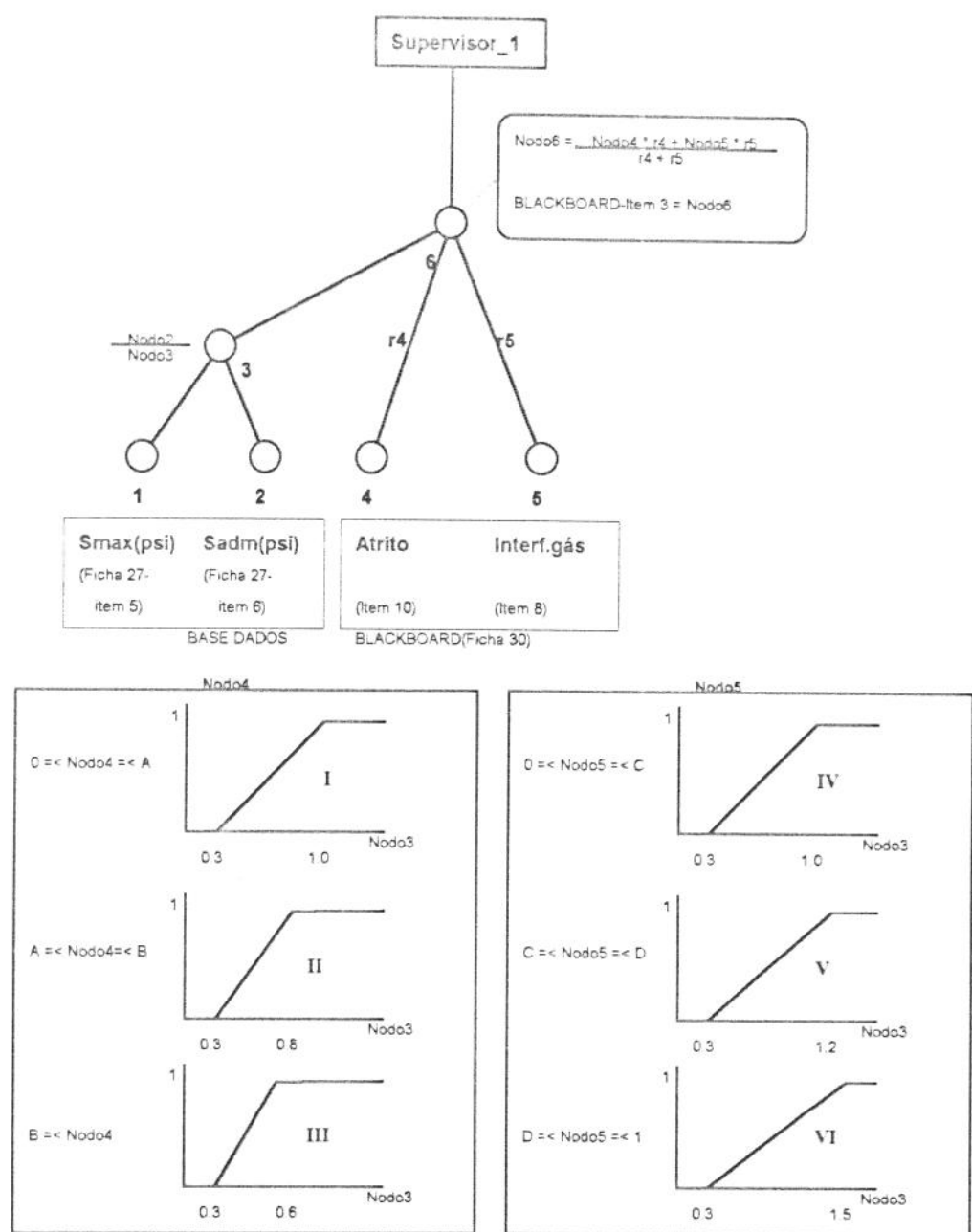


Figura 3-20 - Agente Hastes de bombeamento

### 3.3.2.1.6 Teste de produção X vazão potencial

Compara o teste de produção com a vazão potencial (determinada pela análise nodal) ou com a vazão histórica. Dá um valor de confiança para a hipótese de que o poço está produzindo todo seu potencial.

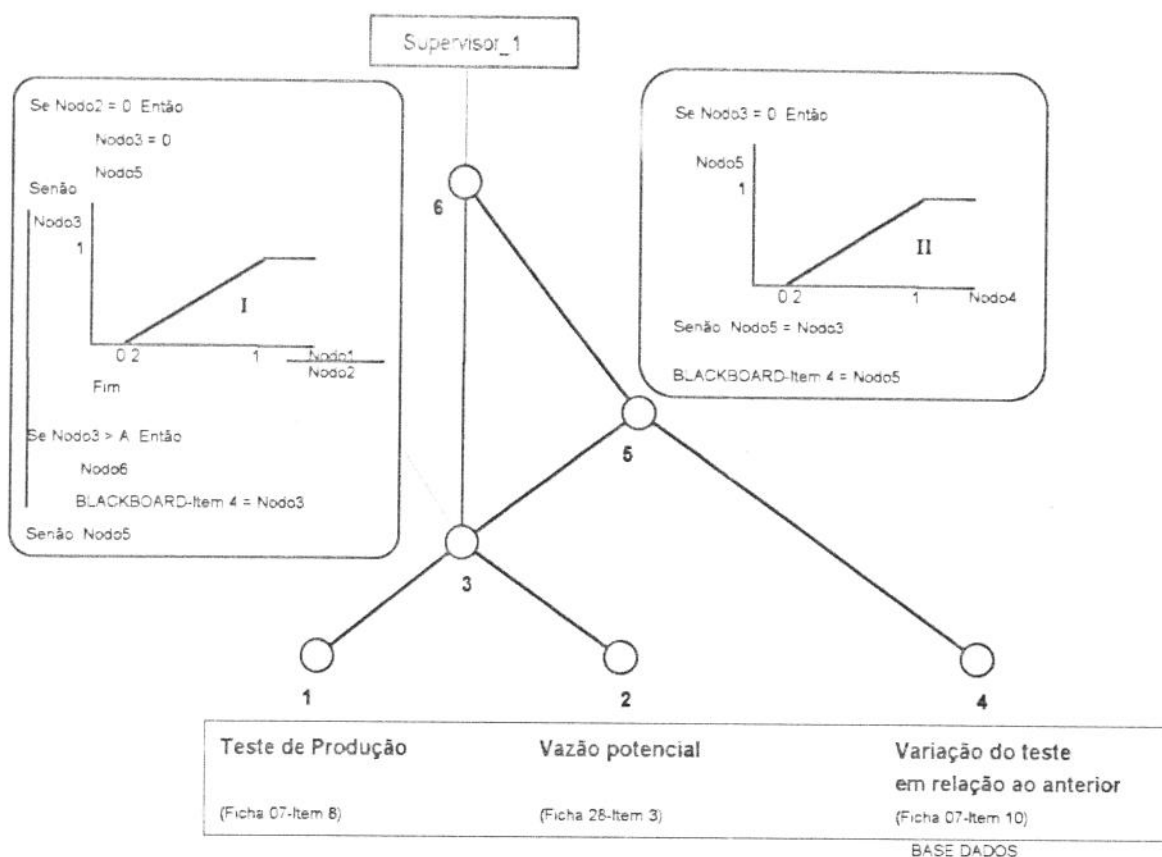


Figura 3-21- Agente Teste de produção X Vazão potencial

### 3.3.2.1.7 Eficiência Volumétrica:

Compara o teste de produção com o deslocamento volumétrico da instalação (determinado pela norma API RP 11L). Atribui um valor de confiança para a hipótese de que a instalação está produzindo o valor máximo possível para as condições de bombeamento. Em função da confiança atribuída à interferência de gás no sistema, são selecionadas as funções nebulosas que calcularão o valor de confiança da hipótese referida.

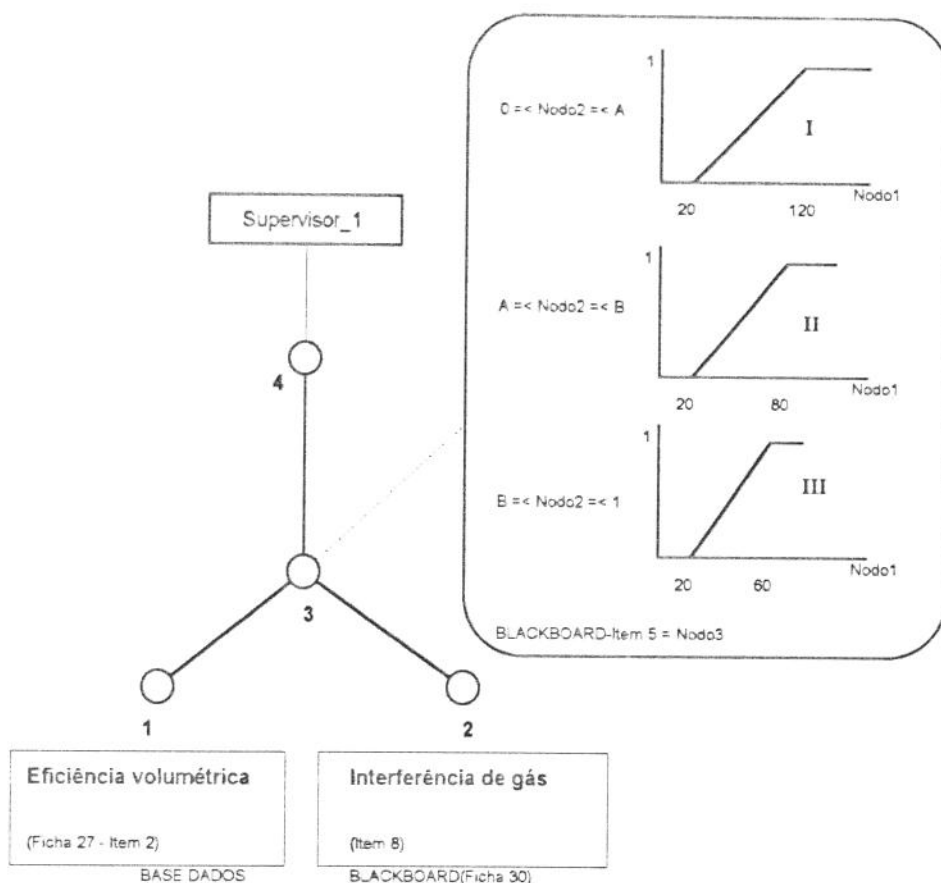


Figura 3-22 - Agente Eficiência volumétrica

### 3.3.2.1.8 Posição da bomba

A tarefa deste agente é classificar a **profundidade da bomba**, com relação à profundidade do Topo / Base do **intervalo canhoneado** e com a profundidade do **fundo atual** do poço.

O parâmetro a ser analisado “profundidade da bomba” (ou simplesmente “prof”) é comparado com os parâmetros “topo” e “base” dos perfurados, e com o fundo do poço (ou respectivamente topo, base e fundo).

A figura abaixo ilustra a comparação a ser feita.

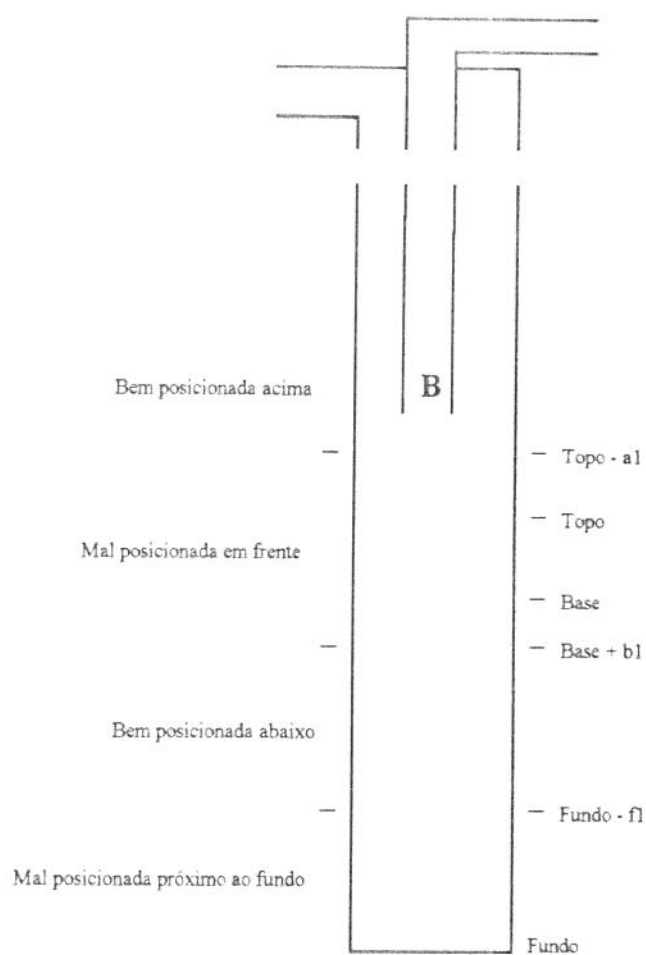


Figura 3-23 - Critérios<sup>22</sup> para classificar a profundidade da bomba

<sup>22</sup> "a1", "b1" e "fl" são valores arbitrários definidos pelo usuário.

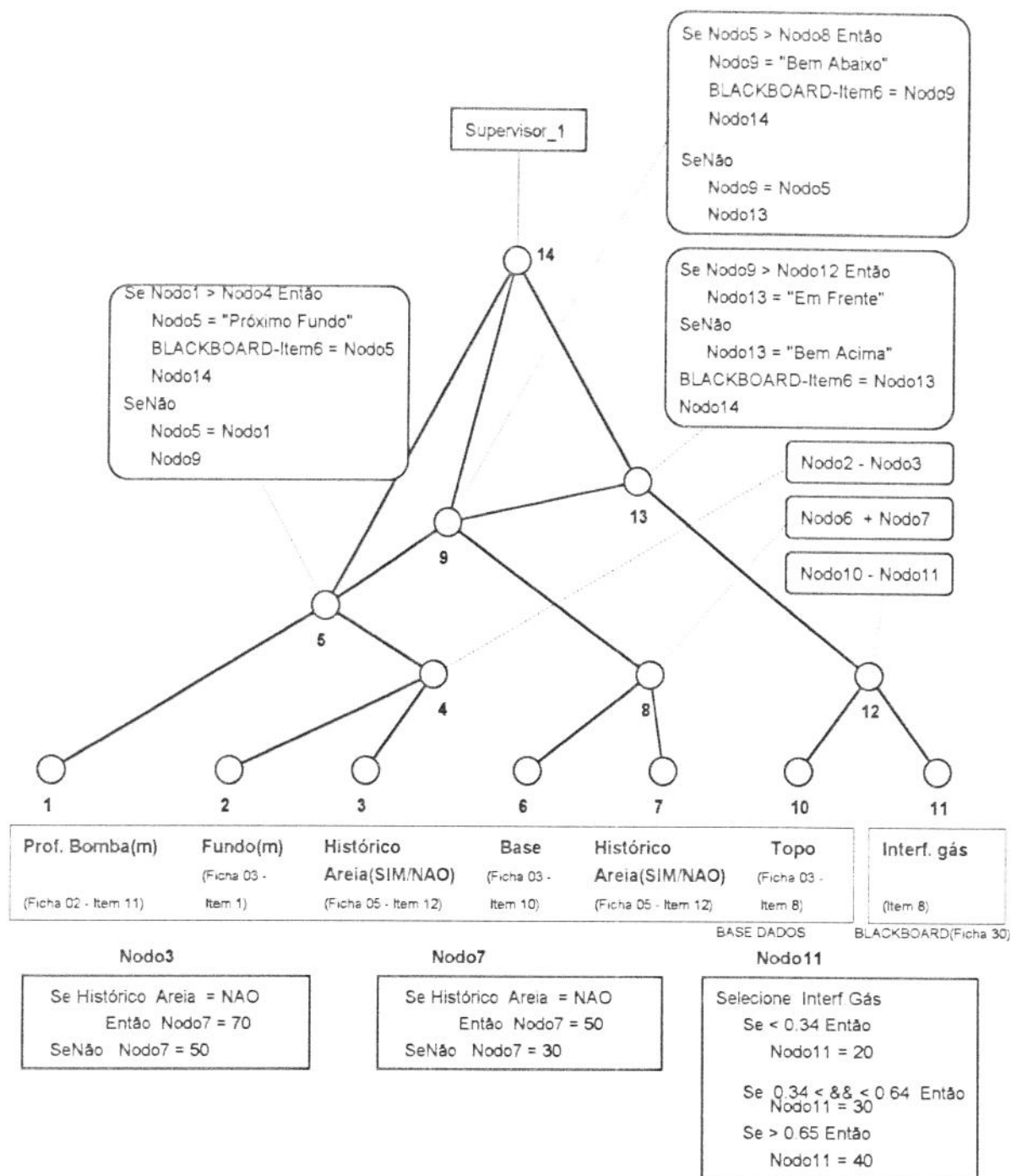


Figura 3-24 - Agente Posicionamento da bomba

### 3.3.2.1.9 Pressão de Sucção

A depender da capacidade de produção do poço (reservatório), expressa por sua IPR (Inflow Performance Relationship) e da capacidade de produção do equipamento instalado, existirá uma pressão de sucção e uma vazão em que o sistema se estabilizará. Esses parâmetros, **pressão de sucção requerida(PSucReq)** e **vazão desejada** são

fornecidas pelo agente análise nodal. PSucReq é utilizada por este agente para definir o sintoma relativo à pressão de sucção (  $P_{suc\ alta} \rightarrow 0 - P_{suc} \rightarrow 1$  ).

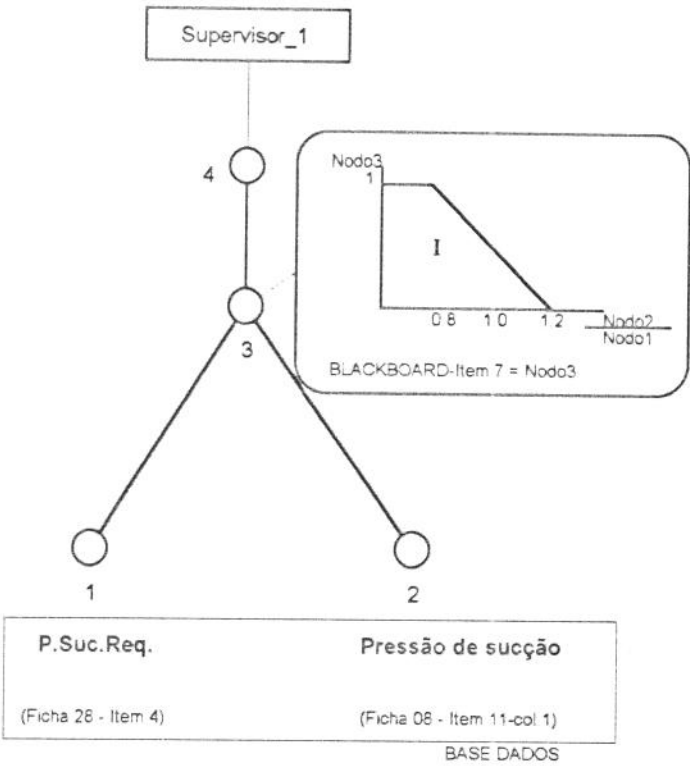


Figura 3-25 - Agente Pressão de sucção

3.3.2.1.10 Taxa de compressão da bomba

Este agente exprime a relação entre a taxa de compressão disponível na bomba (volume deslocado pelo pistão ÷ volume total) e a taxa de compressão requerida (pressão de descarga ÷ pressão de sucção).



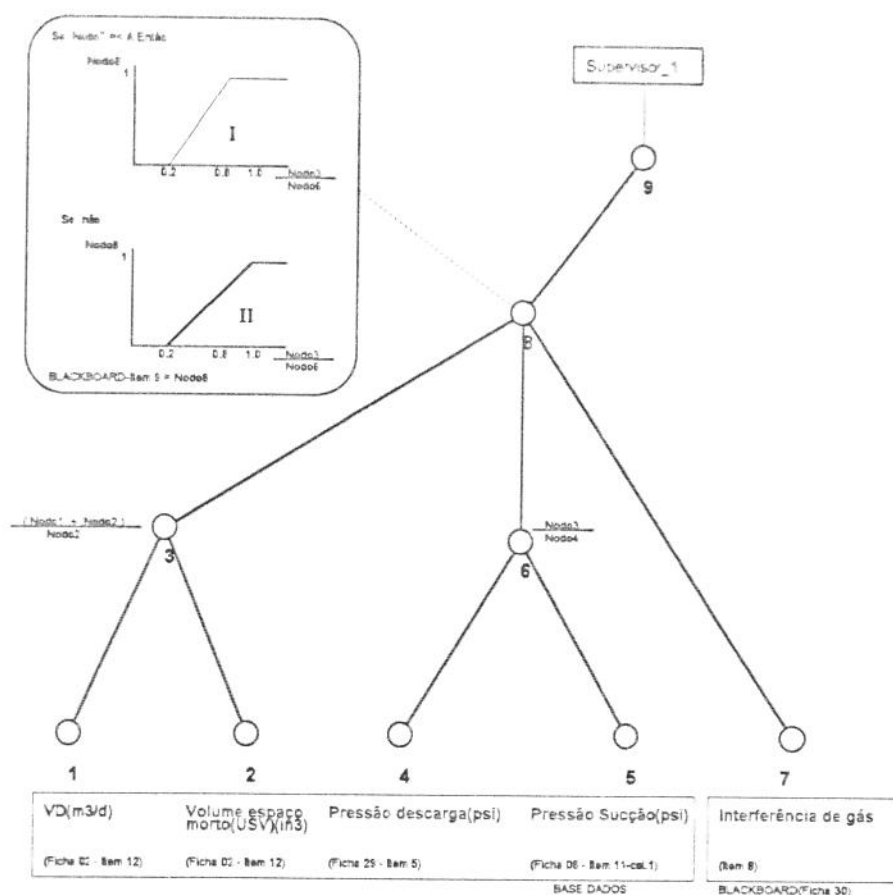


Figura 3-26 - Agente Taxa de compressão

**NOTA:** VD é o volume deslocado pelo pistão em cada ciclo de bombeamento estimado a partir da norma API RP 11L.

### 3.3.2.1.11 Parafina

A possibilidade da existência de acúmulo de parafina na coluna é determinada principalmente a partir da informação do usuário sobre o **histórico de acúmulo de parafina** na coluna. Caso não exista histórico considera-se que a possibilidade de existência de acúmulo de parafina é menor; por outro lado, se há histórico, o tempo decorrido desde a última substituição da bomba é considerado para a definição sobre a hipótese de acúmulo severo de parafina.

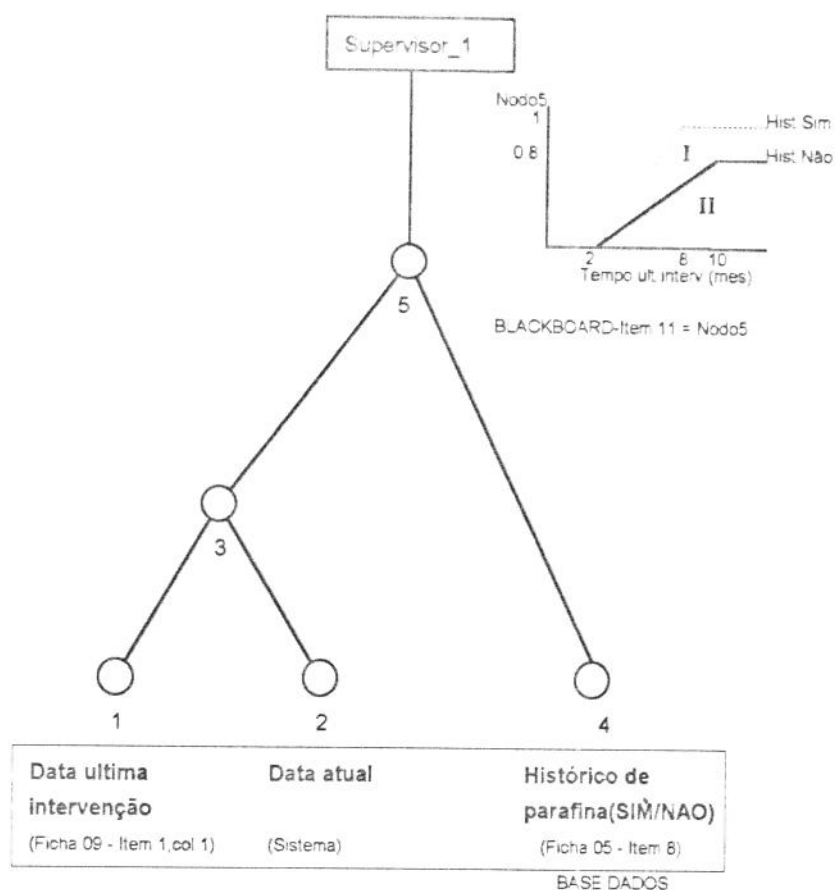


Figura 3-27 - Agente Parafina

### 3.3.2.1.12 Obstrução da Sucção da Bomba por Scale

A hipótese da existência de scale na bomba é determinada principalmente a partir da informação do usuário sobre o **histórico de deposição de scale** na bomba. Caso não exista histórico considera-se que a possibilidade de existência de scale é reduzida; por outro lado, se há histórico o tempo decorrido desde a última substituição da bomba é considerado para a definição sobre a deposição de scale.

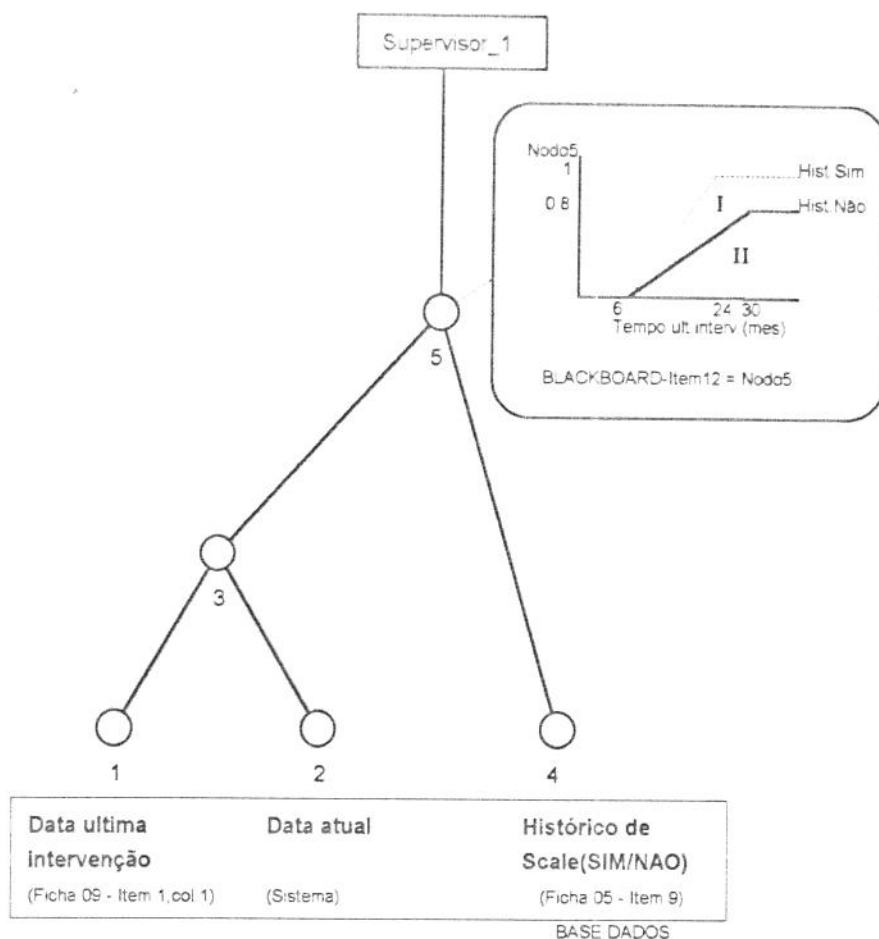


Figura 3-28 - Agente Scale

### 3.3.2.1.13 Obstrução da Sucção da Bomba por Areia

Analisa a hipótese de o poço ter areia acumulada obstruindo a sucção da bomba. Essa análise é feita com base em informação do usuário sobre o **histórico de areia**, o tempo decorrido desde a **última limpeza** realizada, e a distância entre a bomba e o fundo atual do poço.

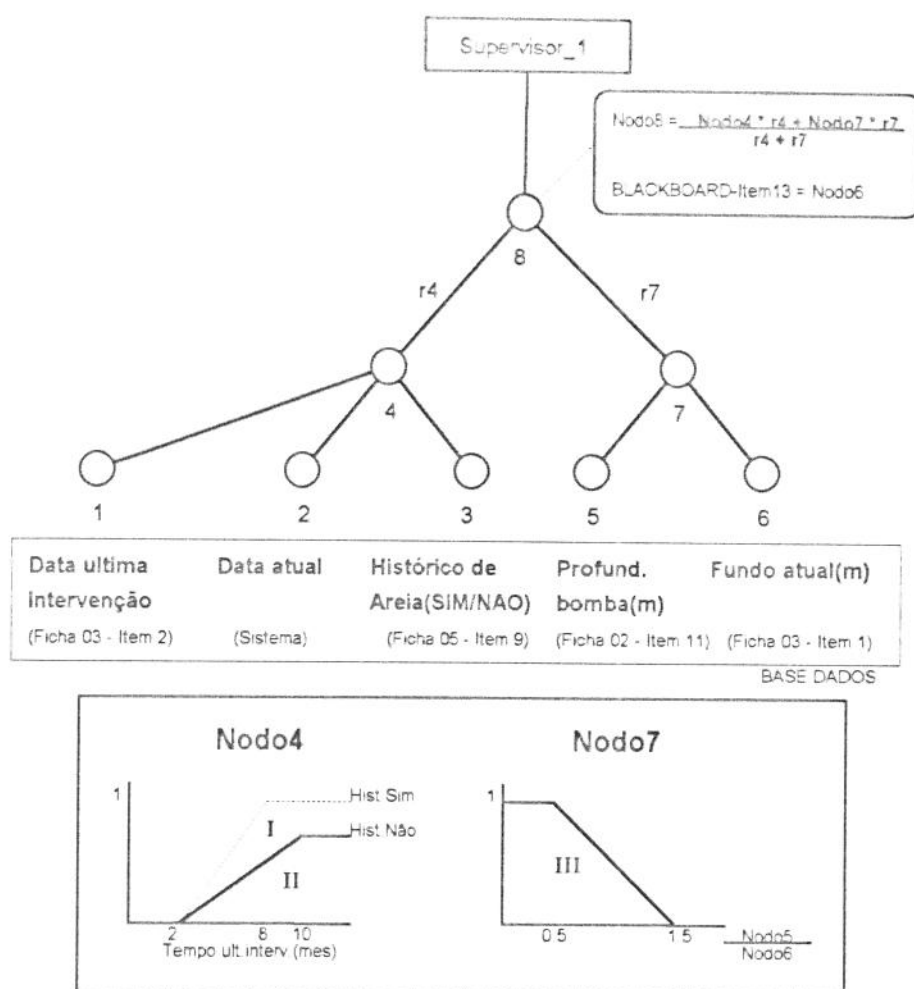


Figura 3-29 - Agente Areia

### 3.3.2.1.14 Corrosão na coluna de hastes

A agressividade o fluido é determinada principalmente a partir da informação do usuário sobre a **presença de agentes corrosivos**. Caso não exista histórico considera-se que a possibilidade da agressão do fluido sobre o equipamento é reduzida; por outro lado, se há histórico o tempo decorrido desde a última substituição da bomba é considerado para a definição sobre a hipótese de corrosão severa no equipamento de fundo.

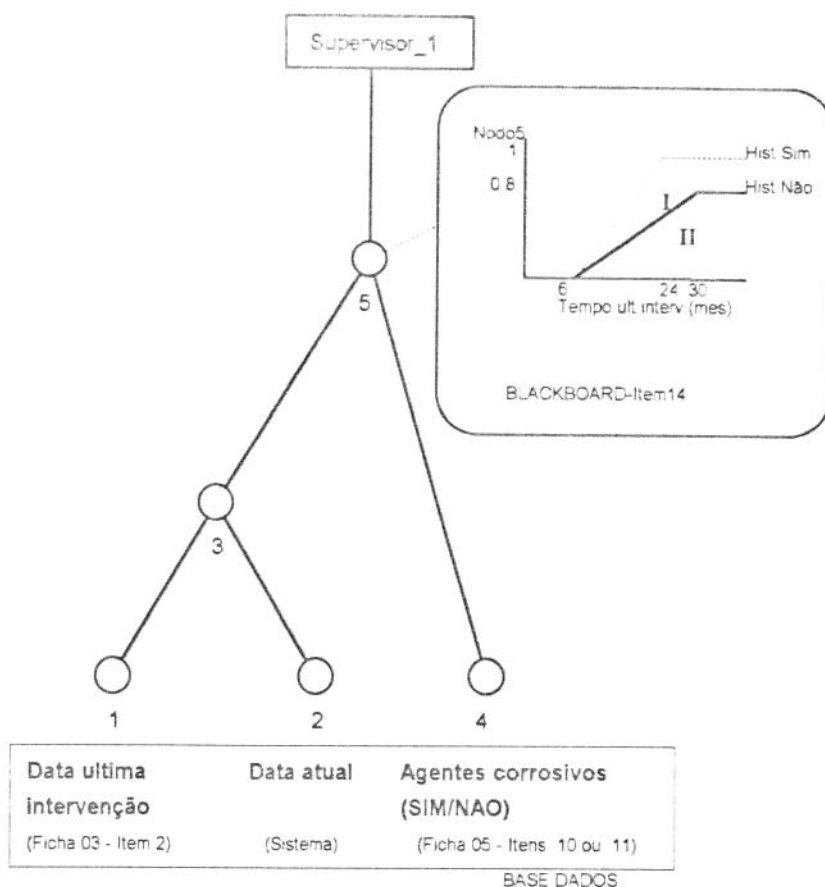


Figura 3-30 - Agente Corrosão

### 3.3.2.2 Referentes ao reconhecimento de padrões

Embora existam variações dentro dos grupos de padrões (item 3.2), neste trabalho buscamos identificar apenas os padrões genéricos que nos parecem os mais importantes. Quanto à identificação das variações dos padrões mostrados no item 3.2.1 e os padrões com efeitos superpostos mostrados no item 3.2.2, acreditamos depender de uma experiência na análise do SBM, ainda por ser adquirida.

#### 3.3.2.2.1 Normal:

Para este padrão foi adotada a forma apresentada na figura abaixo.

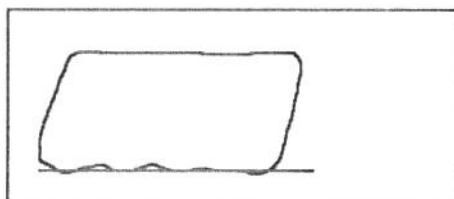


Figura 3-31 - Padrão para carta dinamométrica normal

Esta situação ocorre associada às seguintes evidências: baixa interferência de gás, pressão de sucção baixa e eficiência volumétrica alta. Esses conceitos abstratos são representados nos nodos terminais como valores de confiança nas hipóteses respectivas.

A agregação das evidências relativas à interferência de gás e pressão de sucção fornece um valor intermediário de confiança para a hipótese de CDF normal (nodo 4). A agregação deste valor com a confiança inicial na hipótese de CDF normal fornecida pelo reconhecimento de padrões (nodo1) fornece novo valor de confiança intermediário para hipótese CDF normal (nodo 5). Se este valor de confiança for superior ao limiar indicado pelo especialista, o mesmo é adotado como valor final de confiança fornecido pelo grafo. Caso contrário o mesmo é agregado ao valor de confiança na hipótese de EV alta, e o resultado desta agregação (nodo 7) adotado como valor final de confiança na hipótese de CDF normal (nodo 8).

O valor de confiança do reconhecimento de padrões (nodo1) é recebido através da mensagem emitida pelo Supervisor\_2. Após o processamento do grafo o controle é devolvido ao supervisor\_2 que ativará outros grafos referentes às restantes classificações da carta dinamométrica.

Se o valor de confiança contido no Blackboard for inferior ao valor final obtido no grafo, seu conteúdo é atualizado. Este procedimento garante a aceitação da hipótese (classificação) com maior confiança.

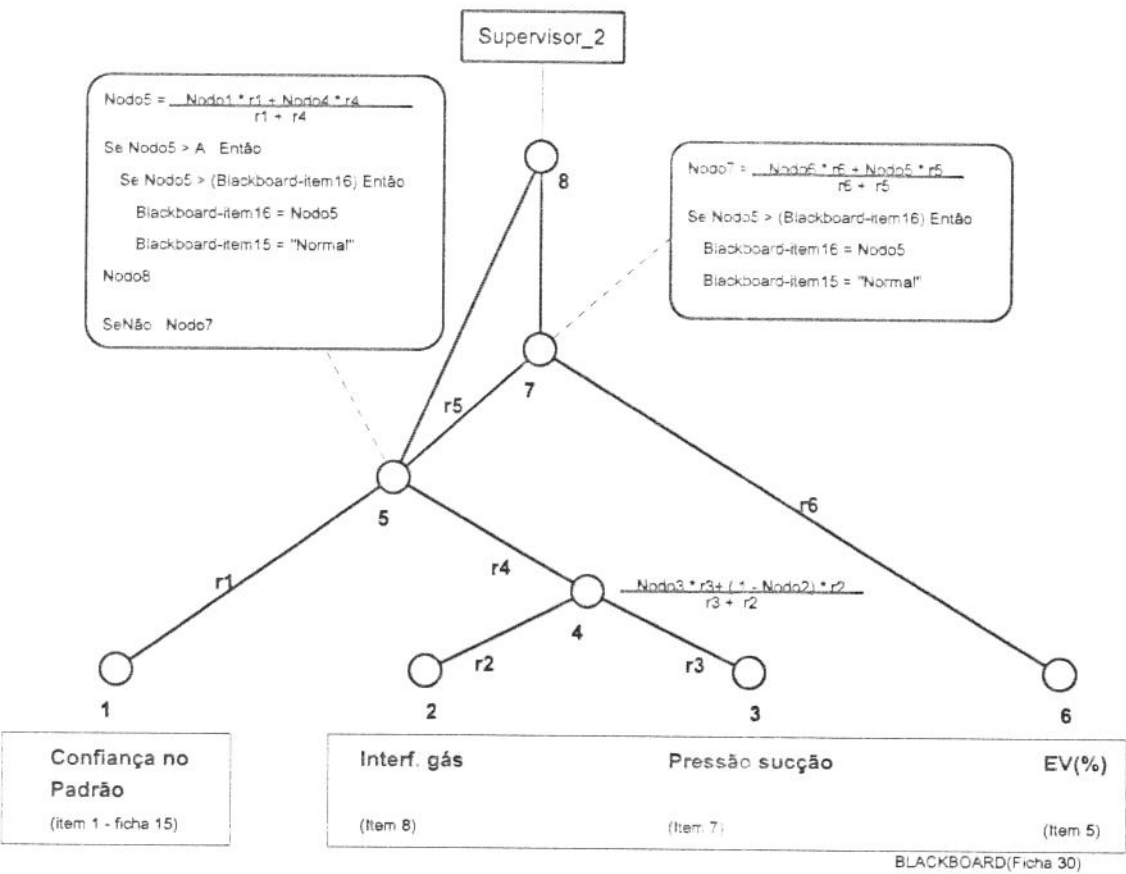


Figura 3-32 - Agente padrão normal

### 3.3.2.2 Pancada de fluido

Neste padrão foi adotada a forma apresentada na figura abaixo:

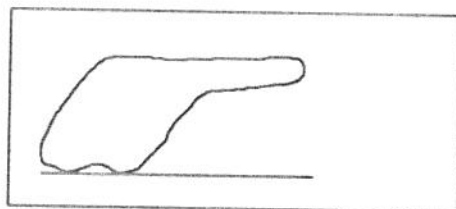


Figura 3-33 - Padrão para carta dinamométrica com pancada de fluido

Esta situação ocorre associada às seguintes evidências: baixa **pressão de sucção**, baixa **interferência de gás**, e **sucção da bomba obstruída**.

A agregação das evidências relativas à interferência de gás e pressão de sucção fornece um valor intermediário de confiança para a hipótese de CDF com pancada de fluido (nodo 4). A agregação deste valor com a confiança inicial na hipótese de CDF com pancada de fluido fornecida pelo reconhecimento de padrões (nodo1) fornece novo valor de confiança intermediário para hipótese CDF com pancada de fluido (nodo 5). Se este valor de confiança for superior ao limiar indicado pelo especialista, o mesmo é adotado como valor final de confiança fornecido pelo grafo. Caso contrário, como no caso de pressão de sucção alta, o mesmo é agregado ao valor de confiança na hipótese obstrução da sucção da bomba por areia (nodo 7), novamente se o valor de confiança resultante for superior ao limiar indicado pelo especialista, o mesmo é adotado como valor final de confiança, senão é verificada a hipótese de obstrução da sucção por scale e o resultado desta agregação (nodo 9) adotado como valor final de confiança na hipótese de CDF com pancada de fluido (nodo 10).





A evidência mais importante associada a esta situação de bombeamento é a fornecida pelo objeto interferência de gás o qual faz a análise baseado nos valores quantitativos da carta dinamométrica da superfície.

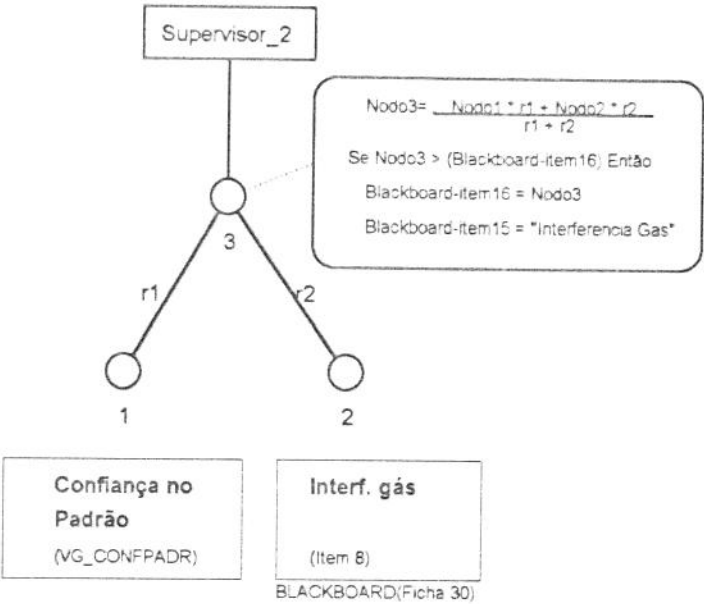


Figura 3-36 - Agente padrão Interferência de gás

3.3.2.2.4 Bloqueio de gás:

Este padrão é uma variação do anterior (interferência de gás) que ocorre associado às seguintes evidências: **nível dinâmico virtual** (item 3.1.1 , ficha 29) na profundidade da bomba e **interferência de gás** elevada, **baixa taxa de compressão** na bomba, e **baixa eficiência volumétrica**.

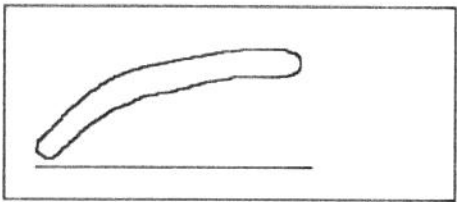


Figura 3-37 - Padrão bloqueio de gás

É tomada a relação entre a profundidade da bomba e o nível dinâmico virtual e a partir deste valor é obtida a confiança na hipótese de CDF com bloqueio de gás. Essa confiança é obtida da função de pertinência representativa do conjunto de valores de confiança para a hipótese de bloqueio de gás relacionado com o nível dinâmico virtual.

A agregação dessa evidência com a relativa à interferência de gás fornece um valor intermediário de confiança para a hipótese de CDF com bloqueio de gás (nodo 5). A agregação deste valor com a confiança inicial na hipótese de CDF com bloqueio de gás, fornecida pelo reconhecimento de padrões (nodo1) fornece novo valor de confiança intermediário para hipótese CDF com bloqueio de gás (nodo 6). Se este valor de confiança for superior ao limiar indicado pelo especialista, o mesmo é adotado como valor final de confiança fornecido pelo grafo. Caso contrário o mesmo é agregado ao valor de confiança na hipótese de Taxa de compressão alta (nodo7), novamente se o valor de confiança resultante for superior ao limiar indicado pelo especialista, o mesmo é adotado como valor final de confiança, senão é verificada a confiança na hipótese de EV alta e o resultado desta agregação (nodo 10) adotado como valor final de confiança na hipótese de CDF com bloqueio de gás (nodo 11).

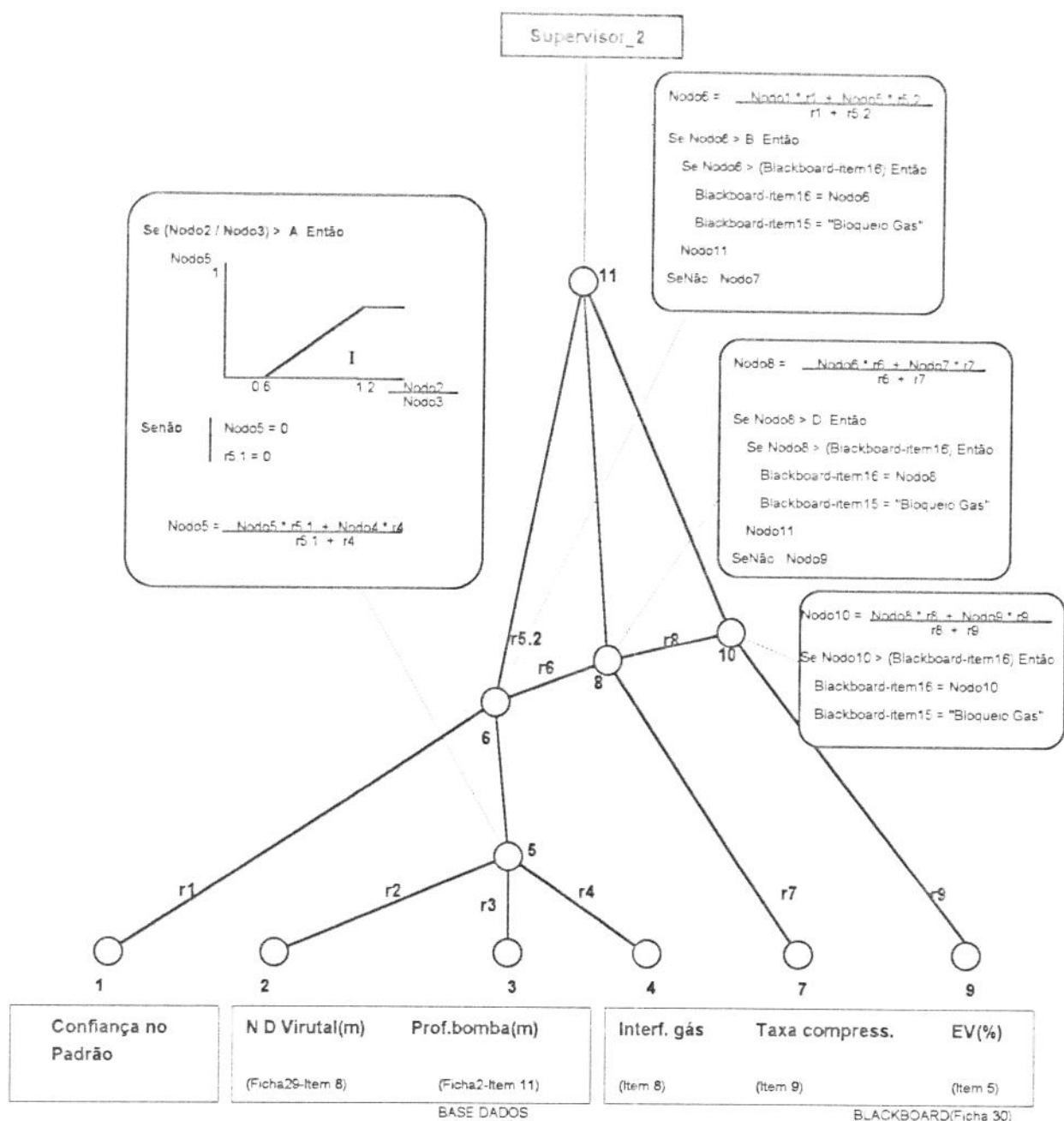


Figura 3-38 - Agente padrão bloqueio de gás

### 3.3.2.2.5 Vazamento da válvula de passeio:

Este padrão é uma variação do padrão vazamento nas válvulas (item 2.6.1.4). Ocorre relacionado com o resultado do teste de pressurização e com baixa interferência de gás.

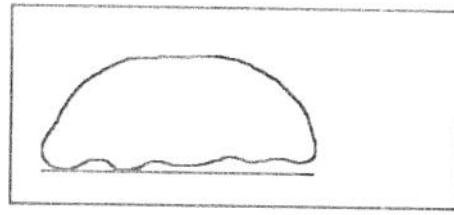


Figura 3-39 - Padrão para carta dinamométrica com vazamento na válvula de passeio

O resultado do teste de pressurização positivo no curso ascendente é uma indicação de que não há vazamento na válvula de passeio, desacreditando o padrão. Caso o teste indique vazamento é verificada a interferência de gás, a qual aumenta ou diminui a confiança no padrão dependendo se for alta ou baixa. Então, no grafo abaixo, se o teste de pressurização indicar resultado negativo, a confiança na hipótese de CDF com vazamento na válvula de passeio é agregada à confiança na hipótese interferência de gás elevada, resultando no valor de confiança final na hipótese de CDF com vazamento na válvula de passeio. Caso o teste tenha resultado positivo é atribuída confiança nula para a hipótese de CDF com vazamento na válvula de passeio.

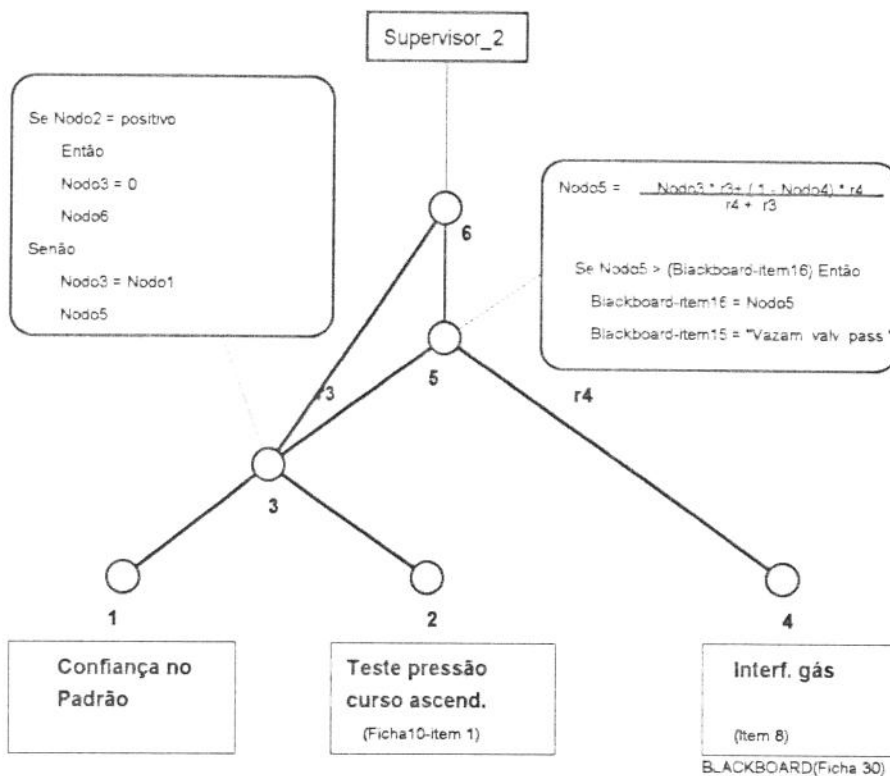


Figura 3-40 - Agente padrão vazamento na válvula de passeio

### 3.3.2.2.6 Vazamento da válvula de pé:

Esta situação é tratada de maneira idêntica a anterior. O mesmo raciocínio é aplicado sem alterações; a diferença fundamental está no formato da CDF, conforme figuras a seguir.

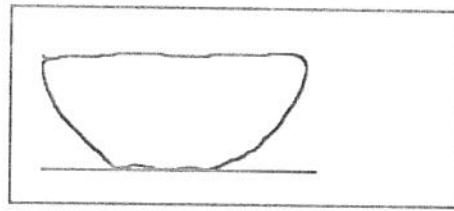


Figura 3-41 - Padrão para carta dinamométrica com vazamento da válvula de pé

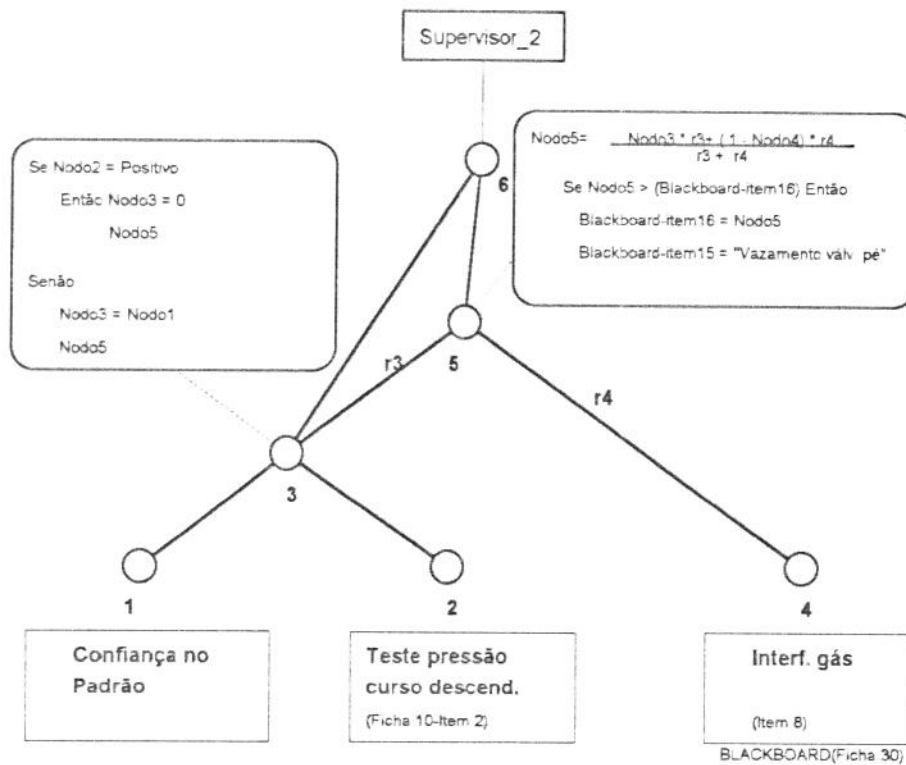


Figura 3-42 - Agente padrão vazamento na válvula de pé

### 3.3.2.2.7 Haste partida

A ocorrência de haste partida está associada à interrupção ou queda muito acentuada da produção, e a valores semelhantes de cargas medidas nos testes das válvulas de passeio e de pé. Neste caso a CDS reflete com bastante clareza o problema, não havendo portanto necessidade de utilizar a CDF a qual, devido ao modelo matemático utilizado para obtê-la não ser adequado para este caso.

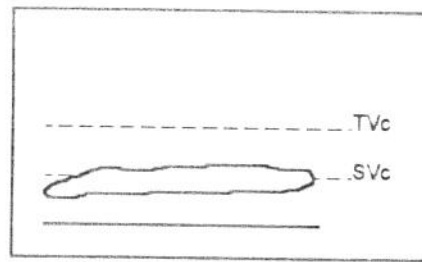


Figura 3-43 - Padrão para carta dinamométrica com haste partida

Devido a normalização da carta as características observadas neste caso são as mesmas para os seguintes casos: Pistão desenroscado e válvulas de passeio e de pé completamente abertas.

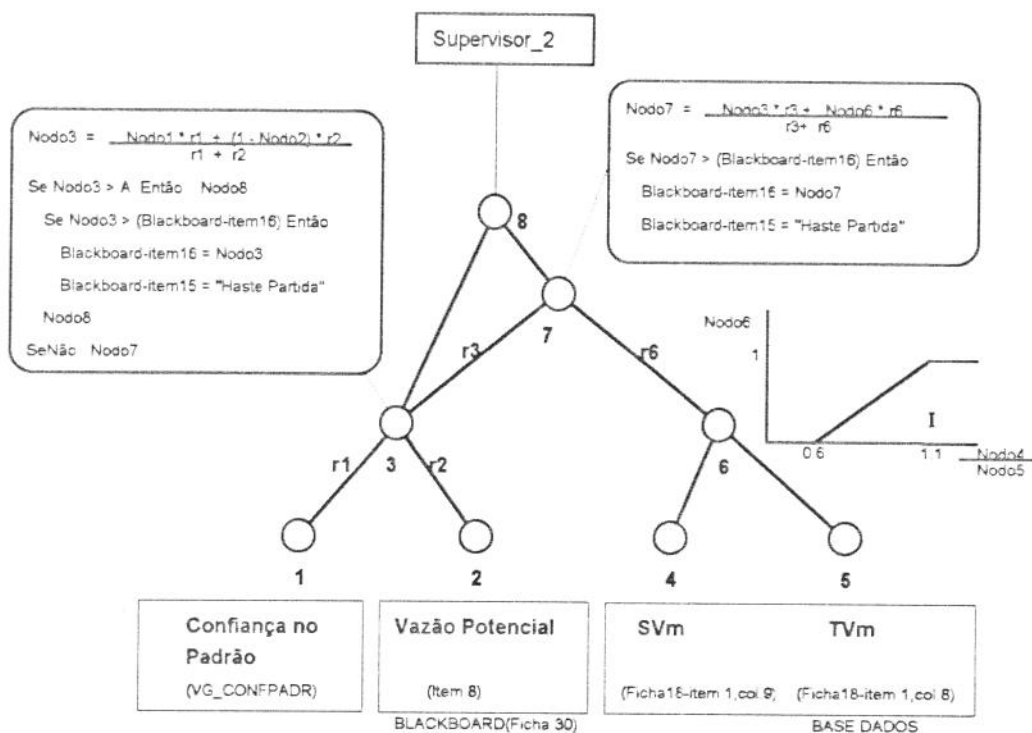


Figura 3-44 - Agente haste partida

### 3.3.2.2.8 Pistão preso:

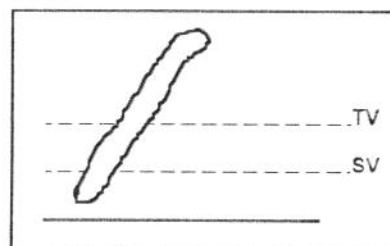


Figura 3-45 - Padrão para carta dinamométrica com pistão preso

A ocorrência de pistão preso está associada à interrupção ou queda muito acentuada da produção, a altos valores da carga medida no teste da válvula de passeio e baixos valores no teste da válvula de pé.

As características observadas neste caso são as mesmas para os seguintes casos: Pistão preso na extremidade superior da bomba, preso na extremidade inferior da bomba.

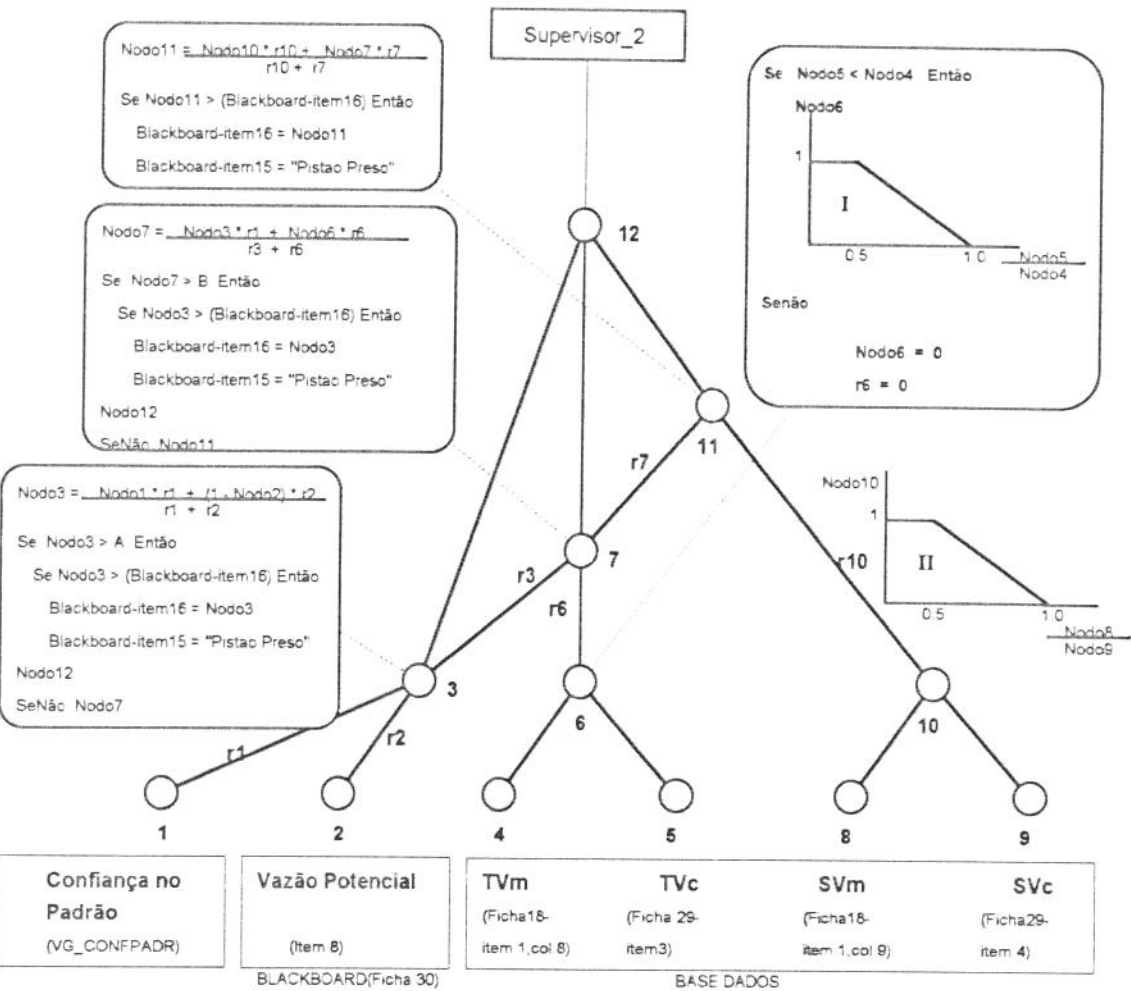


Figura 3-46 - Agente pistão preso

### 3.3.2.3 Referentes a diagnose

Estes agentes são ativados por situações anormais detectadas pelo supervisor 3 nos sintomas contidos no-blackboard. Uma hierarquia definida a priori estabelece a ordem com que os agentes seleccionados devem ser ativados. Cada agente está relacionado com um determinado sintoma o qual o mesmo procurará explicar e indicará o agente especializado na ação para solucionar o problema, item 3.3.2.4. .

Cada diagnóstico tem uma variável de status que garante a habilitação ou desabilitação do agente. Em cada nodo de decisão a variável correspondente ao diagnóstico

consequente é verificada. Caso seja encontrada uma variável de status indicando status desabilitado o processamento é interrompido e o controle devolvido ao supervisor 3. Esse processamento será realizado nos nodos terminais (não representado). A desabilitação de um determinado agente também será realizada nos nodos terminais

#### 3.3.2.3.1 Problemas na carta dinamométrica

Se a classificação da carta for pistão preso ou haste partida o diagnóstico **D18a** e o agente **Intervenção SPT** são ativados e o diagnóstico **D3** é desabilitado (status = OFF). Se a classificação for vazamento da válvula de pé ou passeio são ativados, respectivamente, **D8** e **Aumentar curso/cpm**, e os diagnósticos **D1**, **D2**, **D3**, **D4** são desabilitados (status = OFF). Sendo pancada de fluido a pressão de sucção é investigada para definir se é problema relativo ao poço ou ao equipamento. Caso a pressão seja alta, é assumida a obstrução da sucção da bomba e são ativados, **D18b** e **Intervenção SPT**, caso seja baixa é assumido que a capacidade de produção do poço foi ultrapassada e são ativados **D5** e **Reduzir curso/cpm** e os diagnósticos **D6** e **D7** desabilitados. Se a classificação da carta for bloqueio ou interferência de gás, é investigada a taxa de compressão. Caso esta seja alta são ativados **D18c** e **Intervenção SPT**, se for baixa são ativados **D21** e **Reduzir espaço morto** e desabilitado o diagnóstico **D3**.



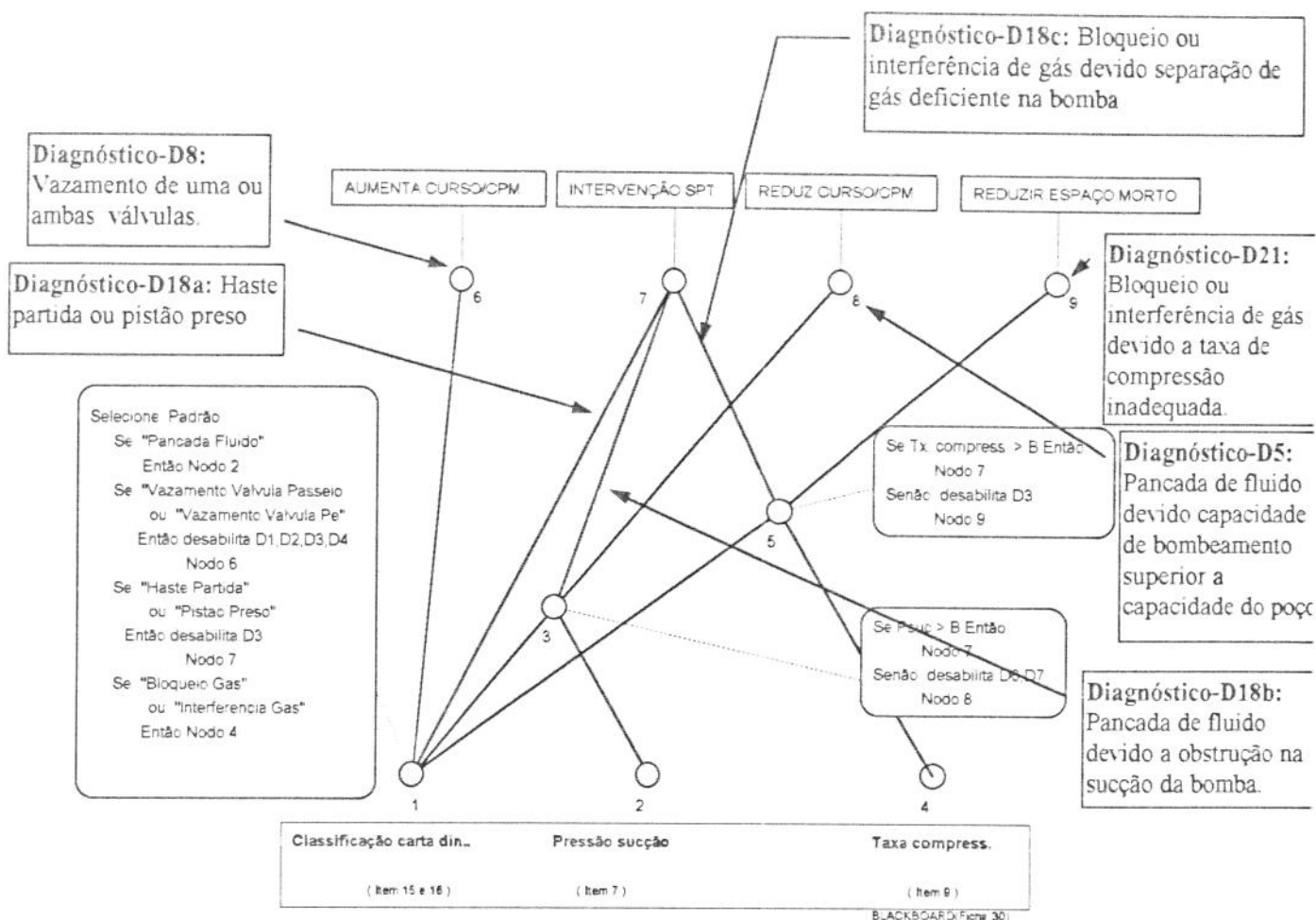


Figura 3-47 - Agente problemas na carta

### 3.3.2.3.2 Queda de produção

No caso de teste de produção indicando queda em relação à vazão potencial (item 4 da ficha 31-blackboard com valor superior ao limiar de ativação - item 6 da ficha 31) do poço é verificado se a pressão de sucção é alta. Caso positivo investiga a carta dinamométrica, caso contrário verifica se o diagnóstico D3 está desabilitado, se estiver (status = "OFF") termina o processamento senão ativa o diagnóstico D3 e o agente **Reduzir curso/cpm** e desabilita o diagnóstico D7. Se a carta dinamométrica indica situação normal ou interferência de gás ou bloqueio de gás ou vazamento na válvula de passeio ou de pé, verifica se o diagnóstico D6 está desabilitado, se estiver (status = "OFF") termina o processamento senão, ativa o diagnóstico D6 e o agente **Aumentar curso/cpm**, para qualquer outra classificação da carta dinamométrica ativa o diagnóstico D14 e o agente **Intervenção de SPT**. O agente "intervenção de SPT" deverá investigar qual a classificação da carta para recomendar o procedimento adequado.



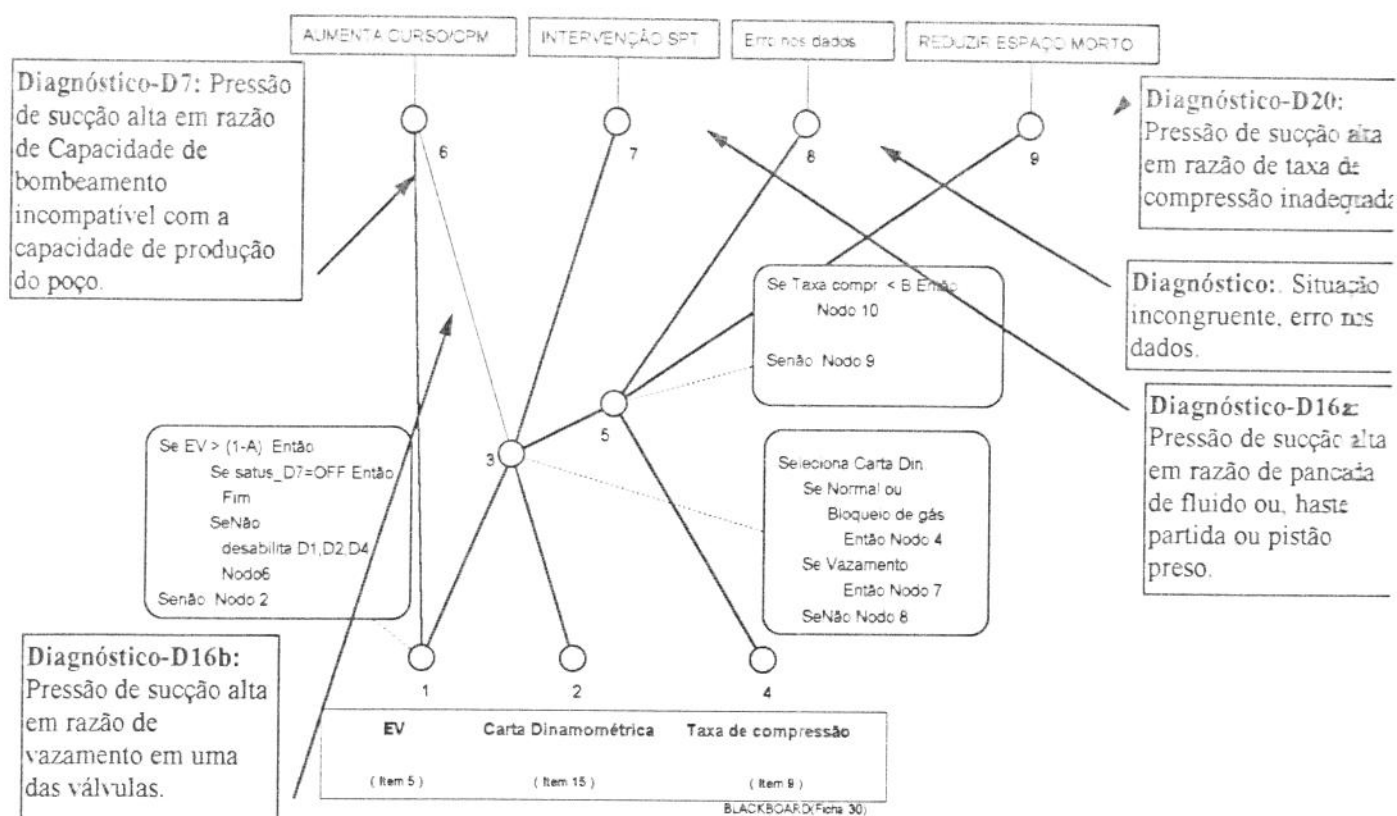


Figura 3-49 - Agente pressão de sucção alta

### 3.3.2.3.4 Eficiência volumétrica baixa

No caso de eficiência volumétrica baixa é verificado se a pressão de sucção é também baixa, caso positivo verifica se o diagnóstico **D4** está desabilitado. Se estiver (status = "OFF") termina o processamento, se não, ativa o diagnóstico **D4** e o agente **Reduzir curso/cpm**. Caso a pressão de sucção seja alta investiga a carta dinamométrica. Se a carta indica vazamento de uma das válvulas ativa o diagnóstico **D15b** e o agente **Aumentar curso/cpm**. Se indica haste partida ou pistão preso, ativa o diagnóstico **D15a** e o agente **Intervenção SPT**. Se a carta dinamométrica indica situação normal ou bloqueio de gás ou interferência de gás, investiga a taxa de compressão. Se esta é alta conclui que existe incongruência nos dados, se for baixa ativa o diagnóstico **D19** e o agente **Reduzir o espaço morto**.

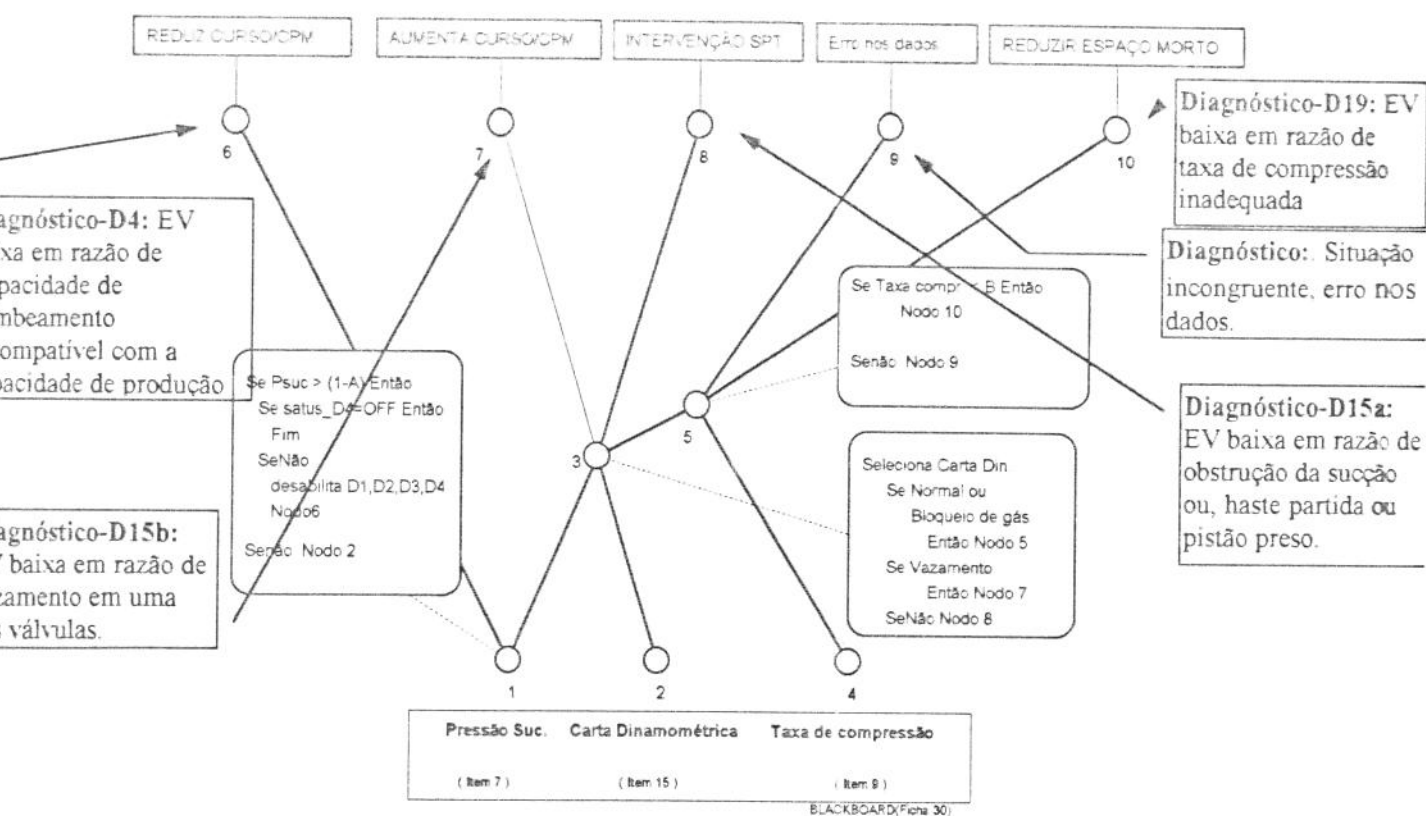


Figura 3-50 - Agente EV baixa

### 3.3.2.3.5 Acúmulo severo de parafina

No caso de acúmulo severo de parafina na coluna ativa o diagnóstico **D12** e o agente **Desparafinar**.

### 3.3.2.3.6 Obstrução severa da sucção

No caso obstrução severa da sucção da bomba, verifica se a certeza na hipótese de obstrução por areia é alta. Caso negativo investiga a hipótese de obstrução por scale, caso esta também seja baixa, assume que a obstrução se deve a detritos na bomba. Em qualquer dos casos ativa o agente **Intervenção SPT** e os respectivos diagnósticos **D17a** ou **D17b**.

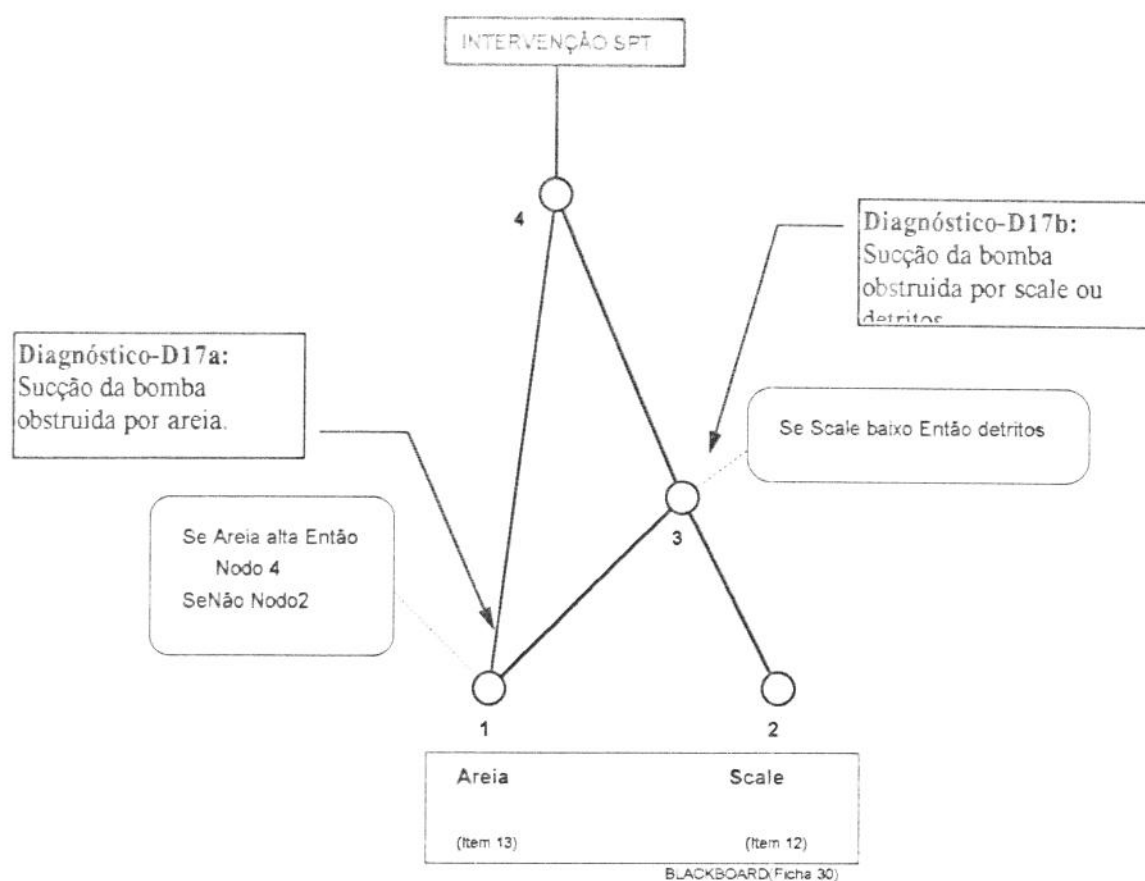


Figura 3-51 - Agente obstrução da sucção

### 3.3.2.3.7 Corrosão severa

No caso corrosão severa ativa o diagnóstico **D23** e o agente **Injetar inibidor**.

### 3.3.2.3.8 Unidade de bombeamento subdimensionada

No caso de UB subdimensionada é verificado se o atrito é elevado no sistema. Caso positivo verifica qual a razão do mesmo. Caso contrário verifica se o diagnóstico **D1** está desabilitado, se estiver (status = "OFF") termina o processamento, senão ativa o diagnóstico **D1** e o agente **reduz curso/cpm**. No caso de a razão do atrito elevado ser acúmulo de parafina na coluna ativa o diagnóstico **D10** e o agente **Desparafinar**, caso contrário é assumido que o atrito é intrínseco do poço e ativa o diagnóstico **D9** e o agente **Substituir UB**.

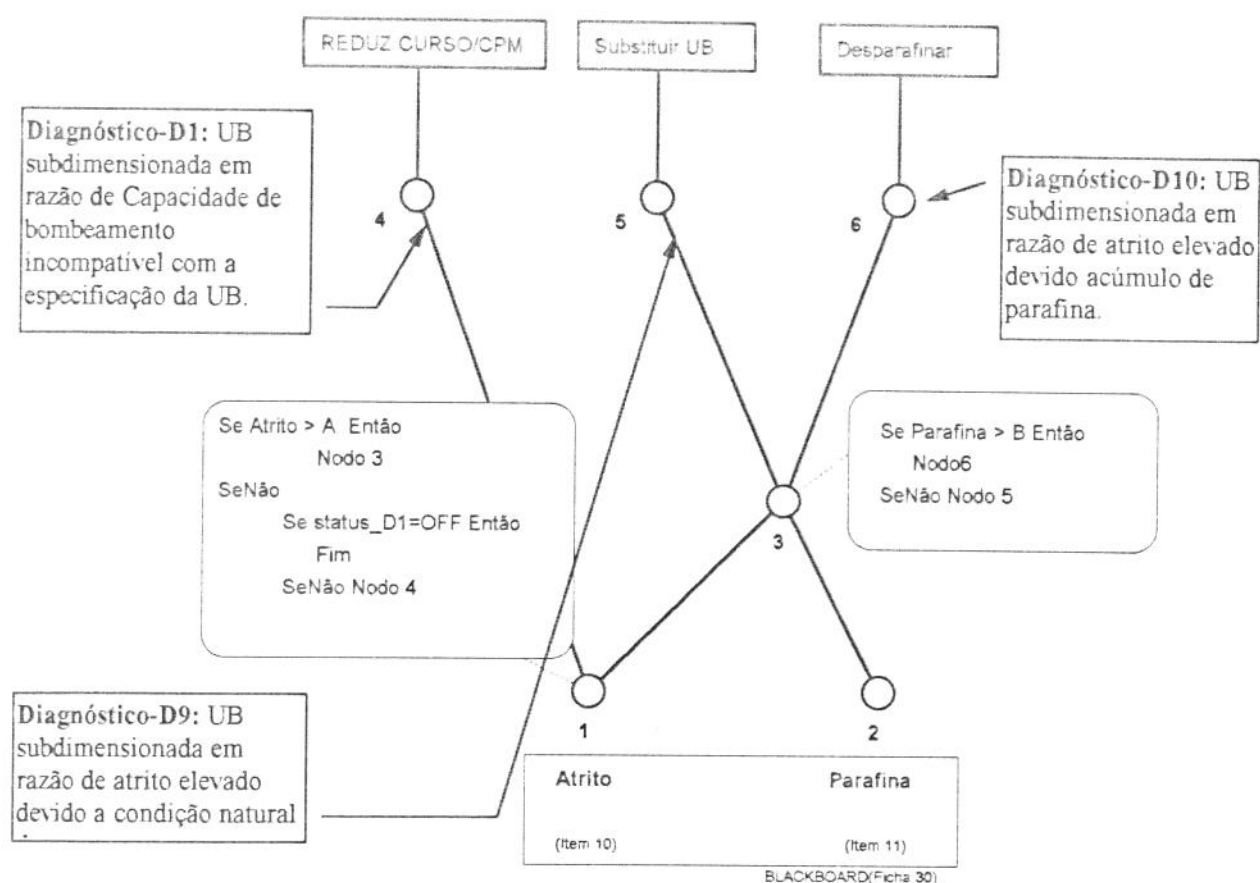


Figura 3-52 - Agente UB subdimensionada

### 3.3.2.3.9 Motor subdimensionado

Ativa o diagnóstico **D22** e o agente **substituir o motor**.

### 3.3.2.3.10 Coluna de hastes subdimensionada

No caso de HB subdimensionada é verificado se o atrito é elevado no sistema. Caso positivo verifica-se qual a razão do mesmo, caso contrário verifica se o diagnóstico **D2** está desabilitado, se estiver (status = "OFF") termina o processamento, se não, ativa o diagnóstico **D2** e o agente **reduzir curso/cpm**. No caso de a razão do atrito elevado ser acúmulo de parafina na coluna ativa o diagnóstico **D11** e o agente **Desparafinar**, caso contrário é assumido que o atrito é intrínseco do poço e diagnóstico **D13** e o agente **Intervenção SPT** são ativados.

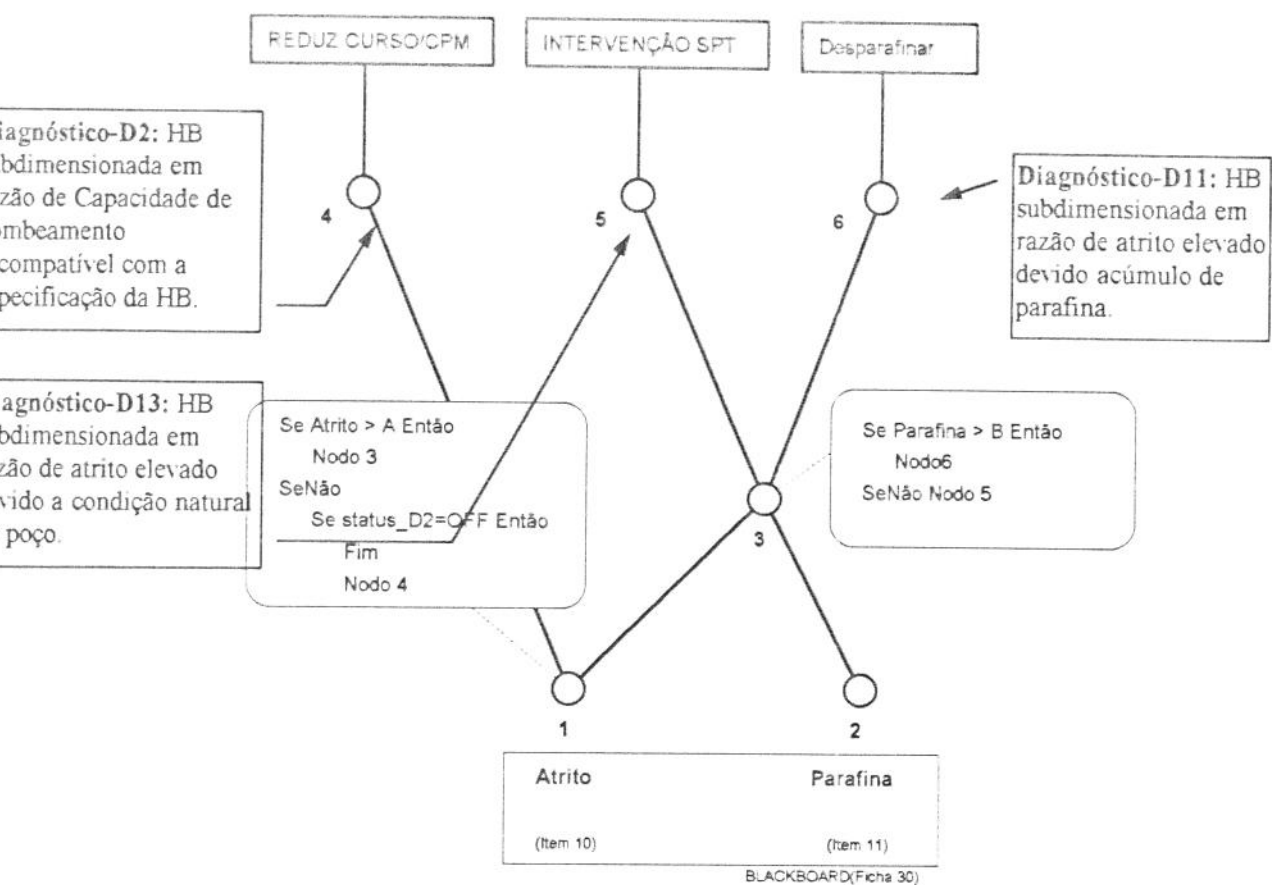


Figura 3-53 - Agente HB subdimensionada

3.3.2.4 Referentes às ações

3.3.2.4.1 Intervenção de sonda.

Este agente tem por objetivo preparar o documento de solicitação da intervenção no poço. Recebe a solicitação de diversos agentes, sob diversas condições, como observado na tabela abaixo. É constituído por 8 agentes aqui denominados de sub-agentes, que definem as ações pertinentes às situações indicadas na tabela abaixo, o sub-agente Interv\_0 é o responsável por ativar os outros sub-agentes, atuando como um supervisor portanto:

Tabela 3-5 - Triggers do agente intervenção

| Solicitada por             | Nas condições                     | Diagnóstico | Ação     |
|----------------------------|-----------------------------------|-------------|----------|
| Problemas na carta         | Haste partida                     | D18a        | Interv_6 |
|                            | Pistão preso                      |             | Interv_7 |
|                            | Bloqueio de gás+taxa compr.alta   | D18c        | Interv_2 |
|                            | Interf. de gás + taxa compr. alta |             |          |
|                            | Pancada + Psuc alta               | D18b        | Interv_1 |
| Queda de produção          | Psuc alta + pancada               | D14         |          |
|                            | Psuc alta + haste partida         |             |          |
|                            | Psuc alta + pistão preso          |             |          |
| Pressão de sucção alta     | EV baixa + pancada                | D16a        |          |
|                            | EV baixa + haste partida          |             |          |
|                            | EV baixa + pistão preso           |             |          |
| EV baixa                   | Psuc alta + pancada               | D15a        |          |
|                            | Psuc alta + haste partida         |             |          |
|                            | Psuc alta + pistão preso          |             |          |
| Obstrução severa da sucção | Areia alta                        | D17a        | Interv_3 |
|                            | Scale alto                        | D17b        | Interv_4 |
| Col. haste subdimensionada | Atrito alta + parafina baixa      | D13         | Interv_5 |



3.3.2.4.1.1 Interv\_0

Se a classificação da carta for haste partida ou pistão preso, são ativados respectivamente os agentes Interv 6 e Interv 7. Caso negativo o status do diagnóstico é verificado (nodo 3) e o agente correspondente é ativado.

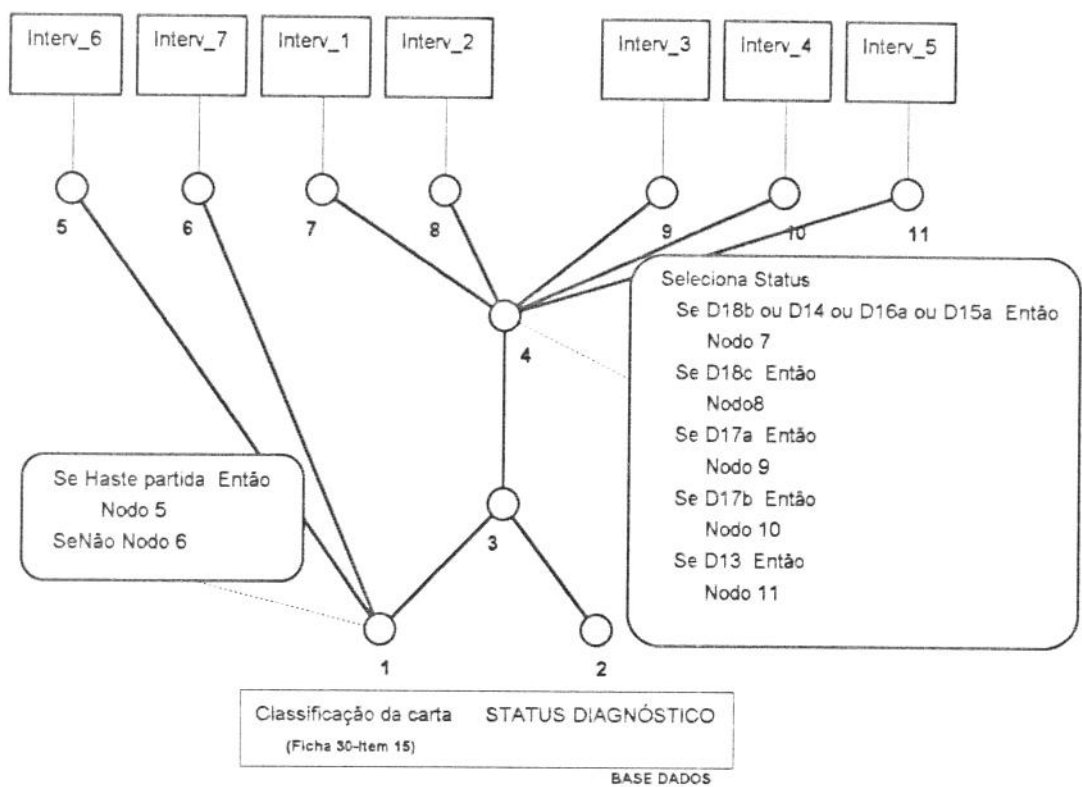


Figura 3-54 - Agente Interv\_0

3.3.2.4.1.2 Interv\_1

Este agente é ativado para os diagnósticos D18b ou D14 ou D16a ou D15a que ocorrem para os casos de obstrução da sucção da bomba. Em função do tipo de obstrução diferentes ações são recomendadas (A1, A2, A3, A4).

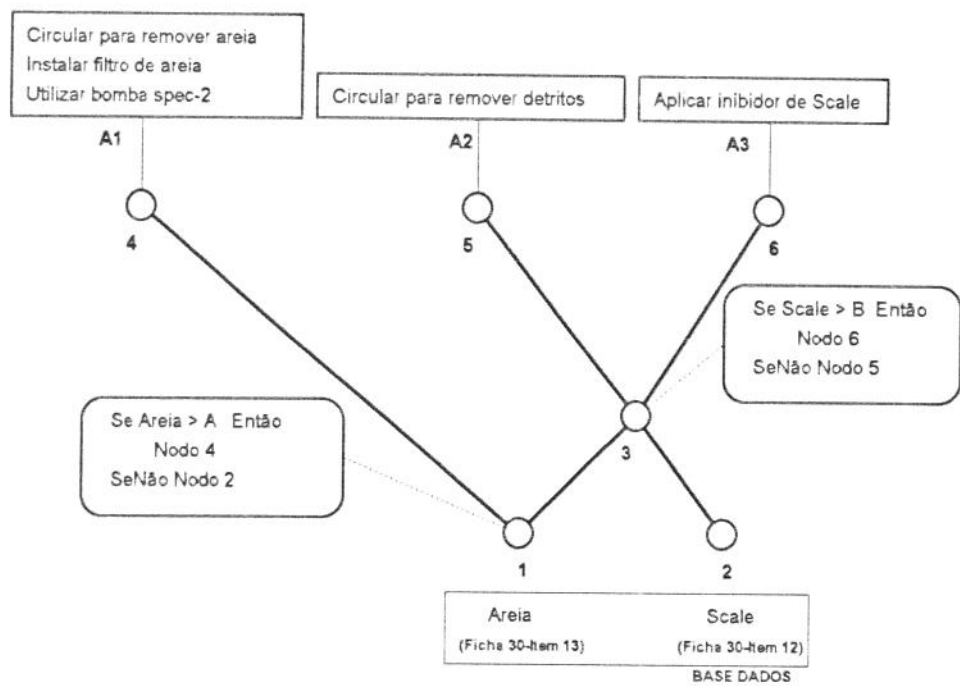


Figura 3-55 - Agente Interv\_1

3.3.2.4.1.3 Interv\_2

Este agente é ativado quando é identificado interferência ou bloqueio de gás, e indica a ação (A4, A5, A6, A7) a ser adotada em função da existência de separador de gás de fundo (nodo 1) ou da possibilidade de utilização de “âncora natural” (nodo 4).

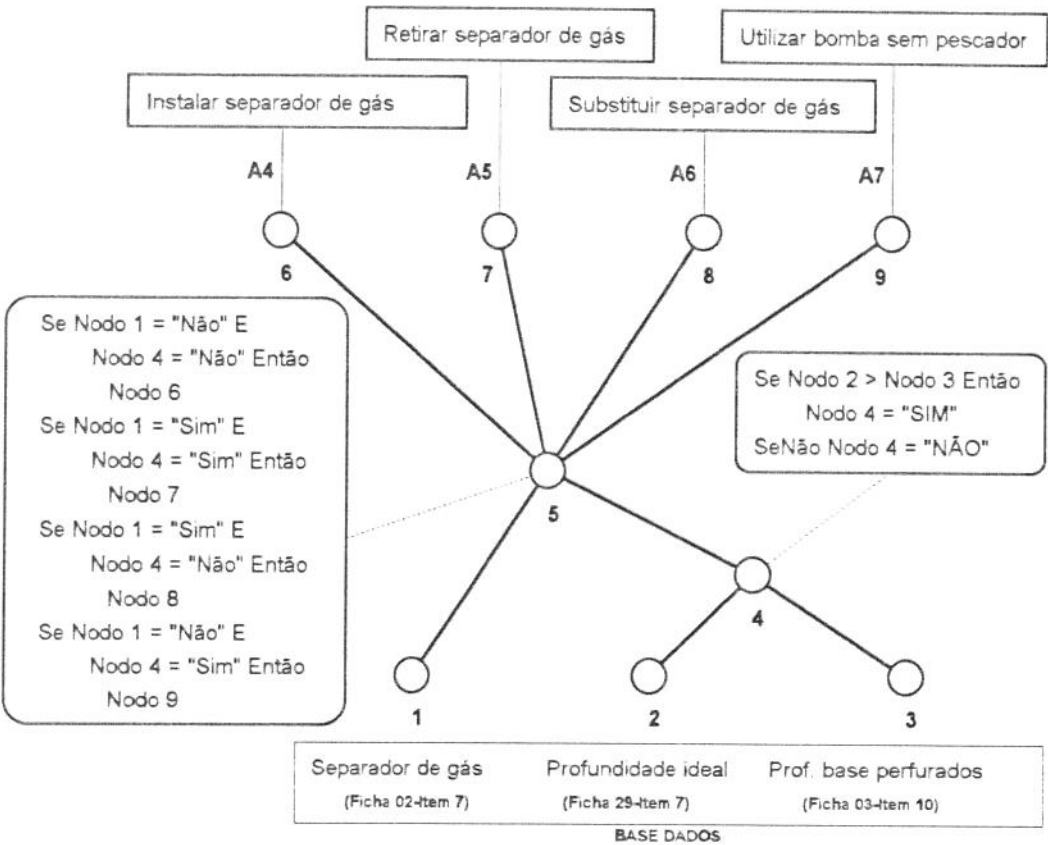


Figura 3-56 - Agente Interv\_2

3.3.2.4.1.4 Interv\_3

Nos casos em que é verificada obstrução da sucção da bomba por areia este agente é ativado e recomenda a ação A1.

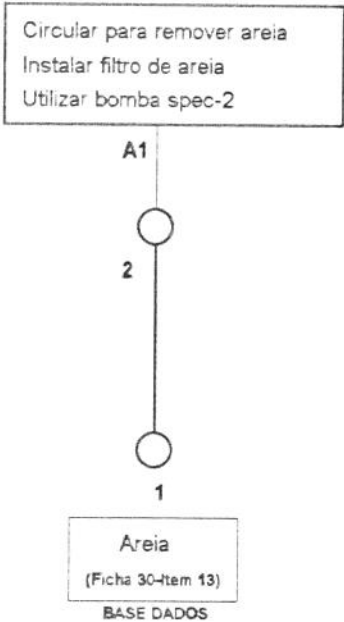


Figura 3-57 - Agente Interv\_3

3.3.2.4.1.5 Interv\_4

Este agente é ativado quando é verificada obstrução da sucção da bomba por acúmulo de scale ou detritos (diagnóstico D17b) em função da maior ou menor possibilidade de um ou outro ações pertinentes são recomendadas (A32, A2).

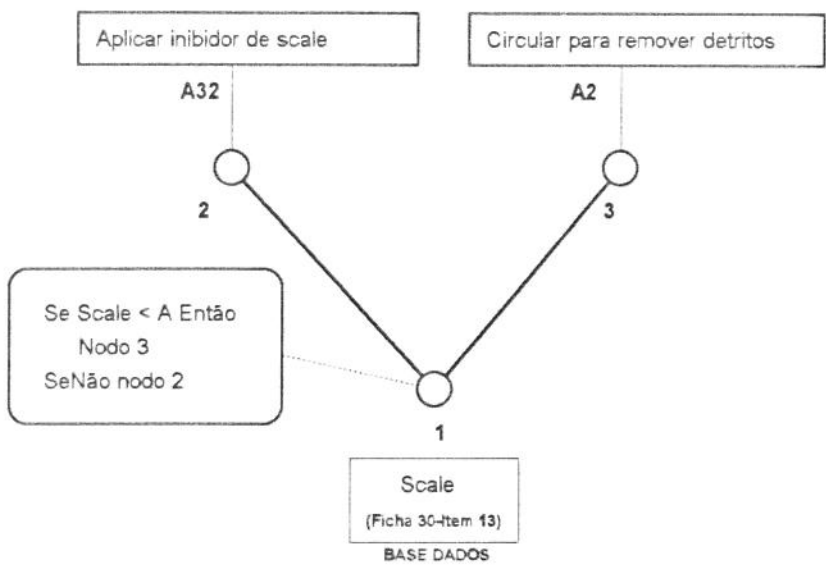


Figura 3-58 - Agente Interv\_4

3.3.2.4.1.6 Interv\_5

Este agente é ativado pelo diagnóstico D13 o qual indica que as HB estão subdimensionadas. Em função do grau das HB e do valor de confiança na hipótese de corrosão severa, ações pertinentes são recomendadas (A8, A9, A10).

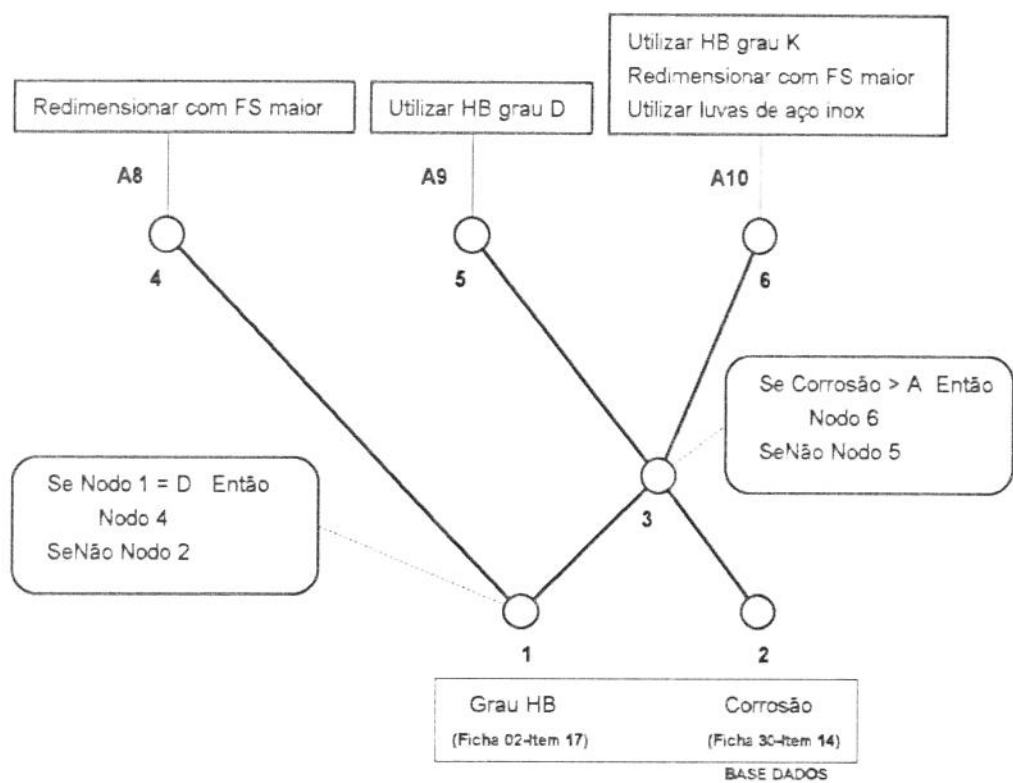


Figura 3-59 - Agente Interv\_5

3.3.2.4.1.7 Interv\_6

Este agente é ativado pela carta dinamométrica com padrão “haste partida”. Em função do valor de confiança na hipótese de atrito severo e corrosão severa, grau das HB e desvio do poço as ações pertinentes são recomendadas ( A11, A12, A13, A14, A15).

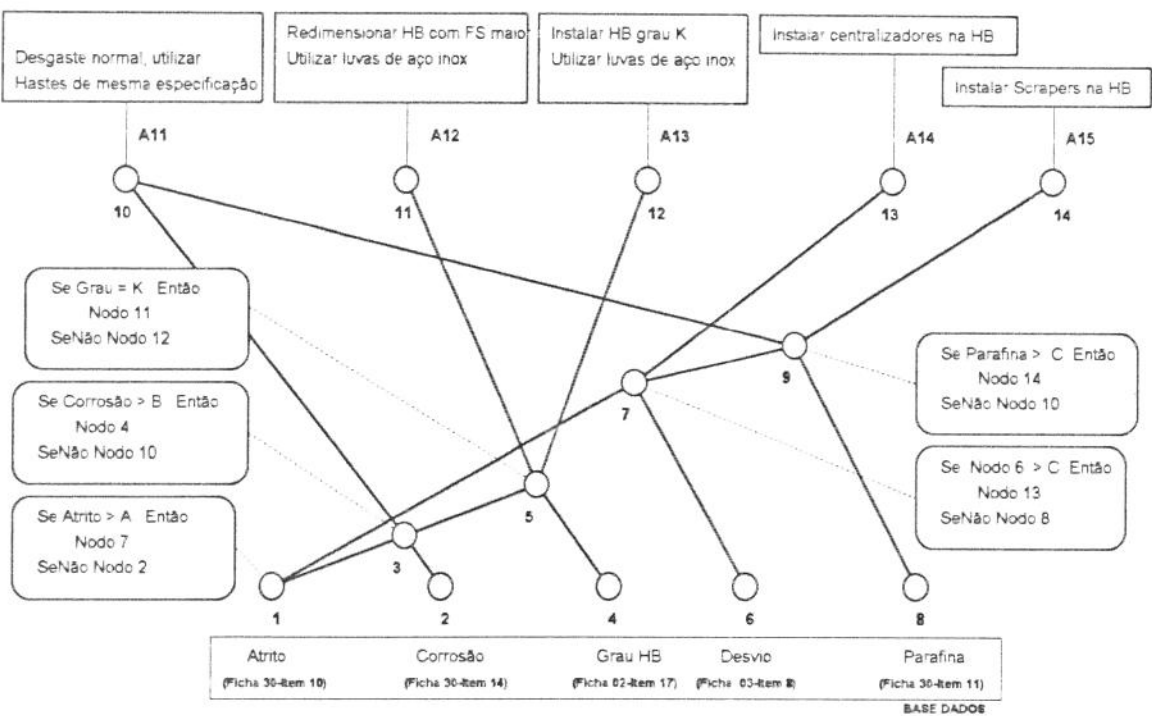


Figura 3-60 - Agente Interv\_6

3.3.2.4.1.8 Interv\_7

Este agente é ativado pela carta dinamométrica com padrão “pistão preso”. Em função do valor de confiança na hipótese de obstrução da sucção da bomba são recomendadas ações relativas à produção de fluido com areia, ou apenas a substituição da bomba (A1, A16).

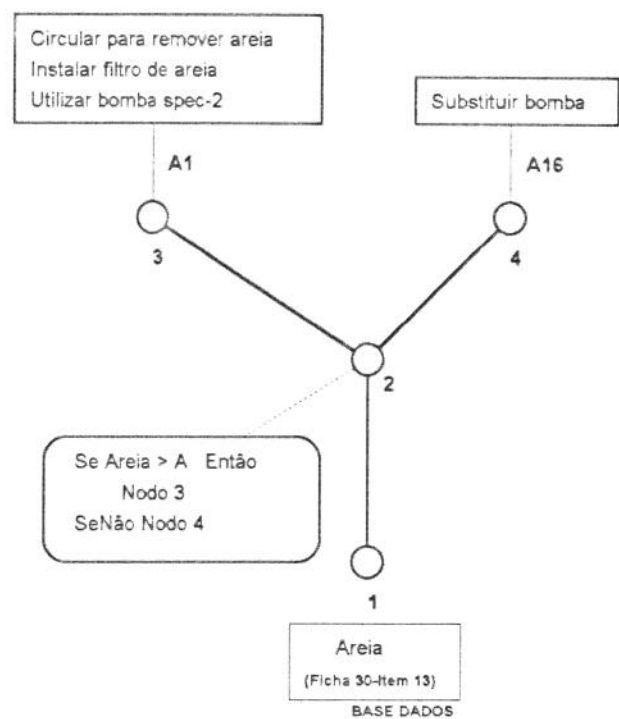


Figura 3-61 - Agente Interv\_7



3.3.2.4.2 Reduzir curso/cpm.

Este agente tem por objetivo preparar o documento de solicitação de diminuição do curso e ou velocidade de bombeamento do poço. Recebe solicitação de diversos agentes, tabela abaixo, sob diversas condições. É constituído por 4 agentes aqui denominados de sub-agentes, o quais definem as ações pertinentes às situações indicadas na tabela abaixo. O sub-agente Reduz\_0 é o responsável por ativar os outros sub-agentes, atuando também como um supervisor:

Tabela 3-6 - Triggers do Agente Reduzir curso/cpm

| Solicitada por         | Nas condições        | Diagnóstico | Ações   |
|------------------------|----------------------|-------------|---------|
| Problemas na carta     | Pancada + psuc baixa | D5          | Reduz_3 |
| Queda de produção      | Psuc baixa           | D3          |         |
| Pressão de sucção alta | EV alta              | D7          |         |
| UB subdimensionada     | Atrito baixo         | D1          | Reduz_1 |
| HB subdimensionada     | Atrito baixo         | D2          | Reduz_2 |

3.3.2.4.2.1 Reduz\_0

Em função do diagnóstico ativo ( D1, D2, D3 ou D5 ou D7), diferentes subagentes são ativados, conforme figura abaixo.

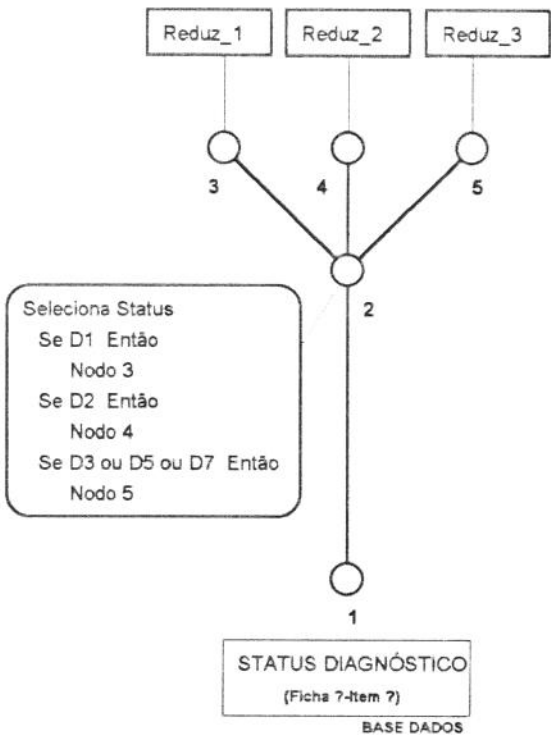


Figura 3-62 - Agente Reduz\_0

3.3.2.4.2.2 Reduz\_1

É ativado quando a UB é considerada não adequada para a capacidade de bombeamento exigida (diagnóstico D1). As ações recomendadas visam adequar as condições do SBM para a UB (A17, A18, A19).

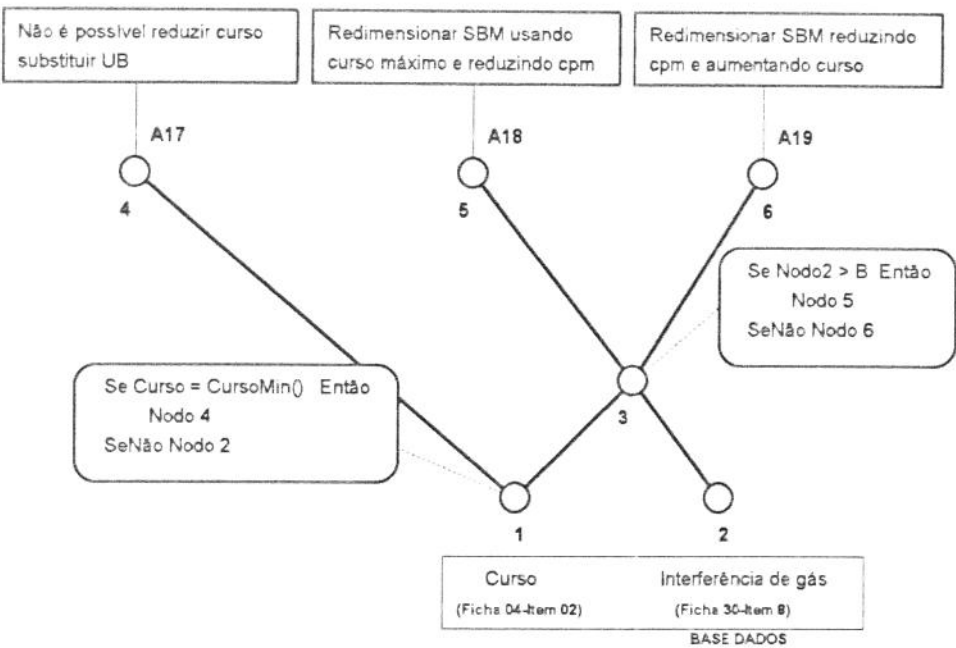


Figura 3-63 - Agente Reduz\_1

3.3.2.4.2.3 Reduz\_2

Este agente é ativa no caso de HB subdimensionada (diagnóstico D2) e as ações recomendadas (A20, A21) visam adequar o SBM para a coluna de hastes instalada.

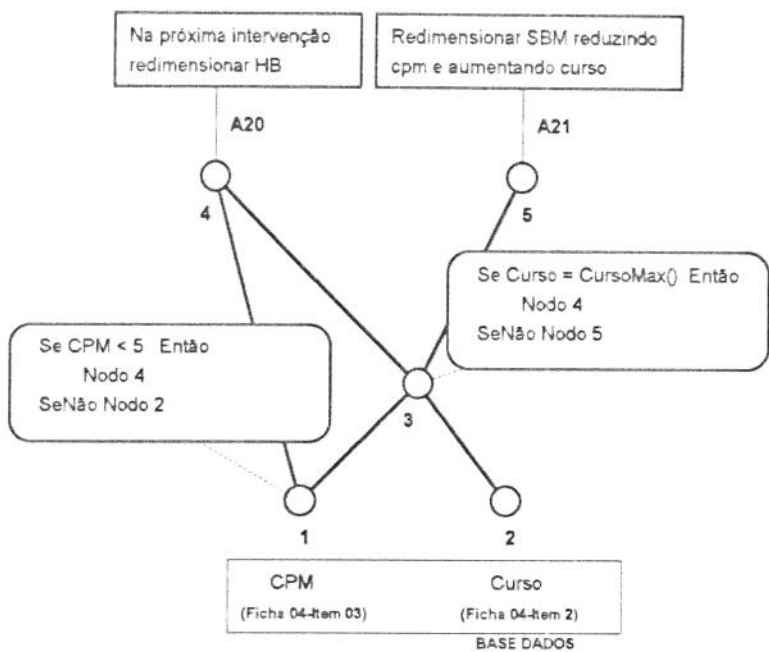


Figura 3-64 - Agente Reduz\_2

3.3.2.4.2.4 Reduz\_3

Este agente pode ser ativado pelos diagnósticos D3, D5, os quais indicam uma situação em que o SBM tem a capacidade de bombeamento superior a capacidade do poço.

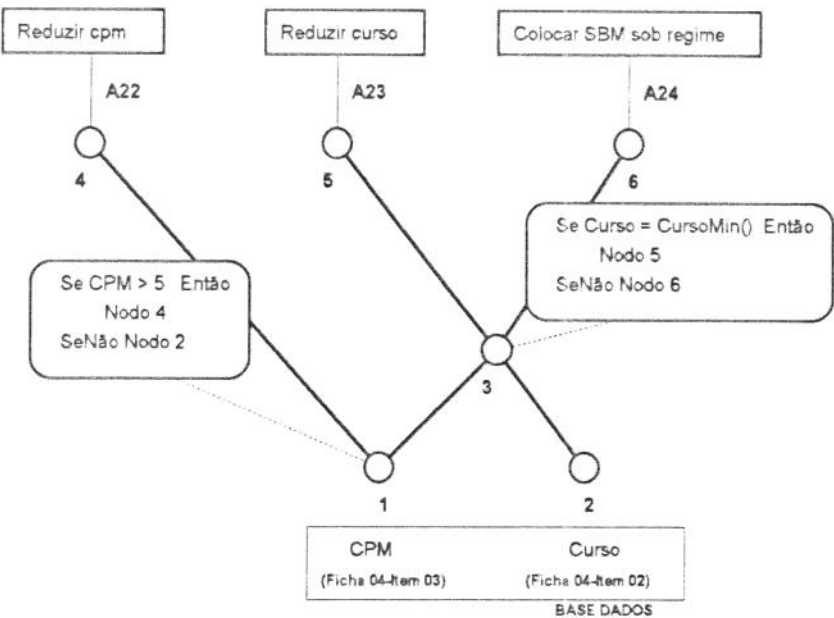


Figura 3-65 - Agente Reduz\_3

3.3.2.4.3 Aumentar curso/cpm.

Este agente tem por objetivo preparar o documento de solicitação de aumento do curso e ou velocidade de bombeamento do poço. Recebe solicitação de diversos agentes, sob diversas condições, ver tabela e figura abaixo.

Tabela 3-7 - “Triggers” do agente aumentar curso/cpm

| Solicitada por         | Nas condições                  | Diagnóstico | Ações              |
|------------------------|--------------------------------|-------------|--------------------|
| Problemas na carta     | Vazamento valv. de passeio     | D8          | Aumentar curso/cpm |
|                        | Vazamento valv. de pé          |             |                    |
| Queda de produção      | Psuc alta + normal             | D6          |                    |
|                        | Psuc alta + Interf. gás        |             |                    |
|                        | Psuc alta + bloqueio gás       |             |                    |
|                        | Vazamento valv. de passeio     |             |                    |
|                        | Vazamento valv. de pé          |             |                    |
| Pressão de sucção alta | EV baixa + Vaz. valv. passeio  | D16b        |                    |
|                        | EV baixa + Vaz. valv. pé       |             |                    |
|                        | EV alta                        | D7          |                    |
| EV baixa               | Psuc alta + Vaz. valv. passeio | D15b        |                    |
|                        | Psuc alta + Vaz. valv. pé      |             |                    |
|                        | Psuc baixa                     | D4          |                    |

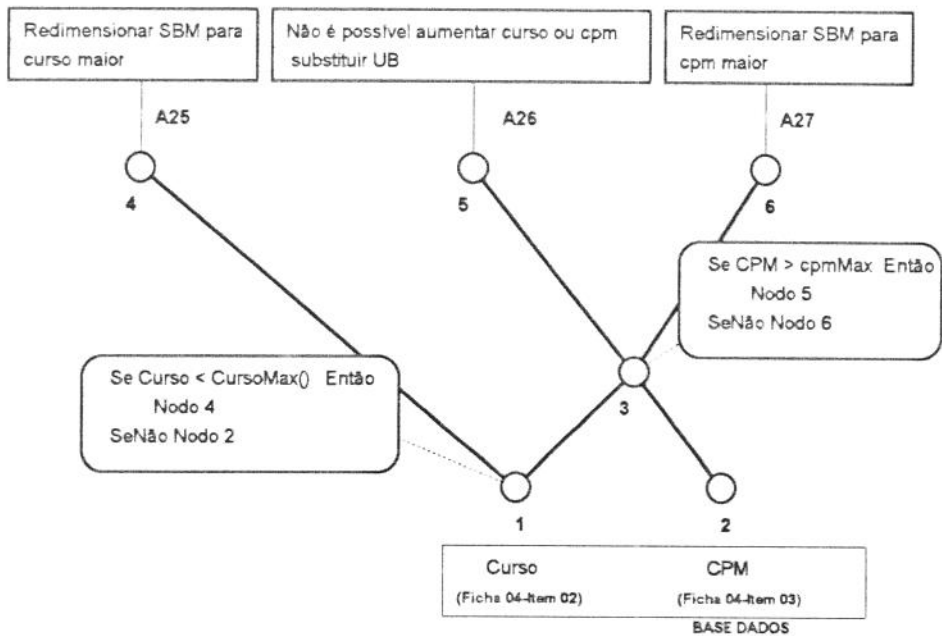


Figura 3-66 - Agente Aumenta curso/cpm

#### 3.3.2.4.4 Outros agentes

As ações substituir UB, desparafinar coluna de tubos, reduzir espaço morto da bomba, substituir motor e aplicar inibidor de scale, são realizadas por agentes de mesmo nome cuja definição conceitual depende do procedimento operacional a ser utilizado e não disponível para o autor durante a redação desta monografia.

## 4. Exemplos de utilização do sistema

Tres casos típicos, baseados em dados reais, foram analisados como exemplo de utilização do sistema desenvolvido. A apresentação dos resultados obtidos será feita utilizando os próprios recursos do sistema, conforme mostrado nas figuras abaixo:

### 4.1 Caso 1

Este caso apresenta uma situação onde a solução do problema detectado envolve uma intervenção de sonda, no qual a definição das ações é mais complexa pela necessidade de indicar ações para sanar múltiplas falhas ou problemas.

#### 4.1.1 Dados do poço

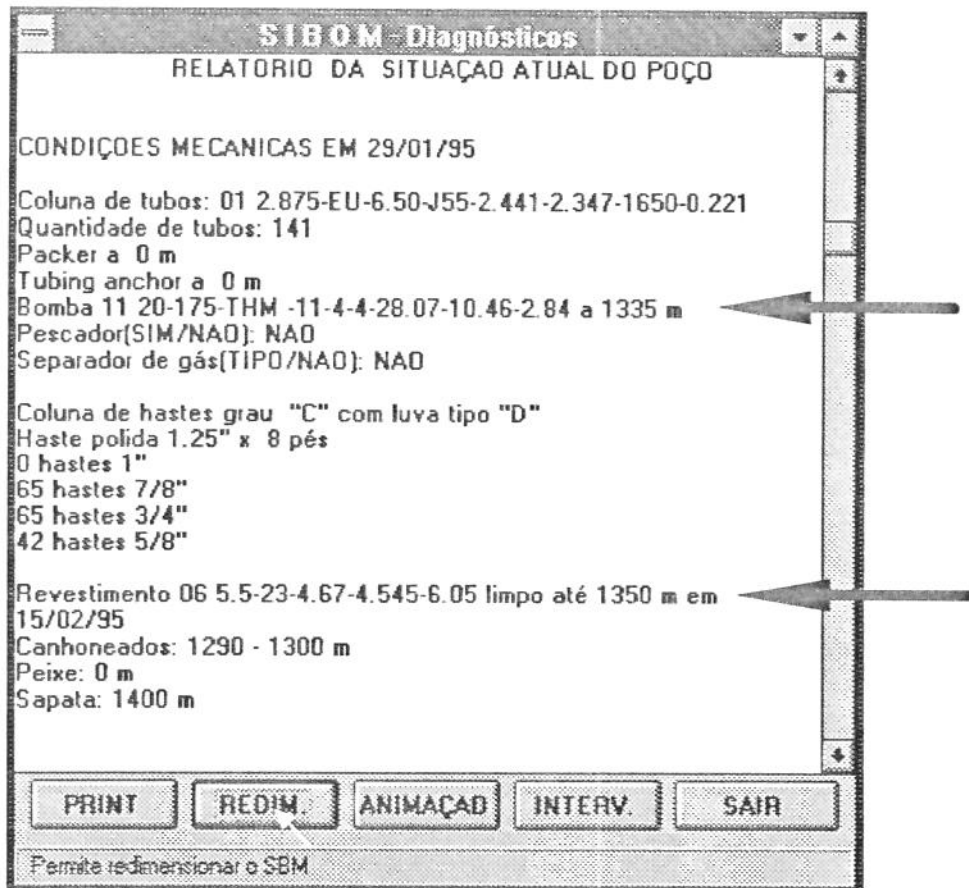


Figura 4-1- Condições mecânicas do poço - CAM 76

A partir dos dados do poço (figura acima e seguintes) é possível concluir sobre alguns aspectos relevantes em relação ao SBM:

A bomba está posicionada muito próxima do fundo e dos perfurados (setas).

**SIBOM - Diagnósticos**

**UNIDADE DE BOMBEAMENTO**

Unidade de bombeamento: 33MICROLAB ML160\* 160200 74 9  
 Curso: 44 pol.  
 Velocidade de bombeamento: 11 cpm  
 Contrapesos em :  
 Motor ELÉTRICO de 15 hp

**CARACTERÍSTICAS DO FLUIDO PRODUZIDO**

Grau API: 35  
 RGL: 50 m3/m3  
 Densidade relativa do gás: 0.65  
 Salinidade da água produzida: ppm  
 Densidade relativa da água: 1.05  
 Histórico de parafinação: SIM  
 Histórico de formação de scale: NAO  
 Produção de areia: SIM  
 Presença de H2S: SIM  
 Presença de CO2: NAO  
 Viscosidade média do fluido: 12.43 cp

**CARACTERÍSTICAS DO RESERVATÓRIO**

Zona produtora: CP-1  
 Pressão estática de 27 Kgf/cm2 a 1200 m, medida em 29/01/95  
 Pressão de saturação: 1300 psi  
 Temperatura de fundo: 120 F

PRINT REDIM ANIMAÇAD INTERV. SAIR

Permite redimensionar o SBM

Figura 4-2 - Características da UB, do fluido e do reservatório do poço CAM 76

A última limpeza (intervenção de sonda) realizada neste poço ocorreu há mais de 9 meses e, dado os históricos de produção de areia e de acúmulo de parafina (setas) é possível a obstrução da sucção da bomba por areia e um eventual acúmulo de parafina na coluna.



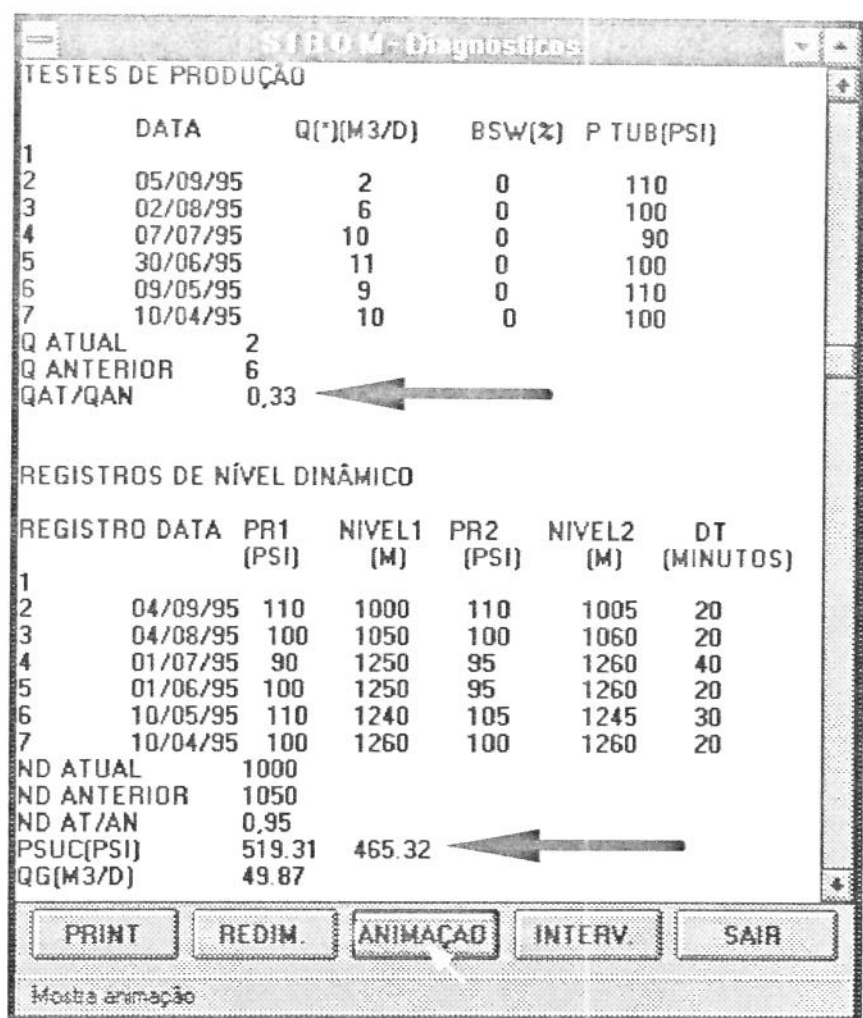


Figura 4-3- Testes de produção e registros de nível dinâmico do poço CAM 76

O último teste de produção realizado indicou uma queda de produção e a pressão de sucção calculada a partir do último registro de nível dinâmico indicou valor elevado da pressão de sucção (setas).

Para uma boa avaliação destes valores, os mesmos devem ser comparados respectivamente com a vazão potencial e com a pressão de sucção requerida, parâmetros calculados a partir da análise nodal (figura 4-22).

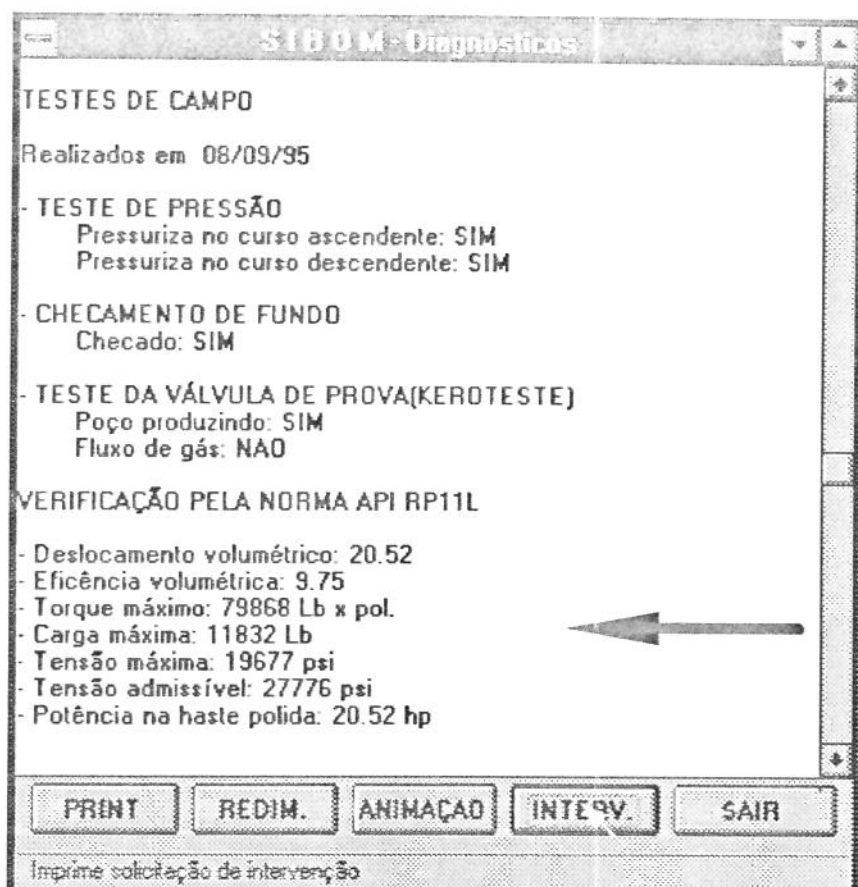


Figura 4-4 - Testes de campo e verificação pela norma API RP11L do CAM 76

Os parâmetros obtidos a partir da norma API RP 11L (seta) indicam EV bastante baixa e valores de carga, tensão e torque aparentemente aceitáveis. No entanto, para uma boa avaliação destes últimos parâmetros é necessário avaliar o atrito e a presença de gás no SBM.

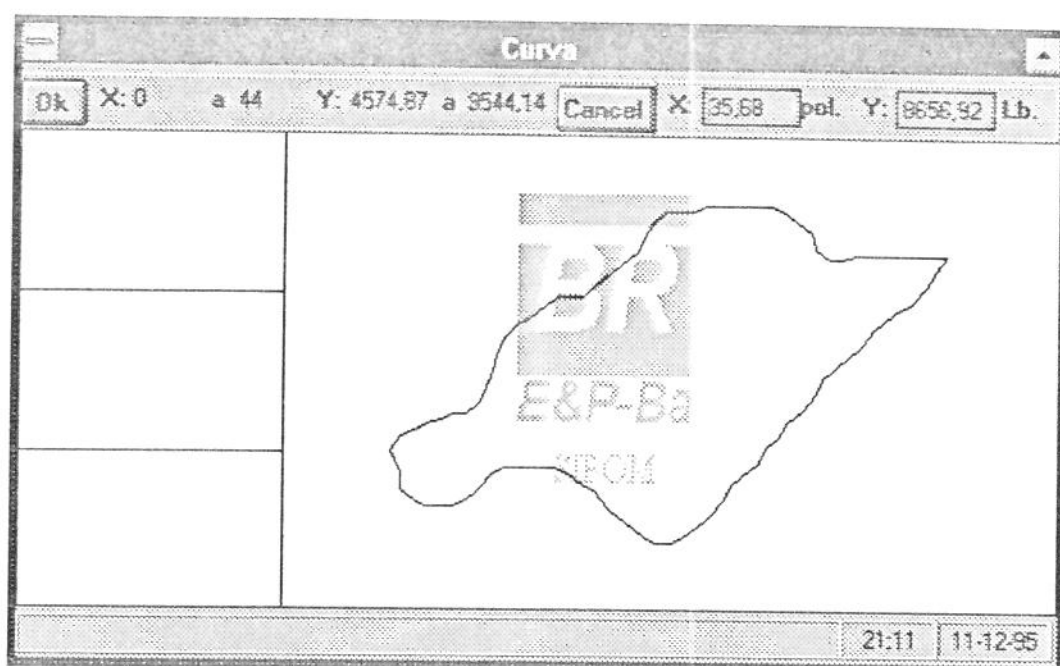


Figura 4-5 - Carta dinamométrica de superfície do poço CAM 76

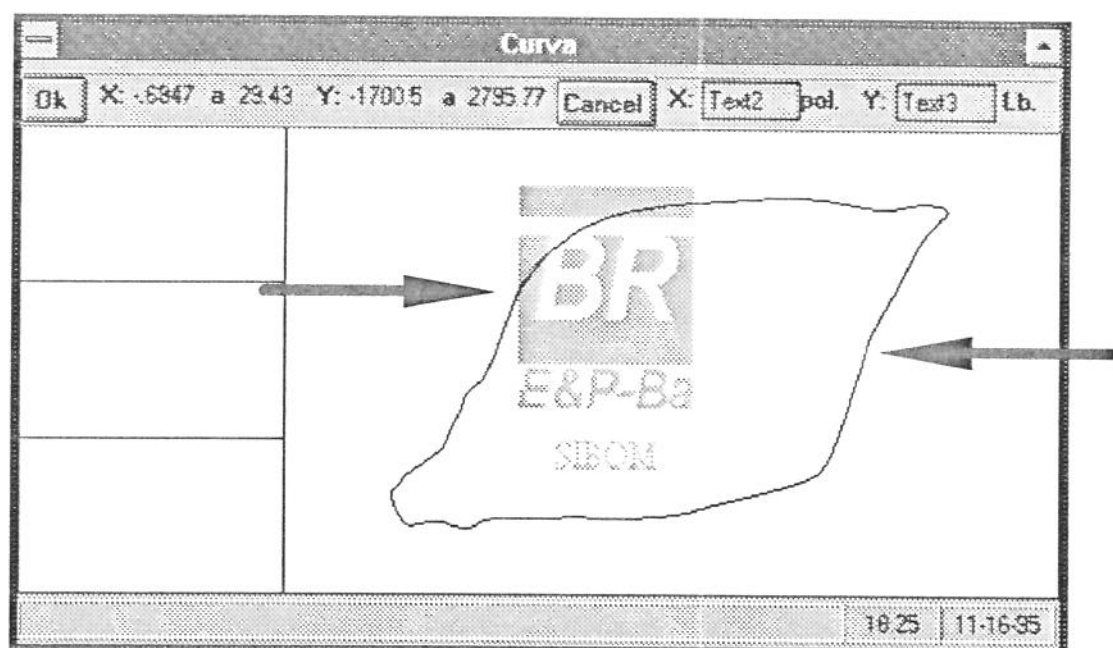


Figura 4-6 - Carta dinamométrica de fundo do poço CAM 76

A carta dinamométrica de fundo permite identificar uma ligeira pancada de fluido ( seta direita) e um leve vazamento na válvula de passeio (seta esquerda), além do deslocamento da coluna de tubo.

Os comentários acima apresentados foram obtidos a partir da visão de usuário, embora utilizando recursos como cálculo da pressão de sucção e carta de fundo. A seguir apresentamos a análise realizada pelo sistema.

4.1.2 Definição dos sintomas

Os agentes do grupo 1 definem o quadro de sintomas do SBM.

4.1.2.1 Agente Atrito

Este agente analisa o atrito presente no sistema a partir da comparação entre cargas estáticas medidas e calculadas.

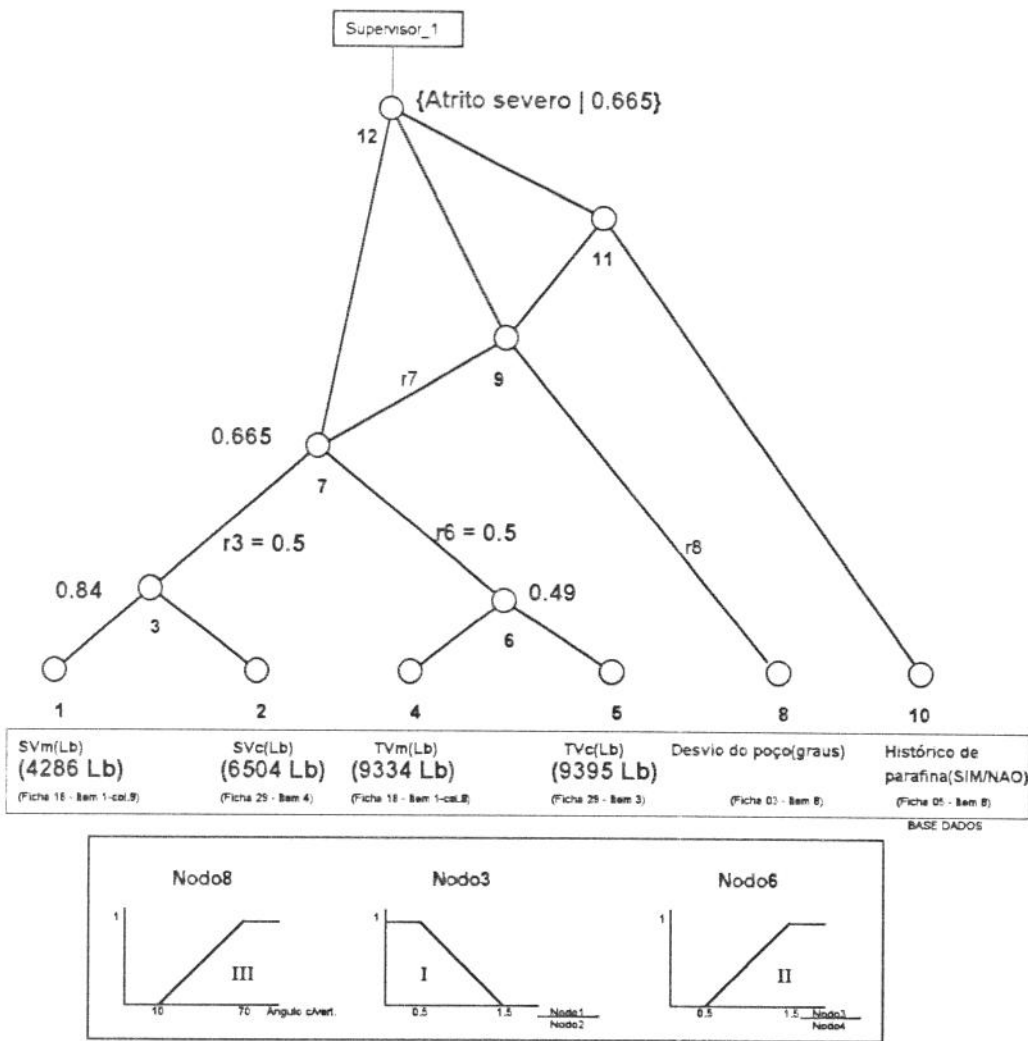


Figura 4-7 - Agente Atrito

O valor da carga no teste da válvula de pé (nodo 1) comparado com o correspondente valor teórico (nodo 2) permite obter um valor de confiança de 0.84 (nodo3) para a hipótese de atrito severo no SBM.

O valor da carga no teste da válvula de passeio (nodo 4) comparado com o correspondente valor teórico (nodo 5) permite obter um valor de confiança de 0.49 (nodo 6) para a mesma hipótese.

A agregação das duas regras através da média ponderada pela relevância de cada uma permite obter um valor de confiança de 0.665 para a hipótese de atrito severo. Sendo este valor maior que o limiar definido para a aceitação da hipótese, o mesmo é utilizado para atualizar o blackboard (ficha 30 item 10).

### 4.1.2.2 Agente Interferência de gás

Este agente avalia a hipótese de interferência (presença) de gás severa no SBM.

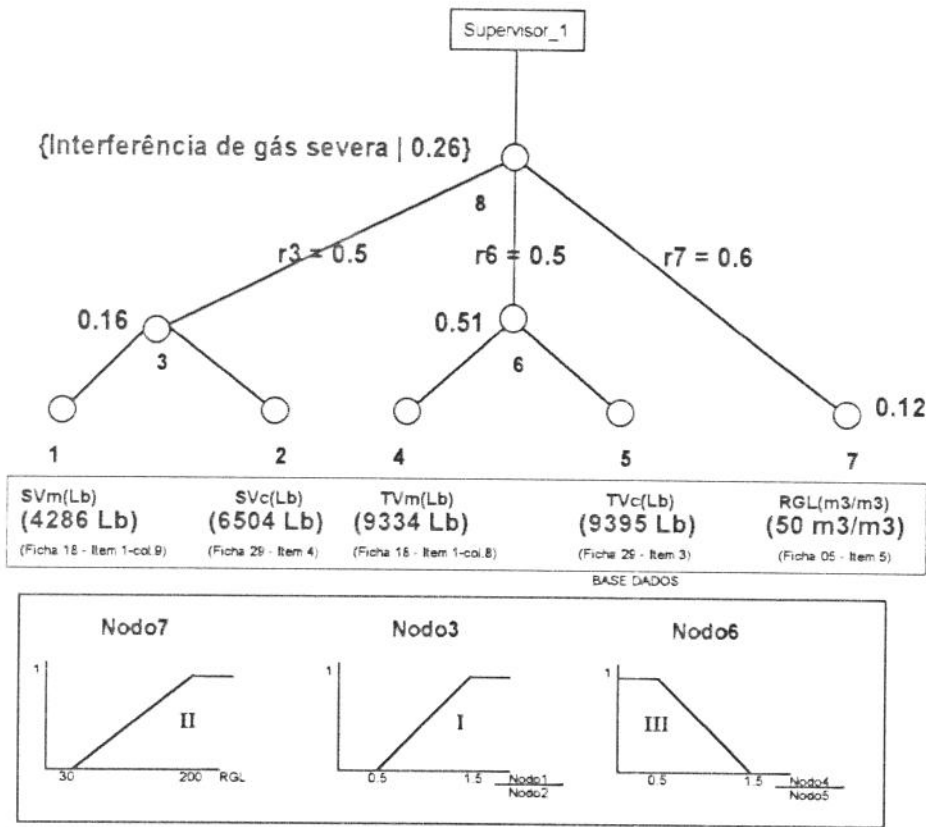


Figura 4-8 - Agente Interferência de gás

De forma semelhante à descrita acima para o atrito, apenas utilizando outras funções de pertinência e o valor da RGL medida, é definido um valor de confiança para a hipótese de “interferência de gás severa” no SBM.

#### 4.1.2.3 Agente Unidade de bombeamento

Este agente avalia o dimensionamento da UB a partir da comparação dos valores de carga e torque calculados pela norma API RP 11L com os correspondentes valores da UB.

No nodo 7 (figura abaixo) a partir do valor de confiança na hipótese de atrito severo (0.66) é selecionada a função de pertinência “I” utilizada para, a partir do valor calculado no nodo 3, obter o valor de confiança na hipótese UB subdimensionada do ponto de vista de carga levando em conta apenas o atrito existente no sistema.

No nodo 8 é adotado procedimento semelhante levando em conta apenas a interferência de gás. Neste caso é selecionada a função de pertinência “IV”.

No nodo 9 é feita a agregação do valor de confiança na hipótese de UB subdimensionada do ponto de vista de carga levando em conta tanto o atrito como a interferência de gás.

Nos nodos 10, 11 e 12 é adotado procedimento análogo aos anteriores para o torque, usando agora as funções de pertinência “IX”, “X”.

No nodo 13 é feita a agregação das regras acima descritas para a carga e torque utilizando-se para isso a função lógica “OU” formalizada através da operação de máximo. Obtem-se dessa forma o valor de confiança de 0.69 para a hipótese “UB subdimensionada”.

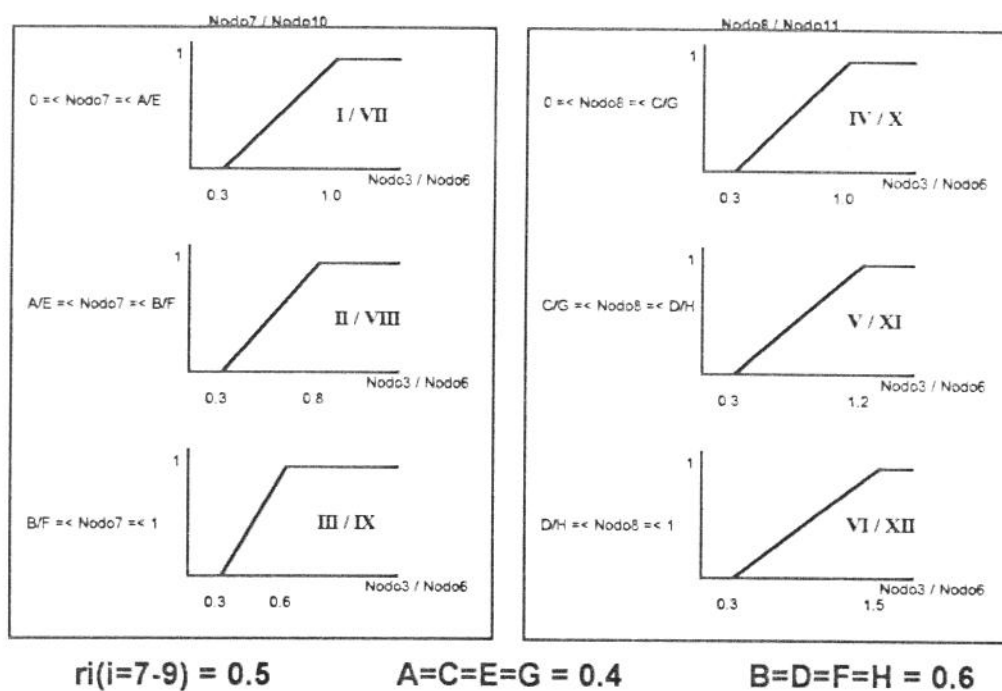
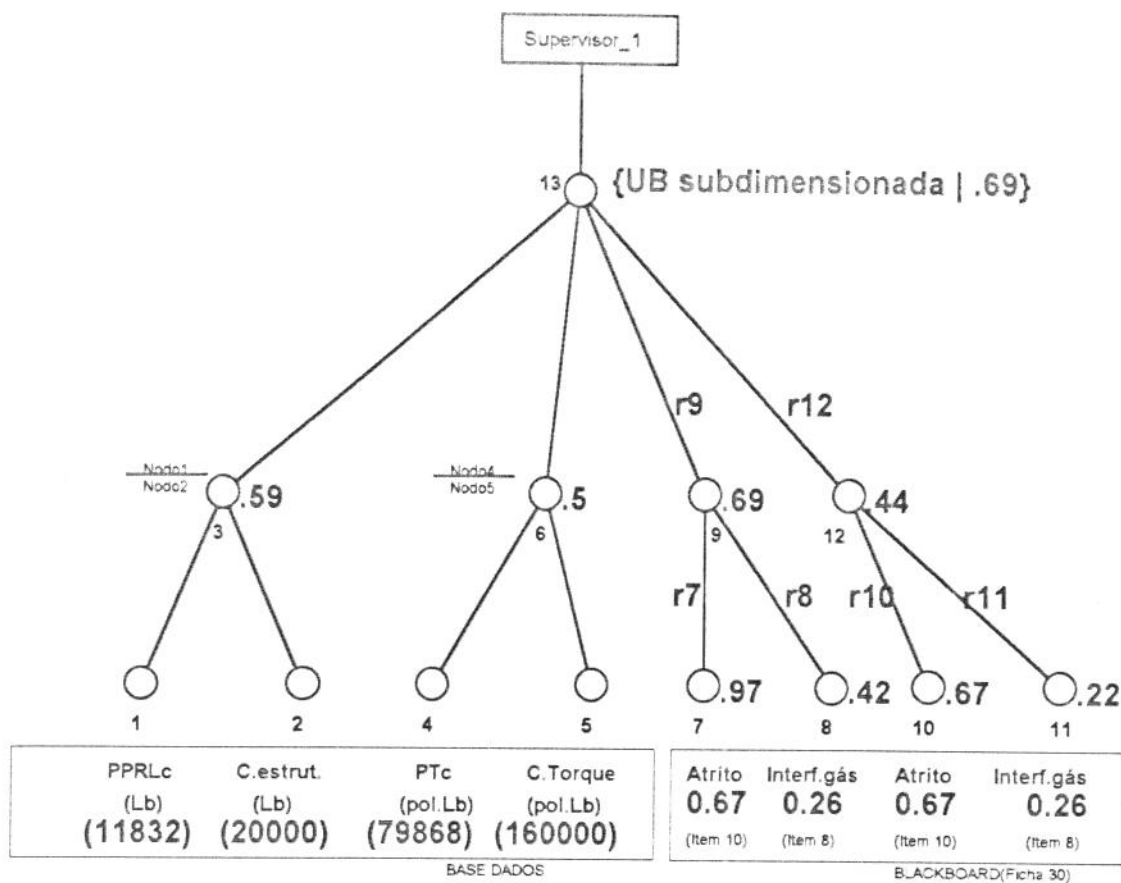


Figura 4-9 - Agente Unidade de bombeamento

4.1.2.4 Agente motor

Este agente avalia o sintoma do motor da UB a partir da comparação entre a potência instalada e a potência requerida, levando em conta tanto a presença de gás como atrito no sistema.

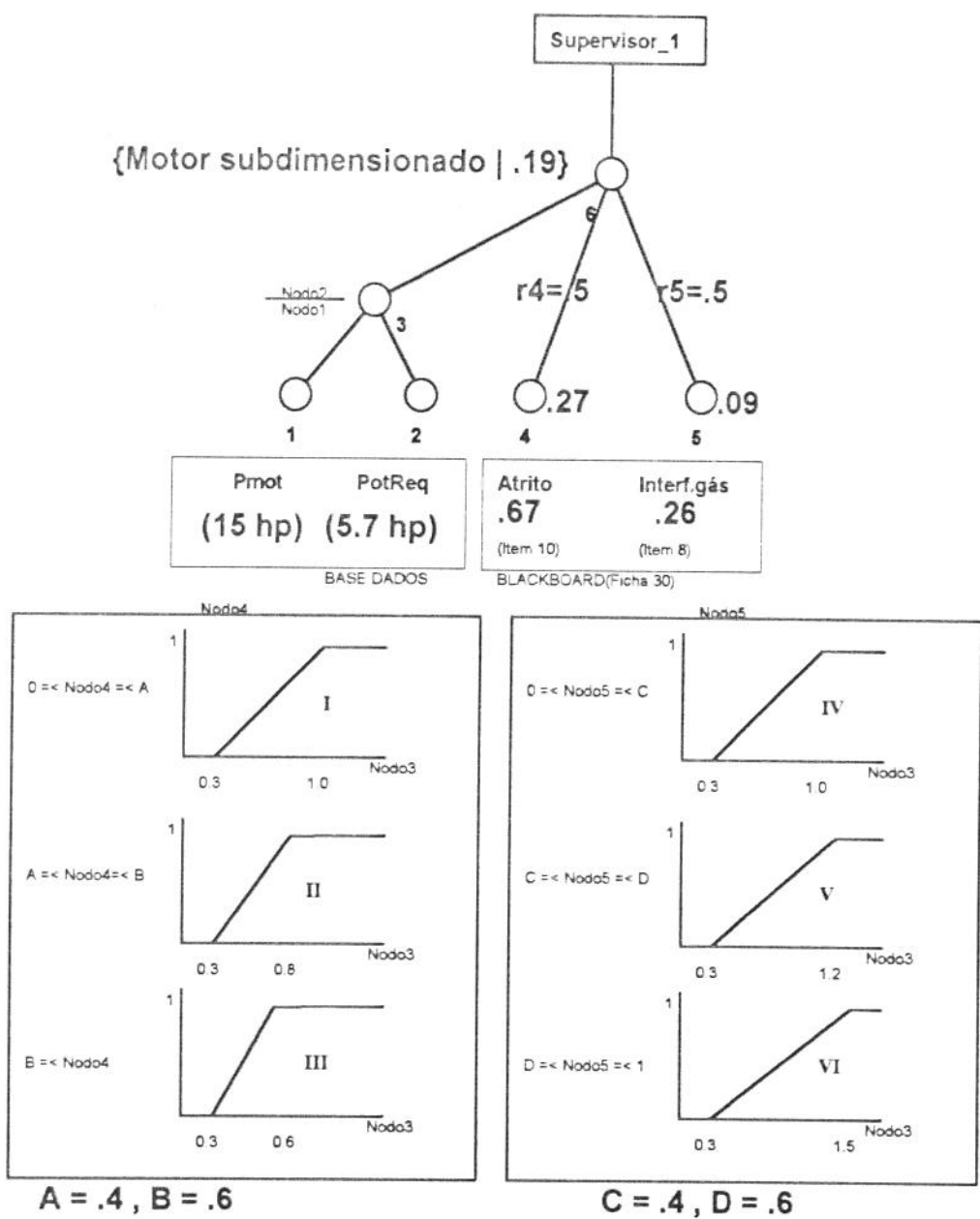


Figura 4-10 - Agente Motor

O procedimento adotado neste agente é semelhante ao anterior. Em função dos valores de confiança nas hipóteses de atrito severo e interferência de gás severa, são selecionadas as funções de pertinência “III” e “IV” utilizadas para definir o valor de confiança na hipótese motor subdimensionado nos nodos 4 e 5. A agregação dos valores de confiança através da média ponderada pelas relevâncias atribuídas às regras formalizadas nos nodos 4 e 5 define o valor de confiança na hipótese motor subdimensionado (0.19).



4.1.2.5 Agente Tensão nas hastes

De forma análoga aos agentes anteriores, este agente define o valor de confiança na hipótese HB subdimensionada em 0.8.

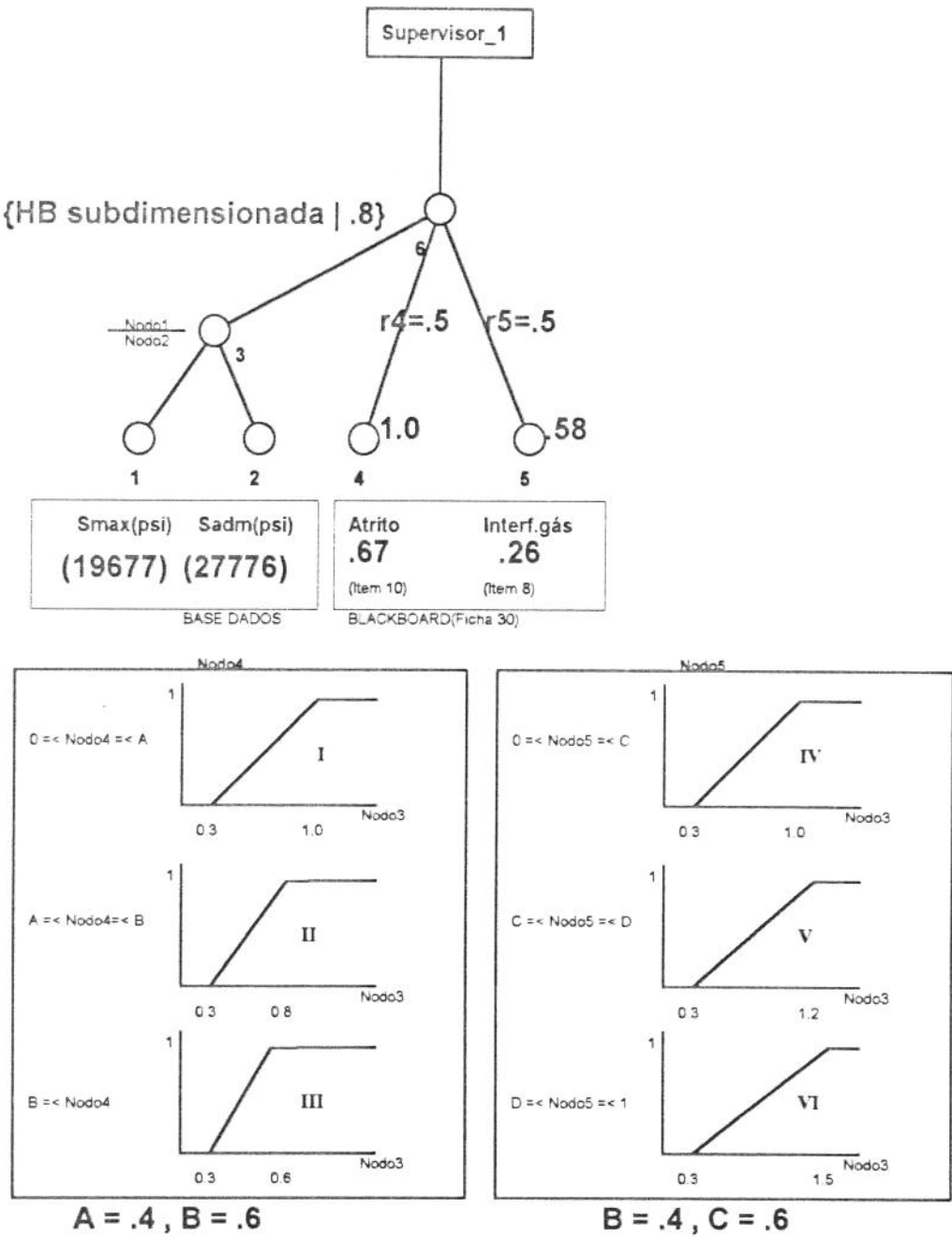


Figura 4-11 - Agente Haste de bombeamento

4.1.2.6 Agente Teste de produção X vazão potencial

Este agente compara o valor do teste de produção com a vazão potencial do SBM calculada através da análise nodal. Caso o valor da vazão potencial seja desconhecido ou o valor de confiança obtido muito baixo, a variação em relação ao teste de produção anterior é utilizada para definir a hipótese.

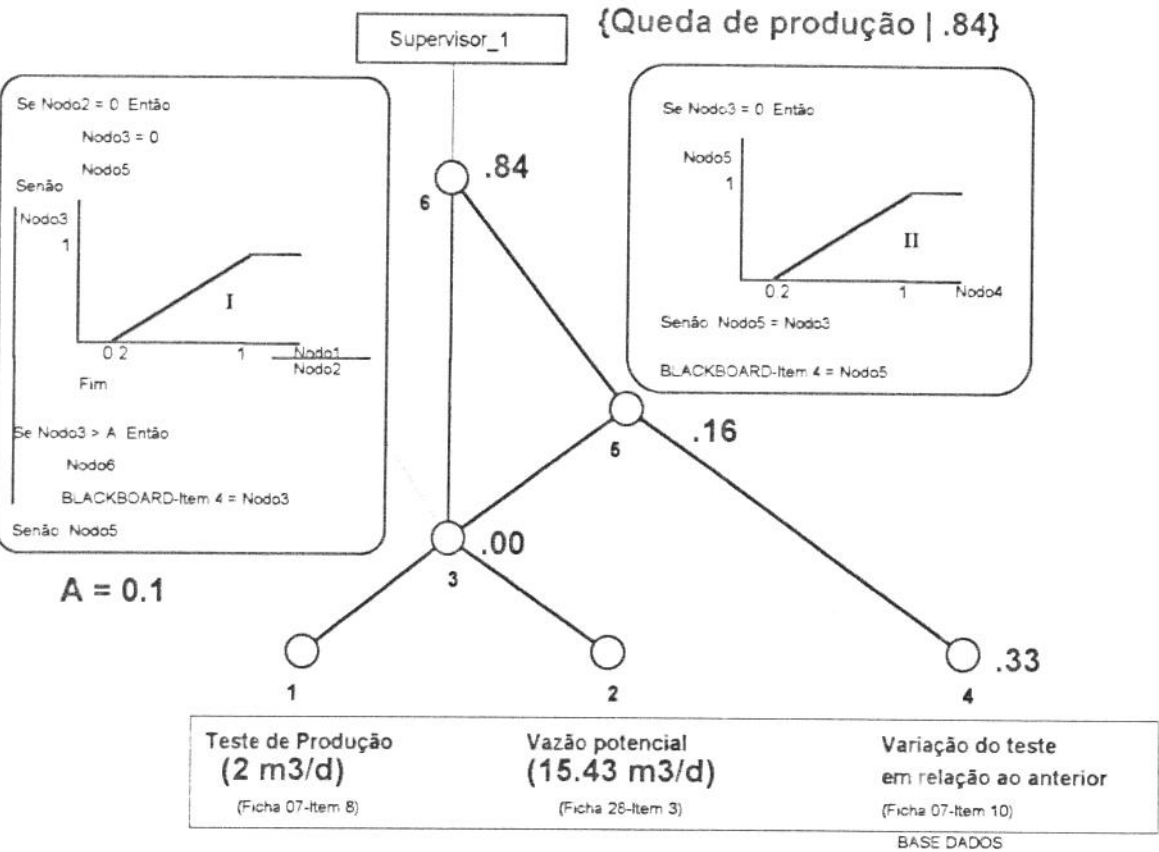


Figura 4-12 - Agente Teste de produção X vazão potencial

A função de pertinência “I” no nodo 3 fornece um valor de confiança nulo o qual é menor que o limite de 0.1 definido. Isto faz com que os nodos 4 e 5 sejam ativados e o valor de confiança de 0.16 seja obtido da função de pertinência “II”. O valor de confiança para a hipótese de queda de produção é obtido através da operação complemento realizada no nodo 6, obtendo o valor de 0.84.

4.1.2.7 Agente Eficiência Volumétrica

Este agente avalia a EV do sistema levando em conta a interferência de gás.

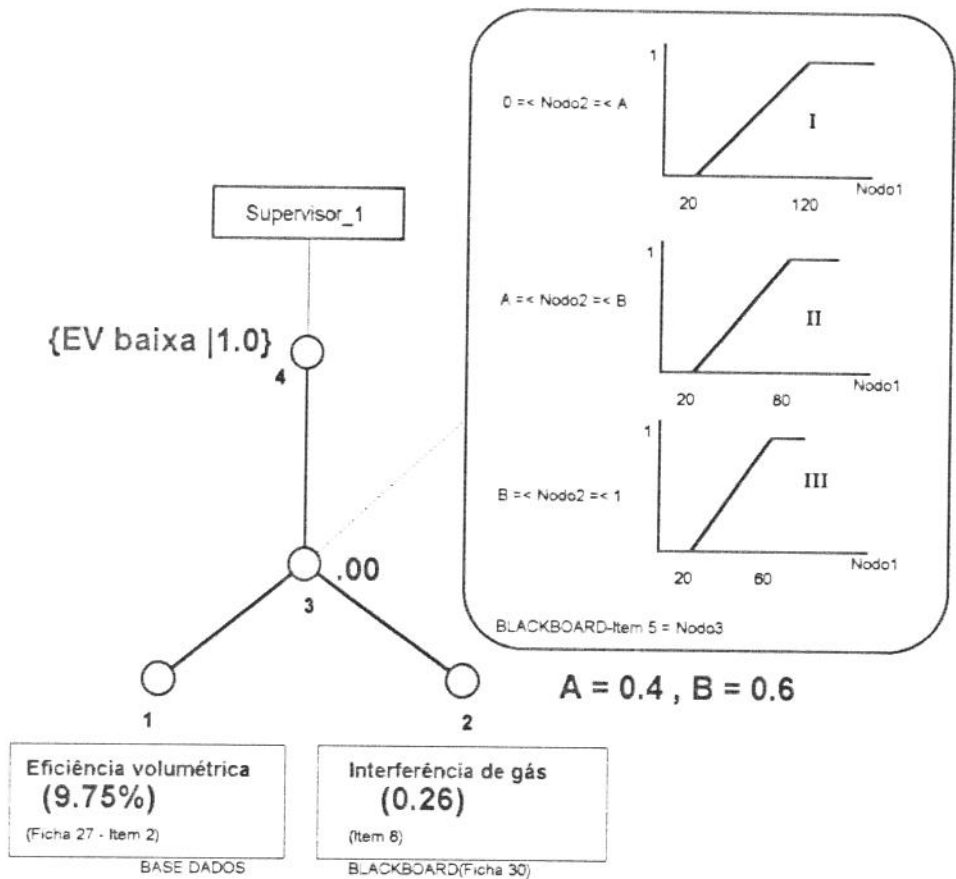


Figura 4-13- Agente Eficiência volumétrica

O valor de confiança na hipótese de interferência de gás severa define a função de pertinência a ser utilizada para o cálculo do valor de confiança na hipótese de EV alta, obtendo para os dados deste poço o valor 0.0. O valor de confiança na hipótese de EV baixa é calculado através da operação complemento realizada no nodo 4 obtendo-se o valor de confiança de 1.0.

4.1.2.8 Agente Pressão de Sucção

Este agente compara a pressão de sucção calculada a partir do registro do nível dinâmico com a pressão requerida calculada através da análise nodal. A função de pertinência “I” formaliza o conceito de menor utilizado na comparação.

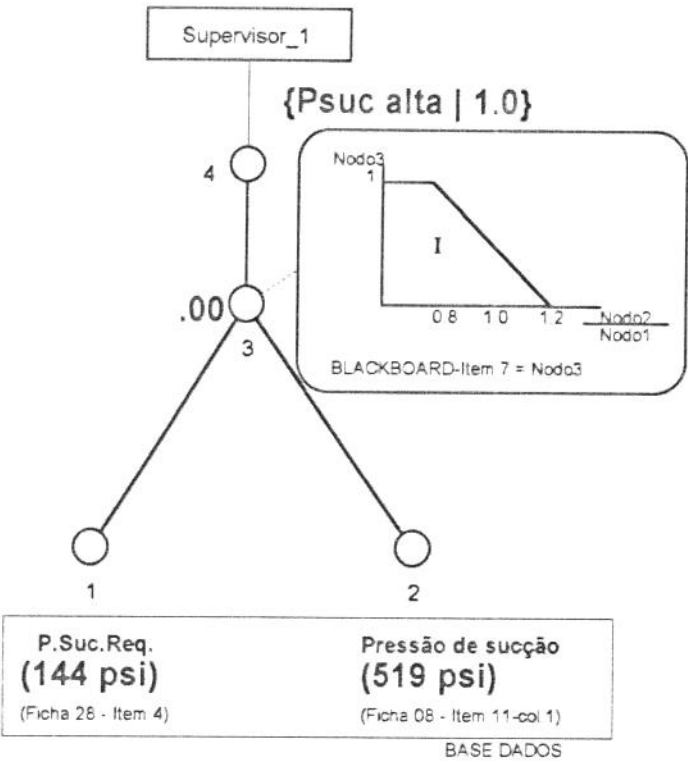


Figura 4-14 - Agente Pressão de sucção

No nodo 3 a função de pertinência fornece o valor de confiança para a hipótese de pressão de sucção baixa e o valor de confiança na hipótese de pressão de sucção alta é calculada pela operação complemento no nodo 4, obtendo-se neste caso o valor 1.0.

4.1.2.9 Agente Taxa de compressão da bomba

Este agente define um valor de confiança para a hipótese “Taxa de compressão baixa na bomba”, através da comparação entre a taxa de compressão presente na bomba e aquela requerida para que a bomba possa comprimir gás.

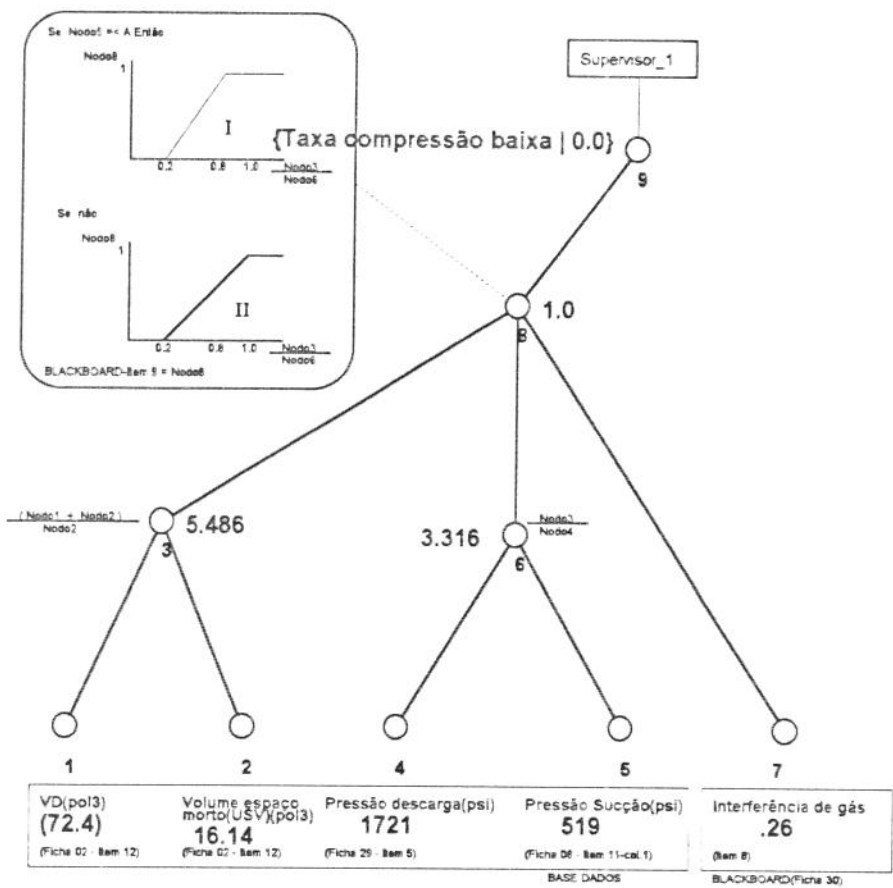


Figura 4-15- Agente Taxa de compressão

Em função do valor de confiança na hipótese interferência de gás severa, é selecionada a função de pertinência que formaliza o conceito de menor para as taxas de compressão. Dessa forma, para os valores deste SBM é obtido o valor de confiança 0.0 para a hipótese taxa de compressão baixa no nodo 9.

4.1.2.10 Agente Parafina

Este agente utiliza o tempo decorrido entre a última limpeza do poço e a data atual, juntamente com a informação sobre a existência de histórico de parafina, para definir o valor de confiança para a hipótese “acúmulo severo de parafina na coluna”.

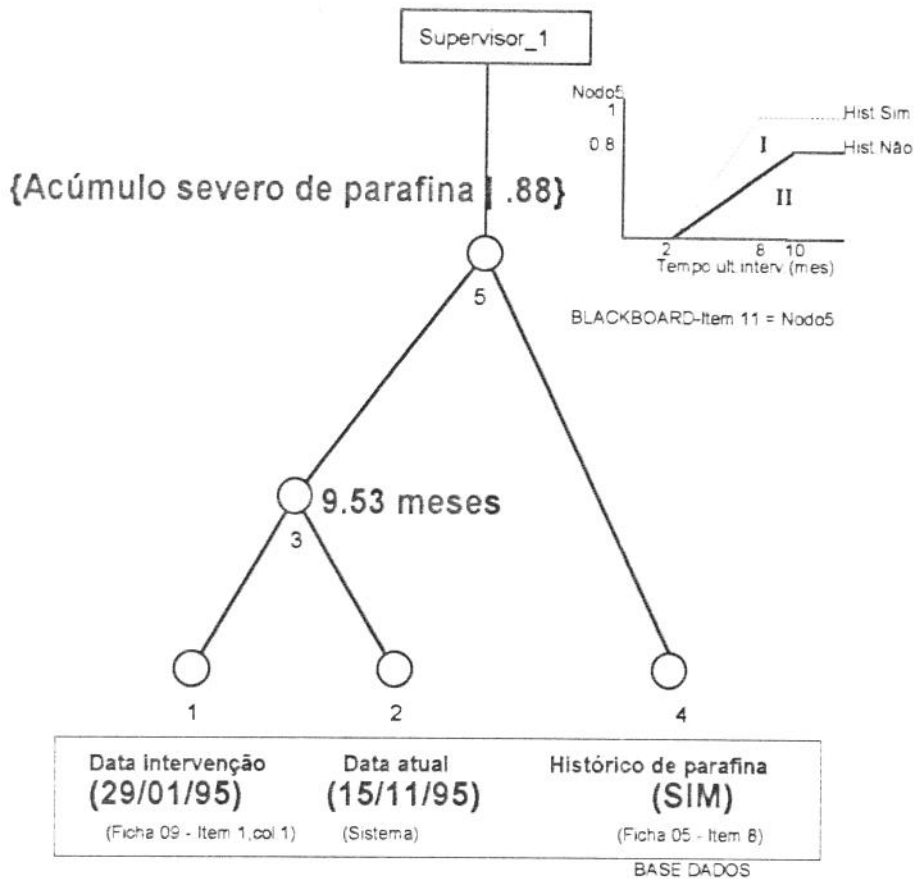


Figura 4-16- Agente Parafina

Levando em conta que decorreram 9.53 meses desde a última limpeza (intervenção de sonda) no poço e que o mesmo apresenta histórico de parafinação (função de pertinência “I” ), a hipótese de acúmulo severo de parafina é definida com o valor de confiança de 0.88 .

4.1.2.11 Agente Obstrução da Sucção da Bomba por Scale

O procedimento adotado neste agente para avaliar a hipótese de obstrução da sucção da bomba por scale é análogo ao adotado no agente anterior para avaliar o acúmulo de parafina.

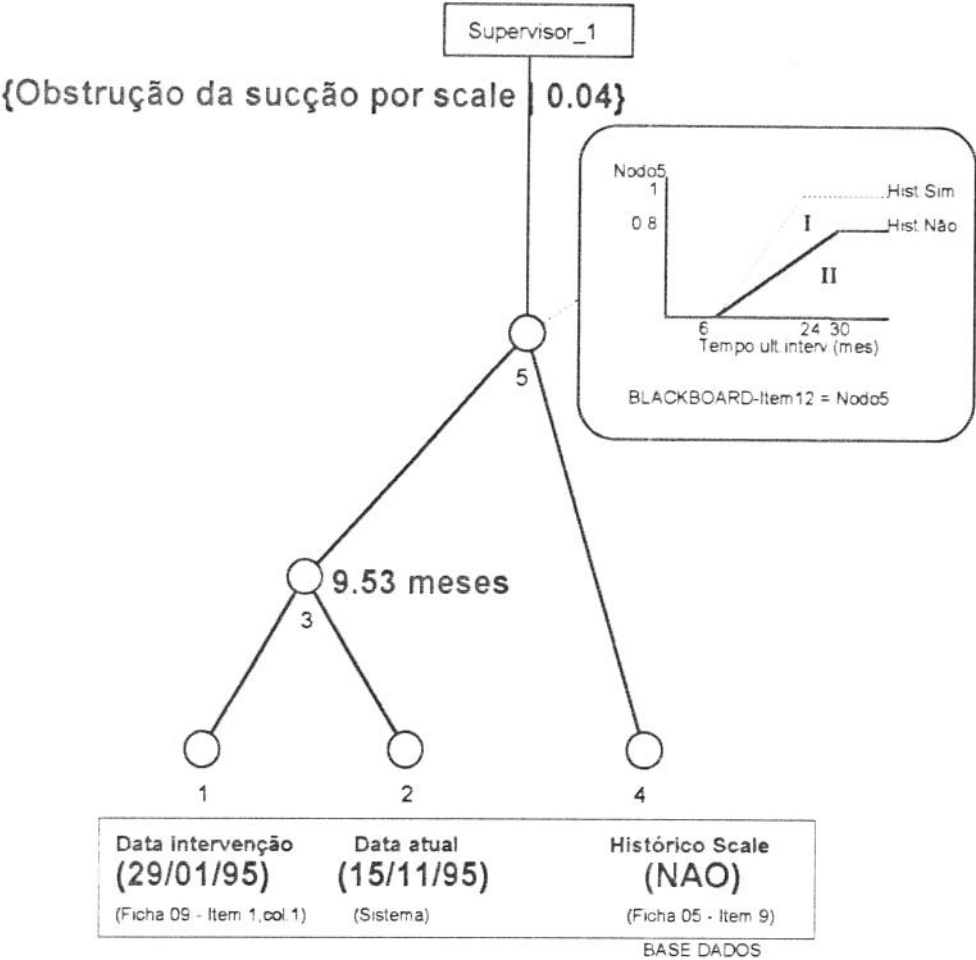


Figura 4-17- Agente Scale

4.1.2.12 Obstrução da Sucção da Bomba por Areia

Este agente avalia a hipótese de obstrução da sucção da bomba por areia, para tanto analisa o tempo decorrido desde a última intervenção no poço e o posicionamento da bomba em relação ao fundo do poço.

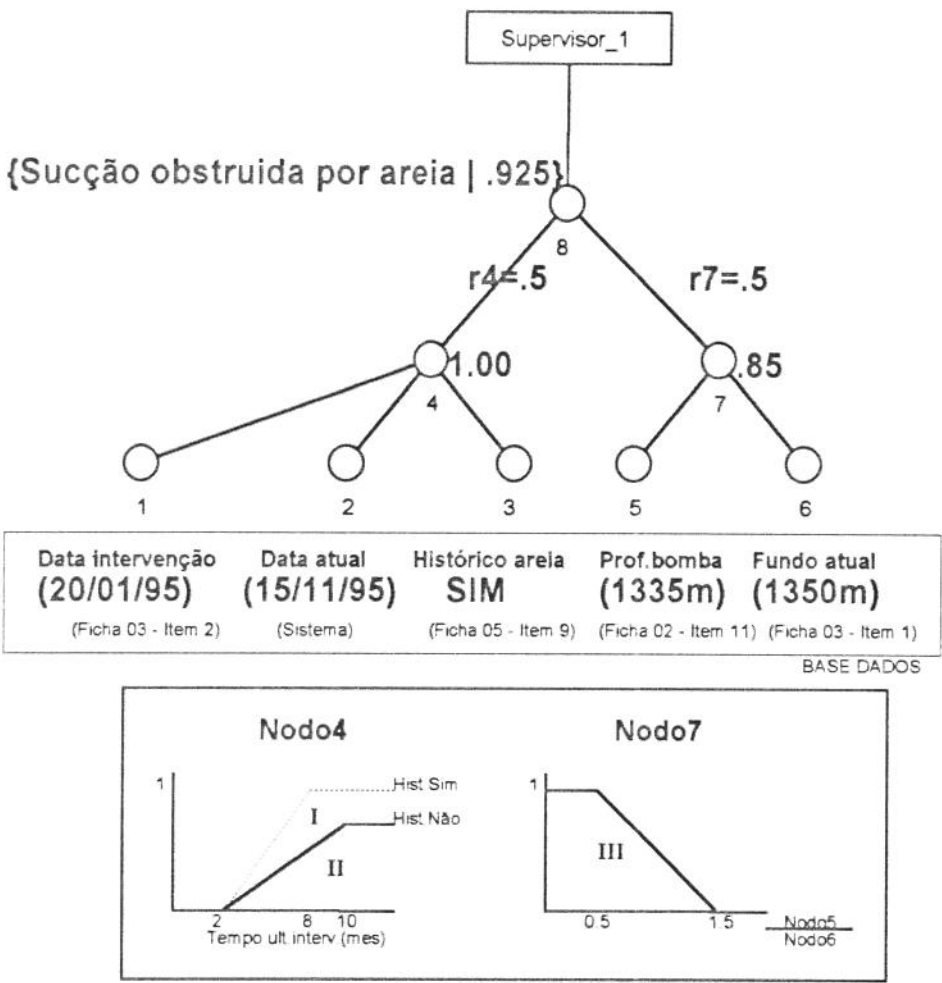


Figura 4-18- Agente Areia

A existência de histórico de produção de areia define a função de pertinência “I” através da qual é definido o valor de confiança 1.0 para a hipótese.

A comparação entre a profundidade do fundo do poço e a posição da bomba é formalizada através da função de pertinência “III” a qual fornece para este caso o valor de confiança 0.85.

A agregação das duas regras acima é formalizada no nó 8 através da média ponderada pelas relevâncias obtendo-se dessa forma o valor de confiança 0.92 para a hipótese sucção da bomba obstruída por areia.



4.1.2.13 Agente Corrosão na coluna de hastes

O procedimento adotado neste agente é análogo ao adotado nos agentes “Parafina” e “Obstrução da sucção da bomba por scale”.

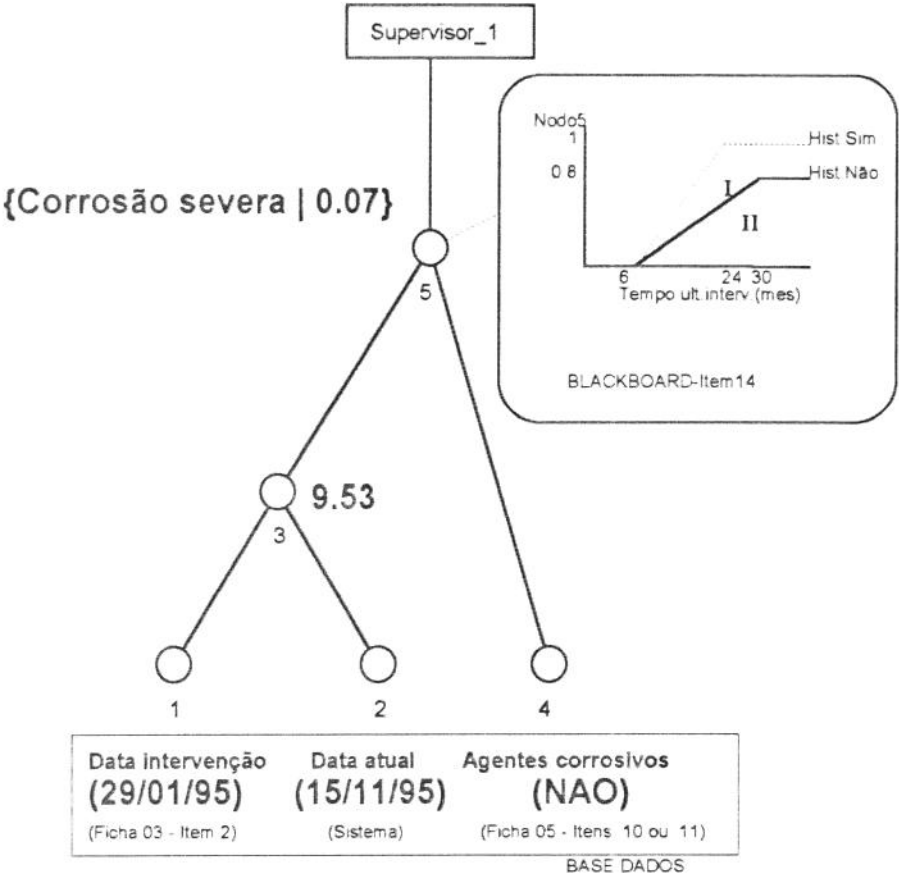


Figura 4-19- Agente Corrosão

4.1.3 Análise da carta dinamométrica

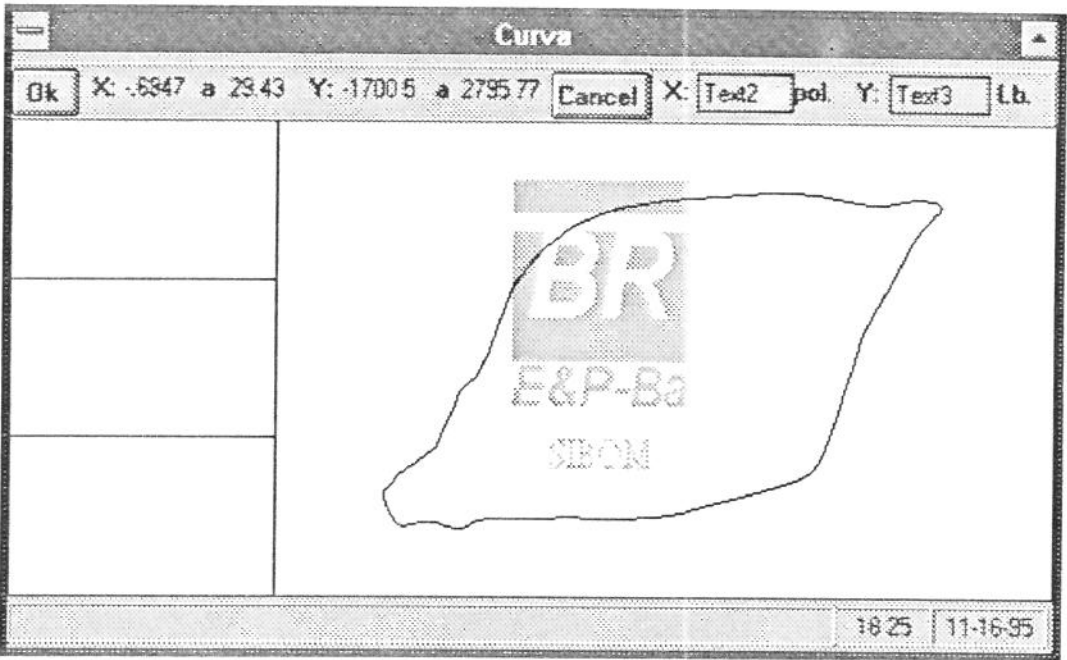


Figura 4-20 - Carta de fundo do poço CAM 76

Classificação da carta dinamométrica<sup>23</sup> :  
PANCADA DE FLUIDO | 0,46;  
NORMAL | 0,64;  
INTERFERÊNCIA DE GÁS|0,73.

A classificação da carta dinamométrica com base apenas na sua forma geométrica (acima) provoca a ativação dos agentes correspondentes “Pancada de fluido”, “Normal” e “Interferência de gás” os quais retornam o valor atualizado do grau de similaridade da carta dinamométrica em relação aos padrões e aos dados da BD.

Dos agentes ativados, será destacado apenas aquele que forneceu o maior grau de similaridade, no caso, o agente pancada de fluido.

<sup>23</sup> Feita pelo agente reconhecimento de padrões do SICAD [1,2].

4.1.3.1 Pancada de fluido

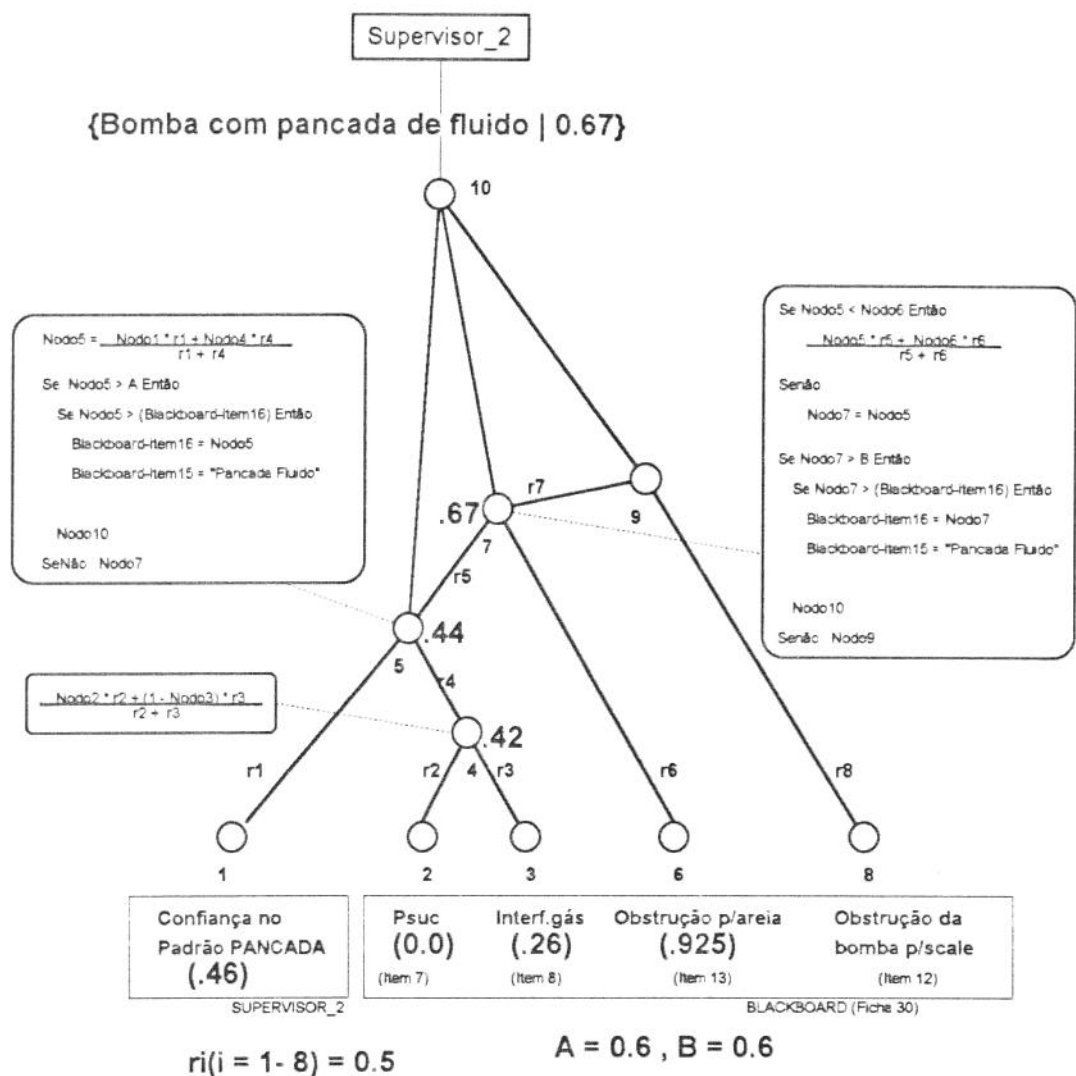


Figura 4-21 - Agente padrão pancada de fluido

A classificação da carta dinamométrica com grau de similaridade 0.46 ativa este agente. No nodo 4 os valores de confiança nas hipóteses pressão de sucção alta e interferência de gás severa são agregados através da média ponderada formalizando a regra: “Se a pressão de sucção é baixa e a interferência de gás é baixa Então existe pancada de fluido” a qual fornece o valor de confiança 0.42.

No nodo 5 é feita a agregação da regra acima e o grau de similaridade obtendo-se o valor de confiança de 0.44 o qual representa o grau de similaridade do padrão levando em conta a pressão de sucção e a interferência de gás. Como o valor de confiança obtido não é superior ao limiar definido, o nodo 6 é ativado e é verificado o valor de confiança na hipótese de obstrução da sucção da bomba por areia ou scale, a qual, se for alta, reforça a confiança na hipótese de pancada de fluido.

No nodo 7 é feita a agregação entre os valores de confiança obtidos nos nodos 5 e 6 o que resulta em 0.67, superior ao limiar para aceitação da hipótese.

Os resultados fornecidos pelos agentes acima descritos (itens 4.1.2 e 4.1.3) integram o quadro de sintomas do poço. Estes resultados são colocados na ficha 30 (blackboard) e disponibilizados para todos os demais agentes do sistema:

- 1- UB subdimensionada: **0.69**
- 2- MOTOR subdimensionado: **0.19**
- 3- HB subdimensionada: **0.8**
- 4- Queda de produção: **0.84**
- 5- EV baixa: **1.0**
- 6- POSIÇÃO DA BOMBA: Proximo Fundo
- 7- Pressão de sucção alta: **1.0**
- 8- Interferência de gás severa: **0.26**
- 9- Taxa de compressão alta: **1.00**
- 10- Atrito severo: **0.66**
- 11- Acúmulo severo de parafina na coluna: **0.88**
- 12- Sucção da bomba obstruída por scale: **0.04**
- 13- Sucção da bomba obstruída por areia: **0.92**
- 14- Corrosão severa: **0.07**
- 15- Classificação da carta dinamométrica: **Pancada Fluido**
- 16- Confiança na classificação: **0.67**

Os sintomas acima são apresentados ao usuário na seguinte forma (seta):

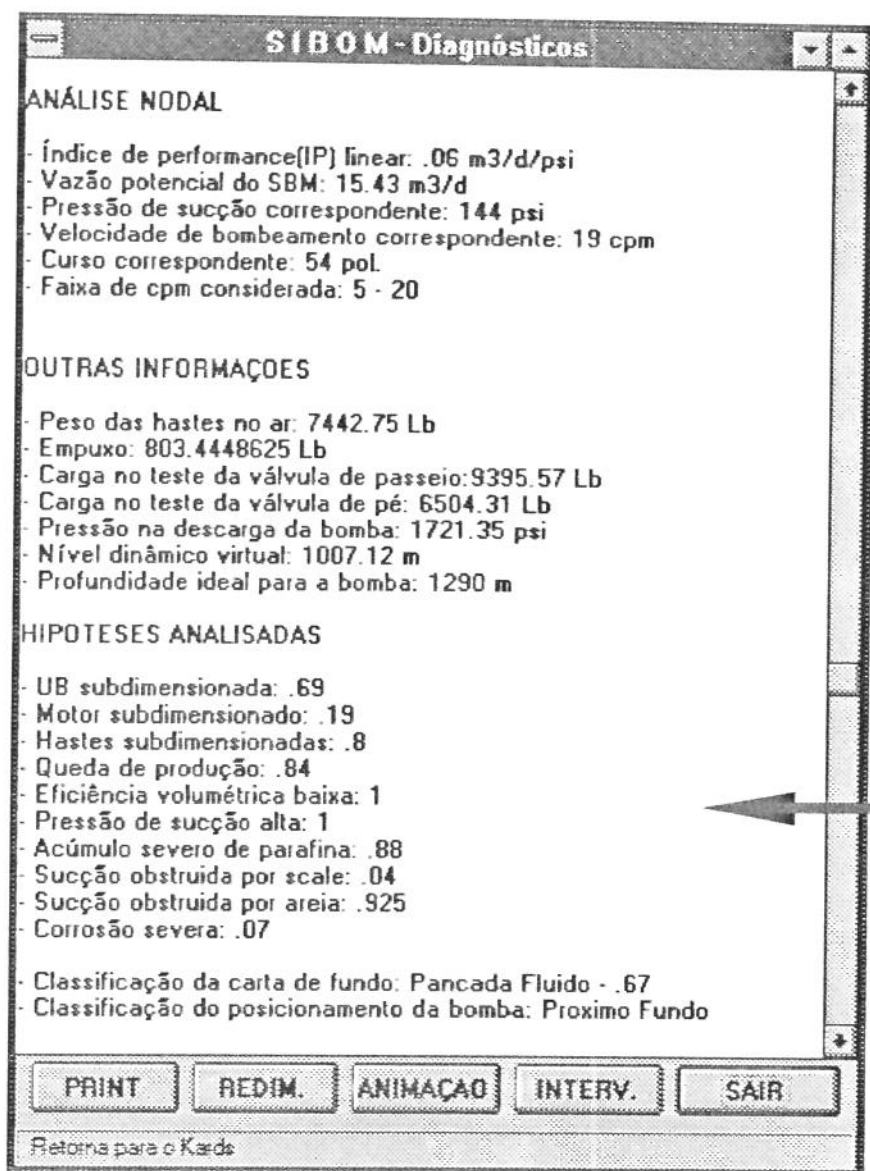


Figura 4-22 - Análise preliminar do CAM 76

#### 4.1.4 Definição dos diagnósticos

Os agentes do grupo diagnósticos são ativados em função dos valores de confiança contidos no blackboard. Para cada sintoma existe um agente encarregado de definir um diagnóstico correspondente que é ativado apenas se o valor de confiança do item correspondente for superior a um limiar de ativação, ver tabela abaixo:

**Tabela 4-1 - Limiares de ativação dos agentes do grupo diagnósticos**

| Itens do blackboard | Valor de confiança | Agentes            | Limiar de ativação |
|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 15                  | -                  | Problemas na carta | -                  |
| 4                   | 0.84               | Queda de produção  | 0.75               |
| 7                   | 1.0                | Psuc alta          | 0.75               |
| 5                   | 1.0                | EV baixa           | 0.75               |
| 11                  | 0.88               | Acúmulo parafina   | 0.75               |
| 12                  | 0.04               | Obstrução sucção   | 0.75               |
| 13                  | 0.92               | Obstrução sucção   | 0.75               |
| 14                  | 0.07               | Corrosão severa    | 0.75               |
| 1                   | 0.69               | UB subdimension.   | 0.60               |
| 2                   | 0.19               | Motor subdimens.   | 0.75               |
| 3                   | 0.80               | HB subdimension.   | 0.75               |

Na tabela acima observamos que apenas os agentes “Problemas na carta”, “Queda de produção”, “Pressão de sucção alta”, “EV baixa”, “Acúmulo severo de parafina”, “Obstrução da sucção por areia”, “UB subdimensionada”, “HB subdimensionada”, são ativados.

4.1.4.1 Agente problemas na carta

Este agente é ativado devido a classificação da carta dinamométrica ser diferente de “Normal”.

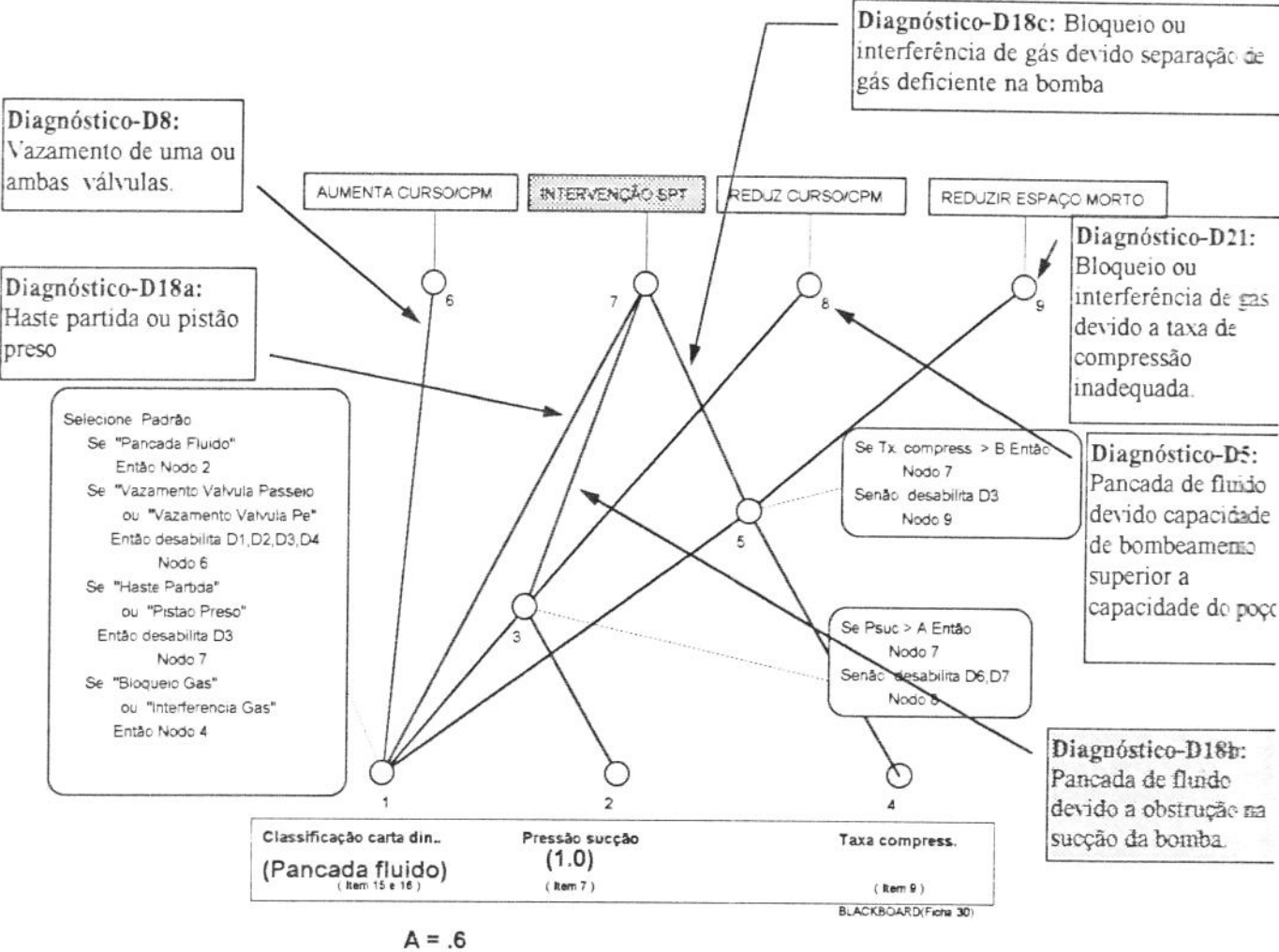


Figura 4-23- Agente problemas na carta

No nodo 1 é verificado que o problema identificado na carta é “Pancada de fluido”, o que provoca a ativação do nodo 2. Nesse nodo é verificado que o poço encontra-se em uma situação de pancada de fluido e pressão de sucção alta, um sintoma de obstrução da sucção cuja solução envolve a limpeza do poço.

Assim sendo, este agente define o diagnóstico *D18b-Pancada de fluido devido a obstrução da sucção da bomba* e a ação intervenção de sonda.

4.1.4.2 Agente Queda de produção

Este agente é ativado devido ao valor de confiança na hipótese queda de produção (0.84) ser maior que o limiar de ativação definido (0.75).

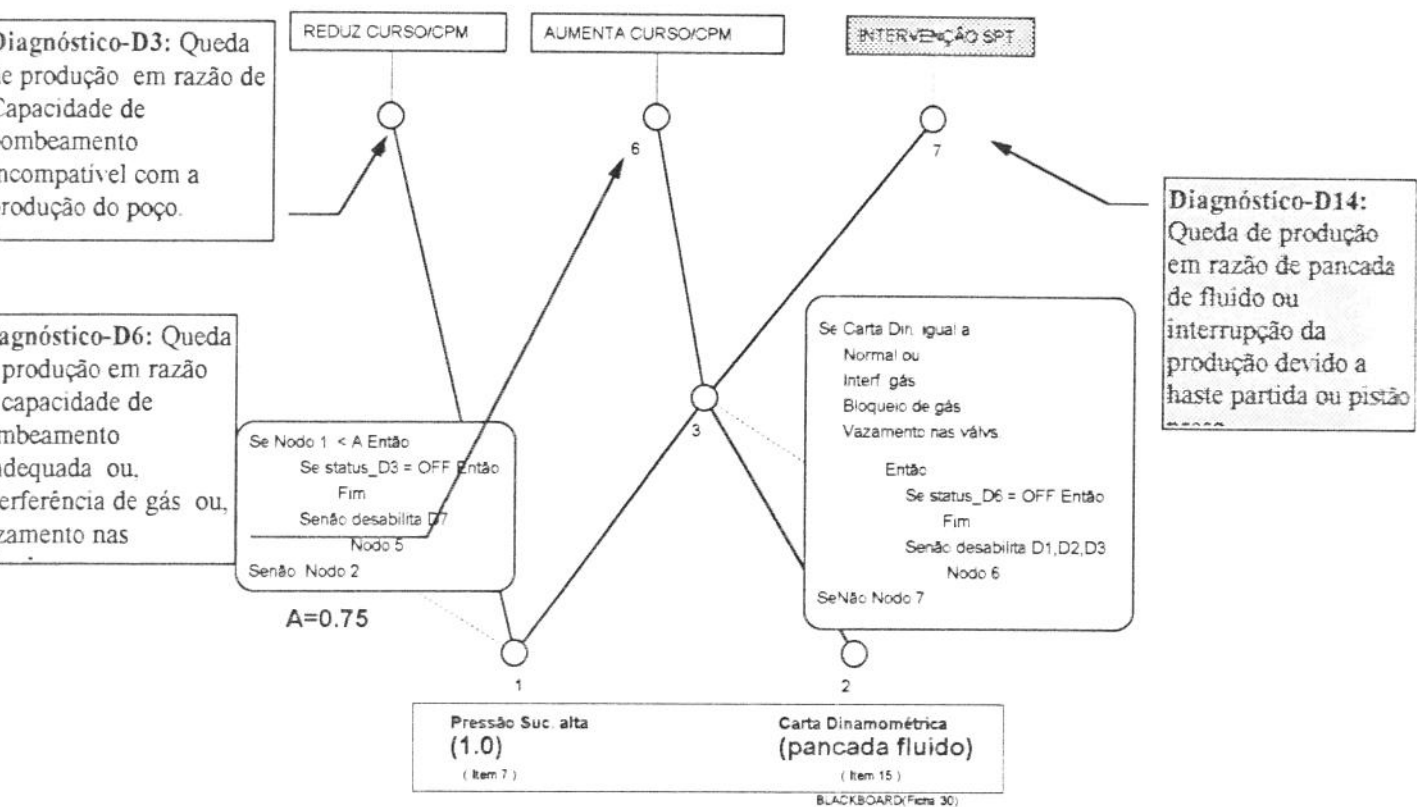


Figura 4-24 - Agente queda de produção

No nodo 1 é verificado que a pressão de sucção é considerada alta, (maior que o limiar de ativação do agente “pressão de sucção alta”), o nodo 2 é ativado e no nodo 3 verificado que a classificação da carta dinamométrica é pancada de fluido. Estes sintomas são característicos de obstrução da sucção da bomba, embora possam ocorrer para pistão preso e haste partida também. Neste caso então o diagnóstico definido é *D14 - Queda de produção em razão de pancada de fluido ou interrupção da produção devido a haste partida ou pistão preso* e a ação recomendada é intervenção de sonda.



4.1.4.3 Agente Pressão de sucção alta

Este agente é ativado devido ao valor de confiança na hipótese pressão de sucção alta (1.0) ser maior que o limiar de ativação definido (0.75).

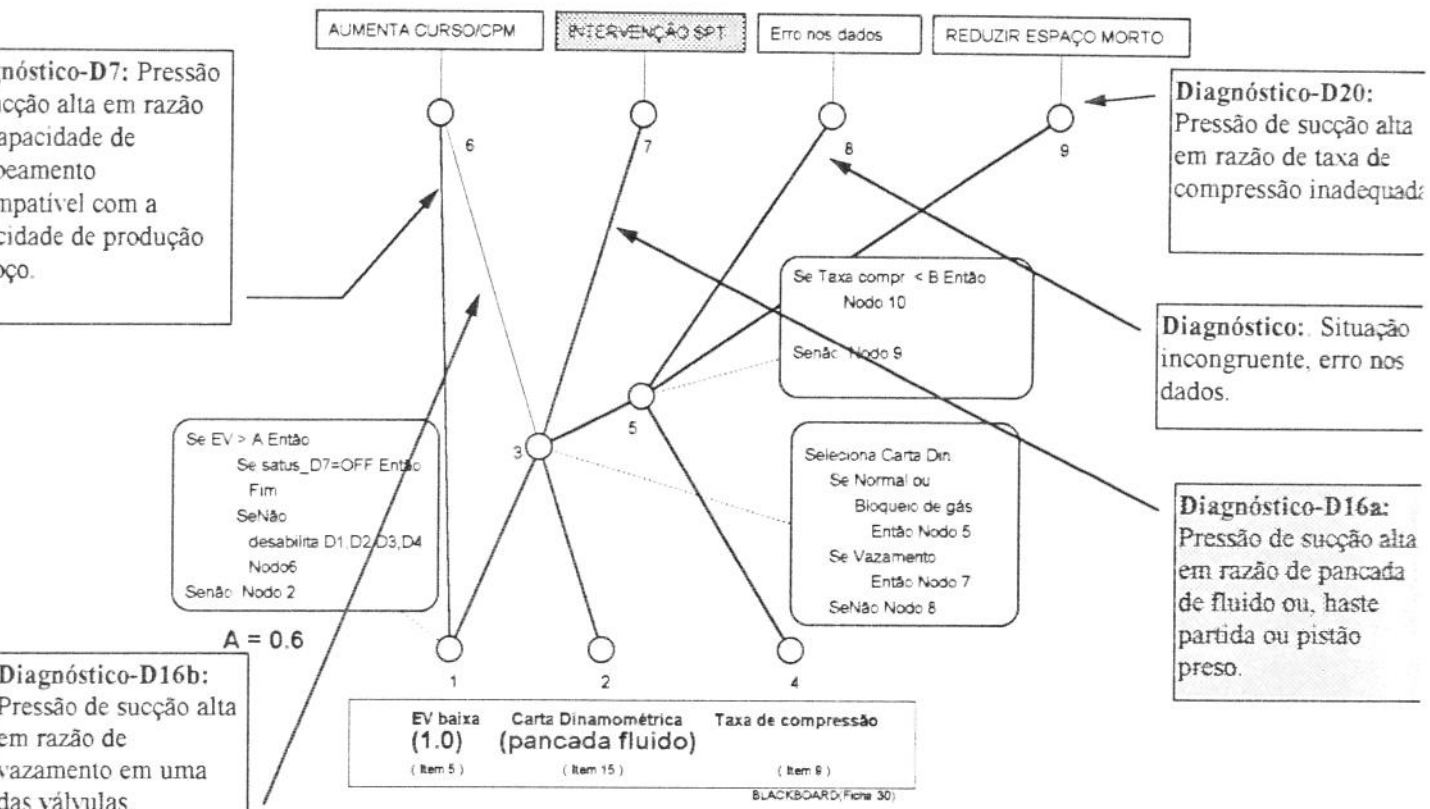


Figura 4-25- Agente pressão de sucção alta

No nodo 1 é verificado que a EV é considerada baixa, (valor de confiança maior que o limiar de ativação do agente “EV baixa”), o nodo 2 é ativado e no nodo 3 verificado que a classificação da carta dinamométrica é pancada de fluido. Estes sintomas são característicos de obstrução da sucção da bomba embora possam ocorrer para pistão preso e haste partida também. Neste caso então o diagnóstico definido é *D16a - Pressão de sucção alta em razão de pancada de fluido ou interrupção da produção devido a haste partida ou pistão preso* e a ação recomendada é intervenção de sonda.

#### 4.1.4.4 Agente Eficiência volumétrica baixa

Este agente é ativado devido ao valor de confiança na hipótese EV baixa (1.0) ser maior que o limiar de ativação definido (0.75).

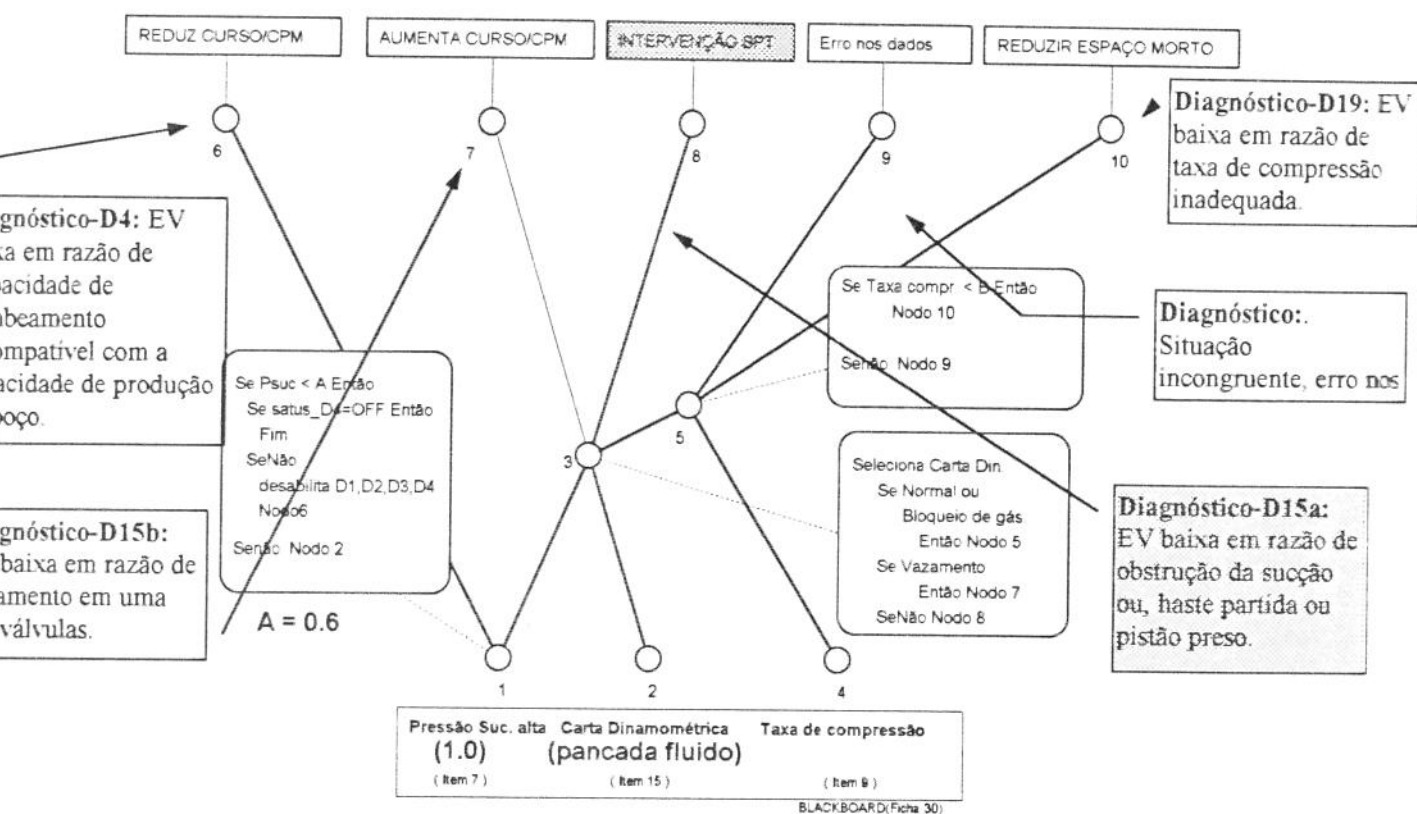


Figura 4-26 - Agente EV baixa

No nodo 1 é verificado que a pressão de sucção é considerada alta, (valor de confiança maior que o limiar de ativação do agente “Pressão de sucção alta”), o nodo 2 é ativado e no nodo 3 verificado que a classificação da carta dinamométrica é pancada de fluido. Estes sintomas são característicos de obstrução da sucção da bomba embora possam ocorrer para pistão preso e haste partida também. Neste caso então o diagnóstico definido é *D15a - EV baixa em razão de obstrução da sucção da bomba ou interrupção da produção devido a haste partida ou pistão preso* e a ação recomendada é intervenção de sonda.

4.1.4.5 Agente Obstrução da sucção da bomba

Este agente é ativado devido ao valor de confiança na Obstrução severa da sucção da bomba por areia(0.92) ser maior que o limiar de ativação definido (0.75).

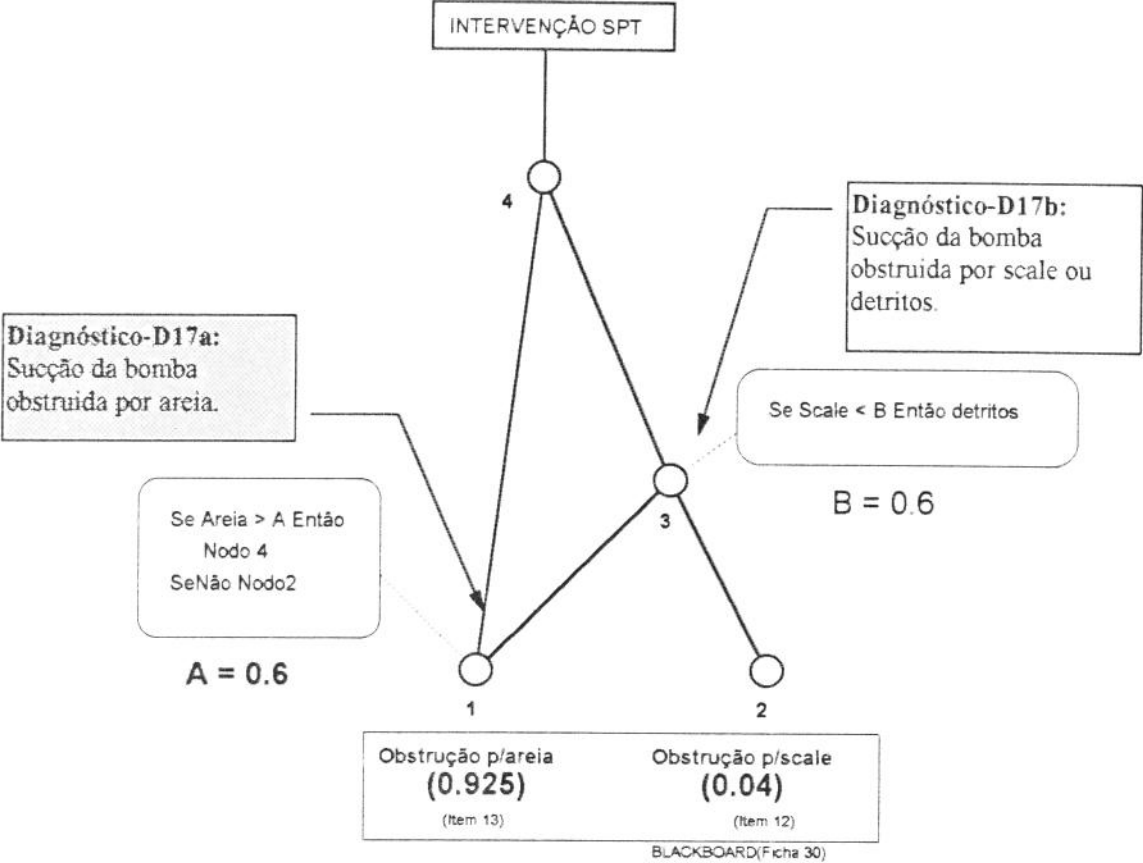


Figura 4-27 - Agente obstrução da sucção

No nó 1 é verificado que a obstrução da sucção se deve a areia, o diagnóstico *D17a - Sucção da bomba obstruída por areia* é definido e uma intervenção de sonda recomendada.

4.1.4.6 Agente Unidade de bombeamento subdimensionada

Este agente é ativado devido ao valor de confiança na hipótese UB subdimensionada (0.69) ser maior que o limiar de ativação definido (0.6).

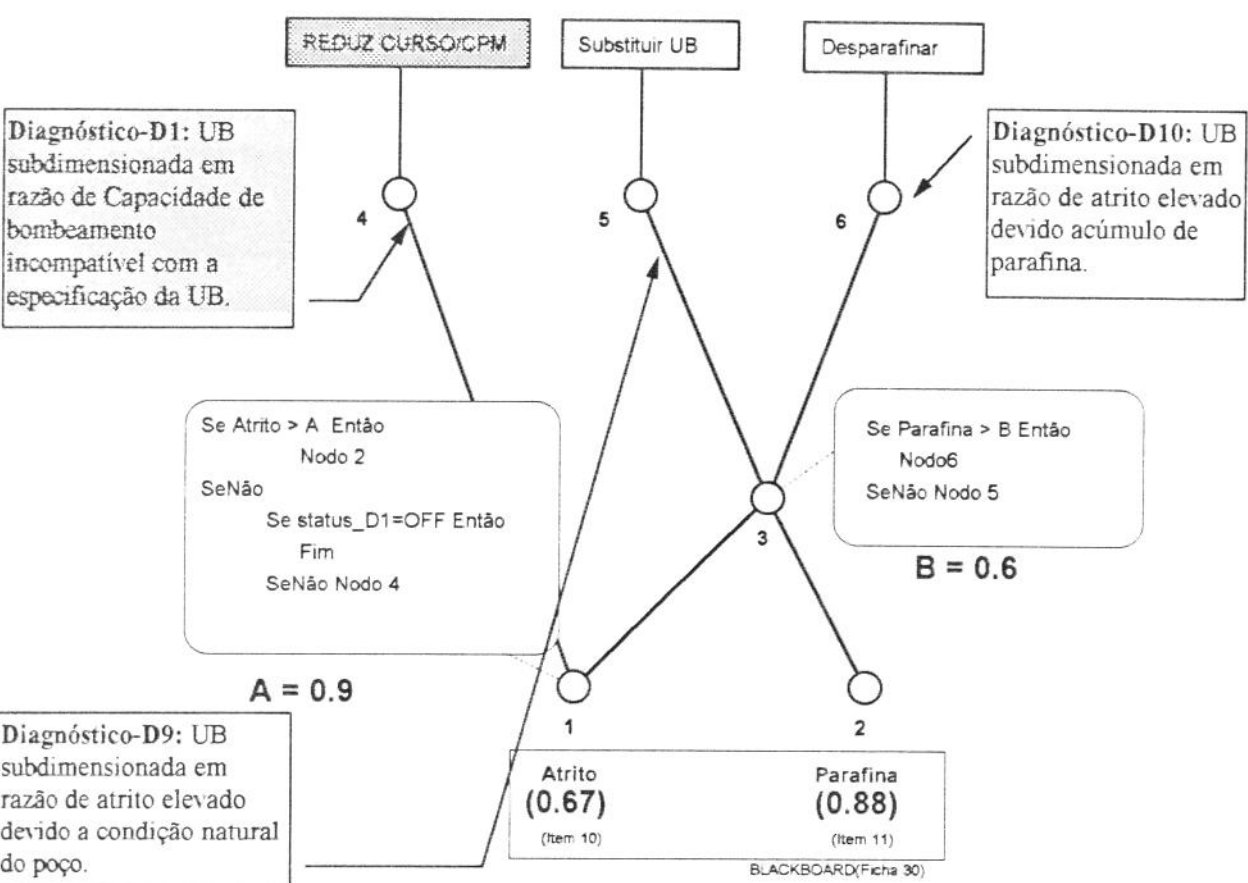
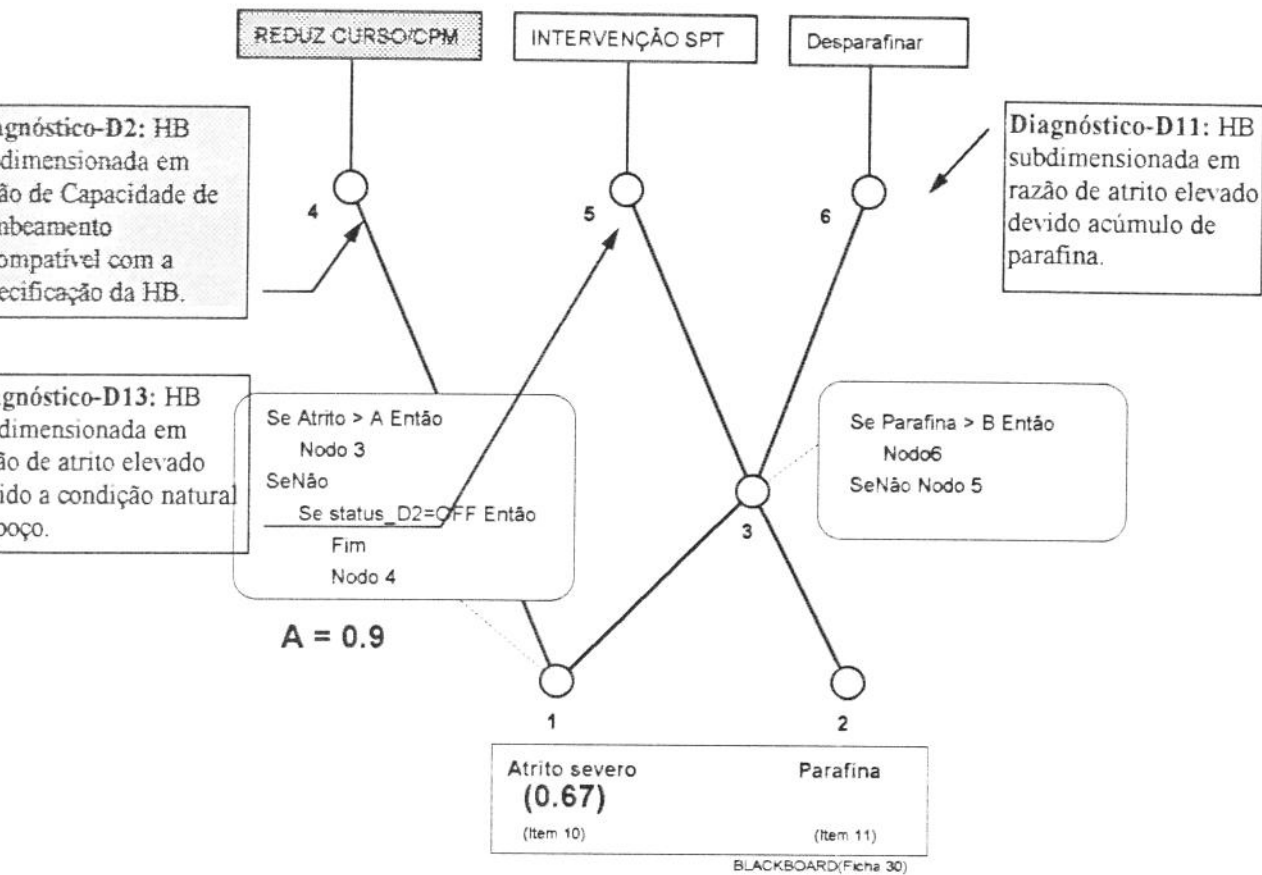


Figura 4-28 - Agente UB subdimensionada

No nó 1 é verificado que o valor de confiança na hipótese atrito severo é considerado baixo para a avaliação da UB, o que define o diagnóstico *D1 - UB subdimensionada em razão da capacidade de bombeamento incompatível com a especificação da UB* e recomenda a redução da capacidade de bombeamento (curso e ou cpm).

#### 4.1.4.7 Agente Coluna de hastes subdimensionada

Este agente é ativado devido ao valor de confiança na hipótese HB subdimensionada (0.8) ser maior que o limiar de ativação definido (0.75).



**Figura 4-29- Agente HB subdimensionada**

No nodo 1 é verificado que o valor de confiança na hipótese atrito severo é considerado baixo para a avaliação da UB, o que define o diagnóstico *D2 - HB subdimensionada em razão da capacidade de bombeamento incompatível com a especificação da HB* e recomenda a redução da capacidade de bombeamento (curso e ou cpm).

Os seguintes diagnósticos foram definidos:

- **Diagnóstico-D18b:** Pancada de fluido devido a obstrução na sucção da bomba.
- **Diagnóstico-D14:** Queda de produção em razão de pancada de fluido ou interrupção da produção devido a haste partida ou pistão preso.
- **Diagnóstico-D16a:** Pressão de sucção alta em razão de pancada de fluido ou, haste partida ou pistão preso.
- **Diagnóstico-D15a:** EV baixa em razão de obstrução da sucção ou, haste partida ou pistão preso.
- **diagnóstico-D12:** Coluna de tubos parafinada.

- **Diagnóstico-D17a:** Sucção da bomba obstruída por areia.
- **Diagnóstico-D1:** UB subdimensionada em razão de Capacidade de bombeamento incompatível com a especificação da UB.
- **Diagnóstico-D2:** HB subdimensionada em razão de Capacidade de bombeamento incompatível com a especificação da HB.

Os seguintes agentes do grupo ações foram ativados:

### 4.1.5 Agentes do grupo ações

#### 4.1.5.1 Agente Intervenção de sonda - Interv 1

Ativado pelos diagnósticos D18b, D14, D16a, D15a e D17a.

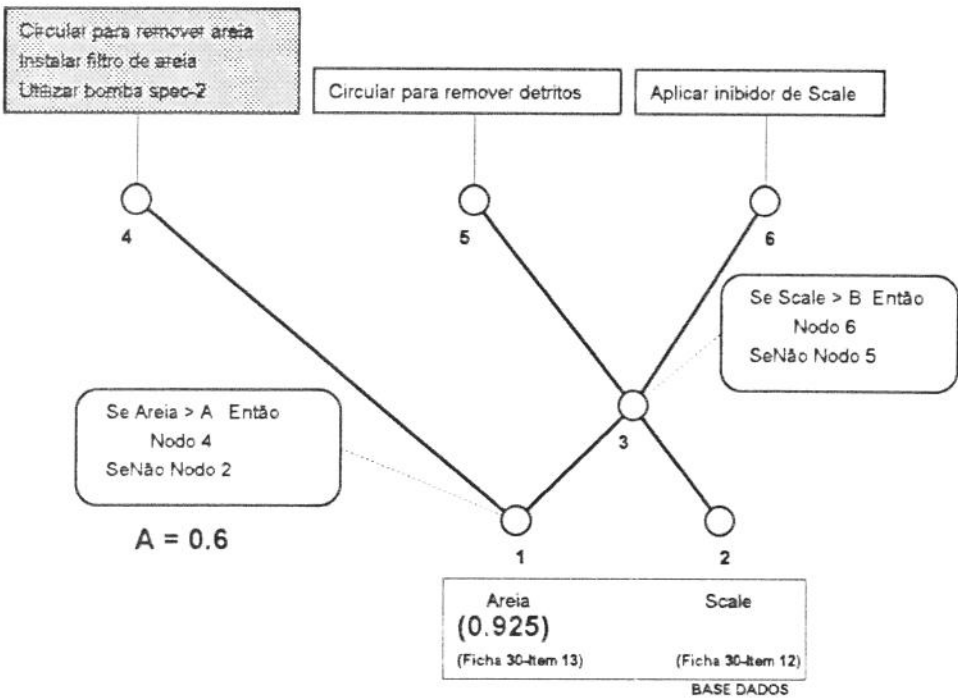


Figura 4-30 - Agente Interv 1

No nó 1 é confirmado que a bomba está obstruída por areia devendo ser adotada a ação *A1-Circular para remover areia; instalar filtro de areia; utilizar bomba spc 2*.

4.1.5.2 Reduzir curso/cpm - Reduz 1

Ativado pelo diagnóstico D1.

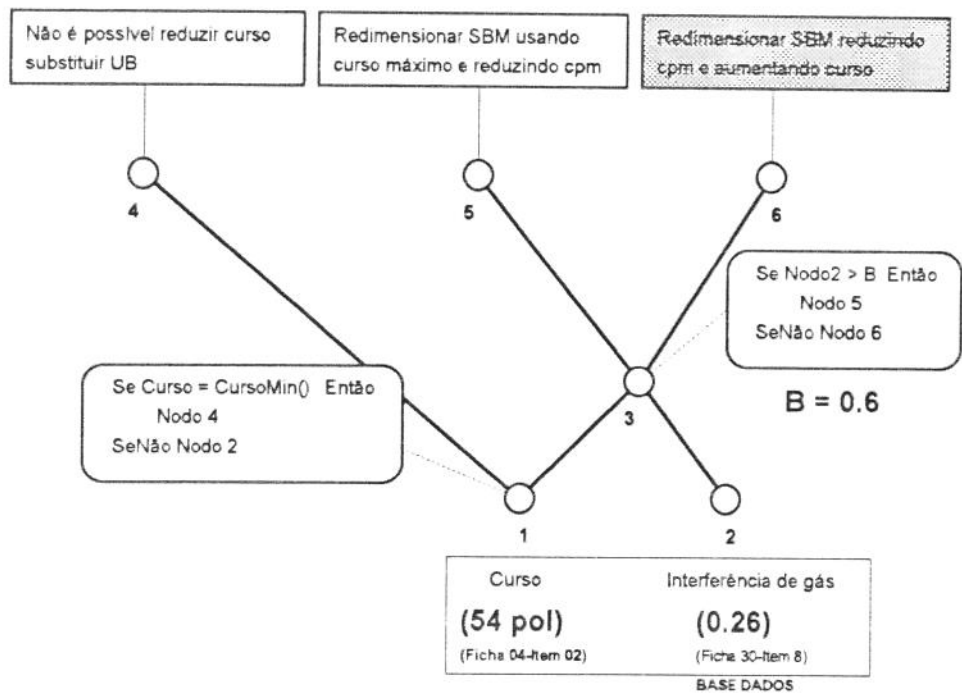


Figura 4-31 - Agente Reduz 1

No nodo 1 é verificado que o curso da UB (54), é diferente do curso mínimo, e no nodo 3 é verificado que a interferência de gás é baixa (menor que o limiar definido B = 0.6). Estas restrições indicam que o sistema pode ser redimensionado visando adequar a UB para as condições do poço.

O diagnóstico final é apresentado pelo sistema na seguinte forma:

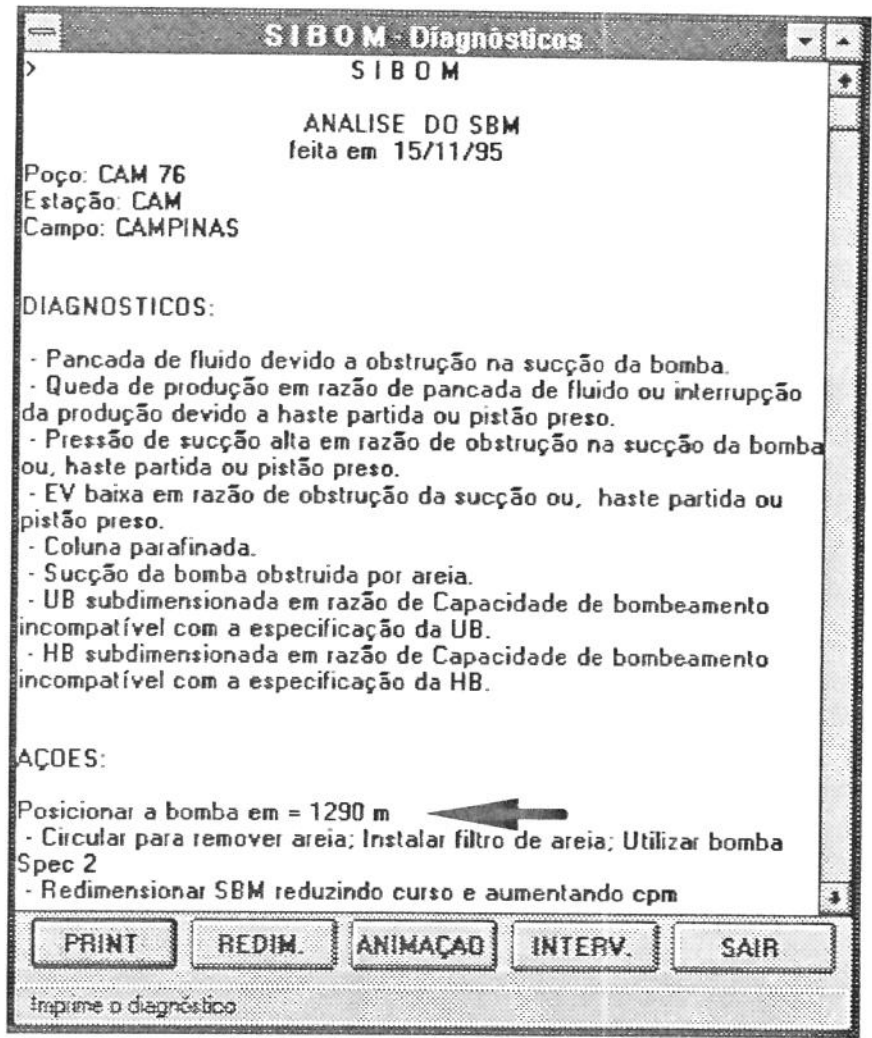


Figura 4-32 - Relatório do SIBOM

A figura acima apresenta o conjunto de diagnósticos obtidos pelo sistema e o conjunto de ações pertinentes. No presente caso uma intervenção de sonda deve ser feita para posicionar a bomba devidamente (de acordo com os critérios definidos no item 3.3.2.1.8), remover areia do revestimento, instalar bomba adequada para fluido com severa presença de abrasivos. O redimensionamento do SBM visa corrigir o subdimensionamento da UB e das hastes os quais, em função da definição dos limiares de ativação dos agentes correspondentes foram considerados críticos.



4.2 Caso 2

Este caso apresenta a situação em que a ação envolve apenas atuação sobre as condições operacionais (curso e cpm) e indica a necessidade circular óleo quente para desparafinar a coluna de produção. Foram detectados dados incongruentes na análise das hipóteses pressão de sucção alta e eficiência volumétrica baixa, o que levou o sistema a desconsiderar suas análises.

4.2.1 Dados do poço

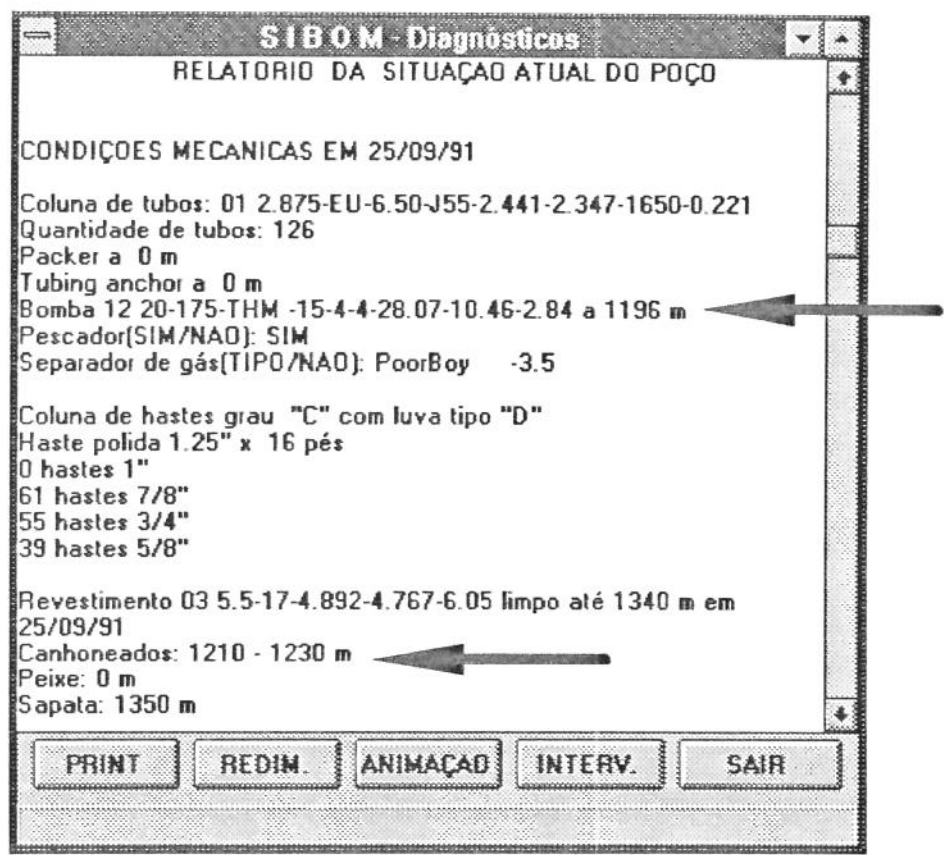


Figura 4-33 - Condições mecânicas atuais do poço CAM 93

Neste caso a bomba está posicionada muito próxima do intervalo perfurado (setas).

**SIBOM - Diagnósticos**

**UNIDADE DE BOMBEAMENTO**

Unidade de bombeamento: 33MICROLAB ML.160\* 160200 74 9  
Curso: 74 pol.  
Velocidade de bombeamento: 11 cpm  
Contrapesos em :  
Motor ELETRICO de 10 hp

**CARACTERISTICAS DO FLUIDO PRODUZIDO**

Grau API: 35  
RGL: 100 m3/m3  
Densidade relativa do gás: 0.65  
Salinidade da água produzida: ppm  
Densidade relativa da água: 1.05  
Histórico de parafinação: NAO  
Histórico de formação de scale: NAO  
Produção de areia: NAO  
Presença de H2S: NAO  
Presença de CO2: NAO  
Viscosidade média do fluido: 1.40 cp

**CARACTERISTICAS DO RESERVATORIO**

Zona produtora: CP-1  
Pressão estática de 60 Kgf/cm2 a 1000 m, medida em 25/09/91  
Pressão de saturação: 800 psi  
Temperatura de fundo: 140 F

PRINT REDIM. ANIMAÇÃO INTERV. SAIR

Figura 4-34 - Características da UB, do fluido e do reservatório do poço CAM 93

A última limpeza (intervenção de sonda) foi realizada há mais de 40 meses, o que, apesar de não existir histórico de acúmulo de parafina, indica a possibilidade de existir acúmulo de parafina na coluna.

**SIBOM - Diagnósticos**

**TESTES DE PRODUÇÃO**

|            | DATA     | Q(*) (M3/D) | BSW(Z) | P TUB (PSI) |
|------------|----------|-------------|--------|-------------|
| 1          |          |             |        |             |
| 2          | 18/09/95 | 6           | 0      | 120         |
| 3          | 02/09/95 | 5           | 0      | 120         |
| 4          | 30/07/95 | 15          | 0      | 100         |
| 5          |          |             |        |             |
| 6          |          |             |        |             |
| 7          |          |             |        |             |
| Q ATUAL    |          | 6           |        |             |
| Q ANTERIOR |          | 5           |        |             |
| QAT/QAN    |          | 1,20        |        |             |

**REGISTROS DE NÍVEL DINAMICO**

| REGISTRO    | DATA     | PR1 (PSI) | NIVEL1(*) (M) | PR2 (PSI) | NIVEL2 (M) | DT (MINUTOS) |
|-------------|----------|-----------|---------------|-----------|------------|--------------|
| 1           |          |           |               |           |            |              |
| 2           | 02/09/95 | 120       | 400           | 130       | 420        | 40           |
| 3           | 01/08/95 | 100       | 1100          | 110       | 1105       | 20           |
| 4           |          |           |               |           |            |              |
| 5           |          |           |               |           |            |              |
| 6           |          |           |               |           |            |              |
| 7           |          |           |               |           |            |              |
| ND ATUAL    |          | 400       |               |           |            |              |
| ND ANTERIOR |          | 1100      |               |           |            |              |
| ND AT/AN    |          | 0,36      |               |           |            |              |
| PSUC (PSI)  |          | 1052.91   | 1069.56       |           |            |              |
| QG (M3/D)   |          | 303.55    |               |           |            |              |

←

PRINT REDIM. ANIMAÇÃO INTERV. SAIR

Figura 4-35 - Testes de produção e registros de nível dinâmico do poço CAM 93

O último teste de produção realizado não indicou queda de produção e o último registro do nível dinâmico indicou valor elevado da pressão de sucção (seta).

Esses valores devem ser comparados respectivamente com a vazão potencial e com a pressão de sucção requerida, calculados a partir da análise nodal (figura 4-52).

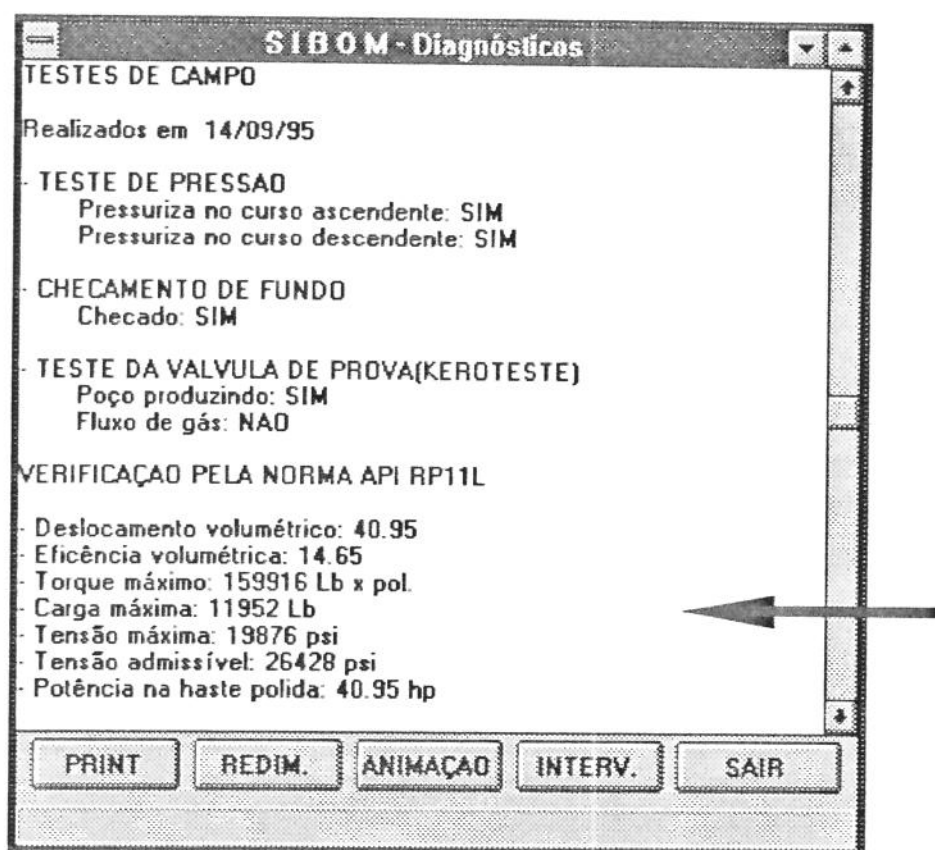


Figura 4-36 - Testes de campo e verificação pela norma API RP11L do CAM 93

Os parâmetros obtidos a partir da norma API RP11L (seta), indicam EV baixa e valores de carga, tensão e torque aparentemente aceitáveis. Para uma boa avaliação desses tres últimos parâmetros é necessário avaliar o atrito e a presença de gás no SBM.

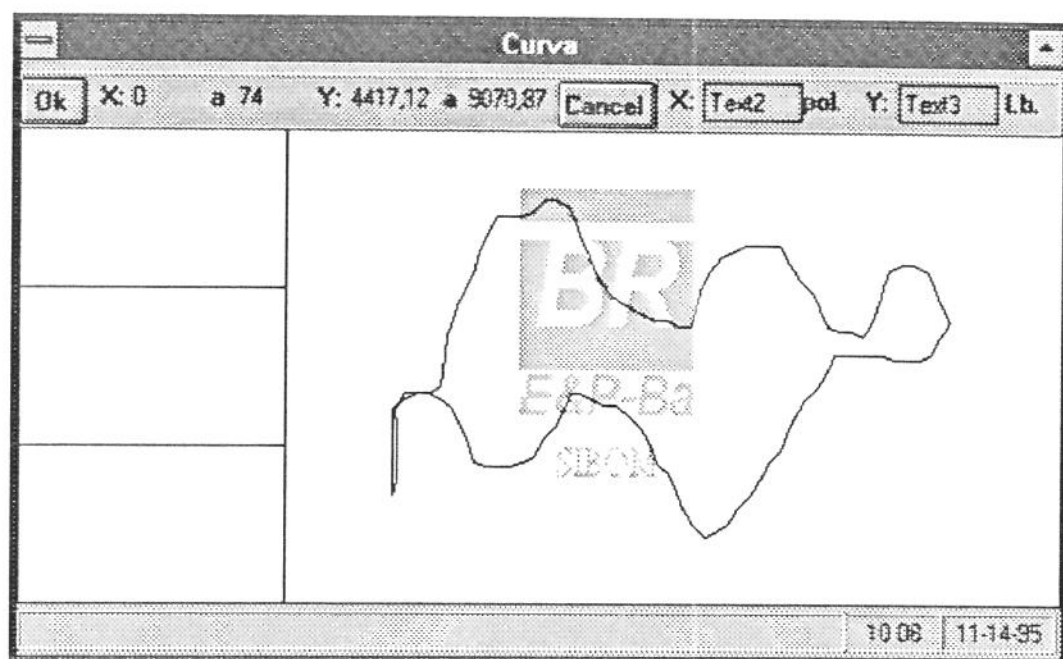


Figura 4-37 - Carta dinamométrica de superfície do poço CAM 93

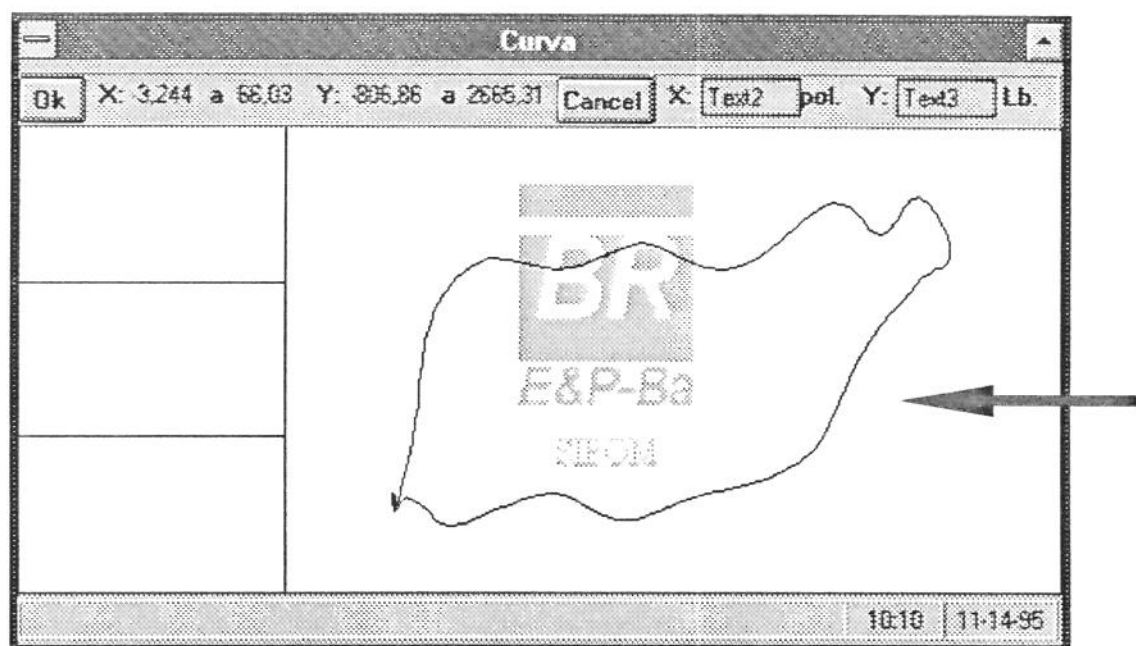


Figura 4-38 - Carta dinamométrica de fundo do poço CAM 93

A carta dinamométrica de fundo permite identificar a ocorrência de pancada de fluido (seta).

4.2.2 Definição dos sintomas

4.2.2.1 Agente Atrito

O valor da carga no teste da válvula de pé comparado com o correspondente valor teórico permite obter um valor de confiança de 0.48 (nodo 3) para a hipótese de atrito severo no SBM.

O valor da carga no teste da válvula de passeio comparado com o correspondente valor teórico permite obter um valor de confiança de 0.56 (nodo 6) para a mesma hipótese.

A agregação das duas regras através da média ponderada pela relevância de cada uma permite obter um valor de confiança de 0.52 para a hipótese de atrito severo. Sendo este valor menor que o limiar definido para a aceitação da hipótese, é verificado o desvio do poço (nodo 8) que resulta em um valor de confiança de 0.57, o qual agregado com a confiança atual (nodo 7) resulta em um valor de confiança de 0.54 para a hipótese atrito severo. Este valor é colocado no blackboard (ficha 30 item 10).

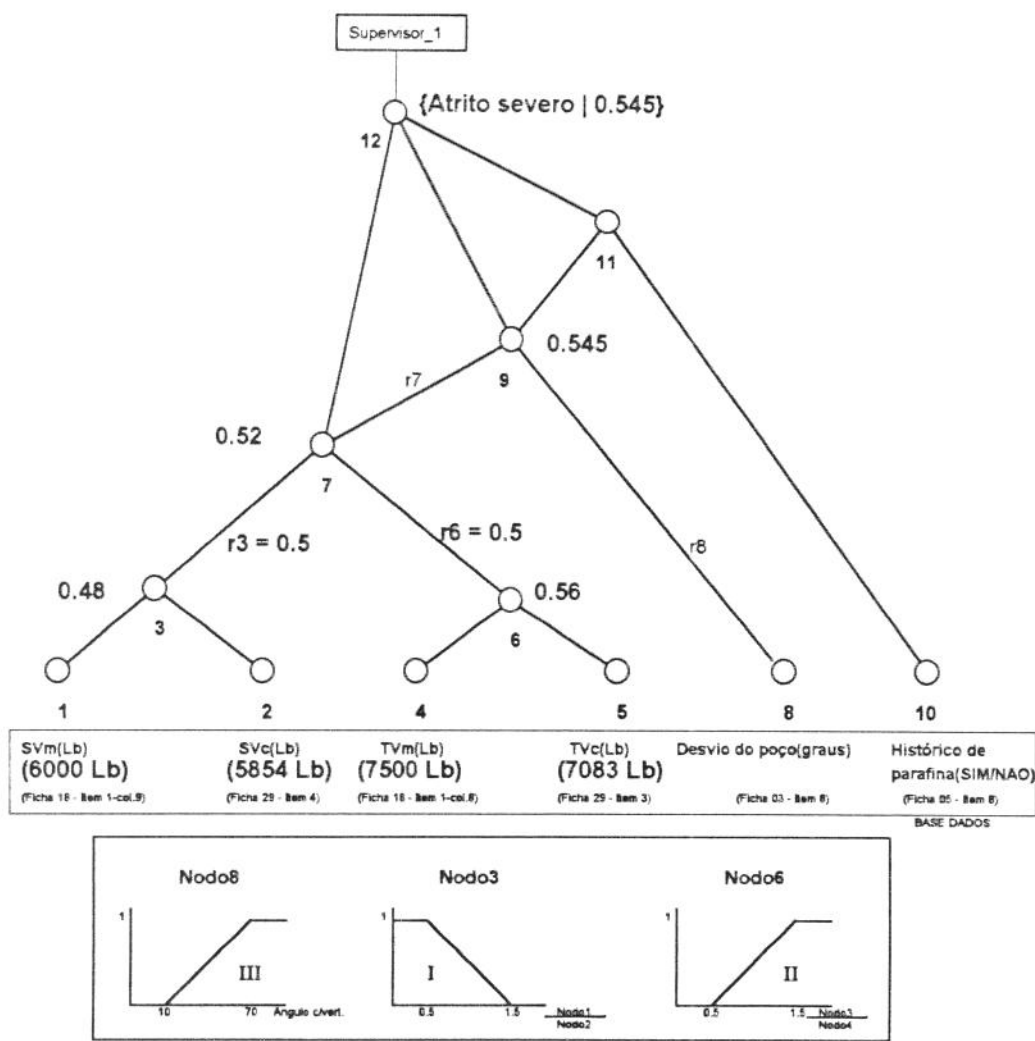


Figura 4-39 - Agente Atrito

4.2.2.2 Agente Interferência de gás

De forma semelhante à descrita no item anterior para o atrito, apenas utilizando outras funções de pertinência e o valor da RGL medida, é definido um valor de confiança para a hipótese de interferência de gás severa no SBM.

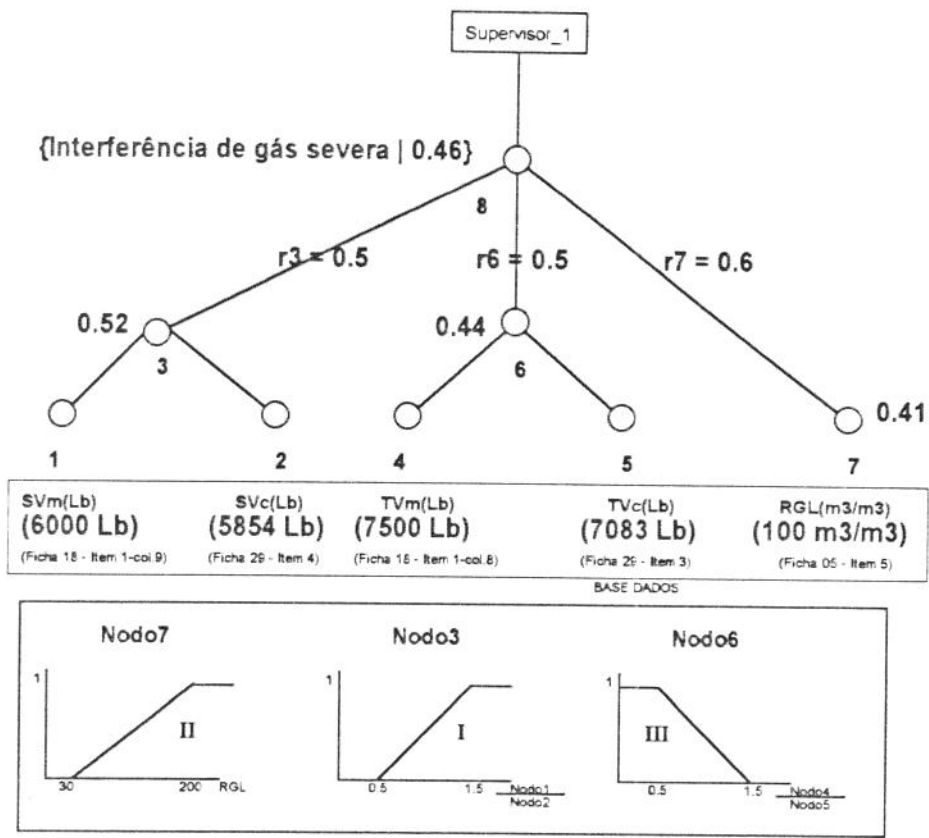


Figura 4-40 - Agente Interferência de gás

#### 4.2.2.3 Agente Unidade de bombeamento

No nodo 7 (figura a seguir) a partir do valor de confiança na hipótese de atrito severo (0.54) é selecionada a função de pertinência “II” utilizada para, a partir do valor calculado no nodo 3, obter o valor de confiança na hipótese UB subdimensionada do ponto de vista de carga levando em conta apenas o atrito existente no sistema.

No nodo 8 é adotado procedimento semelhante levando em conta apenas a interferência de gás. Neste caso é selecionada a função de pertinência “V”.

No nodo 9 é feita a agregação do valor de confiança na hipótese de UB subdimensionada do ponto de vista de carga levando em conta tanto o atrito como a interferência de gás.

Nos nodos 10, 11 e 12 é adotado procedimento análogo aos anteriores para o torque, usando agora as funções de pertinência “IX”, “X”.

No nodo 13 é feita a agregação das regras acima descritas para a carga e torque utilizando-se para isso a função lógica “OU” formalizada através da operação de máximo, obtendo-se dessa forma um valor de confiança de 0.89 para a hipótese UB subdimensionada.



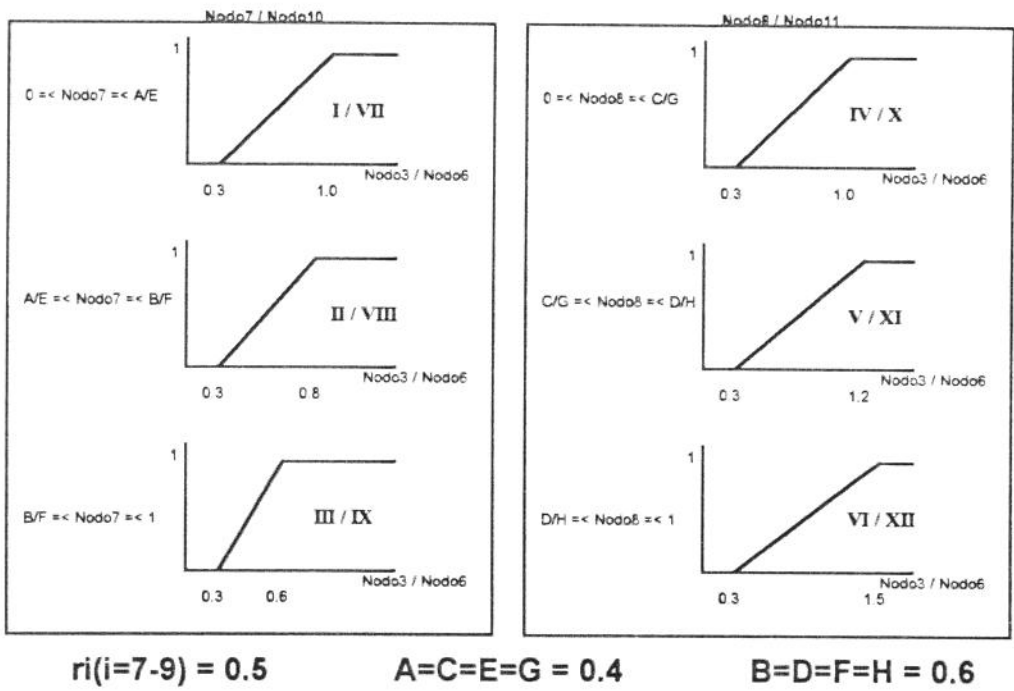
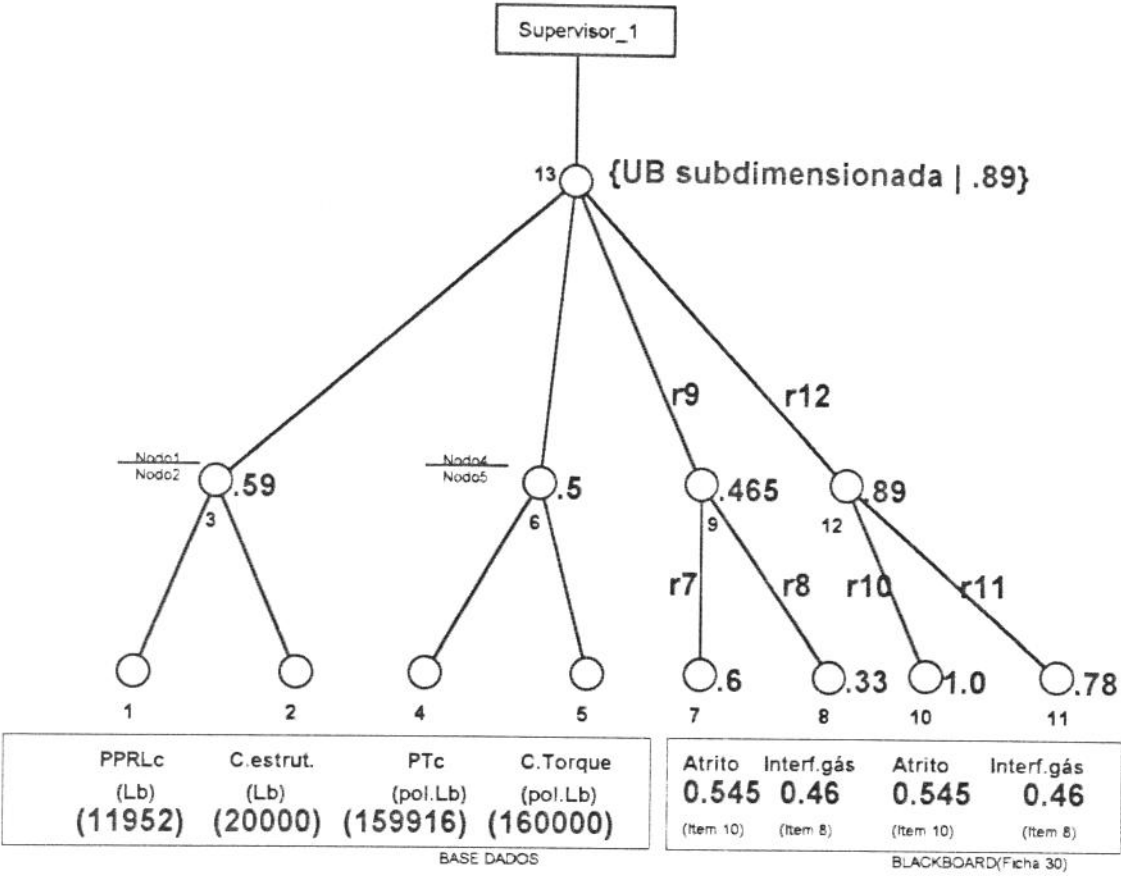


Figura 4-41 - Agente Unidade de bombeamento

4.2.2.4 Agente motor

O procedimento adotado neste agente é semelhante ao anterior. Em função dos valores de confiança nas hipóteses de atrito severo e interferência de gás severa, são selecionadas as funções de pertinência “II” e “V” utilizadas para definir o valor de confiança na hipótese motor subdimensionado nos nodos 4 e 5. A agregação dos valores de confiança através da média ponderada pelas relevâncias atribuídas às regras formalizadas nos nodos 4 e 5 define o valor de confiança na hipótese “motor subdimensionado” (0.96).

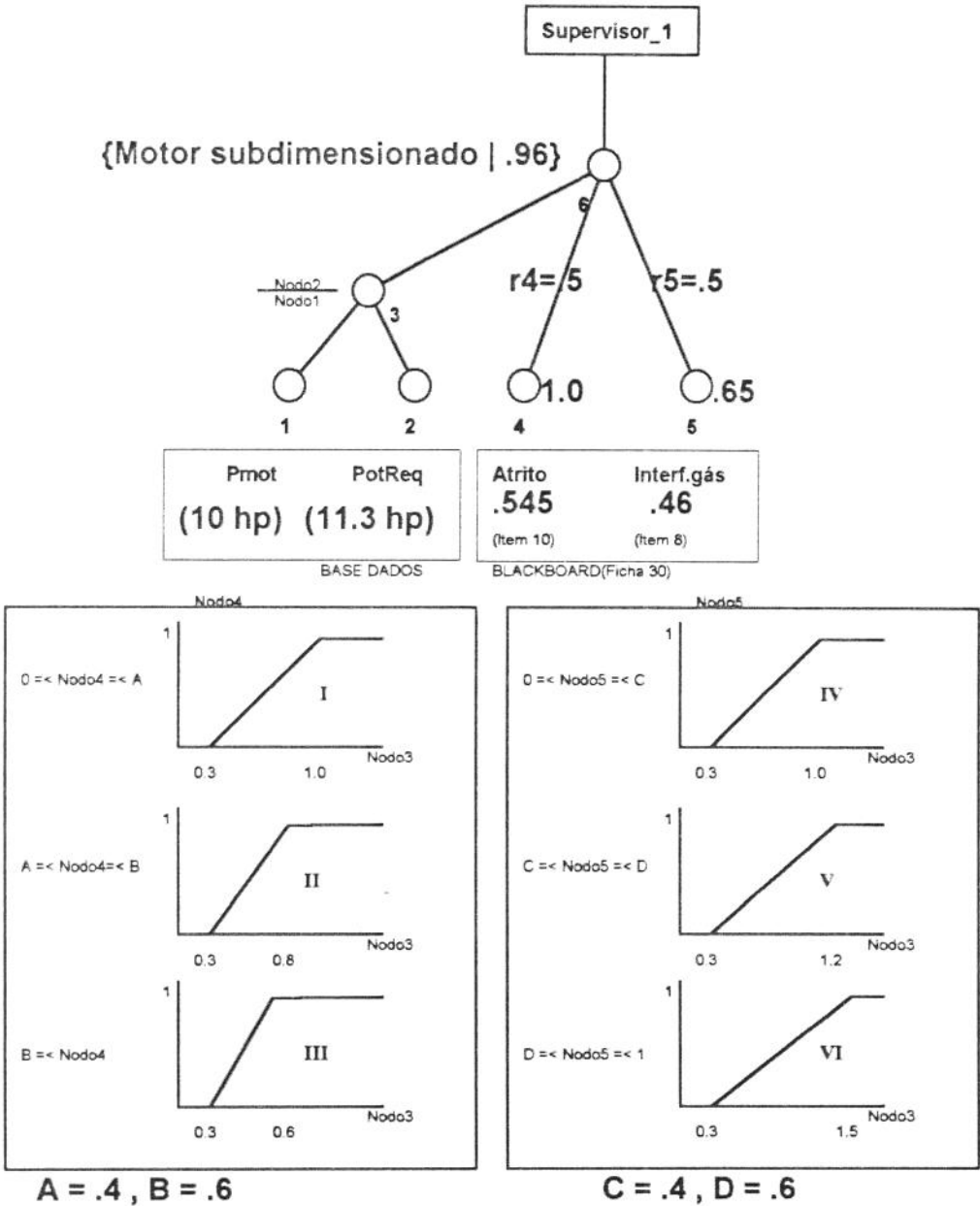


Figura 4-42 - Agente Motor

4.2.2.5 Agente Tensão nas hastes

De forma análoga aos agentes anteriores, este agente define o valor de confiança na hipótese HB subdimensionada em 0.7.

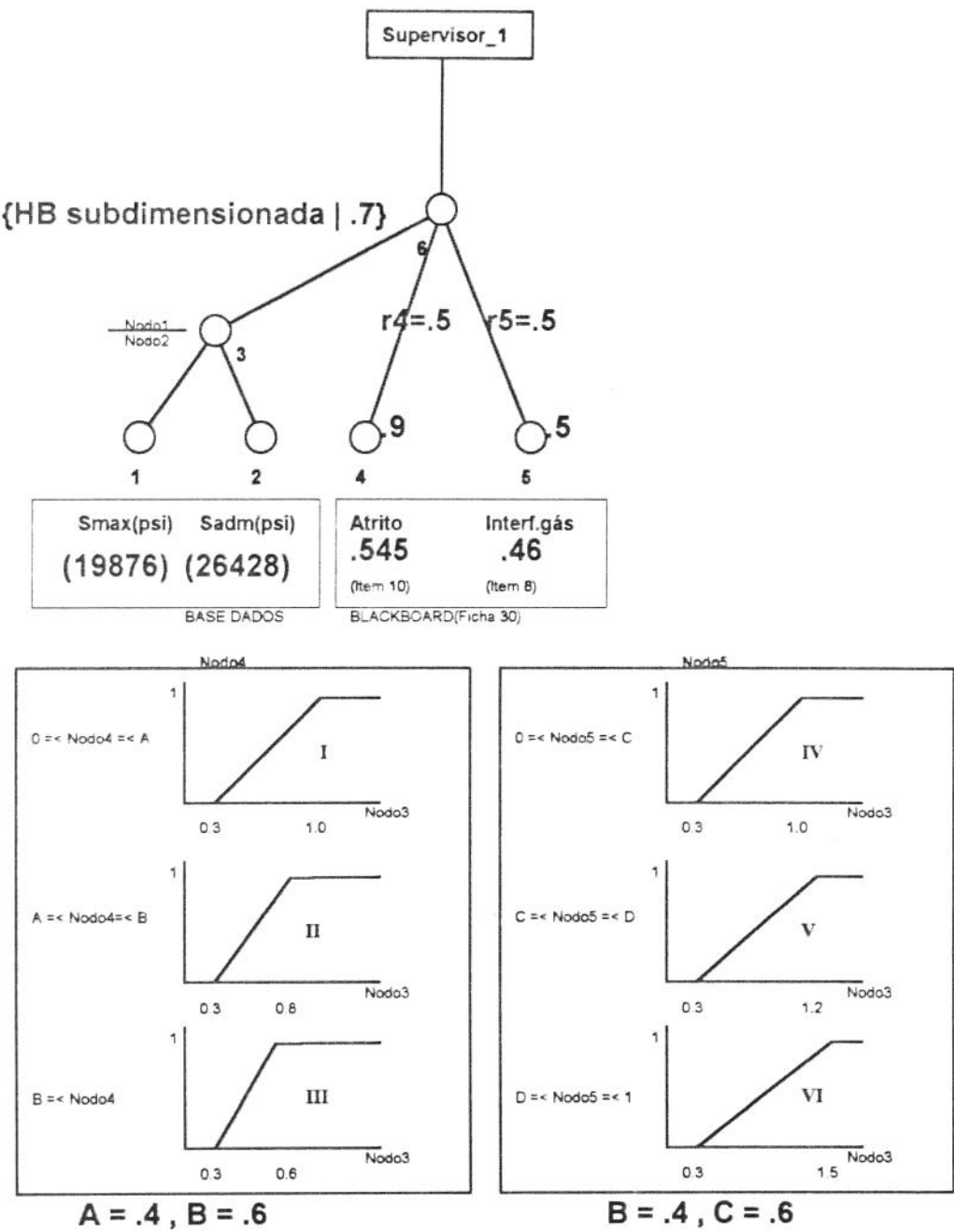


Figura 4-43 - Agente Haste de bombeamento

4.2.2.6 Agente Teste de produção X vazão potencial

A função de pertinência “I” no nodo 3 fornece um valor de confiança nulo o qual é menor que o limite de 0.1 definido. Isto faz com que os nodos 4 e 5 sejam ativados e o valor de confiança de 1.0 seja obtido da função de pertinência “II”. O valor de confiança para a hipótese de queda de produção é obtido através da operação complemento realizada no nodo 6, obtendo o valor de 0.0.

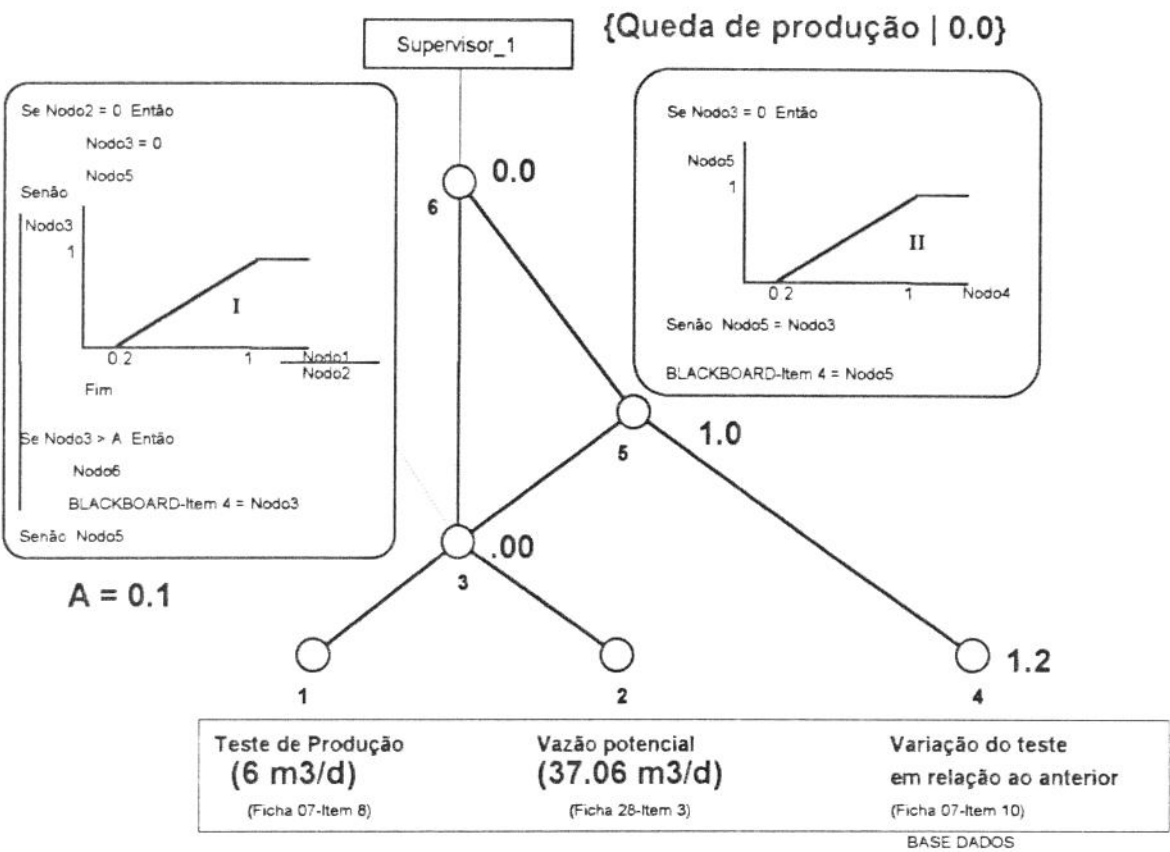


Figura 4-44 - Agente Teste de produção X vazão potencial

4.2.2.7 Agente Eficiência Volumétrica

O valor de confiança na hipótese de interferência de gás severa define a função de pertinência a ser utilizada para o cálculo do valor de confiança na hipótese de EV alta, obtendo para os dados deste poço o valor 0.0. O valor de confiança na hipótese de EV baixa é calculado através da operação complemento realizada no nodo 4 obtendo-se o valor de confiança de 1.0.

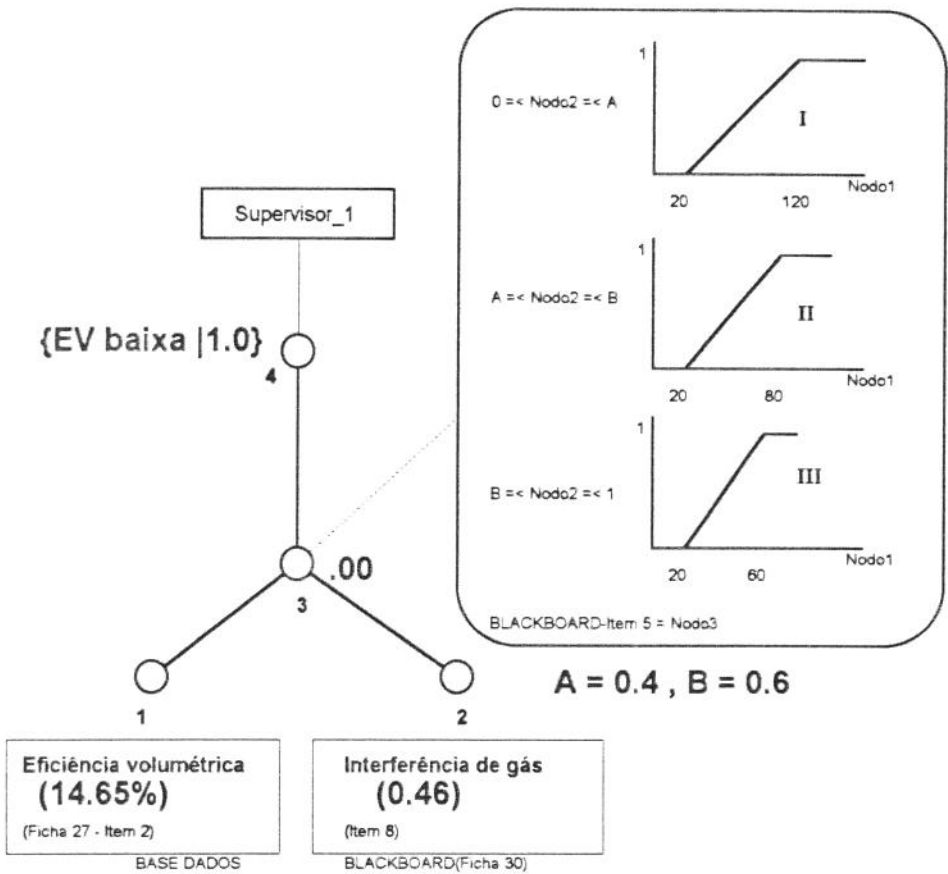


Figura 4-45- Agente Eficiência volumétrica

4.2.2.8 Agente Pressão de Sucção

No nodo 3 a função de pertinência fornece o valor de confiança para a hipótese de pressão de sucção baixa e o valor de confiança na hipótese de pressão de sucção alta é calculada pela operação complemento no nodo 4, obtendo-se neste caso o valor 0.6.

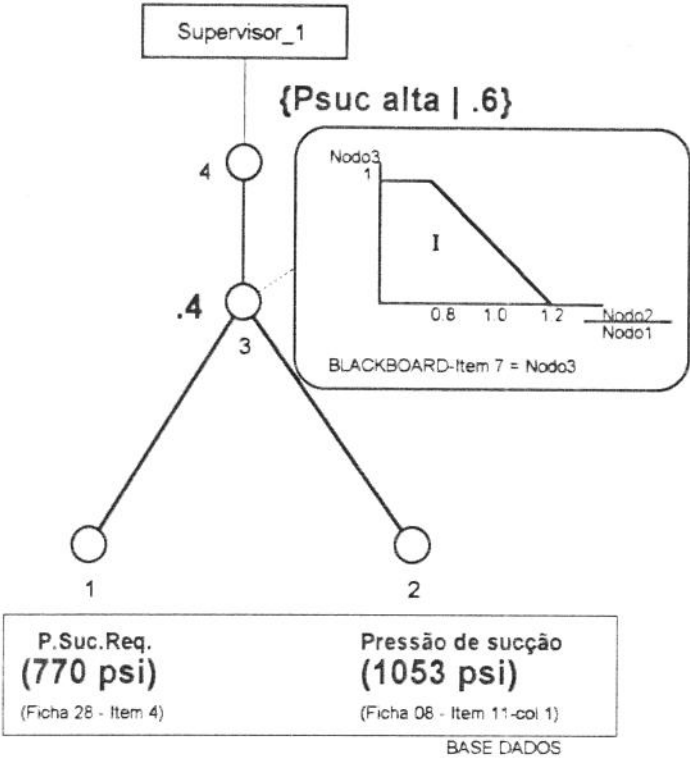


Figura 4-46 - Agente Pressão de sucção

4.2.2.9 Agente Taxa de compressão da bomba

Em função do valor de confiança na hipótese interferência de gás severa, é seleccionada a função de pertinência que formaliza o conceito de menor para as taxas de compressão. Dessa forma, para os valores deste SBM é obtido o valor de confiança 0.0 para a hipótese taxa de compressão baixa no nodo 9.

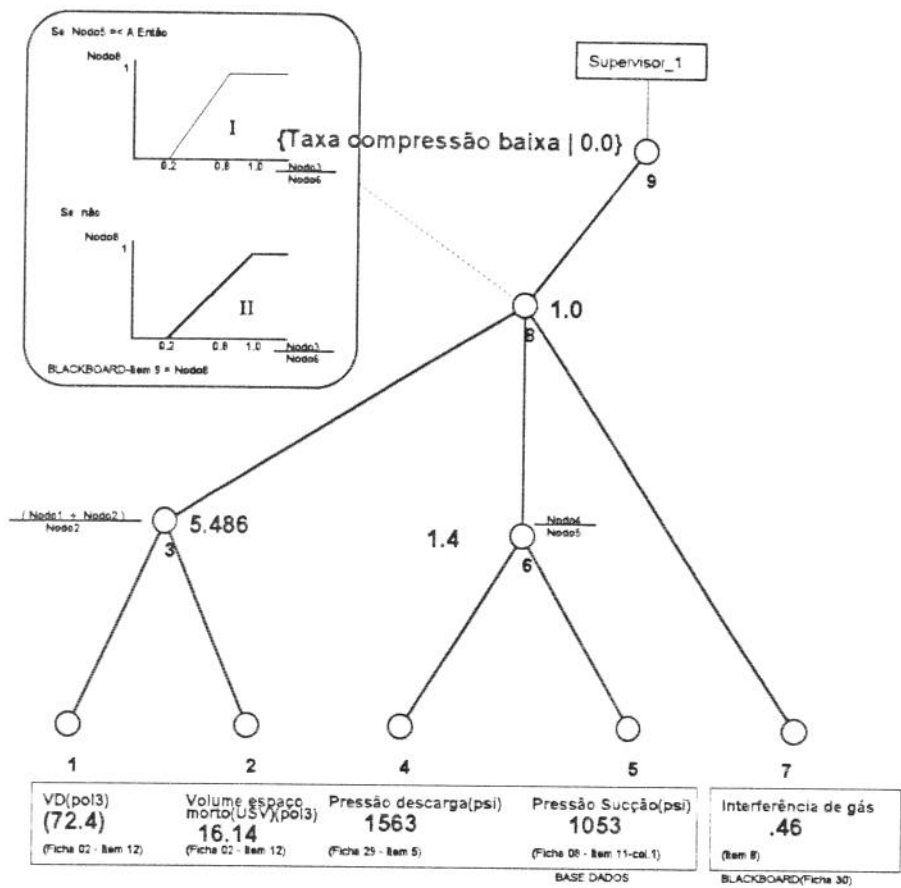


Figura 4-47- Agente Taxa de compressão

4.2.2.10 Agente Parafina

Levando em conta que decorreram quase 50 meses desde a última limpeza (intervenção de sonda) no poço e que o mesmo não apresenta histórico de parafinação (função de pertinência “II” ), a hipótese de acúmulo severo de parafina é definida com o valor de confiança de 0.8 .

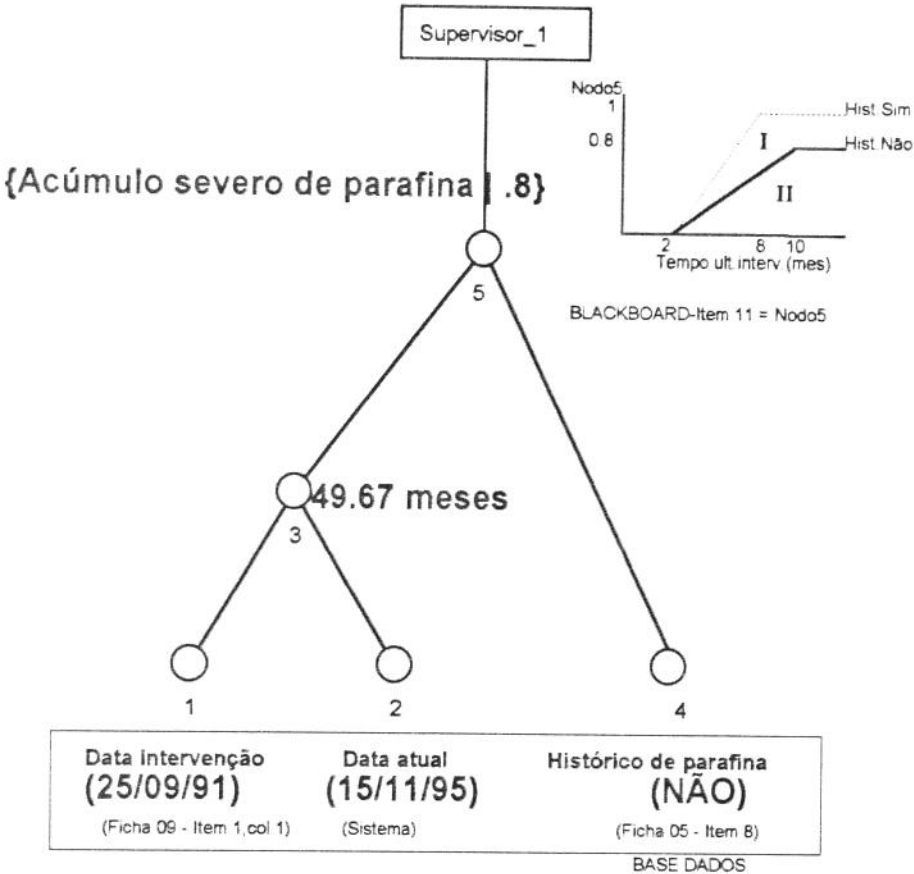


Figura 4-48- Agente Parafina



4.2.2.11 Agente Obstrução da Sucção da Bomba por Scale

A exemplo do agente anterior a hipótese de obstrução da sucção da bomba por scale é definida a partir do tempo decorrido desde a última limpeza realizada no poço e da função de pertinência “II”.

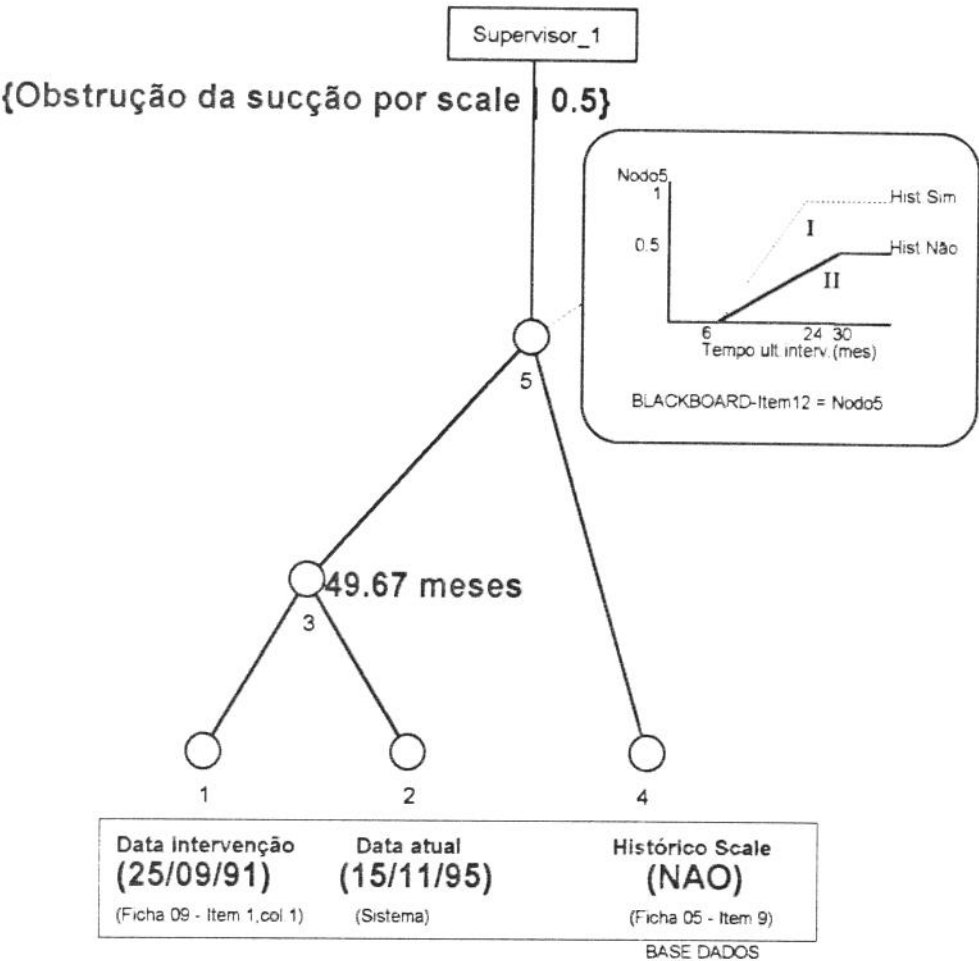


Figura 4-49- Agente Scale

4.2.2.12 Obstrução da Sucção da Bomba por Areia

A inexistência de histórico de parafinação define a função de pertinência “II” através da qual é definido o valor de confiança 0.8 para a hipótese.

A comparação entre a profundidade do fundo do poço e a posição da bomba é formalizada através da função de pertinência “III” a qual fornece para este caso o valor de confiança 0.39.

A agregação das duas regras acima é formalizada no nodo 8 através da média ponderada pelas relevâncias obtendo-se dessa forma o valor de confiança 0.59 para a hipótese sucção da bomba obstruída por areia.

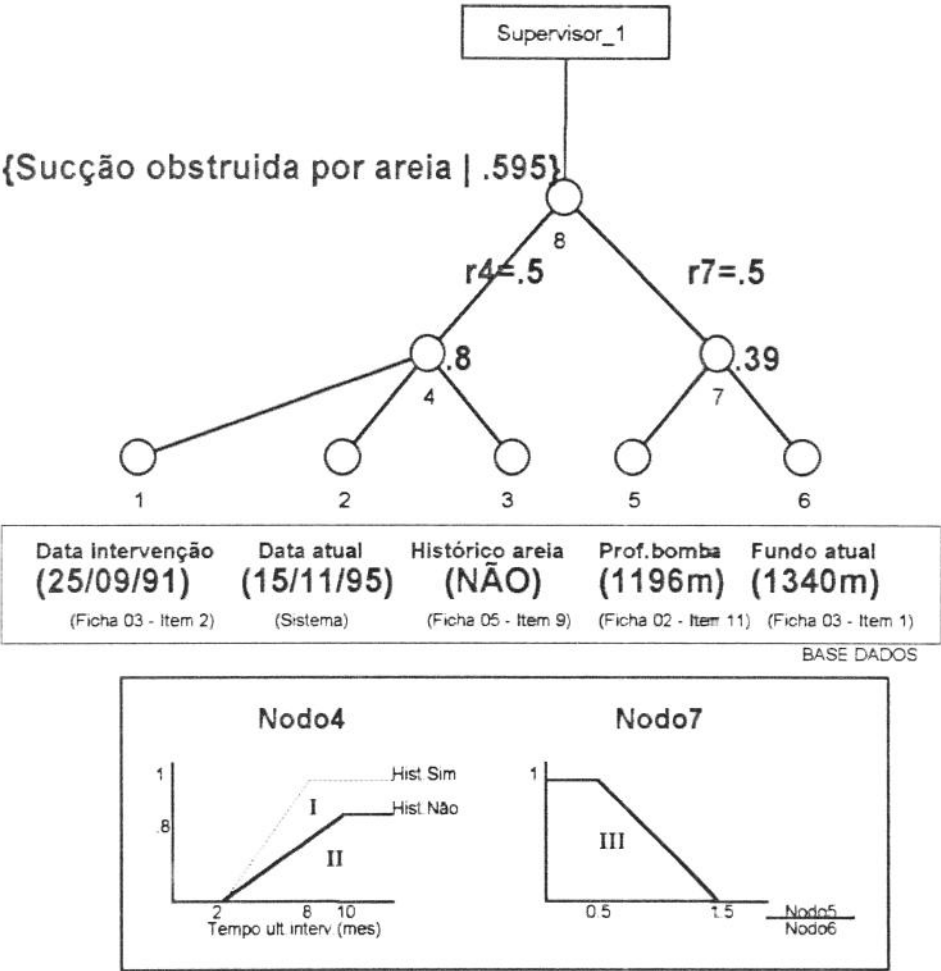


Figura 4-50- Agente Areia

4.2.2.13 Agente Corrosão na coluna de hastes

A semelhança do procedimento adotado nos agentes “Parafina” e “Obstrução da sucção da bomba por scale”, este agente define o valor de confiança para a hipótese “Corrosão severa” em 0.5.

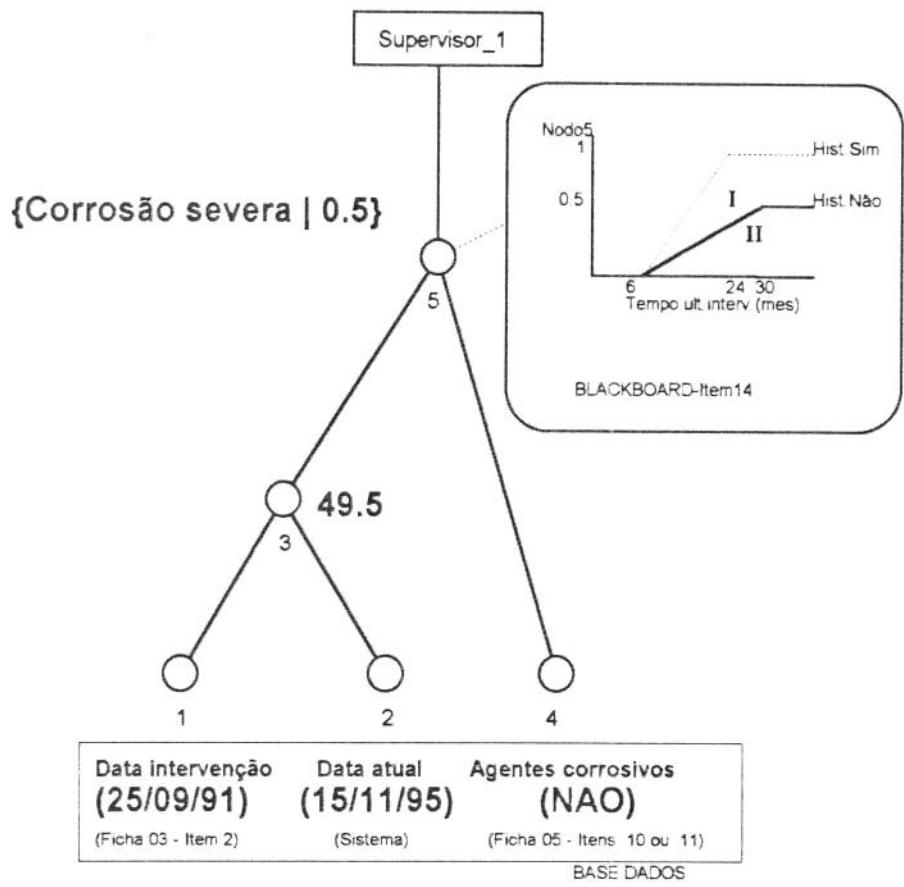


Figura 4-51- Agente Corrosão

4.2.3 Análise da carta dinamométrica

Classificação da carta dinamométrica<sup>24</sup> :  
PANCADA DE FLUIDO | 0,53;  
NORMAL | 0,87;  
INTERFERÊNCIA DE GÁS|0,52.

A classificação da carta dinamométrica (figuras 4-37 e 4-38) com base apenas na sua forma geométrica (acima) provoca a ativação dos agentes correspondentes “Pancada de fluido”, “Normal” e “Interferência de gás” os quais retornam o valor atualizado do grau de similaridade da carta dinamométrica em relação aos padrões e aos dados da BD.

Dos agentes ativados, será destacado apenas aquele que forneceu o maior grau de similaridade, no caso, o agente “Normal”.

<sup>24</sup> Feita pelo agente reconhecimento de padrões do SICAD [1,2].

4.2.3.1 Agente Normal

A classificação da carta dinamométrica com grau de similaridade 0.87 ativa este agente. No nodo 4 os valores de confiança nas hipóteses interferência de gás severa e pressão de sucção alta são agregados através da média ponderada formalizando a regra: “Se a interferência de gás é baixa e a pressão de sucção é baixa Então a situação do poço é normal” a qual fornece o valor de confiança 0.47.

No nodo 5 é feita a agregação da regra acima e o grau de similaridade obtendo-se o valor de confiança de 0.67 que representa o grau de similaridade do padrão levando em conta a pressão de sucção e a interferência de gás. Como o valor de confiança obtido é superior ao limiar definido, a hipótese de carta normal é aceita.

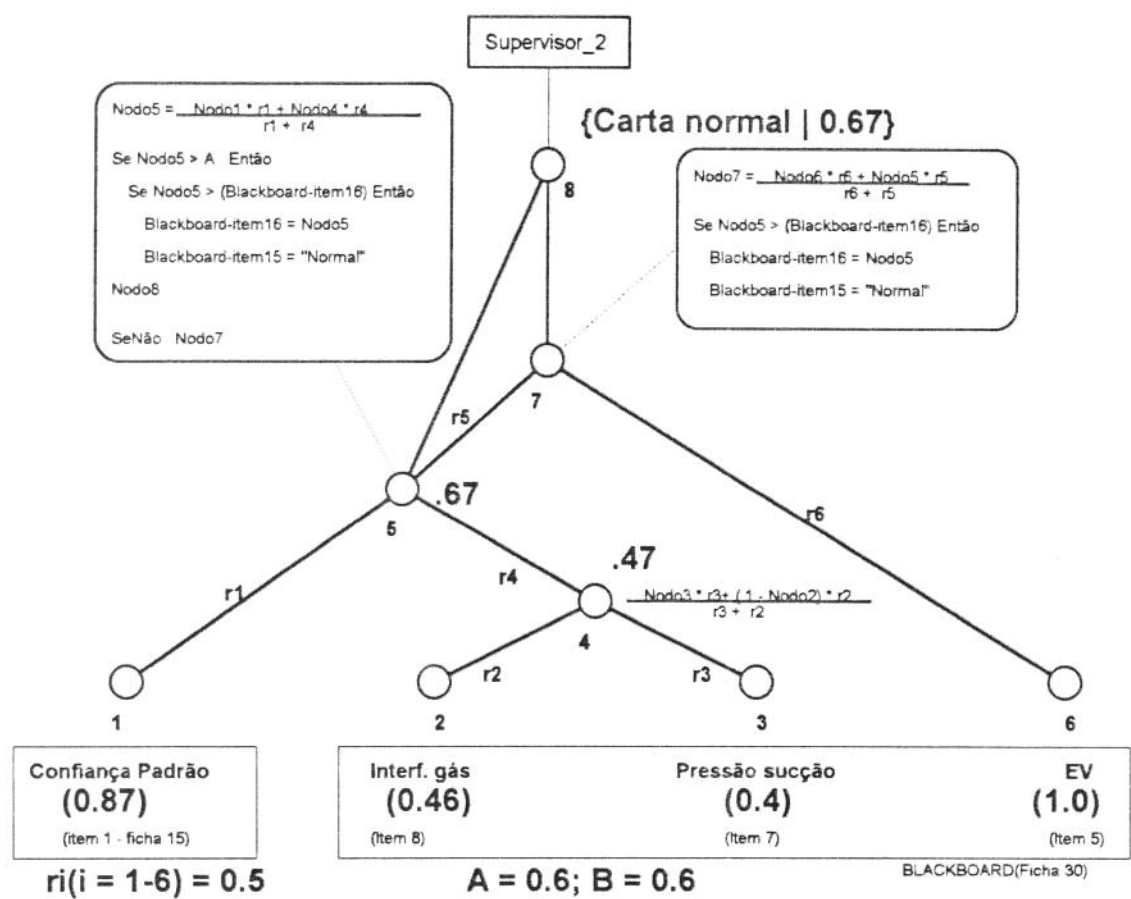


Figura 4-52 - Agente Normal

Os resultados fornecidos pelos agentes descritos nas páginas anteriores integram o quadro de sintomas do poço. Estes resultados são colocados na ficha 30 (blackboard) e disponibilizados para todos os demais agentes do sistema:

- 1- UB subdimensionada: **0.89**
- 2- MOTOR subdimensionado: **0.96**
- 3- HB subdimensionada: **0.7**
- 4- Queda de produção: **0.0**
- 5- EV baixa: **1.0**
- 6- POSIÇÃO DA BOMBA: **Em frente ao perfurados**
- 7- Pressão de sucção alta: **0.6**
- 8- Interferência de gás severa: **0.46**
- 9- Taxa de compressão alta: **1.00**
- 10- Atrito severo: **0.54**
- 11- Acúmulo severo de parafina na coluna: **0.80**
- 12- Sucção da bomba obstruída por scale: **0.50**
- 13- Sucção da bomba obstruída por areia: **.59**
- 14- Corrosão severa: **0.50**
- 15- Classificação da carta dinamométrica: **Normal**
- 16- Confiança na classificação: **0.67**

Os sintomas acima são apresentados ao usuário na seguinte forma, figura da página seguinte:

**SIBOM - Diagnósticos**

**ANÁLISE NODAL**

- Índice de performance(IP) linear: .102 m<sup>3</sup>/d/psi
- Vazão potencial do SBM: 37.06 m<sup>3</sup>/d
- Pressão de sucção correspondente: 770 psi
- Velocidade de bombeamento correspondente: 19 cpm
- Curso correspondente: 54 pol.
- Faixa de cpm considerada: 5 - 20

**OUTRAS INFORMAÇÕES**

- Peso das hastes no ar: 6728.5 Lb
- Empuxo: 726.341575 Lb
- Carga no teste da válvula de passeio: 7083.18 Lb
- Carga no teste da válvula de pé: 5854.90 Lb
- Pressão na descarga da bomba: 1563.57 psi
- Nível dinâmico virtual: 427.83 m
- Profundidade ideal para a bomba: 1260 m

**HIPÓTESES ANALISADAS**

- UB subdimensionada: .89
- Motor subdimensionado: .96
- Hastes subdimensionadas: .70
- Queda de produção: 0
- Eficiência volumétrica baixa: 1
- Pressão de sucção alta: 1
- Acúmulo severo de parafina: .80
- Sucção obstruída por scale: .50
- Sucção obstruída por areia: .595
- Corrosão severa: .50
- Classificação da carta de fundo: Normal - .67
- Classificação do posicionamento da bomba: Em Frente

**PRINT** **REDIM.** **ANIMAÇÃO** **INTERV.** **SAIR**

Figura 4-53 - Resultados da análise preliminar do poço CAM 93

4.2.4 Definição dos diagnósticos

Os agentes do grupo diagnósticos são ativados em função dos valores de confiança contidos no blackboard. Para cada sintoma existe um agente encarregado de definir um diagnóstico correspondente que é ativado apenas se o valor de confiança do item correspondente for superior a um limiar de ativação, ver tabela abaixo:

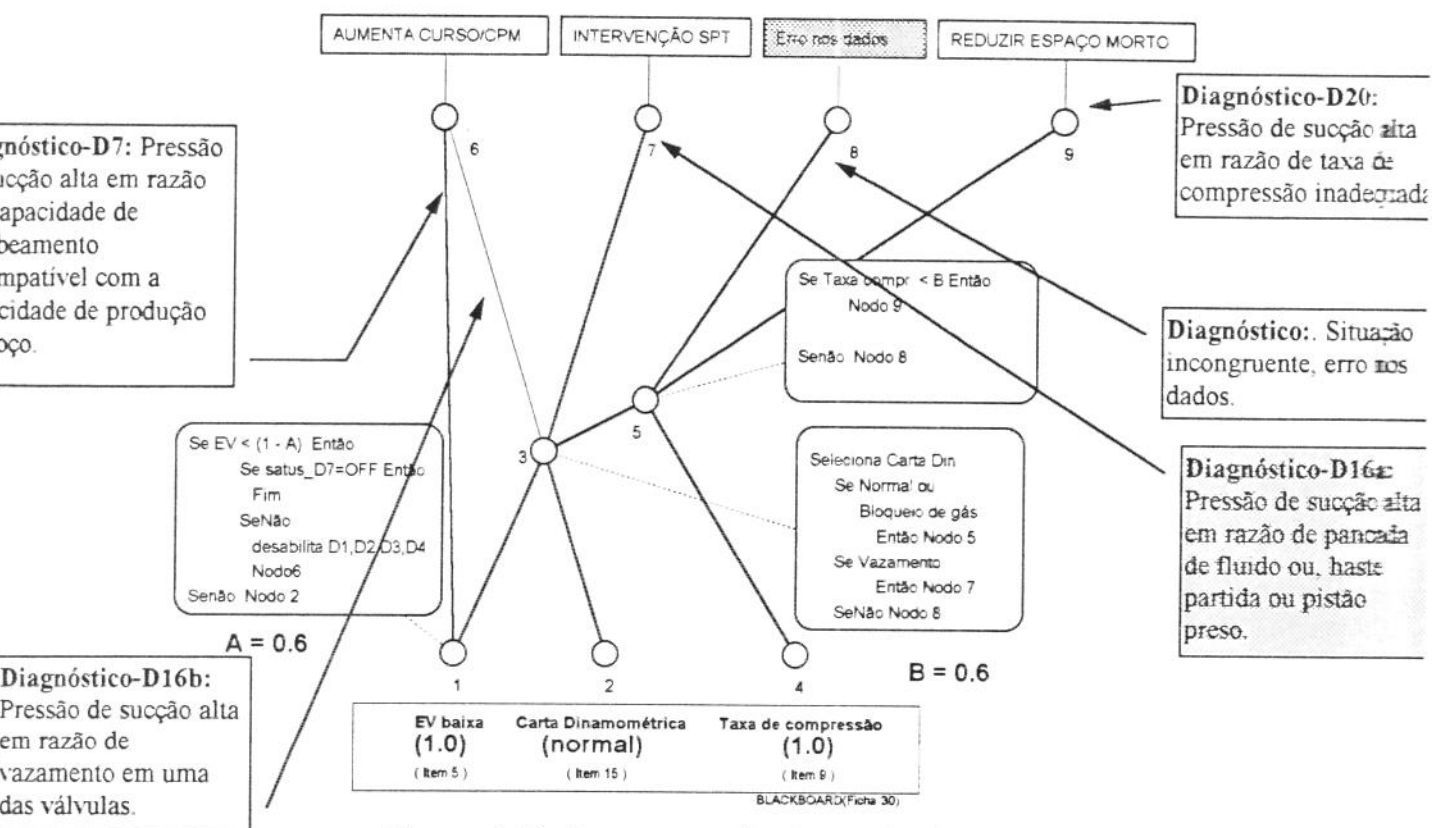
Tabela 4-2 - Limiares de ativação dos agentes do grupo diagnósticos

| Itens do blackboard | Valor de confiança | Agentes            | Limiar de ativação |
|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 15                  | -                  | Problemas na carta | -                  |
| 4                   | 0.0                | Queda de produção  | 0.6                |
| 7                   | 0.6                | Psuc alta          | 0.6                |
| 5                   | 1.0                | EV baixa           | 0.6                |
| 11                  | 0.8                | Acúmulo parafina   | 0.6                |
| 12                  | 0.5                | Obstrução sucção   | 0.6                |
| 13                  | 0.59               | Obstrução sucção   | 0.6                |
| 14                  | 0.5                | Corrosão severa    | 0.6                |
| 1                   | 0.89               | UB subdimension.   | 0.6                |
| 2                   | 0.96               | Motor subdimens.   | 0.6                |
| 3                   | 0.7                | HB subdimension.   | 0.6                |

Na tabela acima observamos que apenas os agentes “Pressão de sucção alta”, “EV baixa”, “Acúmulo severo de parafina”, “UB subdimensionada”, “Motor subdimensionado”, “HB subdimensionada”, são ativados.

#### 4.2.4.1 Agente Pressão de sucção alta

Este agente é ativado devido ao valor de confiança na hipótese pressão de sucção alta (0.6) ser maior que o limiar de ativação definido (0.6).



**Figura 4-54- Agente pressão de sucção alta**

No nodo 1 é verificado que a EV é considerada baixa, (valor de confiança maior que o limiar de ativação do agente “EV baixa”), o nodo 2 é ativado e no nodo 3 verificado que a classificação da carta dinamométrica é normal o que provoca a ativação dos nodos 4 e 5. No nodo 5 verifica-se que a taxa de compressão é alta. Estes sintomas teoricamente não devem ocorrer juntos, o que indica que existe incongruência nos dados utilizados na análise.



4.2.4.2 Agente Eficiência volumétrica baixa

Este agente é ativado devido ao valor de confiança na hipótese EV baixa (1.0) ser maior que o limiar de ativação definido (0.6).

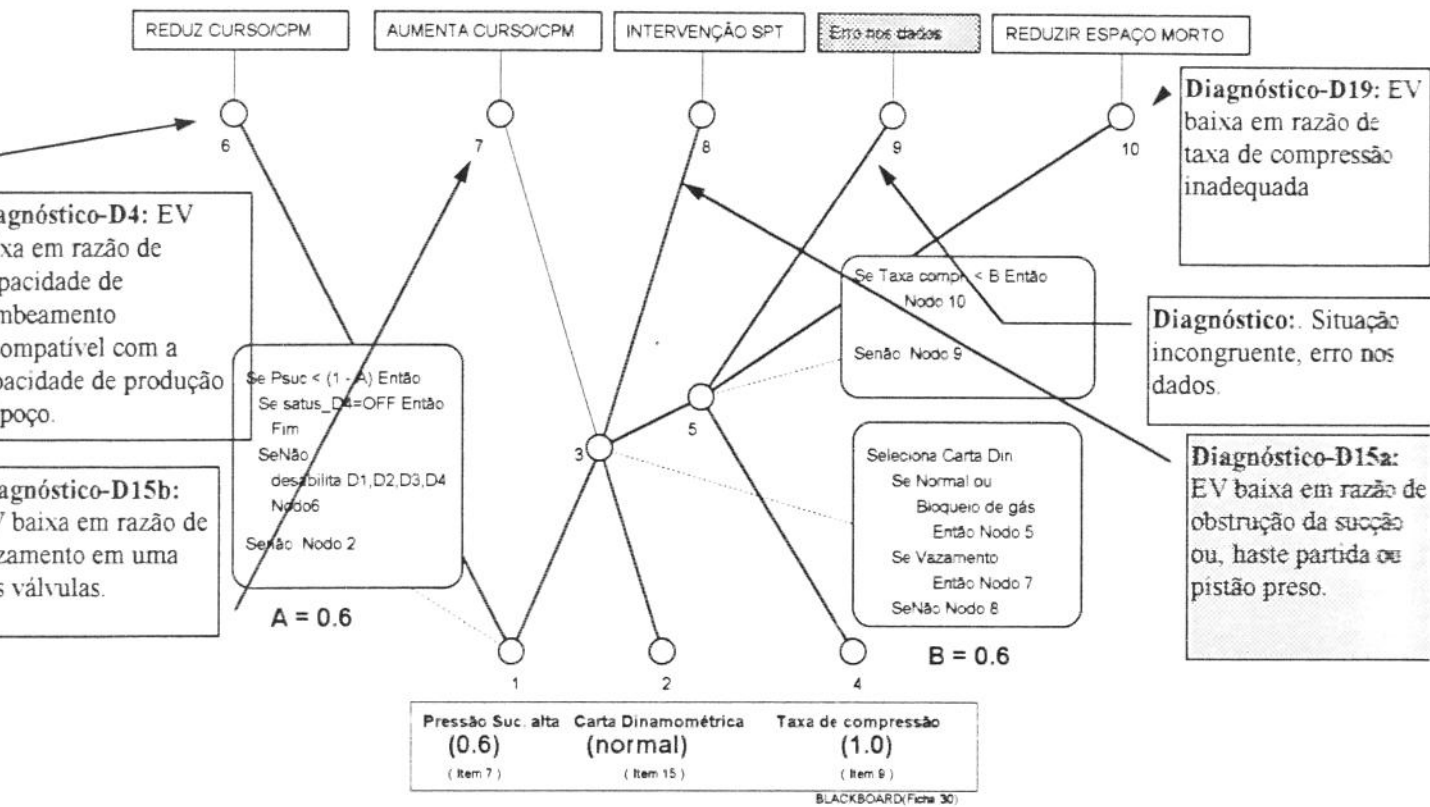


Figura 4-55 - Agente EV baixa

No nódo 1 é verificado que a pressão de sucção é considerada alta, (valor de confiança maior que o limiar de ativação do agente "Pressão de sucção alta"), o nódo 2 é ativado e no nódo 3 verificado que a classificação da carta dinamométrica é normal o que provoca a ativação dos nódos 4 e 5. No nódo 5 verifica-se que a taxa de compressão é alta. Estes sintomas teoricamente não devem ocorrer juntos, o que indica que existe incongruência nos dados utilizados na análise.

4.2.4.3 Agente Unidade de bombeamento subdimensionada

Este agente é ativado devido ao valor de confiança na hipótese UB subdimensionada (0.89) ser maior que o limiar de ativação definido (0.6).

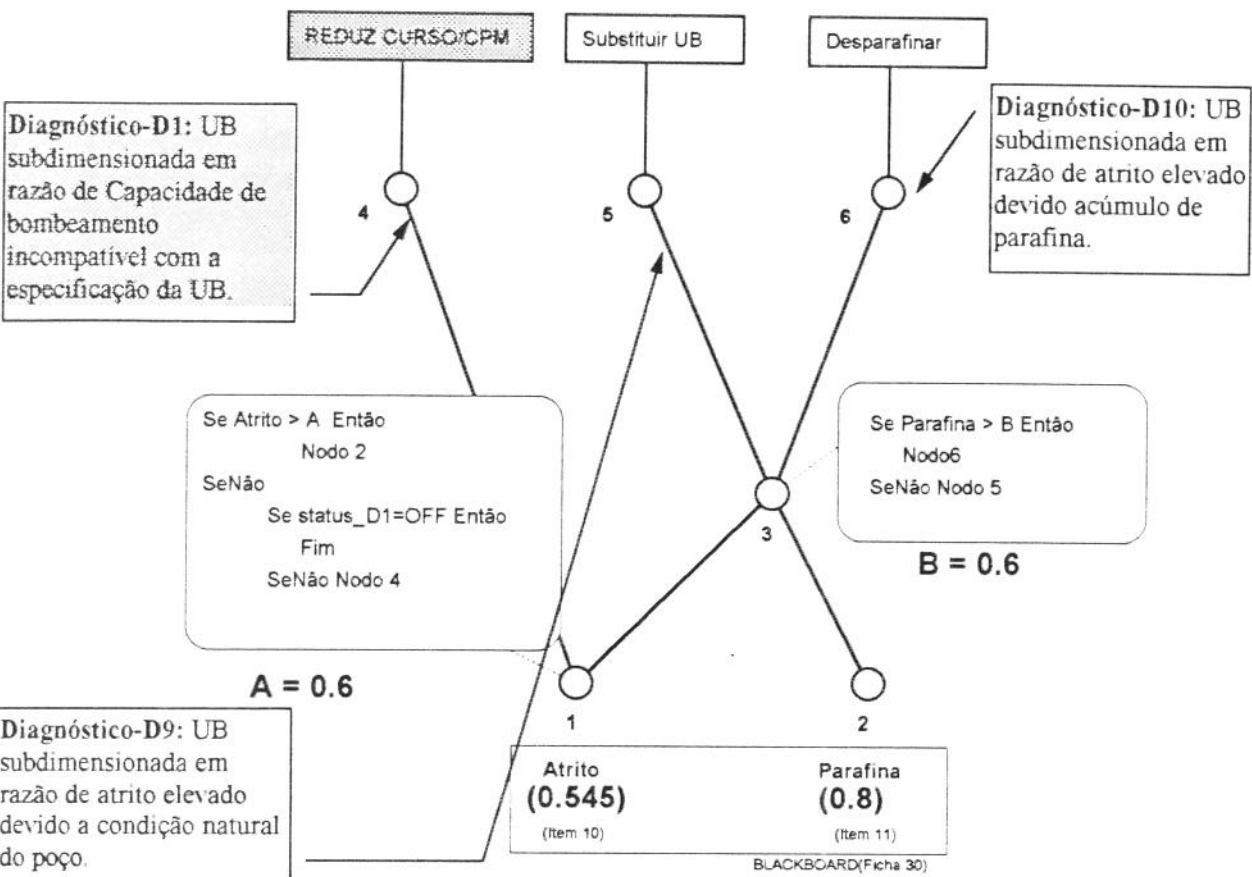


Figura 4-56 - Agente UB subdimensionada

No nodo 1 é verificado que o valor de confiança na hipótese atrito severo é considerado baixo para a avaliação da UB, o que define o diagnóstico *D1 - UB subdimensionada em razão da capacidade de bombeamento incompatível com a especificação da UB* e recomenda a redução da capacidade de bombeamento (curso e ou cpm).

4.2.4.4 Agente Coluna de hastes subdimensionada

Este agente é ativado devido ao valor de confiança na hipótese HB subdimensionada (0.8) ser maior que o limiar de ativação definido (0.75).

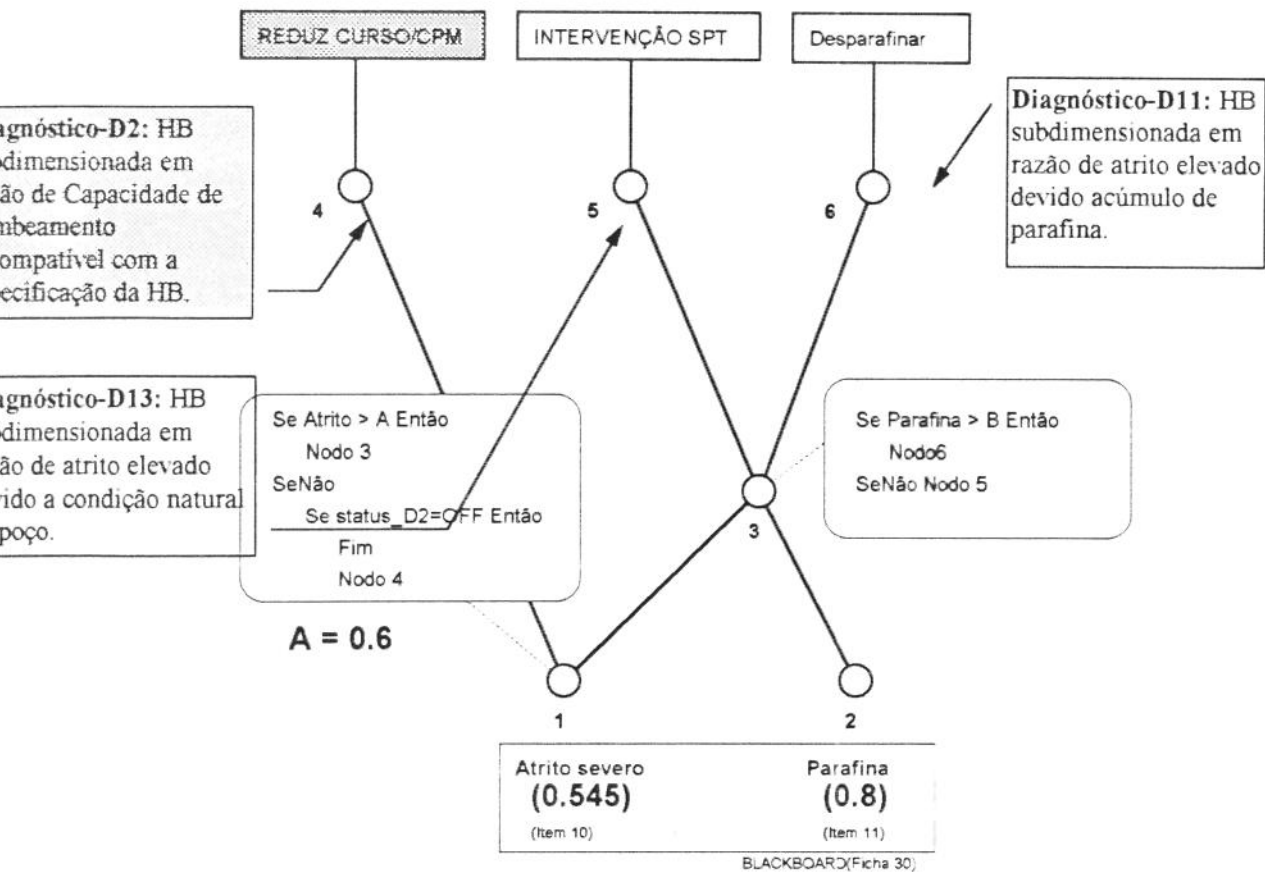


Figura 4-57- Agente HB subdimensionada

No nó 1 é verificado que o valor de confiança na hipótese atrito severo é considerado baixo para a avaliação da HB, o que define o diagnóstico D2 - HB subdimensionada em razão da capacidade de bombeamento incompatível com a especificação da HB e recomenda a redução da capacidade de bombeamento (curso e ou cpm).

Os seguintes diagnósticos foram definidos:

- **Diagnóstico-D12:** Coluna de tubos parafinada.
- **Diagnóstico-D1:** UB subdimensionada em razão de Capacidade de bombeamento incompatível com a especificação da UB.
- **Diagnóstico-D22:** Motor subdimensionado.
- **Diagnóstico-D2:** HB subdimensionada em razão de Capacidade de bombeamento incompatível com a especificação da HB.

Os seguintes agentes do grupo ações foram ativados:

4.2.5 Definição das ações

4.2.5.1 Reduzir curso/cpm - Reduz 1

Ativado pelo diagnóstico D1.

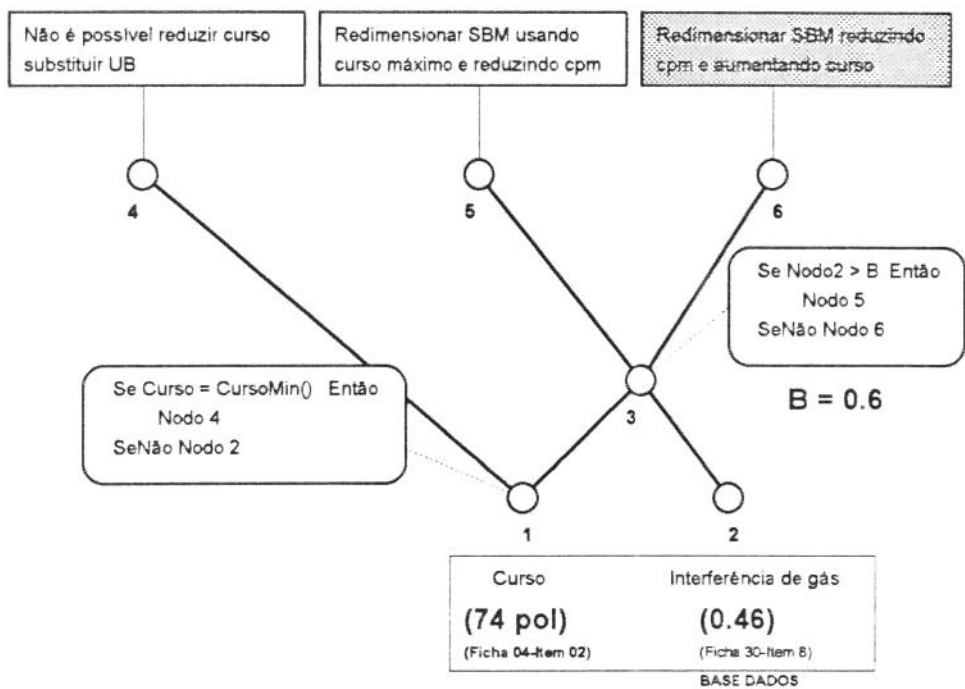


Figura 4-58 - Agente Reduz 1

No nodo 1 é verificado que o curso da UB (74), é diferente do curso mínimo, no nodo 3 é verificado que a interferência de gás é baixa (menor que o limiar definido B = 0.6). Estas restrições indicam que o sistema pode ser redimensionado visando adequar a UB para as condições do poço.

4.2.5.2 Reduzir curso/cpm - Reduz 2

Ativado pelo diagnóstico D2.

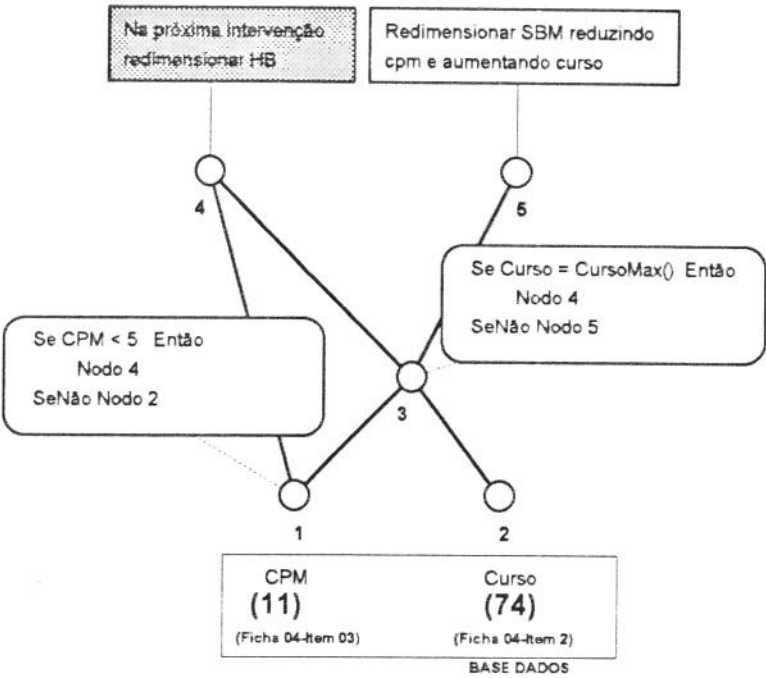


Figura 4-59 - Agente Reduz 2

No nodo 1 é verificado que a velocidade de bombeamento da UB (11), é diferente do mínimo, o que provoca a ativação dos nodos 2 e 3. No nodo 3 é verificado que o curso da UB é o máximo. Estas restrições indicam que as HB devem ser redimensionadas e modificadas em uma próxima intervenção.

O diagnóstico final é apresentado pelo sistema na seguinte forma:

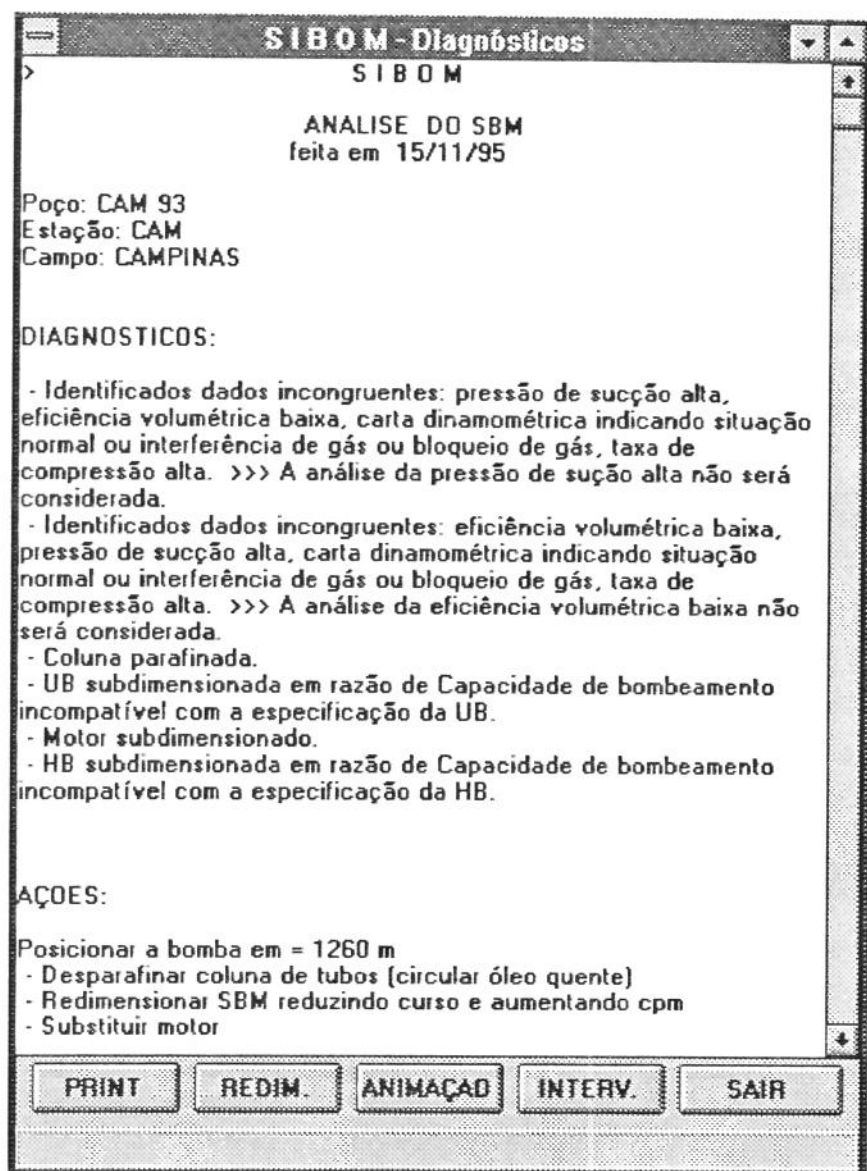


Figura 4-60 - Diagnósticos do poço CAM 93

A figura acima apresenta o conjunto de diagnósticos obtidos pelo sistema e o conjunto de ações pertinentes. No presente caso verificou-se que alguns dados da BD estão incongruentes. O redimensionamento do SBM visa corrigir o subdimensionamento da UB e das HB os quais, em função da definição dos limiares de ativação dos agentes correspondentes foram considerados críticos, além disso deve ser substituído o motor.

A figura a seguir mostra o objeto "REDIM", utilizado para efetuar o redimensionamento do SBM.

**SIBOM - Redimensionamento(API RP 11 L)**

Arquivo Sobre...

**Unidade de Bombeio**  
MICROLAB ML160\*

**Curso(pol.)**  
44 54 64 74 ☐ ☒ ☐ ☐ ☐ ☐

Velocidade de bombeio(spm).....= 19  
Potência do motor(hp).....= 10

**Hastes e Bomba**  
75 1.75

| Grau Haste | Fator Serviço | Bomba Tipo | Camisa (ft) | Profund. (m) |
|------------|---------------|------------|-------------|--------------|
| C          | 1             | THM        | 15          | 1196         |

**Fluido**  
Grau API 8SW(%) SGW Nível(m)  
35 1 1.05 1196

Vazão desejada(m3/d).....= 37.06  
Efic. Volumétrica (%).....= 100

**Tubulação**  
2.875 EU-6.50-J55  
☒ Ancorado ?

**Poço**  
CAM 93

**Resultados**

|                |                        |
|----------------|------------------------|
| Torque Máx.    | Capac. ao Torque da UB |
| 147003         | 160000 Lb x Pé         |
| Carga Máx.     | Capac. Estrut. da UB   |
| 12700          | 20000 Lb               |
| Pot. Requerida | Motor                  |
| 21.76          | 10 hp                  |
| Tensão Máx.    | Tensão Adm.            |
| 21121          | 25260 Psi              |
| Desloc. Volum. | Vazão desejada         |
| 51.93          | 37.06 m3/d             |

 SIBOM

Clique para calcular. 11-15-1995 10:47:13

Figura 4-61 - Redimensionamento do poço CAM 93

4.3 Caso 3

Este caso demonstra o uso de limiares de ativação mais elásticos. O que resulta na identificação apenas da parafinação da coluna de tubos. Os agentes relacionados com dimensionamento do SBM e a obstrução da sucção por areia, diferentemente dos caso anteriores, não foram ativados.

4.3.1 Dados do poço

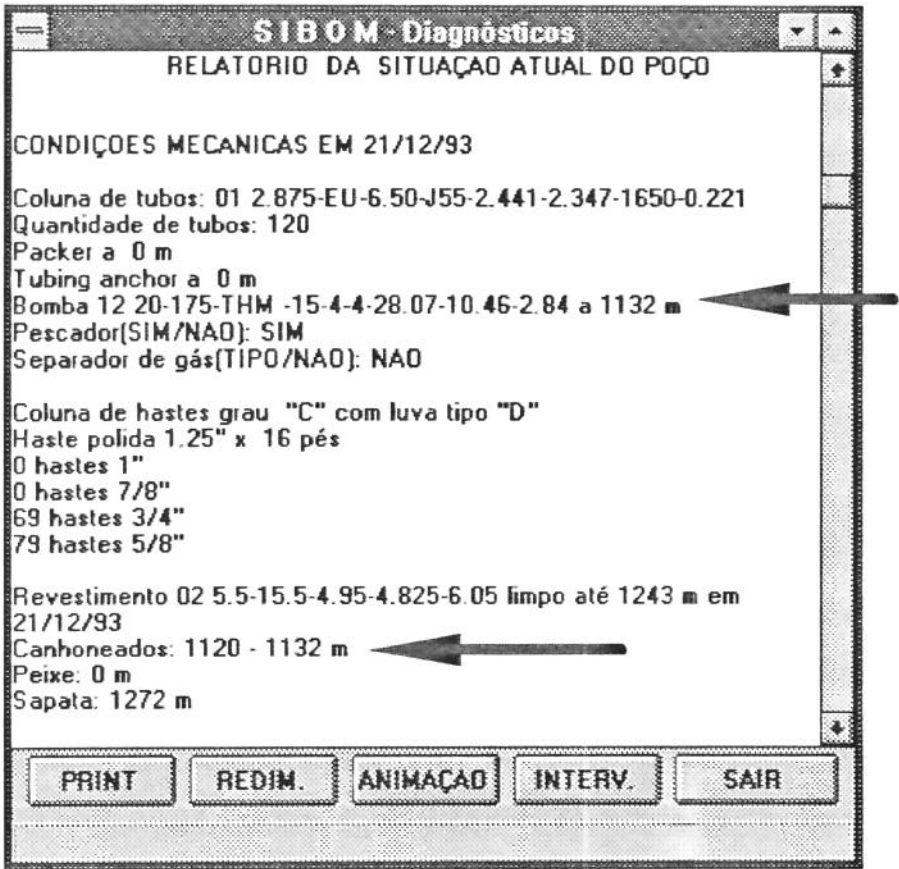


Figura 4-62 - Condições mecânicas do poço CAM 40

A bomba está posicionada em frente aos perfurados (setas).



**SIBOM - Diagnósticos**

**UNIDADE DE BOMBEAMENTO**

Unidade de bombeamento: 34VOITH V.160 160200 74 9  
Curso: 64 pol.  
Velocidade de bombeamento: 12 cpm  
Contrapesos em :  
Motor ELETRICO de 40 hp

**CARACTERISTICAS DO FLUIDO PRODUZIDO**

Grau API: 35  
RGL: 8 m3/m3  
Densidade relativa do gás: 0.67  
Salinidade da água produzida: ppm  
Densidade relativa da água: 1.05  
Histórico de parafinação: SIM  
Histórico de formação de scale: NAO  
Produção de areia: SIM  
Presença de H2S: NAO  
Presença de CO2: NAO  
Viscosidade média do fluido: 15.87 cp

**CARACTERISTICAS DO RESERVATORIO**

Zona produtora: CP-1  
Pressão estática de 52 Kgf/cm2 a 1107 m, medida em 21/12/93  
Pressão de saturação: 1500 psi  
Temperatura de fundo: 130 F

PRINT REDIM. ANIMAÇÃO INTERV. SAIR

Figura 4-63 - Características da UB do fluido e do reservatório do poço CAM 40

A última limpeza (intervenção de sonda) foi realizada há mais de 20 meses, o que, em virtude da existência de histórico de parafina, é uma indicação de acúmulo de parafina na coluna. O posicionamento da bomba distante do fundo poço diminui a possibilidade de obstrução da sucção por areia.

**SIBOM - Diagnósticos**

**TESTES DE PRODUÇÃO**

|   | DATA     | Q(*)[M3/D] | BSW(%) | P TUB(PSI) |
|---|----------|------------|--------|------------|
| 1 |          |            |        |            |
| 2 | 21/09/95 | 26         | 91     | 80         |
| 3 | 29/08/95 | 27         | 92     | 80         |
| 4 | 02/08/95 | 28         | 94     | 80         |
| 5 |          |            |        |            |
| 6 |          |            |        |            |
| 7 |          |            |        |            |

Q ATUAL 26      ←  
 Q ANTERIOR      27  
 QAT/QAN      0,96

**REGISTROS DE NIVEL DINAMICO**

| REGISTRO | DATA<br>(PSI) | PR1<br>(M) | NIVEL1(*)<br>(PSI) | PR2<br>(M) | NIVEL2<br>(MINUTOS) | DT |
|----------|---------------|------------|--------------------|------------|---------------------|----|
| 1        |               |            |                    |            |                     |    |
| 2        | 31/08/95      | 10         | 632                | 11         | 530                 | 40 |
| 3        |               |            |                    |            |                     |    |
| 4        |               |            |                    |            |                     |    |
| 5        |               |            |                    |            |                     |    |
| 6        |               |            |                    |            |                     |    |
| 7        |               |            |                    |            |                     |    |

ND ATUAL      632  
 ND ANTERIOR  
 ND AT/AN      1  
 PSUC(PSI)      610.28    595.82    ←  
 QG(M3/D)      24.95

PRINT    REDIM.    ANIMAÇÃO    INTERV.    SAIR

Figura 4-64 - Testes de produção e registros de nível dinâmico do poço CAM 40

O último teste de produção apresenta valor semelhante aos valores obtidos nos dois últimos testes.

O registro de nível dinâmico indica valor elevado para a pressão de sucção. Comparando esses valores com os resultados obtidos da análise nodal (figura 4-79) indica que seria possível obter uma maior produção.

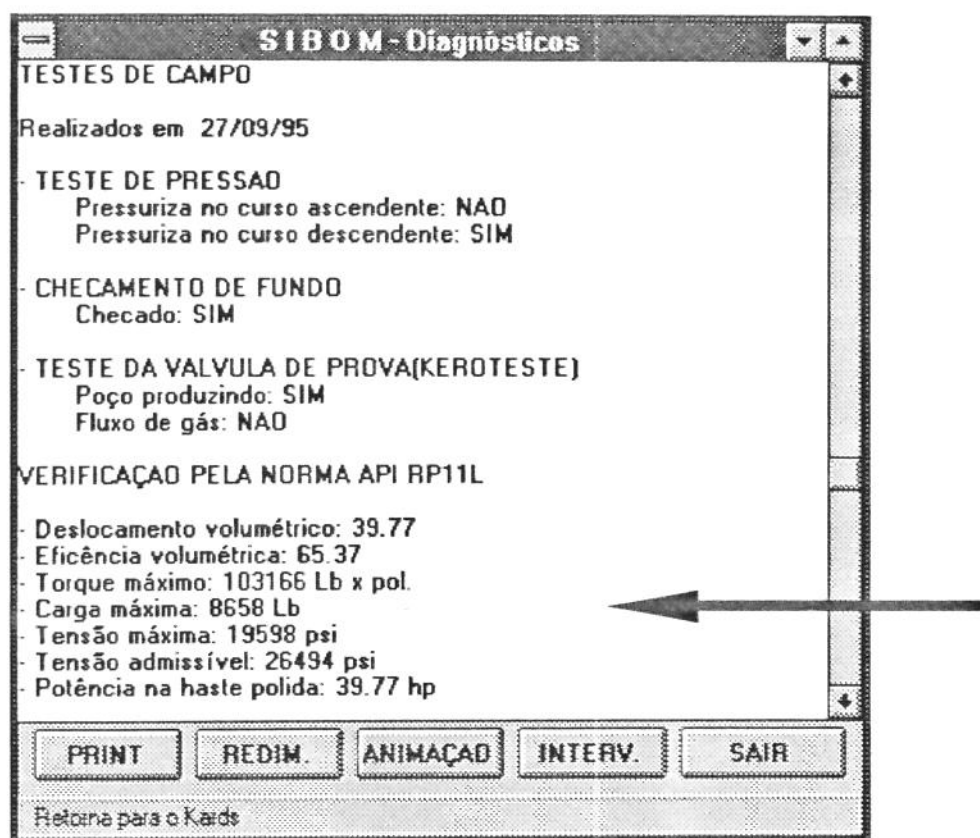


Figura 4-65 - Testes de campo e verificação pela norma API RP11L do CAM 40

Os parâmetros obtidos a partir da norma API RP11L (seta) indicam valores aceitáveis.

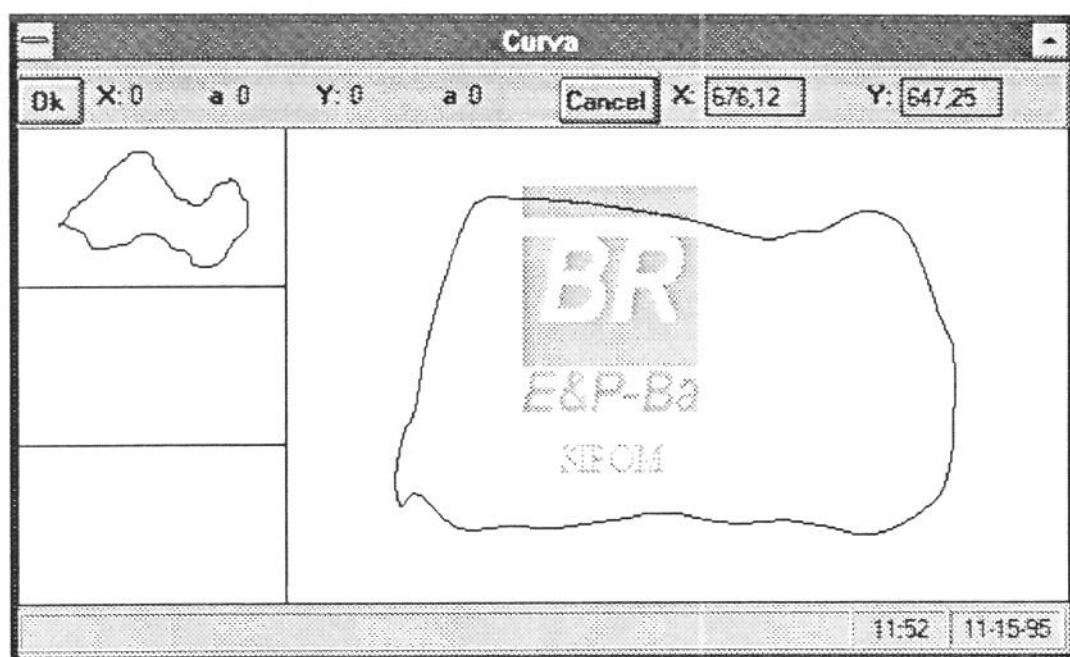


Figura 4-66- Cartas dinamométricas de superfície e de fundo do poço CAM 40

A figura acima mostra uma outra possibilidade de apresentação das cartas dinamométricas. A CDF é apresentada em primeiro plano enquanto que a CDS é apresentada em segundo plano com tamanho reduzido.

A CDF indica situação normal de bombeamento.

4.3.2 Definição dos sintomas

4.3.2.1 Agente Atrito

O valor da carga no teste da válvula de pé comparado com o correspondente valor teórico permite obter um valor de confiança de 0.45 (nodo 3) para a hipótese de atrito severo no SBM.

O valor da carga no teste da válvula de passeio comparado com o correspondente valor teórico permite obter um valor de confiança de 0.13 (nodo 6) para a mesma hipótese.

A agregação das duas regras através da média ponderada pela relevância de cada uma permite obter um valor de confiança de 0.30 para a hipótese de atrito severo. Sendo este valor menor que o limiar definido para a aceitação da hipótese, é verificado o desvio do poço em relação a vertical, dado que o poço não apresenta desvio, é adotado um valor default (nodo 11) para o atrito. Este valor é utilizado para atualizar o blackboard (ficha 30 item 10).

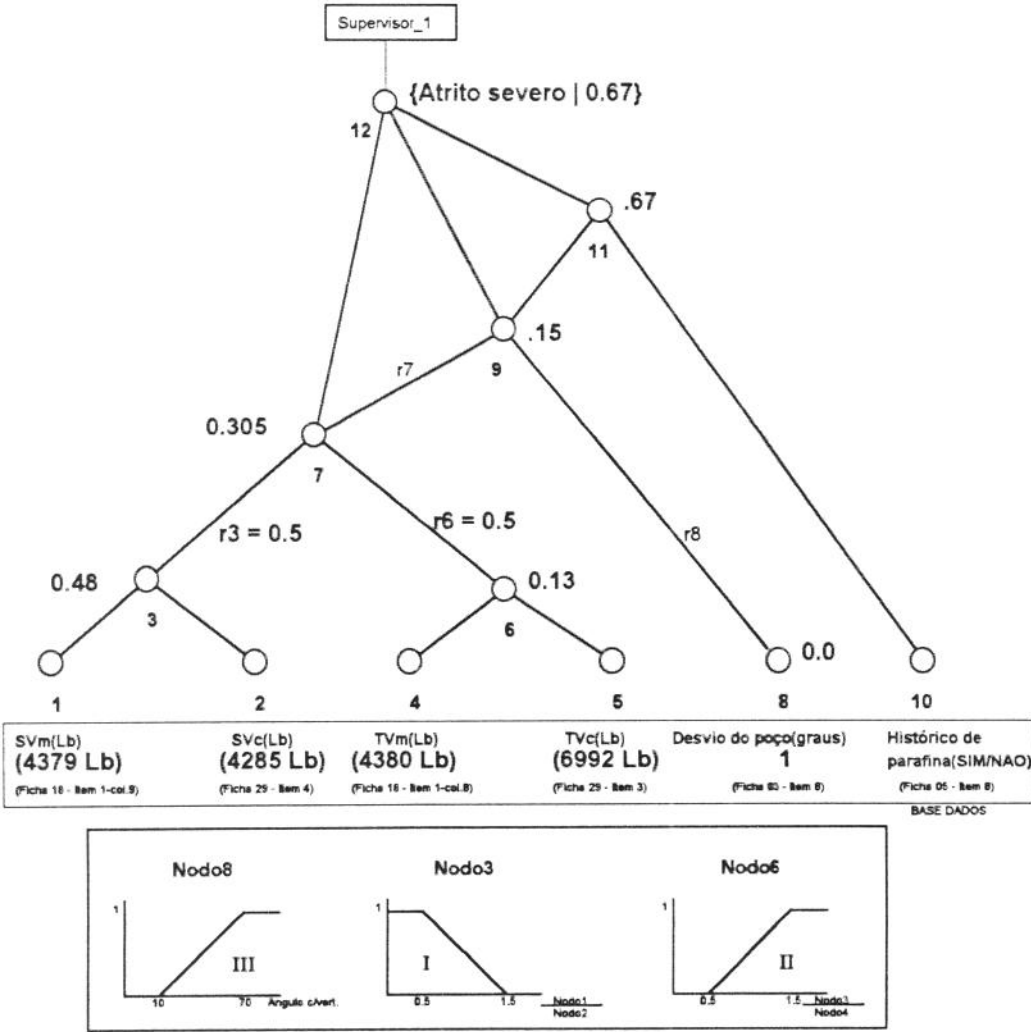


Figura 4-67 - Agente Atrito

4.3.2.2 Agente Interferência de gás

De forma idêntica ao atrito, utilizando as funções de pertinência “I”, “II” e o valor da RGL medida, é definido o valor de confiança de 0.46 para a hipótese de interferência de gás severa no SBM.

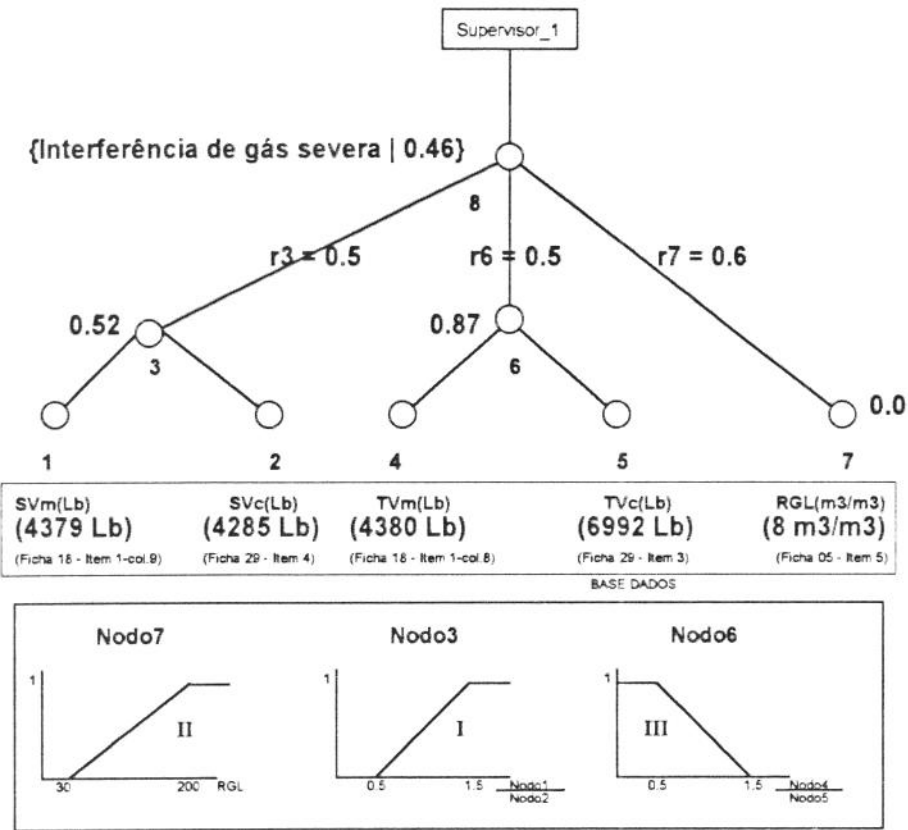


Figura 4-68 - Agente Interferência de gás

#### 4.3.2.3 Agente Unidade de bombeamento

No nodo 7 da figura abaixo, a partir do valor de confiança na hipótese de atrito severo (0.67) é selecionada a função de pertinência “I” utilizada para, a partir do valor calculado no nodo 3, obter o valor de confiança na hipótese UB subdimensionada do ponto de vista de carga levando em conta apenas o atrito existente no sistema.

No nodo 8 é adotado procedimento semelhante levando em conta apenas a interferência de gás. Neste caso é selecionada a função de pertinência “V”.

No nodo 9 é feita a agregação do valor de confiança na hipótese de UB subdimensionada do ponto de vista de carga levando em conta tanto o atrito como a interferência de gás.

Nos nodos 10, 11 e 12 é adotado procedimento análogo aos anteriores para o torque, usando agora as funções de pertinência “IX”, “XI”.

No nodo 13 é feita a agregação das regras acima descritas para a carga e torque utilizando-se para isso a função lógica “OU” formalizada através da operação de máximo, obtendo-se dessa forma o valor de confiança de 0.69 para a hipótese “UB subdimensionada”.

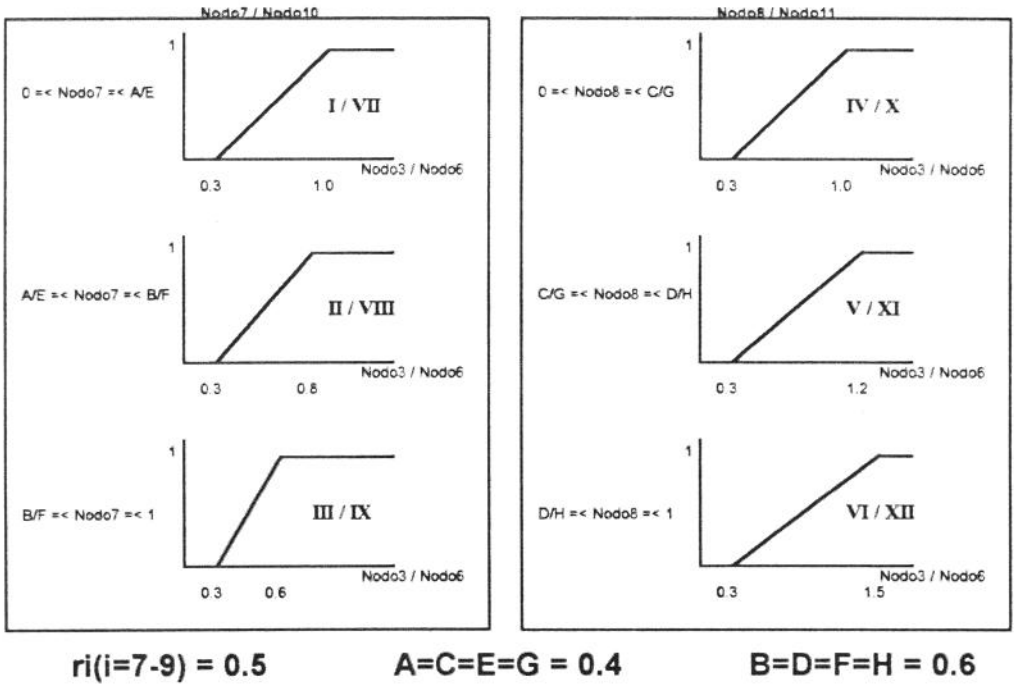
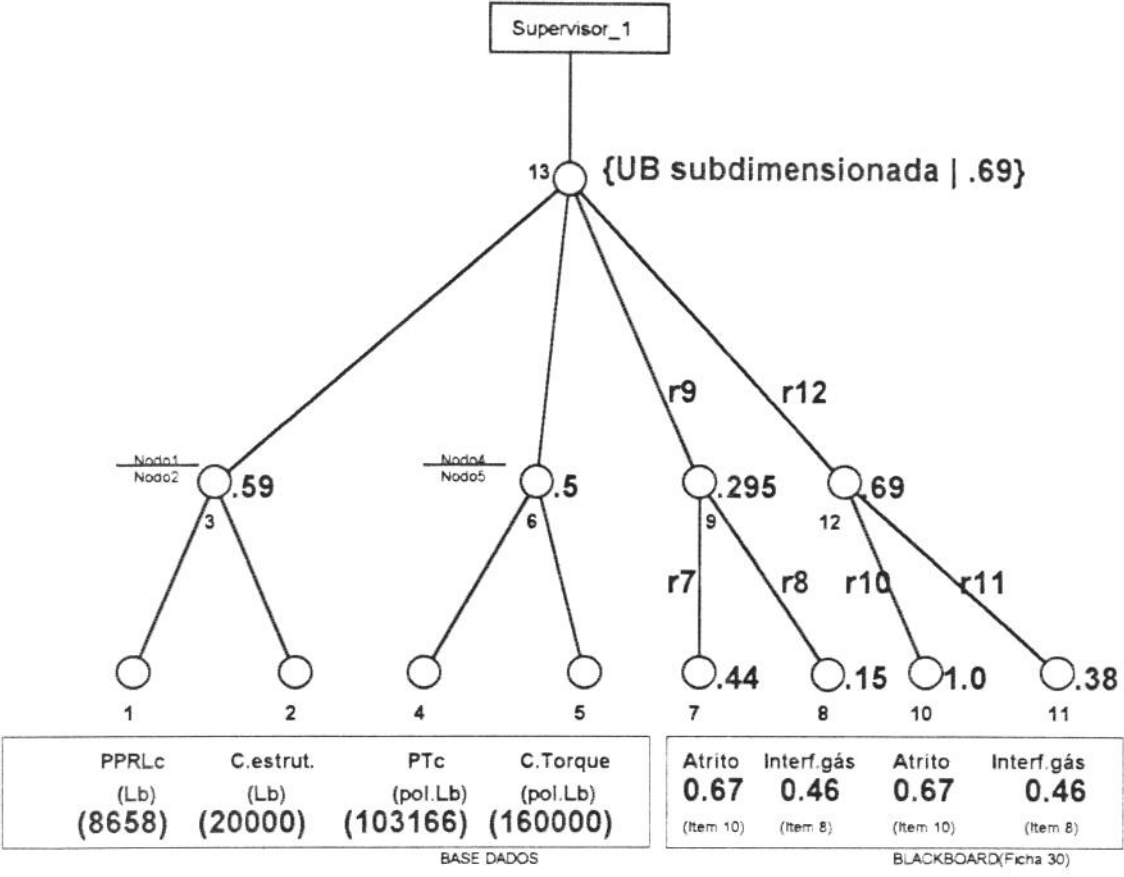


Figura 4-69 - Agente Unidade de bombeamento



4.3.2.4 Agente motor

Em função dos valores de confiança nas hipóteses de atrito severo e interferência de gás severa, são selecionadas as funções de pertinência “III” e “V” utilizadas para definir o valor de confiança na hipótese motor subdimensionado nos nodos 4 e 5. A agregação dos valores de confiança através da média ponderada pelas relevâncias atribuídas às regras formalizadas nos nodos 4 e 5 define o valor de confiança na hipótese “motor subdimensionado” (0.0).

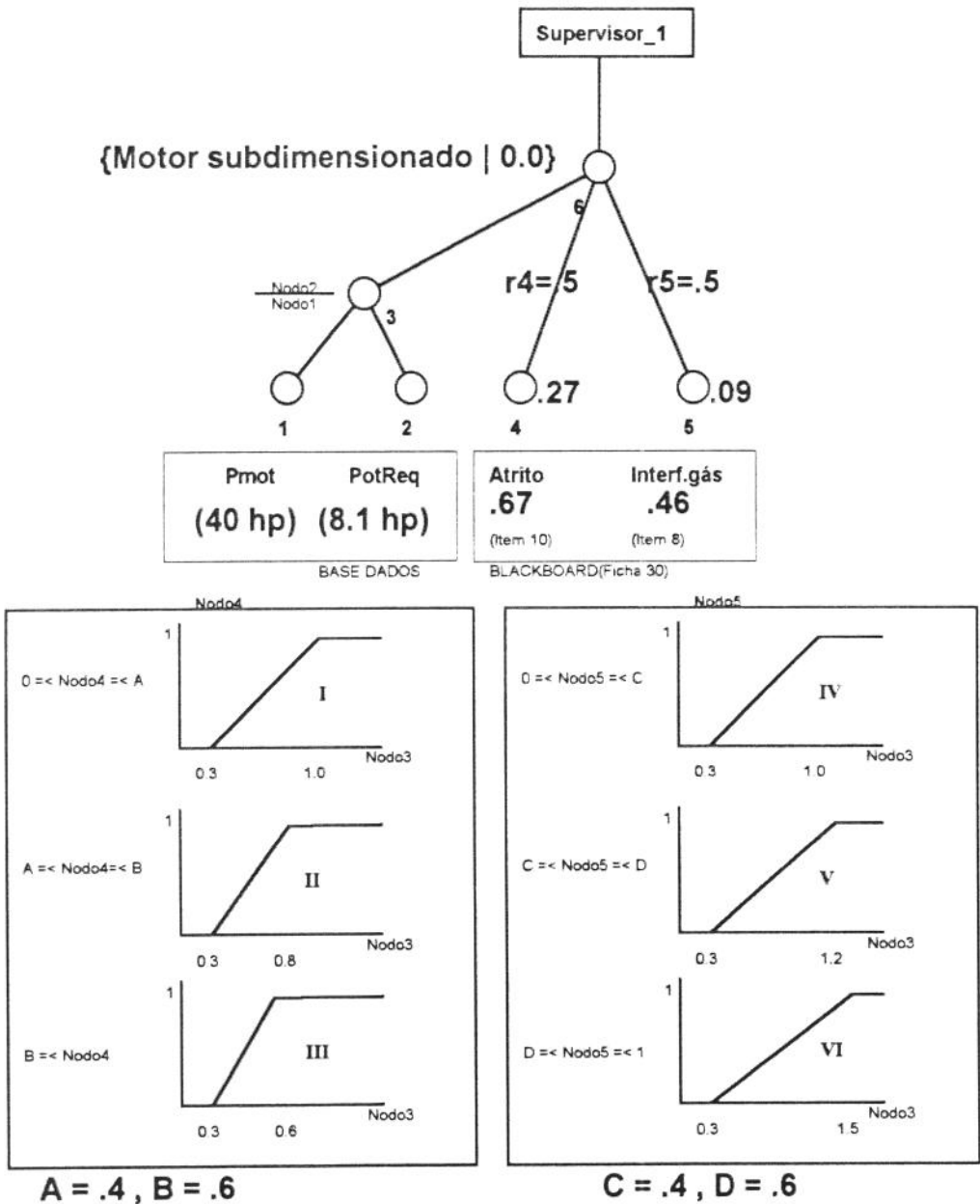


Figura 4-70 - Agente Motor

4.3.2.5 Agente Tensão nas hastes

De forma análoga aos agentes anteriores, este agente define o valor de confiança na hipótese HB subdimensionada em 0.75.

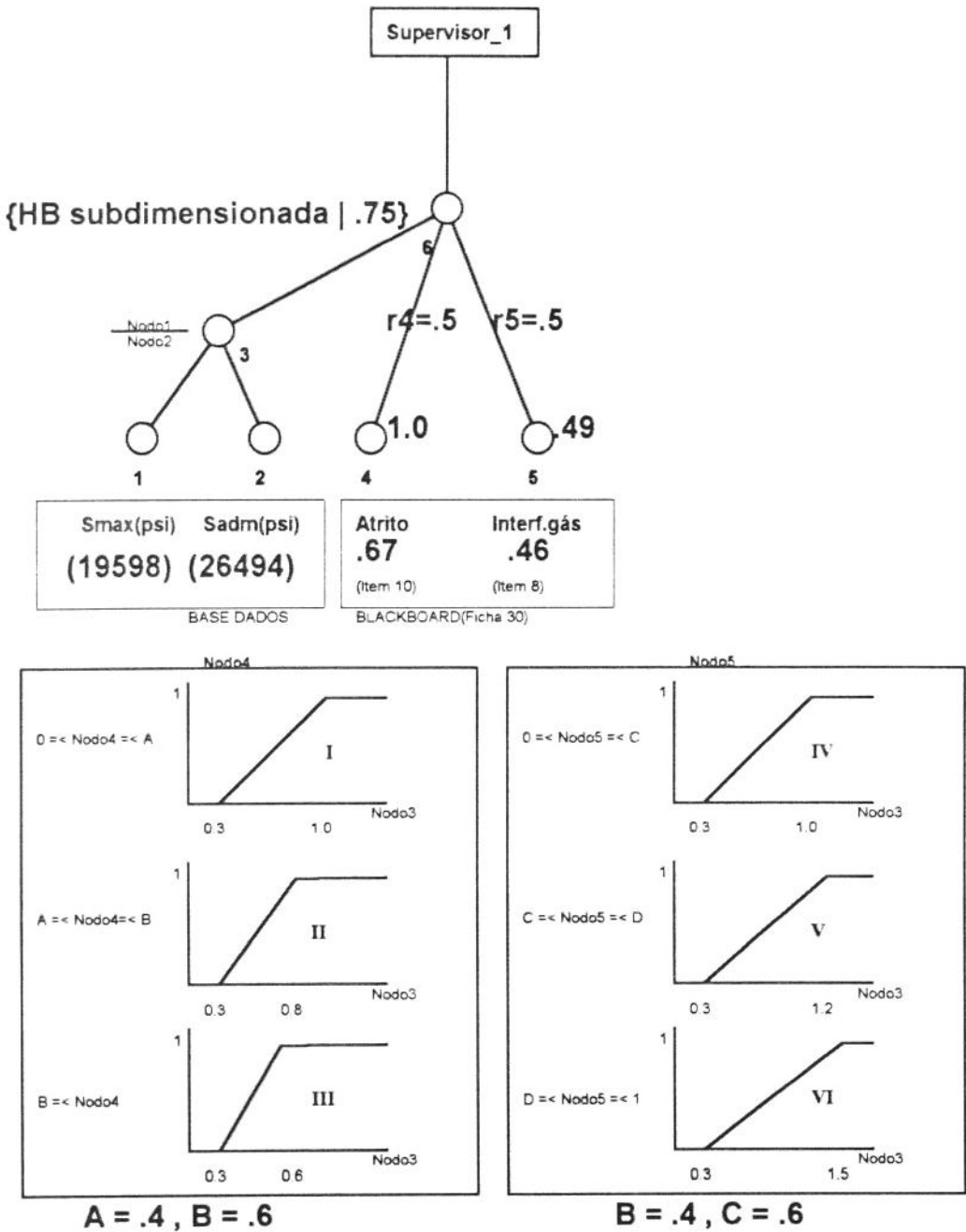


Figura 4-71 - Agente Haste de bombeamento

4.3.2.6 Agente Teste de produção X vazão potencial

A função de pertinência I no nodo 3 fornece um valor de confiança (0.51) maior que o limite de 0.1 definido. Isto faz com que a hipótese de “queda de produção” seja aceita com o valor de confiança de 0.51.

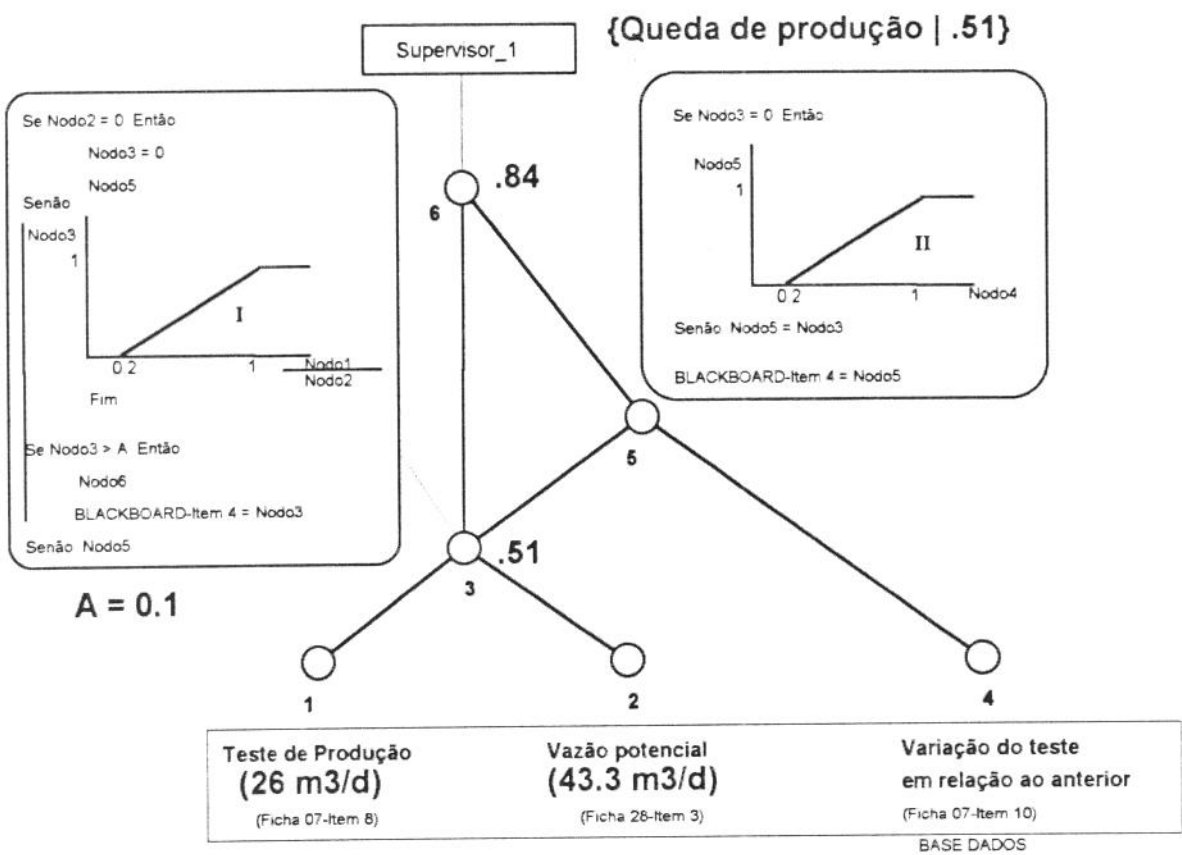


Figura 4-72 - Agente Teste de produção X vazão potencial

4.3.2.7 Agente Eficiência Volumétrica

O valor de confiança na hipótese de interferência de gás severa define a função de pertinência a ser utilizada para o cálculo do valor de confiança na hipótese de EV alta, obtendo para os dados deste poço o valor 0.76. O valor de confiança na hipótese de EV baixa é calculado através da operação complemento realizada no nodo 4 obtendo-se o valor de confiança de 0.24.

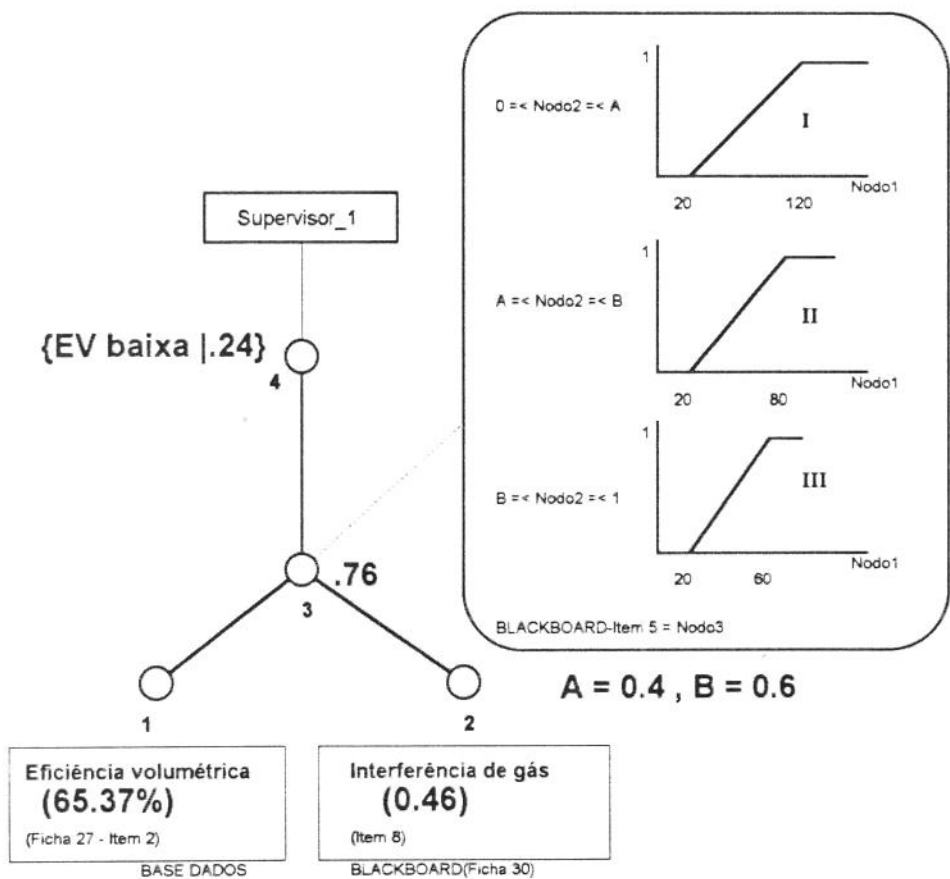


Figura 4-73- Agente Eficiência volumétrica

4.3.2.8 Agente Pressão de Sucção

No nodo 3 a função de pertinência fornece o valor de confiança para a hipótese de pressão de sucção baixa. O valor de confiança na hipótese de pressão de sucção alta é calculada pela operação complemento no nodo 4, obtendo-se 1.0.

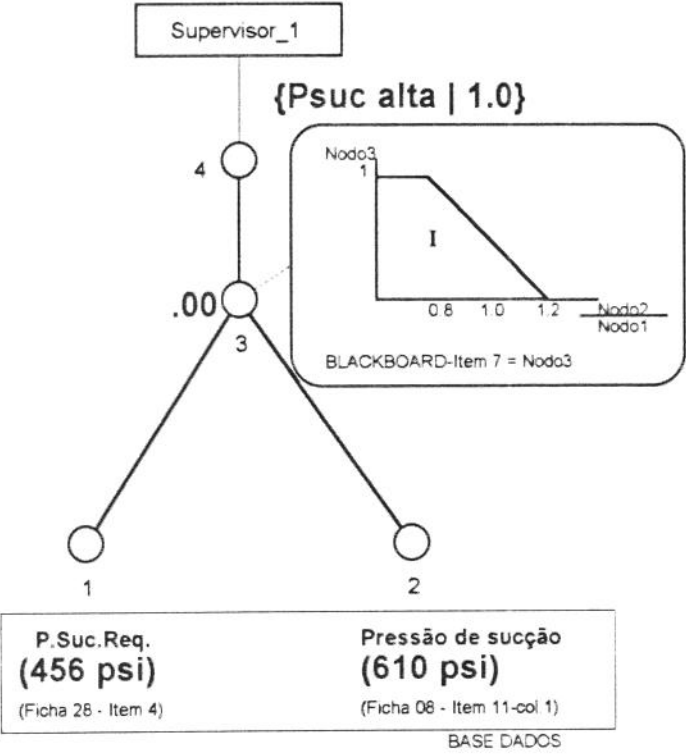


Figura 4-74 - Agente Pressão de sucção

4.3.2.9 Agente Taxa de compressão da bomba

Em função do valor de confiança na hipótese interferência de gás severa, é selecionada a função de pertinência que formaliza o conceito de menor para as taxas de compressão. Dessa forma, para os valores deste SBM é obtido o valor de confiança 0.0 para a hipótese “taxa de compressão baixa” no nodo 9.

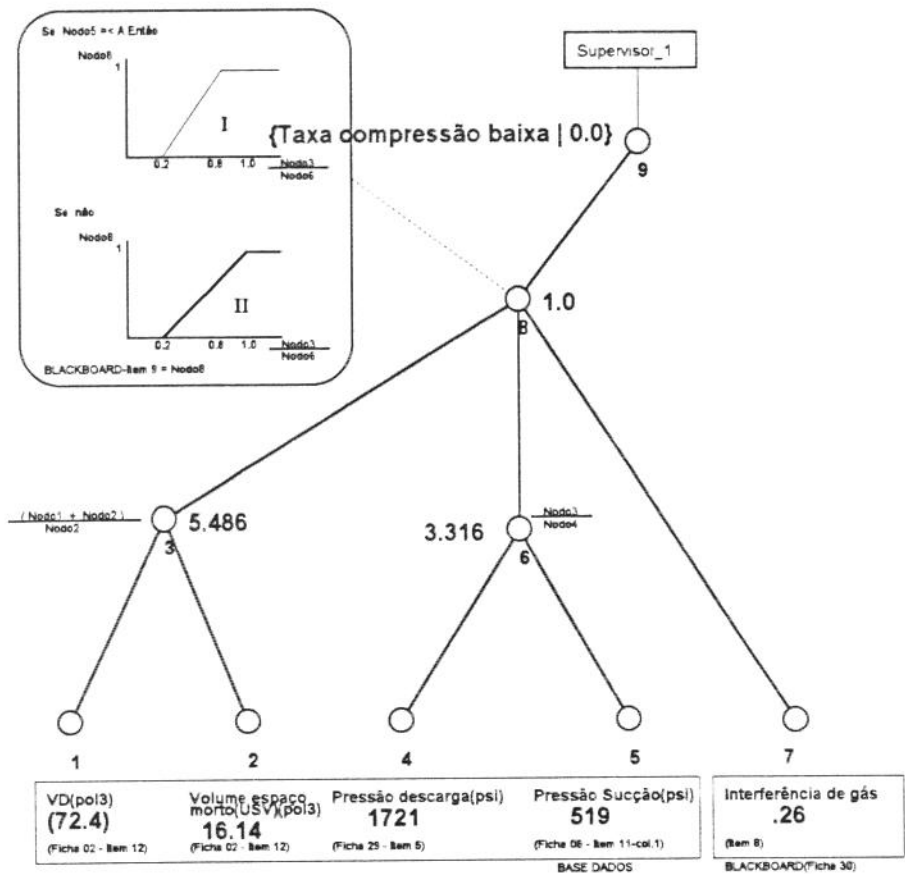


Figura 4-75- Agente Taxa de compressão

4.3.2.10 Agente Parafina

Levando em conta que decorreram mais de 20 meses desde a última limpeza (intervenção de sonda) no poço e que o mesmo apresenta histórico de parafinação (função de pertinência “I” ), a hipótese de acúmulo severo de parafina é definida com o valor de confiança de 1.0 .

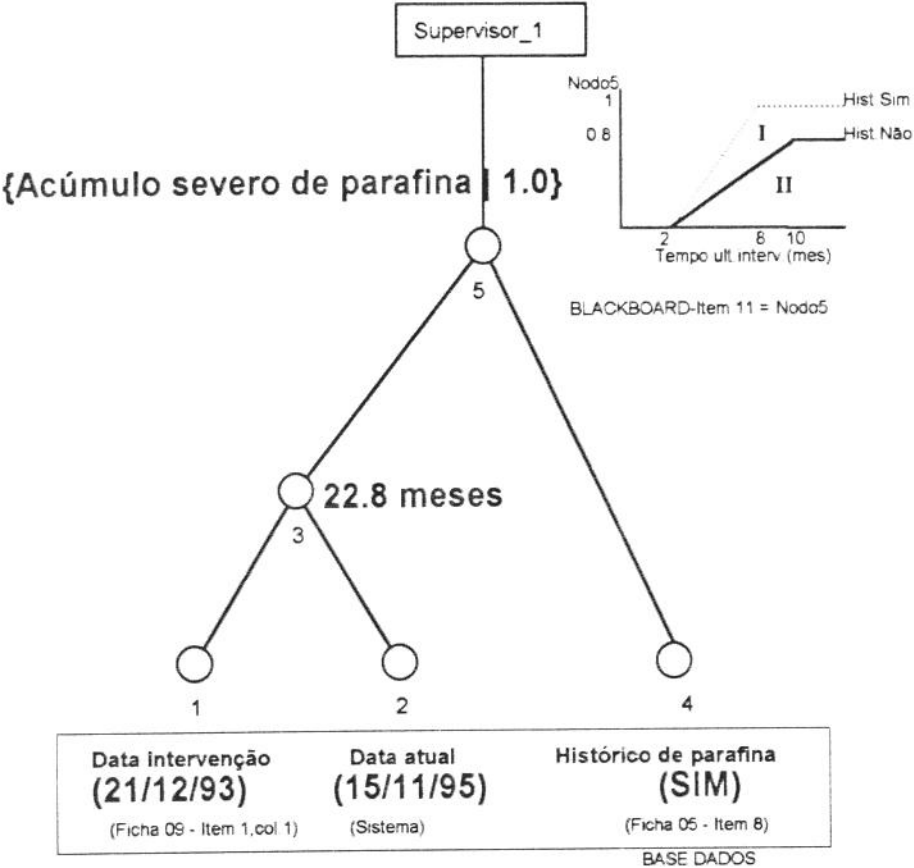


Figura 4-76- Agente Parafina

4.3.2.11 Agente Obstrução da Sucção da Bomba por Scale

O tempo decorrido desde a última intervenção, 22.8 meses, define o valor de confiança de 0.32 para a hipótese “Obstrução da sucção da bomba por scale”.

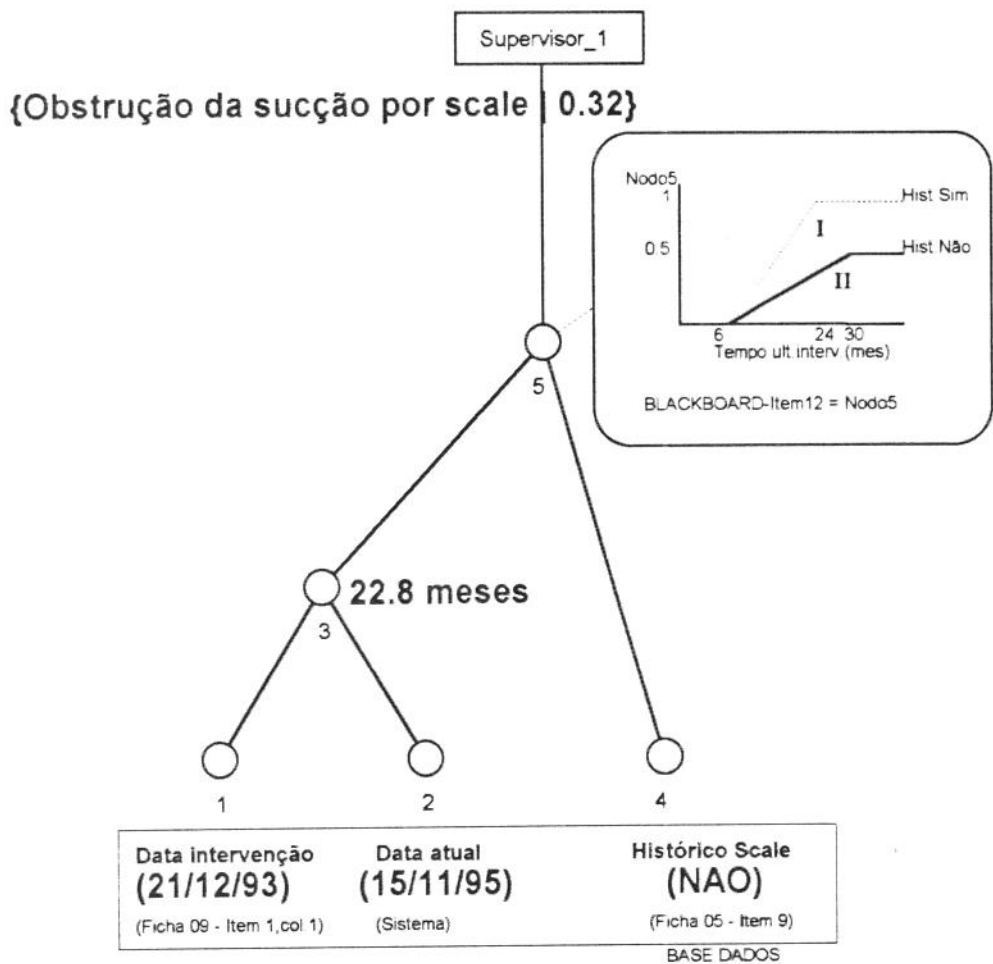


Figura 4-77- Agente Scale



4.3.2.12 Obstrução da Sucção da Bomba por Areia

A existência de histórico de parafinação define a função de pertinência “I” através da qual é definido o valor de confiança 1.0 para a hipótese.

A comparação entre a profundidade do fundo do poço e a posição da bomba é formalizada através da função de pertinência “III” a qual fornece para este caso o valor de confiança 0.46.

A agregação das duas regras acima é formalizada no nodo 8 através da média ponderada pelas relevâncias obtendo-se dessa forma o valor de confiança 0.73 para a hipótese sucção da bomba obstruída por areia.

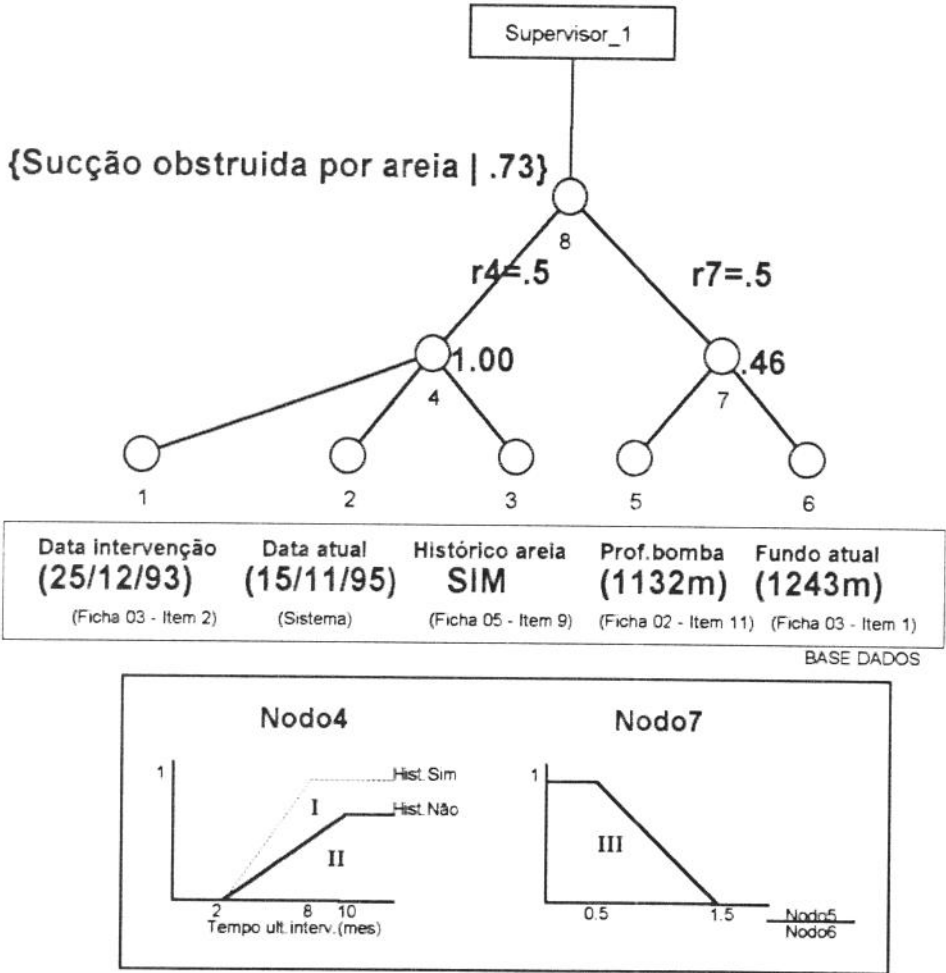


Figura 4-78- Agente Areia

4.3.2.13 Agente Corrosão na coluna de hastes

O procedimento adotado neste agente é idêntico ao adotado no agente “Obstrução da sucção da bomba por scale”.

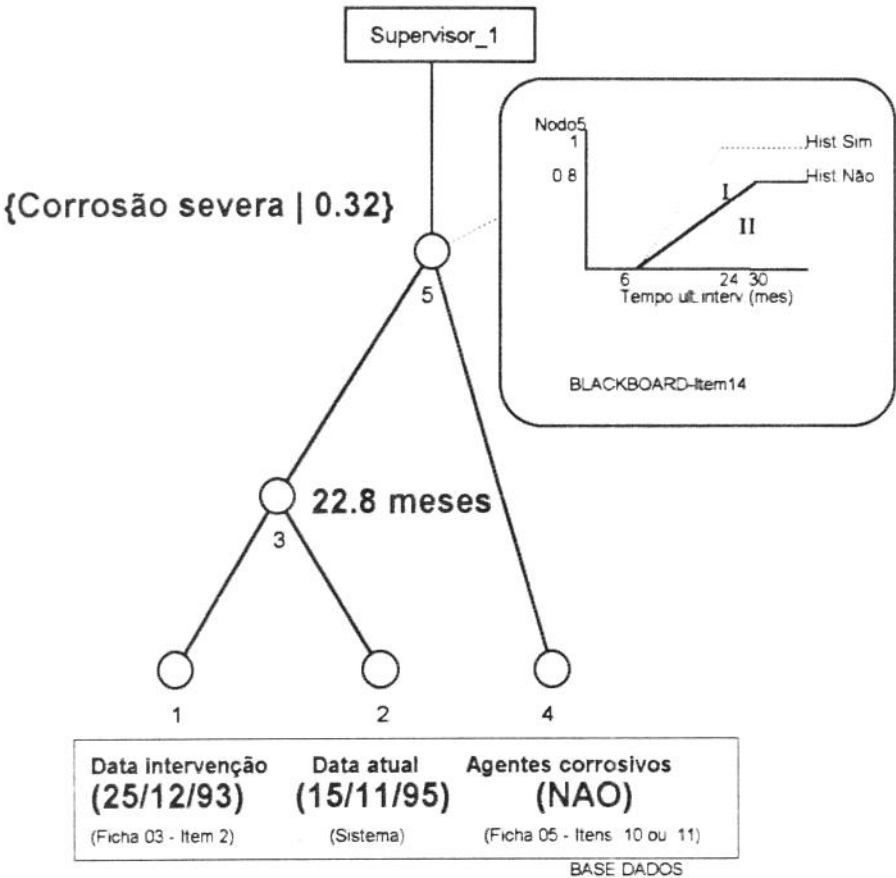


Figura 4-79- Agente Corrosão

### 4.3.3 Análise da carta dinamométrica

Classificação da carta dinamométrica<sup>25</sup> :

PANCADA DE FLUIDO | 0,63;

NORMAL | 0,84;

INTERFERÊNCIA DE GÁS | 0,61.

A classificação da carta dinamométrica com base apenas na sua forma geométrica (acima) provoca a ativação dos agentes correspondentes “Pancada de fluido”, “Normal” e “Interferência de gás”.

Dos agentes ativados, será destacado apenas aquele que forneceu o maior grau de similaridade, no caso o agente normal.

#### 4.3.3.1 Normal

A classificação da carta dinamométrica com grau de similaridade 0.84 ativa este agente. No nodo 4 os valores de confiança nas hipóteses interferência de gás severa e pressão de sucção alta são agregados através da média ponderada formalizando a regra: “Se a interferência de gás é baixa e a pressão de sucção é baixa Então a condição do poço é normal” a qual fornece o valor de confiança 0.27.

No nodo 5 é feita a agregação da regra acima e o grau de similaridade obtendo-se o valor de confiança de 0.55 que representa o grau de similaridade do padrão levando em conta a pressão de sucção e a interferência de gás. Como o valor de confiança obtido é inferior ao limiar definido, o nodo 6 é ativado e o valor de confiança na hipótese de carta normal é calculada pela média ponderada resultando no valor de confiança de 0.66.

---

<sup>25</sup> Feita pelo agente reconhecimento de padrões do SICAD [1,2].

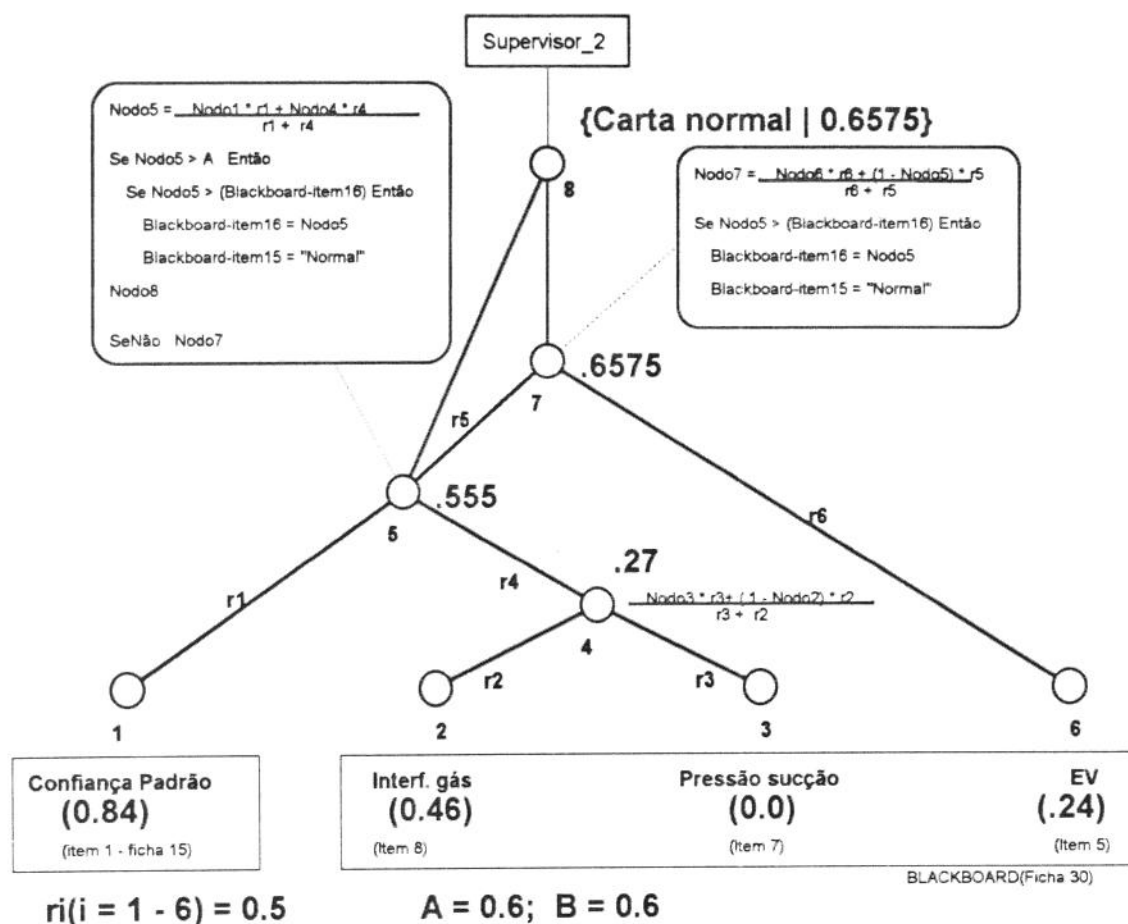


Figura 4-80 - Agente Normal

Os resultados fornecidos pelos agentes descritos nos itens 4.3.2 e 4.3.3. integram o quadro de sintomas do poço. Estes resultados são colocados na ficha 30 (blackboard) e disponibilizados para todos os demais agentes do sistema:

- 1- UB subdimensionada: **0.69**
- 2- MOTOR subdimensionado: **0.0**
- 3- HB subdimensionada: **0.75**
- 4- Queda de produção: **0.50**
- 5- EV baixa: **0.24**
- 6- POSIÇÃO DA BOMBA: **Em frente ao perfurados**
- 7- Pressão de sucção alta: **0.59**
- 8- Interferência de gás severa: **0.46**
- 9- Taxa de compressão alta: **1.00**
- 10- Atrito severo: **0.67**
- 11- Acúmulo severo de parafina na coluna: **1.0**
- 12- Sucção da bomba obstruída por scale: **0.32**
- 13- Sucção da bomba obstruída por areia: **0.73**
- 14- Corrosão severa: **0.32**
- 15- Classificação da carta dinamométrica: **Normal**
- 16- Confiança na classificação: **0.67**

Os sintomas acima são apresentados ao usuário na seguinte forma ( seta):

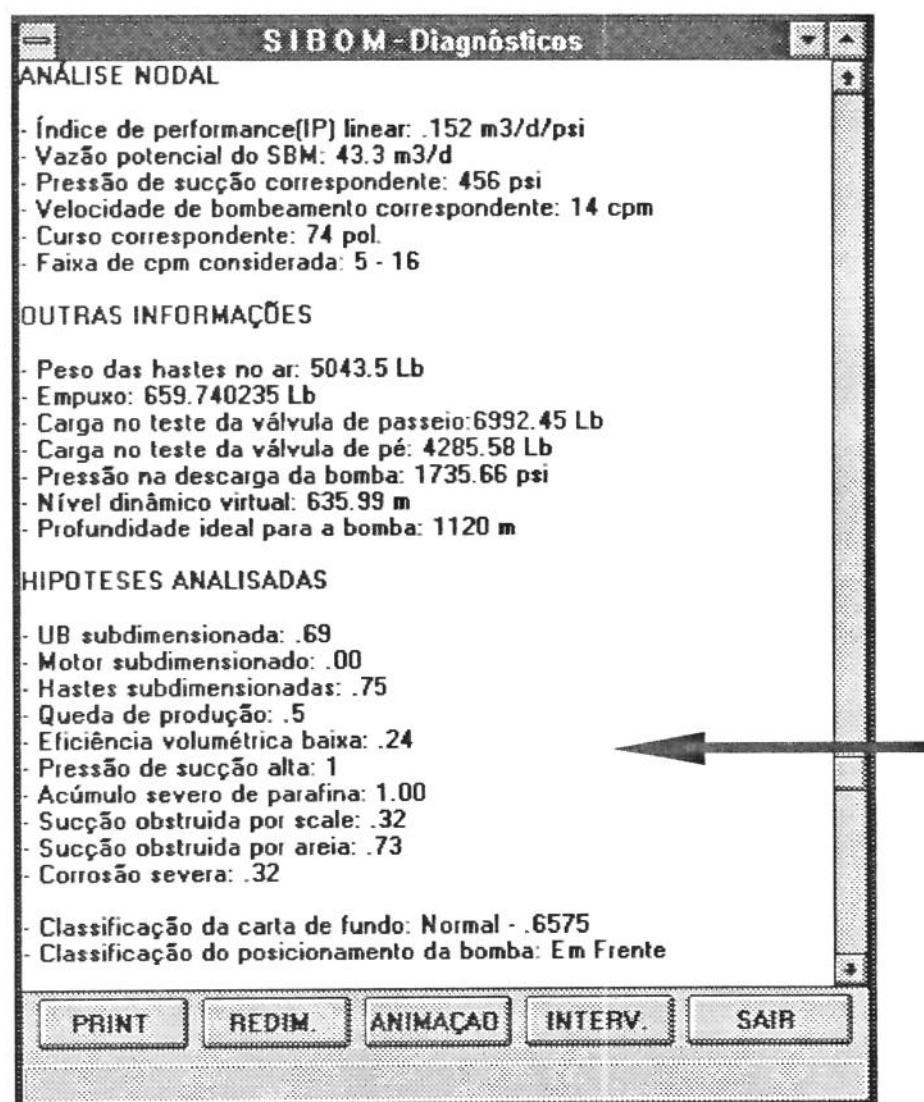


Figura 4-81 - Resultados da análise preliminar do poço CAM 40

4.3.4 Definição dos diagnósticos

Os agentes do grupo diagnósticos são ativados em função dos valores de confiança contidos no blackboard, tabela abaixo:

Tabela 4-3 - Limiares de ativação dos agentes do grupo diagnósticos

| Itens do blackboard | Valor de confiança | Agentes            | Limiar de ativação |
|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 15                  | -                  | Problemas na carta | -                  |
| 4                   | 0.50               | Queda de produção  | 0.6                |
| 7                   | 0.59               | Psuc alta          | 0.6                |
| 5                   | 0.24               | EV baixa           | 0.6                |
| 11                  | 1.00               | Acúmulo parafina   | 0.75               |
| 12                  | 0.32               | Obstrução sucção   | 0.75               |
| 13                  | 0.73               | Obstrução sucção   | 0.75               |
| 14                  | 0.32               | Corrosão severa    | 0.75               |
| 1                   | 0.69               | UB subdimension.   | 0.75               |
| 2                   | 0.00               | Motor subdimens.   | 0.75               |
| 3                   | 0.75               | HB subdimension.   | 0.75               |

Na tabela acima observamos que apenas o agente “Acúmulo severo de parafina” é ativado, o qual define o diagnóstico *D12 - Coluna de tubos parafinada*, para o qual corresponde a ação *A30 - Desparafinar coluna de tubos (circular óleo quente)*.

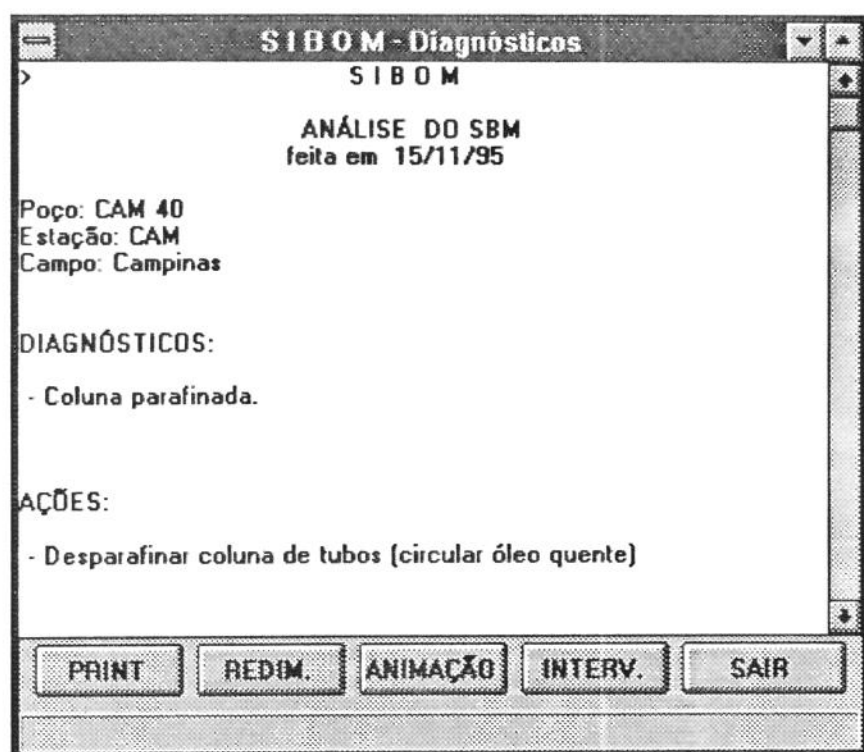


Figura 4-82 - Diagnóstico do poço CAM 40

## 5. Conclusões

Este trabalho demonstra que:

- Os conceitos de sistemas distribuídos, redes neurais simbólicas e lógica nebulosa mostram-se bastante adequados para o desenvolvimento de um sistema inteligente como o proposto, pois permitem a construção de um sistema de fácil manutenção, no qual o conhecimento pode ser alterado para ajustá-lo às culturas locais e à evolução introduzida pelo uso sistemático do próprio sistema. A representação do conhecimento através de agentes especializados construídos com RNS é bastante facilitada pela semelhança entre o processo de raciocínio utilizado na solução de problemas técnicos e a forma como esses agentes podem ser construídos.
- O desenvolvimento de sistemas especialistas pelo próprio usuário é uma técnica bastante poderosa, na medida em que permite que o usuário sistematize seu próprio conhecimento, envolvendo-se no processo e passando a encarar o sistema de forma mais abrangente. Esta técnica é também mais econômica na medida em que o próprio usuário pode alterar o conhecimento codificado, sem necessidade do envolvimento de terceiros. Para que tal técnica seja utilizada, é necessário apenas que um usuário, com experiência na área do conhecimento a ser codificado, receba treinamento a respeito dos conceitos básicos de RNS e lógica nebulosa, e a ele seja disponibilizada uma ferramenta de programação que incorpore facilidades de representação desses conceitos.
- É possível a utilização de técnicas de IA para flexibilizar resultados fornecidos por modelos matemáticos convencionais, os quais invariavelmente são desenvolvidos para situações bem definidas e sua utilização para situações aproximadas apresenta resultados não adequados. Neste trabalho este recurso foi utilizado na flexibilização dos resultados fornecidos pela norma API RP11L visando atender casos não previstos na mesma, como atrito elevado e interferência de gás. Isto permite que o conhecimento empírico de técnicos experientes no assunto seja representado no sistema e a norma seja utilizada para situações diferentes daquelas para as quais os modelos matemáticos que a constituem foram desenvolvidos.
- O uso da média ponderada como regra de cálculo de consenso na agregação de funções nebulosas, é bastante adequado para representar a inter-relação entre parâmetros de valores incertos, como por exemplo o atrito e a interferência de gás na avaliação do dimensionamento da unidade de bombeamento.



## 6. Considerações finais

A estratégia prevista para a implantação do sistema proposto prevê duas grandes fases. A primeira envolve o desenvolvimento de uma cultura operacional adequada aos recursos que este sistema disponibiliza, e a segunda envolve a integração com os controladores locais, cuja implantação deverá ocorrer após o desenvolvimento da primeira fase. A estratégia prevista para a primeira fase envolve:

- Implantação de projeto piloto de acompanhamento de um grupo reduzido de poços
- Utilização dos sistemas convencionais de acompanhamento de poços tais como dinamômetros e registros acústicos de nível dinâmico, dentre outros
- Incorporação ao sistema do jargão utilizado na área operacional
- Treinamento dos técnicos envolvidos no projeto para a utilização do sistema
- Configuração do sistema através da definição dos valores de relevâncias, limiares de ativação e funções de pertinência adequados
- Desenvolvimento de “Know-How” sobre a adequação do sistema às condições de cada grupo de poços ou campo, visando a expansão do projeto
- Integração com os sistemas de base de dados já em uso que compartilham dos mesmos dados, visando evitar duplo fornecimento de dados

## Referências bibliográficas

- [1] **Alegre, L.; Morooka, C. K.; Rocha, A. F.**, - "Intelligent Diagnosis of Rod Pumping Problems". SPE 26516 ,1993.
- [2] **Alegre, L.; Rocha, A. F.; Morooka, C.K.**, - "Intelligent Approach to Rod Pumping Problems", SPE 26253 , 1993.
- [3] **Alhanati, F. J.** - "Elevação de Petróleo", Curso de Mestrado em Eng. de Petróleo Unicamp/FEEM/DEP, 2o. Sem. 1994.
- [4] **API RP 11L** - "Recommended Practice for Design Calculations for Sucker Rod Pumping Systems", API, Dallas, february 1977.
- [5] **Barreto Filho, M. A.** - "Geração de carta dinamométrica de fundo para diagnóstico de bombeio mecânico em poços de petróleo", Tese de mestrado UNICAMP/FEM/DEP, 1993.
- [6] **Chandrasekaran, B.** - "Natural and social system metaphors for distributed problem solving: introduction to the issue", IEEE Trans. Sys. Man and Cybernetics, 1981.
- [7] **Choi, K. I.** - "Digitalização de Cartas Dinamométricas com Determinação de Cartas de Fundo e Diagnósticos Automáticos por um Sistema Especialista", apresentado no 1o.Seminário de Tecnologia de Produção realizado pela PETROBRÁS, Novembro 22-26, 1993.
- [8] **Conry, S.E., K. Kuwarabara, V. R. Lesser and R. A. Meyer** - "Multistage negotiation for distributed constraint satisfaction", IEEE Trans. Sys. Man and Cybernetics, 1992.
- [9] **Corrêa, J. F. S.** - "Análise Nodal Aplicada ao Bombeamento Mecânico", projeto de curso da disciplina IP231-Elevação de Petróleo do Curso de Mestrado em Engenharia de Petróleo -UNICAMP, 2o.Semestre 1994.
- [10] **Corrêa, J. F. S.** - "Curso de Bombeio Mecânico", vols. 2 e 3, Petrobrás-, circulação interna, Salvador(Ba), 1993.
- [11] **Costa, R. de O.** - "Programa Torque versão 1.0", Petrobrás/Rpns/Dirol/Sempro, circulação interna, Natal(RN), 1992.
- [12] **Davis, R. and R. G. Smith** - Negotiation as a metaphor for distributed problem solving. Artificial Intelligence, 1983.
- [13] **Derek, H.J.** - "Sucker Rod Pumping Unit Diagnostics Using an Expert System and Pattern Recognition Technique", MS Thesis, Texas A&M University, College Station, Tx, 1988.
- [14] **Durfee, E. H and T. A. Montgomery** - "Coordination as distributed search in a hierarchical behavior space" IEEE Trans. Sys. Man and Cybernetics, 1991.

- [15] **Foley, W. L.; Svinos, J. G.** - "EXPROD: Expert Advisor Program for Rod Pumping", SPE 16920, presented at the 62<sup>nd</sup> Annual SPE Conference September 27-30, 1987.
- [16] **Fox, M. S.** - An organizational view of distributed systems. IEEE Trans. Sys. Man and Cybernetics, 1981.
- [17] **Ge, J.; Qi, Z.; Pan, Z.** - "A New Approach to Identification of Beam Pump Dynamometer Card", Proceedings of CAIPEP-93, Plano, Texas, pp. 113-118, 1993.
- [18] **Gibbs, S. G.; Neely, A. B.** - "Computer Diagnosis of Down-Hole Conditions in Sucker Rod Pumping Wells", Journal of Petroleum Technology, 1966.
- [19] **Gilbert, W. E.** - "An Oil-Well Pump Dynagraph", API Drilling and Production Practice, 1936.
- [20] **Hewitt, C.** - "Viewing control structure as patterns of passing messages", Artificial Intelligence, 1977.
- [21] **Hewitt, C. and J. Inman** - "DAI betwixt and between: From "Intelligent Agents" to Open System Science", IEEE Trans. Sys. Man and Cybernetics, 1991.
- [22] **Keating, J. F.; Laine, R. E.; Jennings, J. W.** - "Pattern Recognition Applied to Dynamometer Cards", paper SPE 19394 presented at the 1989 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio Texas, October 8-11, 1989.
- [23] **Keating, J. F.; Laine, R. E., Jennings, J. W.** - "Application of a Pattern-Matching Expert System to Sucker-Rod, Dynamometer-Card Pattern Recognition", SPE 21666, presented at the SPE Production Operations Symposium, April 7-9, 1991.
- [24] **Klir, G. J.; Folger, T. A.** - "Fuzzy Sets, Uncertainty, and Information", Prentice-Hall International Editions, 1992.
- [25] **Kornfield, W. and C. E. Hewitt** - "The scientific community metaphor", IEEE Trans. Sys. Man and Cybernetics, 1981.
- [26] **Lesser, V. R. and D. D. Corkill** - "Functionally Accurate, Cooperative distributed systems", IEEE Trans. Sys. Man and Cybernetics, 1981.
- [27] **Lesser, V. R.** - "A retrospective view of FA/C distributed problem solving", IEEE Trans. Sys. Man and Cybernetics, 1991.
- [28] **Linn, L. R.; Lea, J. F.; Bass, O. L.; Asimenu K.** - "Beam Lift Expert Diagnostic System for Multiple Problem Identification", SOUTHWESTERN PETROLEUM SHORT COURSE - 92, pp 324-336, 1992.
- [29] **Lopes, D. et al.** - "Sistema Computacional de Bombeio Mecânico", Petrobrás/Cenpes, circulação interna, Rio de Janeiro (RJ), 1994.
- [30] **MacAllister, D.** - "A Dynamometer Card Interpretation Expert System", Proceedings of CAIPEP-93, Plano, Texas, pp. 171-179, 1993.
- [31] **Martinez, E. R.; Moreno, W. J.; Castillo, V.J.; Moreno, J. A.** - "Rod Pumping Expert System", SPE 26246, presented at the SPE Petroleum Computer Conference, July 11-14, 1993.

- [32] Nakaya, T.; Lopes D.; Sansoni Jr.,U. - "DYCO - Manual do Usuário", Petrobrás/Cenpes, circulação interna, 1994.
- [33] Nazi, G. M.; Ashenayi, K.; Lea, J. F. - "Application of Artificial Neural Network to Pump Card Diagnosis", SPE 25420, presented at the SPE Production Operations Symposium, March 21-23, 1993.
- [34] Parker, R. M. - "The importance of Compression Ratio for Pumping Gassy Wells", SOUTHWESTERN PETROLEUM SHORT COURSE-93, pp 89-95, 1993.
- [35] Rocha, A. F. - "Neural Nets: A Theory for Brains and Machines. Lecture Notes in Artificial Intelligence", Springer Verlag, vol. 638, 1992.
- [36] Rocha, A. F. - "Sistemas Inteligentes Distribuidos", Curso de Mestrado em Eng. de Petróleo Unicamp/FEEM/DEP, 2o. Sem. 1994.
- [37] Rocha, A., F; et al. - "O Sistema Kards - Manual do usuário", UNICAMP/DEP/FEM - RANI, 1995.
- [38] Rogers, J. D.; Guffey, C. G.; Oldham, W. J. B. - "Artificial Neural Networks for Identification of Beam Pump Dynamometer Load Cards", SPE 20651, presented at the 65<sup>th</sup> Annual SPE Conference, September 23-26, 1990.
- [39] Schirmer, P.; Bernard, O.; Pengern, L. - "Association of Statistical, Neural Network and Structural Techniques for Analysing Dynamometer Cards", presented at the AI in Petroleum Exploration. & Production Conference, July 22-24, 1992.
- [40] Schirmer, P.; Gay, J. C.; Toutain, P. - "Use of Advanced Pattern-Recognition and Knowledge-Based System in Analysing Dynamometer Cards", SPE 22305, presented at the 6<sup>th</sup> SPE Computer conference, June 17-20, 1991.
- [41] Silva, W. L.; Lopes, P.R.R.; Souza, M. S. F. P.; Santos, A. G., - "Sistema de Diagnóstico de Falhas de Produção em Bombeio Mecânico", 1o. ENCIA, Rio de Janeiro, pp. 80-90, 1992.
- [42] Slonneger, J.C. - "Dynagraph Analysis of Sucker Rod pumping", GULF PUBLISHING Co., 1961.
- [43] Svinos, J. G. - "Application of Expert System Technology to the Design of Rod Pumping Systems", SOUTHWESTERN PETROLEUM SHORT COURSE - 90, pp 391- 417, 1990.
- [44] Tenório, F.; Alegre L. - "Proposta de construção de hardware para rede neuronal com a função de detector e analizador automático de bombeio mecânico", Petrobrás documento interno, Rio de Janeiro, 1990.
- [45] Triggia, Attilio A. - "Fluxo Multifásico Vertical", Unicamp - Abril 1993 2a. Ed.
- [46] Triggia, Attilio A. - "Programas em Fortran", consulta pessoal, Unicamp, 1994.
- [47] Vogel, J.V. - "Inflow Performance Relationships for Solution-Gas Drive Wells", JPT, january 1968, pp 83-93.