

Este exemplar corresponde à redução da
da tese defendida por Gabriel Paulo
Gutierrez Sotomayor e aprovada
pela comissão julgadora em 13/06/97

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

Otto Luiz Alcântara Santos
ORIENTADOR

Dissertação Apresentada à
Faculdade de Engenharia Mecânica
como Requisito Parcial à Obtenção do
Título de Mestre em Engenharia de Petróleo

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA COMPUTACIONAL
PARA SUPORTE AO CONTROLE DE POÇOS EM ÁGUAS PROFUNDAS

Autor: Gabriel Paulo Gutierrez Sotomayor

Orientador: Otto Luiz Alcântara Santos

Junho, 1997.

So78d

32580/BC



UNIDADE	BC
CID. AADA	
	UNICAMP
	50-380
Ex.	
	32580
	395/98
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
ECO	R\$ 11,00
TA	36/10/98
CPD	

CM-00105004-2

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

So78d Sotomayor, Gabriel Paulo Gutierrez
Desenvolvimento de um sistema computacional para
suporte ao controle de poços em águas profundas
Gabriel Paulo Gutierrez Sotomayor.--Campinas. SP: [s.n.],
1997.

Orientador: Otto Luiz Alcântara Santos.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Pocos de petróleo - Perfuração. 2. Poços de petróleo
submarino. 3. Sistemas especialistas (Computação). I.
Santos, Otto Luiz Alcântara. II. Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

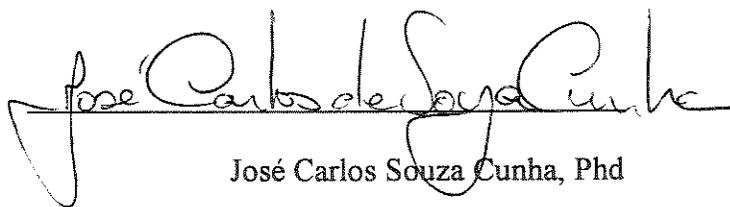
A dissertação “Desenvolvimento de um Sistema Computacional para Suporte ao Controle de Poços em Águas Profundas”, elaborada por Gabriel Paulo Gutierrez Sotomayor e aprovada por todos os membros da Banca Examinadora foi aceita pela Sub-Comissão de Pós-Graduação em Engenharia de Petróleo como requisito parcial à obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Petróleo.

Campinas, 13 de Junho de 1997.

Banca Examinadora



Otto Luiz Alcântara Santos, Phd



José Carlos Souza Cunha, Phd



Celso Kazuyuki Morooka, Phd

*Aos meus filhos
Hugo, Gabriel e Cecília,
pelo carinho e paciência.*

AGRADECIMENTOS

Ao professor Otto Luiz Alcântara Santos, que tem participado nos últimos 13 anos de minha formação profissional dentro da Petrobrás, primeiro como professor do curso de especialização, depois como professor de cursos de aperfeiçoamento e, recentemente, como professor orientador na UNICAMP, cujo decisivo apoio e amizade foram fundamentais para a conclusão de mais esta etapa de aprofundamento dos meus conhecimentos na área de petróleo.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia de Petróleo, pela colaboração e ensinamentos .

À PETROBRÁS pela oportunidade, e aos colegas de trabalho pelo estímulo.

À minha esposa Marilúcia pelo cooperação e compreensão.

Aos meus pais e irmãos, pelo incentivo.

ÍNDICE

<i>1- Introdução.....</i>	<i>1</i>
<i>2- Domínio da Aplicação</i>	<i>3</i>
<i>3 - Estrutura do PROKICK.....</i>	<i>6</i>
3.1- Módulos do Sistema.....	8
3.1.1- Módulo Prevenção	8
3.1.2- Módulo Monitor	18
3.1.3- Módulo Circulação.....	21
3.2- Sistemas Especialistas no PROKICK	29
3.2.1 - Tarefas de Diagnóstico no Controle de Poço em LAP	35
3.2.2- Estruturação da Base de Conhecimentos no PROKICK.....	42
3.3 - Previsão de Pressões.....	46
<i>4- Resultados do PROKICK.....</i>	<i>63</i>
4.1- Aumento da capacidade local de efetuar previsão de pressões	63
4.2- Aumento da capacidade local de resolver problemas de controle de poço	68
4.3- Aumento da capacidade local de manusear procedimentos gerenciais e operacionais.	72
<i>5 - O Processo de Controle de Poço e o PROKICK.....</i>	<i>75</i>
<i>6 - Conclusões e Recomendações.....</i>	<i>108</i>

Bibliografia110

Anexo 1: Relatório do PROKICK sobre o Poço Piloto

*Anexo 2: Exemplo de Relatório de Saída do PROKICK - Procedimento de
Controle*

Anexo 3: Exemplo de Relatório de Saída do PROKICK - Atribuições

LISTA DE FIGURAS

<i>FIGURA 1: Estrutura Modular do PROKICK</i>	10
<i>FIGURA 2: Estrutura Básica de Regra no NEXPERT</i>	32
<i>FIGURA 3: Recorrência nas Regras</i>	34
<i>FIGURA 4 : Árvore de Decisão (parcial) - Exemplo</i>	41
<i>FIGURA 5 : Contexto das Regras de Detecção de Anormalidades</i>	43
<i>FIGURA 6 : Contexto das Regras da Etapa de Circulação</i>	45
<i>FIGURA 7 : Esquema de Poço-Fechamento</i>	49
<i>FIGURA 8 : Esquema de Poço - Circulação</i>	52
<i>FIGURA 9: Interface da Planilha de Controle do PROKICK</i>	64
<i>FIGURA 10: Evolução das Pressões X Tempo</i>	65
<i>FIGURA 11: Comportamento da Pressão no Choke</i>	66
<i>FIGURA 12: Comportamento da Pressão na Sapata do Revestimento</i>	66
<i>FIGURA 13: Comportamento da Pressão de Injeção</i>	67

<i>FIGURA 14: Comportamento da Pressão na Cabeça do Poço.....</i>	<i>67</i>
<i>FIGURA 15 : Interface do PROKICK para Sistema Especialista.....</i>	<i>68</i>
<i>FIGURA 16: Interface para Funcionalidades de Equipamentos</i>	<i>73</i>
<i>FIGURA 17: Interface com arranjo do choke em lâmina de água profunda.....</i>	<i>73</i>
<i>FIGURA 18: Interface para consulta de arranjo mínimo de BOP.....</i>	<i>74</i>
<i>FIGURA 19 : Interface Principal -Módulo de PREVENÇÃO.....</i>	<i>77</i>
<i>FIGURA 20: Interface sub-módulo PROJETO</i>	<i>77</i>
<i>FIGURA 21: Interface para cálculo da Margem do Riser.....</i>	<i>78</i>
<i>FIGURA 22: Interface para cálculo da Margem de Manobra.....</i>	<i>79</i>
<i>FIGURA 23: Interface para cálculo de Pressões</i>	<i>80</i>
<i>FIGURA 24: Interface para cálculo da Tolerância ao KICK</i>	<i>81</i>
<i>FIGURA 25: Recomendação no sub-módulo PROJETO</i>	<i>81</i>
<i>FIGURA 26: Interface para recomendações sobre equipamentos</i>	<i>82</i>
<i>FIGURA 27: Interface para acesso ao sub-módulo de EQUIPE DE SONDA.....</i>	<i>83</i>
<i>FIGURA 28: Interface Principal para o módulo MONITOR.....</i>	<i>85</i>
<i>FIGURA 29: Interface para o sub-módulo TESTE DE EQUIPE.....</i>	<i>86</i>
<i>FIGURA 30 : Interface da SHELL NEXPERT</i>	<i>87</i>
<i>FIGURA 31 : Interface para o sub-módulo de FECHAMENTO.....</i>	<i>88</i>
<i>FIGURA 32: Interface Principal do Módulo CIRCULAÇÃO.....</i>	<i>89</i>
<i>FIGURA 33: Interface do sub-módulo de PLANEJAMENTO.....</i>	<i>90</i>
<i>FIGURA 34: Planilha de Controle - DADOS GERAIS</i>	<i>91</i>
<i>FIGURA 35: Planilha de Controle - MÁXIMAS PRESSÕES ESTÁTICAS</i>	<i>92</i>

<i>FIGURA 36: Planilha de Controle - CAPACIDADES/COMP/VOLUMES.....</i>	<i>93</i>
<i>FIGURA 37: Planilha de Controle - Interface auxiliar</i>	<i>94</i>
<i>FIGURA 38: Planilha de Controle - DADOS DE BOMBAS</i>	<i>95</i>
<i>FIGURA 39: Planilha de Controle - VOLUMES & STROKES.....</i>	<i>96</i>
<i>FIGURA 40: Planilha de Controle - PRESSÕES MÁXIMAS DINÂMICAS.....</i>	<i>97</i>
<i>FIGURA 41: Planilha de Controle - DADOS PARA CONTROLE DO KICK</i>	<i>98</i>
<i>FIGURA 42: Planilha de Controle - Relatório PROCEDIMENTO DE CONTROLE...99</i>	
<i>FIGURA 43: Evolução das Pressões X Strokes.....</i>	<i>100</i>
<i>FIGURA 44: Comportamento da Pressão no Choke X Strokes.....</i>	<i>101</i>
<i>FIGURA 45: Comportamento da Pressão na Sapata do Revestimento X Strokes.....</i>	<i>101</i>
<i>FIGURA 46: Comportamento da Pressão de Injeção X Strokes.....</i>	<i>102</i>
<i>FIGURA 47: Comportamento da Pressão na Cabeça do Poço X Strokes.....</i>	<i>102</i>
<i>FIGURA 48: Interface do Sistema Especialista (Interação 1).....</i>	<i>103</i>
<i>FIGURA 49: Interface do Sistema Especialista (Interação 2).....</i>	<i>104</i>
<i>FIGURA 50: Interface do Sistema Especialista (Interação 3)</i>	<i>104</i>
<i>FIGURA 51: Interface do Sistema Especialista (Interação 4).....</i>	<i>104</i>
<i>FIGURA 52: Interface do Sistema Especialista (Interação 5).....</i>	<i>105</i>
<i>FIGURA 53: Interface do Sistema Especialista (Interação 6).....</i>	<i>105</i>
<i>FIGURA 54: Interface do Sistema Especialista (Interação 7).....</i>	<i>105</i>

LISTA DE TABELAS

<i>TABELA 1: Comportamento das Pressões X Vazões Reduzidas.....</i>	<i>76</i>
---	-----------

NOMENCLATURA

$C_{v,adc}$	- capacidade do anular poço-comando, bbl/m
$C_{v,i}$	- capacidade interna, bbl/m
$C_{v,a}$	- capacidade anular, bbl/m
d_{cl}	- diâmetro interno da CHOKE LINE, pol
$D_{cs,v}$	- profundidade da sapata, m
d_p	- diâmetro do poço, pol
D_{ped}	- profundidade do ponto de equilíbrio dinâmico
d_t	- diâmetro externo da tubulação, pol
D_v	- profundidade vertical do poço, m
D_w	- lâmina d'água, m
D_{wh}	- profundidade da cabeça do poço, m
$glcl$	- gradiente de perda de carga para fluxo laminar, psi/m
$gtcl$	- gradiente de perda de carga para fluxo turbulento, psi/m
htg	- topo do gás, medido a partir do fundo do poço, m
kt	- tolerância ao KICK, lb/gal
L	- comprimento da tubulação, m
L_{cl}	- comprimento da linha do CHOKE, m
L_k	- altura do KICK, m
msm	- margem de segurança de manobra, lb/gal
msr	- margem de segurança do RISER, lb/gal

P_{bg}	- pressão do gás, psi
P_{choke}	- pressão no CHOKE, psi
$P_{ck,cl}$	- pressão no CHOKE com lama na entrada do CHOKE LINE, psi
$P_{ck,s}$	- pressão no CHOKE com lama nova na superfície, psi
P_{cs}	- pressão na sapata, psi
P_{Di}	- pressão no topo do gás na profundidade D_i
PFC_1	- pressão final de circulação 1, psi
PFC_2	- pressão final de circulação 2, psi
P_{form}	- pressão da formação no fundo do poço, psi
$P_{max,st}$	- pressão máxima estática, psi
$P_{max,st,BOP}$	- pressão máxima no BOP, psi
$P_{max,st,f}$	- pressão máxima baseada na fratura da sapata, psi
$P_{max,stg}$	- pressão máxima no revestimento, psi
PIC	- pressão inicial de circulação, psi
PRC_r	- pressão reduzida de circulação, psi
$P_{t,BOP}$	- pressão de teste do BOP, psi
P_{wh}	- pressão na cabeça do poço, psi
Q	- vazão de circulação, gpm
$SICP$	- pressão de fechamento do CHOKE, psi
$SIDPP$	- pressão de fechamento no tubo de perfuração, psi
v	- velocidade de retirada da coluna, pé/min
V_a	- volume anular, bbl

v_b	- velocidade da bomba, <i>spm</i>
v_{cl}	- velocidade na linha do CHOKE, <i>pé/s</i>
V_{disp}	- volume bombeado, <i>bbl</i>
V_{gas}	- volume do gás à uma profundidade específica, <i>bbl</i>
V_i	- volume interno, <i>bbl</i>
V_k	- volume ganho, <i>bbl</i>
α	- percentual da mistura lama -gás
δ_{mp}	- volume por STROKE corrigido, <i>bbl/stk</i>
ΔP	- perda de carga por fricção no anular (fluxo laminar), <i>psi</i>
$\Delta P_{an,csq}$	- perda de carga anular do revestimento, <i>psi</i>
ΔP_{cl}	- perda de carga na linha do CHOKE, <i>psi</i>
μ_p	- viscosidade plástica, <i>cp</i>
ρ_f	- massa específica equivalente de absorção, <i>lb/gal</i>
ρ_K	- massa específica do fluido invasor, <i>lb/gal</i>
ρ_m	- massa específica da lama prevista no projeto, <i>lb/gal</i>
ρ_{mist}	- massa específica da mistura lama-gás, <i>lb/gal</i>
ρ_{nm}	- massa específica da lama nova, <i>lb/gal</i>
ρ_p	- massa específica equivalente da formação, <i>lb/gal</i>
τ	- limite de escoamento, <i>lb/100 pé²</i>

Fatores de Conversão - Sistema Métrico Internacional (SI)

$$\text{bbl/m} * 1.1589\text{E-}01 = \text{m}^3/\text{m}$$

$$\text{pol} * 2.54 \text{ E+}00 = \text{cm}$$

$$\text{lb/gal} * 1.198\text{E+}02 = \text{kg/m}^3$$

$$\text{psi} * 6.894\text{E+}02 = \text{Kpa}$$

$$\text{psi /m} * 6.894\text{E+}02 = \text{KPa/m}$$

$$\text{gpm} * 3.785\text{E-}03 = \text{m}^3/\text{min}$$

$$\text{pés/s} * 3.048\text{E+}00 = \text{m/s}$$

$$\text{bbl} * 1.1589\text{E-}01 = \text{m}^3$$

$$\text{cp} * 1.0\text{E-}03 = \text{Pa.s}$$

$$\text{lb/100pe}^2 * 4.882\text{E-}02 = \text{kg/m}^2$$

RESUMO

SOTOMAYOR, Gabriel Paulo Gutierrez. *Desenvolvimento de um Sistema Computacional para Suporte ao Controle de Poços em Águas Profundas*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1997. 111p. Dissertação (Mestrado)

Diversas soluções de aplicativos computacionais tem sido adotadas pela indústria de petróleo para controle de poço. Nenhum destes aplicativos, entretanto, trata de maneira integrada a questão operacional, isto é, não associam os procedimentos de projeto com os de operação, passando pelo tratamento de anormalidades para situações de lâminas de água profundas. Tal fato termina por impactar a coordenação do processo de controle de poço, com consequências negativas para a segurança do poço e custos operacionais.

Esta dissertação mostra o desenvolvimento e a aplicação de uma ferramenta computacional que enfoca a questão da integração no processo de controle de poço, nas etapas de projeto, monitoramento e circulação do gás. Esta ferramenta, denominada PROKICK, disponibiliza para os técnicos e engenheiros envolvidos no controle de poço, funcionalidades de procedimentos operacionais, previsão de pressões e geração da planilha de controle voltadas principalmente para poços de lâmina d'água profunda. O aplicativo suporta, ainda, o tratamento de problemas de controle de poço com sistemas baseados em conhecimento, implementados através de regras de produção.

Palavras Chave

- Petróleo, Controle de Poço, Ferramenta Computacional .

ABSTRACT

SOTOMAYOR, Gabriel Paulo Gutierrez. *Desenvolvimento de um Sistema Computacional para Suporte ao Controle de Poços em Águas Profundas*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1997. 111p. Dissertação (Mestrado)

Many solutions based on computational systems have been adopted by petroleum industry for well control problems. None of these tools, however, treats operational issues with an integrated vision, that is, they do not associate the design procedures with operational procedures. They also do not regard the analysis of abnormal situations during deepwater well control operations. These facts affect the coordination of well control process, with detrimental consequences to well safety and operational costs.

This dissertation presents the development and application of a computational tool that works with an integrated vision of well control process and includes tasks related to the well design concerning safety, kick detection and kick circulation out of the well. This tool, named PROKICK, offers to the technical personnel involved in well control operations, functionality to operational procedures, pressure behavior prediction and preparation of killsheet for deepwater wells. Also, this tool supports the analysis of well control problems with knowledge systems, built with production rules.

Key Words

-Petroleum, Well Control, Computational Tool

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

As atividades de engenharia freqüentemente vêm encadeadas com um conjunto de tarefas complexas que exigem a manipulação de um volume de informações e conhecimentos significativo. A maior compreensão dos fenômenos científicos e os avanços tecnológicos dentro de um domínio específico, tem colocado à disposição dos engenheiros diversas fontes de conhecimento, que necessitam ser incorporadas nos processos por eles conduzidos. A capacidade limitada dos profissionais de engenharia em manipular grandes e complexas quantidades de conhecimento faz com que muitas vezes sejam adotadas simplificações que terminam por afetar o desempenho do processo em andamento. Estas simplificações podem ocorrer, por exemplo, pela limitação das condições de contorno de forma consciente e adequada às ferramentas disponíveis ou de forma inconsciente, pela limitação de conhecimento. O uso de aplicativos computacionais (SOFTWARES), implementando diversos processos científicos e tecnológicos, cooperam com os profissionais de engenharia no sentido de tornar viável a manipulação de complexas e grandes massas de conhecimento, minimizando assim estas simplificações. Estas ferramentas de auxílio aos profissionais necessitam ser encadeadas de forma coerente com o desdobramento do processo a fim de que sejam utilizadas no instante adequado e possam estabelecer uma padronização facilitando a incorporação de novos conhecimentos e informações à comunidade que interage com o domínio de um determinado processo. Assim, estes aplicativos permitem a integração em um ambiente computacional dos diversos eventos que cooperam com o profissional de engenharia, durante a evolução de todas as etapas de um processo envolvido.

Nesta linha, esta dissertação apresenta o desenvolvimento e a utilização de um sistema computacional integrado para auxiliar o profissional da atividade de perfuração de poços de petróleo no planejamento, execução e acompanhamento de operações de controle de poço.

CAPÍTULO 2 - DOMÍNIO DA APLICAÇÃO

KICK é o fluxo indesejado de fluidos de uma formação permeável para o poço, que pode causar danos materiais significativos se não for detectado prontamente e adequadamente controlado. Quando ocorre um KICK durante a perfuração, por exemplo, o poço é fechado para interromper este fluxo. Utiliza-se então um método de controle, que circula o fluido invasor para fora do poço e injeta lama com peso adequado ao controle do poço.

Para a perfuração adequada de um poço de petróleo do ponto de vista da segurança, diversas tarefas são executadas, desde o projeto do poço até a sua execução. Estas tarefas estão associadas a distintas áreas de conhecimento. Assim, atuar sobre o processo de controle de poço, significa entre outras providências preparar a especificação de equipamentos de segurança do poço, levantar dados e efetuar cálculos diversos necessários às várias fases do processo, atualizar as planilhas diárias de controle, qualificar pessoal, resolver anormalidades durante o combate ao KICK e padronizar as diversas etapas do combate ao KICK [1].

A coordenação adequada de todas as interfaces existentes entre as diversas tarefas associadas ao controle de poço, bem como a taxa de aprendizado do pessoal envolvido direta ou indiretamente no processo, constitui-se numa necessidade e num desafio para empresas que atuam na área de perfuração de poços. Muito embora as empresas disponham de profissionais qualificados no combate ao KICK, tem-se observado que esta competência chega de maneira distinta na área operacional. Embora

os programas de treinamento sejam de bom padrão técnico, revelam-se algumas vezes ineficazes para manter a atualização profissional, dado o elevado contingente de pessoal a ser treinado ou a inadequação do que é ensinado em sala de aula com o conhecimento e habilidades necessárias no controle de um KICK numa sonda de perfuração. Manuais de procedimentos operacionais obsoletos ou mesmo inexistentes e de difícil acesso também constituem-se em dificuldades adicionais. Assim, ferramentas como esta desenvolvida e descrita nesta dissertação, ajudam estas empresas a manter seus profissionais capacitados e com acesso rápido a qualquer informação contida em manuais de procedimentos operacionais. Adicionalmente, o uso de um sistema integrado, denominado PROKICK, poderá permitir a padronização das operações de controle de poços.

Diversas soluções de aplicativos computacionais têm sido adotadas pela indústria de petróleo para o controle de poço. Assim, existem aplicativos de simulação de pressões, de acompanhamento de pressões, e outros que utilizam sistemas especialistas, conforme Referências 2 e 3. Muitos destes aplicativos enfocam uma etapa específica do processo de controle, e nenhum deles trata de maneira integrada a questão operacional, isto é, associam procedimentos de projeto com procedimentos de operação, passando pelo uso de sistemas baseados em conhecimento para tratamento de anormalidades como é o caso deste sistema proposto nesta dissertação. É importante notar que os poucos aplicativos disponíveis nesta área estão desenvolvidos no idioma inglês o que se constitui num obstáculo para a sua utilização. Eles também são aplicativos fechados, o que dificulta ou mesmo torna impossível a sua manutenção e atualização.

A integração das informações dentro de um mesmo ambiente computacional, com o uso de sistemas baseados em conhecimento pode trazer uma grande contribuição no processo de tomada de decisões, na busca da coordenação das interfaces e na melhoria da curva de aprendizado dos profissionais envolvidos no processo, trazendo portanto menos riscos para as operações de controle de poço.

CAPÍTULO 3 - ESTRUTURA DO PROKICK

Como é possível para um grupo de agentes atingir o objetivo de controlar um poço? Controlar um poço é um objetivo social, isto é não é atingível por um único agente, mas por um grupo de agentes [4]. Estes agentes (seres humanos) são os profissionais envolvidos com treinamento, com projeto, com operação, com geração de tecnologia. Então a diferença deste objetivo social para os outros objetivos, é que este demanda cooperação. Controlar um poço, como objetivo de um grupo de agentes, não é passível de decomposição em sub-objetivos, que são atingidos independentemente dos outros agentes. Em outras palavras um agente não pode executar suas tarefas sem considerar o que os outros agentes estão fazendo.

Para atingir objetivos sociais, a coordenação passa a ser um requisito necessário. O que torna a coordenação possível? Quando um trabalho é feito por uma coleção de agentes de modo coordenado, é importante obter respostas quanto a divisão do trabalho e organização : que agente desempenha que tarefa, quando? A distribuição de tarefas entre agentes requer que as tarefas sejam formuladas e descritas de modo que permitam sua distribuição, ou pelo menos levem em conta este fator [5]. No controle de poço esse fator é vital, devido à dispersão geográfica de alguns agentes envolvidos.

Tarefas que demandam mais recursos ou conhecimentos do que aquele possuído por um agente, devem ser decompostas. No caso do controle de um poço, o volume de conhecimento é grande e altamente especializado. Assim o engenheiro de campo, não consegue fazer frente as atividades de controle de poço, no nível de

profundidade necessário, degradando a qualidade das ações que seriam as mais adequadas.

Desta maneira torna-se imperativo alocar algumas das tarefas de controle de poço, para um agente particular. O agente PROKICK foi concebido para assumir algumas tarefas altamente especializadas de controle de poço e que envolvem algum conhecimento específico, que são:

a) conhecimento para filtrar dados monitorados: o agente tem a capacidade de efetuar cálculos complementares, a fim de fornecer informações técnicas, tais como o número de sacos de baritina, densidade da lama nova; o resultado deste cálculos podem auxiliar no desempenho de funções inteligentes , como a simulação de pressões e ou sistemas expertos.

b) conhecimento para resolver problemas: o PROKICK implementou 02 sistemas expertos cobrindo diagnósticos para detecção de kick e anormalidades durante a circulação, além de apresentar procedimentos de atuação diante de anormalidades operacionais.

c) conhecimento para planejar: o PROKICK implementou um simulador de pressões, que permite visualizar e prever o comportamento das pressões no choke, na cabeça do poço, no tubo bengala e na sapata do revestimento, além de procedimentos para fechamento do poço, controle do poço e projeto, por exemplo; também estão neste escopo de conhecimento as informações referentes gerência da capacitação técnica.

Colocar o agente PROKICK na plataforma, com os conhecimentos acima descritos, tem o objetivo de aumentar a capacidade local de desempenho das tarefas de controle de poço. A dispersão geográfica e o regime de trabalho contínuo introduzem problemas de coordenação graves, dado que nem sempre aqueles agentes que dispõem do conhecimento necessário para realizar determinada tarefa podem estar disponíveis para executá-la. Desta maneira o processo de coordenação será otimizado desde um ponto de vista de minimizar os contatos, e os consequentes conflitos que daí podem surgir.

O processo de controle de poço, incorporado ao PROKICK, foi dividido em três módulos: Prevenção (planejamento da perfuração), Monitor (acompanhamento da perfuração) e o módulo de Circulação (restabelecimento da normalidade operacional). Esta divisão foi baseada nos eventos que ocorrem antes da perfuração (Prevenção), durante a normalidade das operações de perfuração até a detecção do kick (Monitor) e na circulação do fluido invasor (Circulação). A Figura 1 mostra os módulos e submódulos do PROKICK.

3.1- Módulos do Sistema

3.1.1- Módulo Prevenção

O módulo Prevenção engloba os eventos associados ao projeto do poço, equipamentos de sonda e equipe de sonda. Destina-se a dar uma visão aos engenheiros de campo dos aspectos relativos à prevenção do controle de poço, de maneira a permitir

uma interação mais efetiva entre os técnicos envolvidos, aumentando portanto a coordenação do processo.

O sub-módulo Projeto contém informações genéricas referentes à tolerância ao KICK, margem de segurança do RISER, margem de manobra e recomendações sobre poço piloto e lama base óleo, além de um quadro de entrada de dados e cálculo, para o teste de absorção. Estas informações e cálculos destinam-se ao uso por parte do engenheiro no planejamento da perfuração do poço no que concerne ao controle de poço.

Problemas do tipo perda de circulação, devido aos baixos gradientes de fratura associados a ocorrência de KICKS podem levar a conseqüências graves, comprometendo a segurança do poço e aumentando os custos operacionais. Estes fatos são mais acentuados se o poço é perfurado em zonas mais problemáticas, como por exemplo, zonas de gás anormalmente pressurizadas ou de gás raso. Sendo assim, dispor de procedimentos de cálculos, e informações para o projeto do poço é fundamental para prevenir problemas de controle de poço.

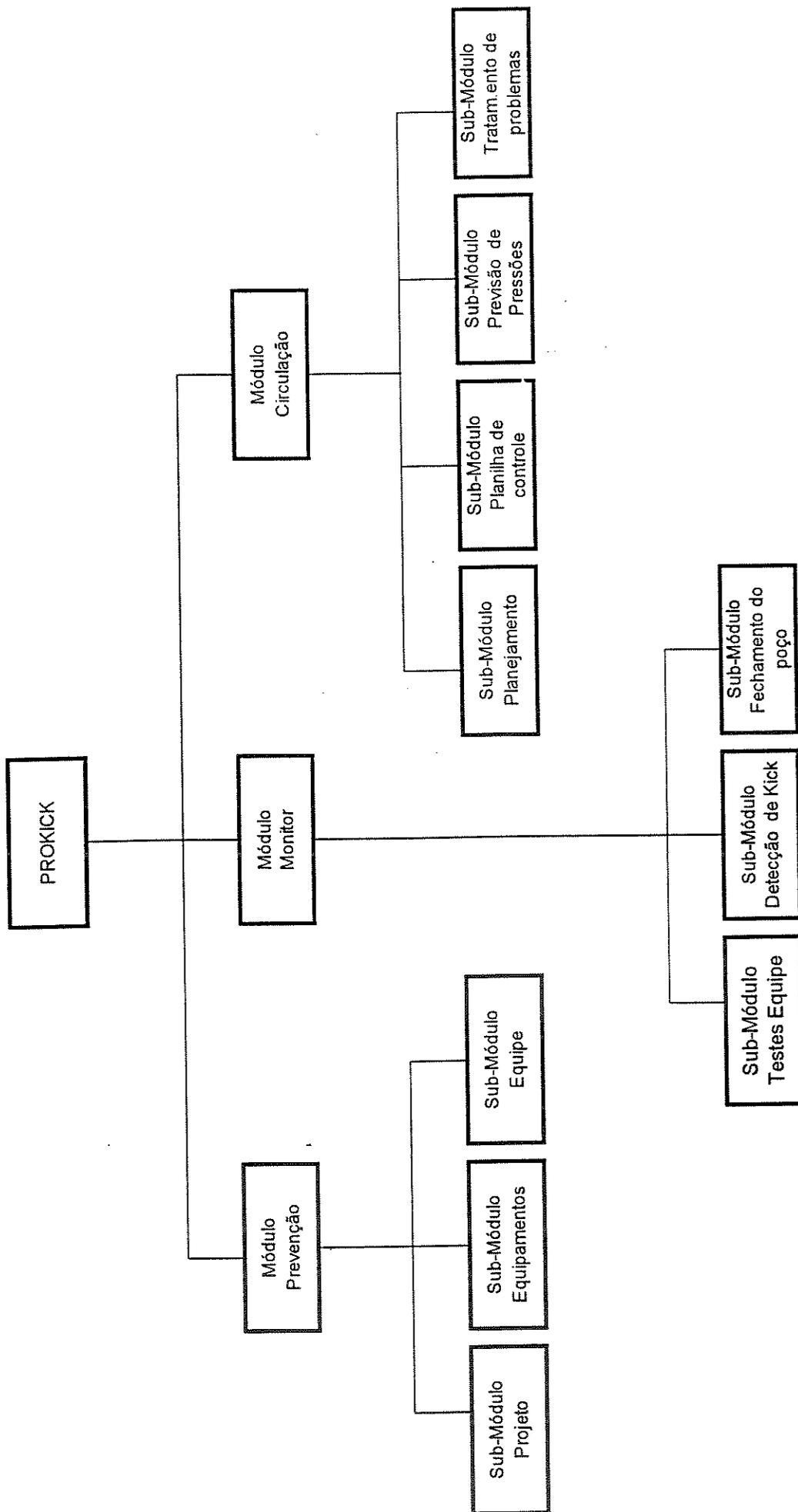


FIGURA 1: Estrutura Modular do PROKICK

Assim foi implementada a tolerância ao KICK no fechamento. A tolerância ao KICK no fechamento (kt), conforme a Referência 6, é definida como a máxima pressão de poros ou peso de lama equivalente contra a qual um poço pode ser fechado sem causar fratura das formações mais frágeis após um KICK com certo volume ter ocorrido. A derivação da tolerância ao KICK (kt) pode ser encontrada nas Referências 6 e 7, sendo a seguinte fórmula implementada neste sistema :

$$kt = \frac{D_{cs, v}}{D_v} (\rho_f - \rho_m) - \frac{L_k}{D_v} (\rho_m - \rho_{mist}) + \rho_m \quad (3.1)$$

sendo:

$$\rho_{mist} = \alpha * \rho_k + (1 - \alpha) * \rho_m \quad (3.2)$$

- kt - tolerância ao KICK, lb/gal
- ρ_f - massa específica equivalente de absorção, lb/gal
- ρ_m - massa específica da lama prevista no projeto, lb/gal
- $D_{es, v}$ - profundidade do gradiente de fratura (sapata), m
- ρ_{mist} - massa específica da mistura lama-gás, lb/gal
- α - percentual da mistura lama-gás
- L_k - altura do KICK, m
- D_v - profundidade vertical do poço, m
- ρ_K - massa específica do fluido invasor, lb/gal

A massa específica da mistura lama-gás pode ser definida através de simuladores de KICKS, de sorte a fornecer maior precisão no cálculo da tolerância ao KICK. No sistema a entrada é feita pelo usuário, mas uma possibilidade futura a ser considerada é sua integração com simuladores de KICKS. Para pequenos volumes (abaixo de 10 bbl) a hipótese de um tampão contínuo de gás ocupando 100% do espaço anular não resultará em diferenças apreciáveis em relação a cálculos que considerem a mistura bifásica.

Um outro aspecto de projeto apresentado no sub-módulo de Projeto é a margem de segurança do RISER [7], calculada para as unidades de posicionamento dinâmico. Tem a finalidade de equilibrar a pressão da formação, caso o RISER seja desconectado e as gavetas do BOP fiquem abertas. Este peso extra no fluido de perfuração foi estimado e implementado pela seguinte fórmula:

$$msr = \frac{D_v * \rho_p - 8.5 * D_w}{D_v - D_w} - \rho_p \quad (3.3)$$

onde :

msr - margem de segurança do RISER, lb/gal

D_v - profundidade do poço, m

ρ_p - massa específica equivalente a pressão da formação, lb/gal

D_w - lâmina d'água, m

Em lâminas d'água profundas o emprego da margem de segurança do RISER pode inviabilizar a perfuração de formações mais frágeis ou causar danos ao reservatório ou levar a uma prisão diferencial. Nestes casos adota-se, além de uma

válvula de retenção na coluna, um fluido de perfuração com apenas a margem de segurança de manobra.

A margem de segurança de manobra foi implementada no PROKICK, baseado na seguinte fórmula simplificada :

$$msm = \frac{2 * \Delta P}{0,17 * D_v} \quad (3.4)$$

sendo:

$$\Delta P = \frac{L * \tau}{61 * (d_p - d_t)} + \frac{L * \mu_p * v}{18287(d_p - d_t)^2} \quad (3.5)$$

onde :

msm - margem de segurança de manobra, lb/gal

τ - limite de escoamento, lbf/100pe²

L - comprimento da tubulação, m

μ_p - viscosidade plástica, cp

v - velocidade de retirada da coluna, pé/min

d_p - diâmetro do poço, pol

d_t - diâmetro externo da tubulação, pol

ΔP - perda de carga por fricção no anular (fluxo laminar), psi

O sub-módulo de Projeto apresenta ainda uma mensagem alertando o projetista de que não deve usar lama base óleo em lâminas de águas profundas e algumas considerações sobre o poço piloto, que tem a finalidade de verificar a existência de acumulações de gás em formações superficiais. Embora apresente diversas vantagens, o uso da lama à base de óleo tem alto risco de poluição em águas profundas, pois é grande a possibilidade de desconexão de emergências. Tal fato provocaria o derramamento de considerável volume de óleo no mar. Além disso, a solubilidade do gás em óleo é muito maior que na água, o que permite que quantidades perigosas de gás dissolvido possam alcançar a superfície antes de serem detectadas.

O sub-módulo Equipamentos permite mostrar arranjos de BOP e CHOKE MANIFOLD, além de trazer informações diversas sobre os equipamentos de prevenção, detecção e controle. Recomenda-se entre os equipamentos de prevenção, o uso de unidade de MUD-LOGGING, para acompanhamento da pressão de poros, visando prevenir a ocorrência de KICKS ou minimizar o volume do fluido invasor no poço. Sugere-se o uso de válvula de retenção tipo FLOAT VALVE próximo à broca, quando não é possível acrescentar a margem de segurança do RISER. Esta válvula tem a finalidade de garantir o fechamento do poço pelo interior da coluna, que junto com o fechamento da gaveta de tubos promoverá o fechamento do poço em caso de desconexão de emergência. Para os equipamentos de detecção, este sub-módulo recomenda, além dos indicadores de vazão de retorno e de nível dos tanques, registradores gráficos de volume dos tanques. Os sensores de nível dos tanques deverão ter sensibilidade para acusar com precisão ganhos de até 10 bbl, tendo alarmes

acoplados. O tanque de manobra também deverá ter um volume superior a 40 bbl com capacidade volumétrica de 6 bbl/pé, equipado com sensor de nível.

As informações referentes aos equipamentos de controle estão divididas entre BOP e linhas de CHOKE e KILL, e o CHOKE MANIFOLD. Para o BOP são apresentados os requisitos mínimos exigidos e as ilustrações dos arranjos padrão e valorizado. No arranjo valorizado, o “LOWER MARINE RISER PACKAGE” (LMRP) deve conter 01 preventor anular e o BOP STACK deve conter 01 preventor anular, 01 gaveta cisalhante (no topo), 01 gaveta variável (superior), 01 gaveta de tubos (intermediária), e 01 gaveta de tubos (inferior). As linhas do KILL e CHOKE devem ter condições de cumprir ambas as funções (injeção no poço e retorno de fluxo). Recomenda-se ainda a utilização de duas saídas abaixo da gaveta superior, em linhas opostas, para permitir a eliminação do gás retido após a circulação do KICK, o enchimento das linhas do KILL e do CHOKE com lama, a aplicação do método volumétrico dinâmico e a circulação de um KICK utilizando simultaneamente as linhas do KILL e do CHOKE para retorno do fluido. O CHOKE MANIFOLD deverá permitir simultaneamente injeção de fluido pela linha de KILL e retorno pela linha do CHOKE, e possuir duas tomadas de pressão para manômetros para permitir que as linhas do CHOKE e de KILL cumpram ambas as funções. Deverá ainda possuir dois pares de CHOKES independentes, cada um deles com um CHOKE de ajuste manual e um CHOKE hidráulico, permitindo o controle do poço, utilizando qualquer uma das linhas do CHOKE ou de KILL como linha de retorno. O arranjo do CHOKE MANIFOLD deve permitir também uma linha de fluxo pleno, isto é, o fluxo de retorno não passa por nenhum dos estranguladores.

Em resumo, o sub-módulo de Equipamentos de Sonda disponibiliza as informações mínimas que devem ser observadas no controle do poço indispensáveis à sua segurança e que devem ser rigorosamente cumpridas, no que diz respeito aos equipamentos. Este sub-módulo fornece subsídios para que engenheiros de campo possam exercer uma adequada fiscalização sobre os equipamentos necessários ao controle do poço. Em uma fase posterior, deverá ser implementado dentro deste módulo as planilhas de acompanhamento de testes de ESCP SUBMARINO .

Ainda, dentro do módulo de Projeto, foi incluído o sub-módulo Equipe de Sonda o qual disponibiliza informações sobre os procedimentos e requisitos mínimos para o treinamento, qualificação e certificação em controle dos poços dos indivíduos que operam diretamente nas atividades de perfuração de poços de petróleo em águas profundas no território brasileiro. Os profissionais foram divididos em três grupos incluindo-se os plataformistas e torristas no Grupo 1, os sondadores, assistente técnico de operações especiais, técnico de operações especiais, técnico de perfuração, no Grupo 2 e os engenheiros e químicos de petróleo no Grupo 3.

Para o Grupo 1, os conhecimentos mínimos necessários para a qualificação envolvem normas referentes a controle de poço, noções de equipamentos de segurança de poço, noções de fluido de perfuração, causas e indícios de KICK, manuseio de válvulas, identificação de linhas, funcionamento de bomba de lama, e inspeção e correção de vazamento das linhas de fluxo e fechamento de poço. A carga horária mínima para este grupo é de 24 horas, incluindo treinamento prático.

Para o Grupo 2, os conhecimentos mínimos necessários englobam normas referentes a controle de poço, finalidades, operações, cuidados especiais e testes dos equipamentos de controle de poço, propriedades dos fluidos de perfuração e comportamento de pressões. Também englobam as causas e indícios de KICKS, o comportamento do fluido invasor, e as informações sobre o KICK e os cálculos necessários. Também estão no rol de conhecimentos mínimos necessários, os fundamentos sobre as operações de controle de poço, os métodos do sondador e volumétrico, os procedimentos de fechamento do poço e a identificação e correção de situações especiais durante a circulação do KICK. Fazem parte do treinamento, exercícios no simulador de KICKS incluindo os métodos do sondador e volumétrico e a descrição dos aspectos peculiares do controle de KICKS em águas profundas. A carga horária mínima para este grupo é de 40 horas, onde estão incluídos o mínimo de 12 horas em exercícios práticos no simulador de KICKS.

Para o Grupo 3, os conhecimentos para qualificação são semelhantes ao do Grupo 2, incluindo-se a organização e supervisão de uma operação de controle de poço e controle de KICKS em situações especiais. Também são indicados exercícios no simulador de KICKS do método do sondador, engenheiro e volumétrico, inclusive com aspectos peculiares do controle de KICKS em águas profundas. A carga horária mínima para este grupo é idêntica ao do Grupo 2. Para os três Grupos são previstas reciclagens para manutenção da certificação com cargas horárias mínimas de 16 horas a cada dois anos para o Grupo 1 e 40 horas para os Grupos 2 e 3.

Este sub-módulo de Equipe de Sonda alerta os engenheiros de campo da necessidade de não só monitorar o nível de capacitação da equipe, mas também, conhecer a qualificação mínima necessária, podendo dentro de um conceito de evolução propor alterações que considere relevantes para a melhora da qualificação da equipe. O engenheiro sofre as conseqüências de um profissional com capacitação insuficiente para executar as operações de controle do poço, portanto o acesso à informação permitirá no mínimo um questionamento sobre a qualificação dos profissionais que estão atuando na sonda, o que contribuirá para o aprimoramento destas operações.

Em resumo, a visão no módulo Prevenção, dos elementos de projeto, associadas as de equipamentos e qualificação do pessoal permite a ação sobre variáveis que influenciam fortemente o desempenho no controle do poço. A disponibilização deste conjunto de procedimentos operacionais e de cálculo impede as simplificações decorrente do desconhecimento, o que termina por impactar de forma positiva a prevenção do controle de KICKS.

3.1.2- Módulo Monitor

O módulo Monitor , está composto de três sub-módulos: teste da equipe da operação, detecção do KICK e fechamento do poço. Este módulo incorpora funcionalidades utilizadas pelo engenheiro de campo até o fechamento do poço.

O sub-módulo de teste de equipe fornece orientações necessárias para avaliar a equipe de sonda , a fim de determinar a performance e o tempo gasto por cada elemento da equipe nos desempenhos de suas funções e responsabilidades durante uma

operação de controle de poço. Os testes devem ser realizados semanalmente para cada equipe, iniciando-se com elevação da bóia do equipamento de detecção do KICK pelo encarregado da sonda. O tempo de reação de cada elemento deve ser medido até o fechamento do BOP, bem como o tempo total que a equipe leva para fechar o poço. Para testes durante a perfuração é importante avaliar a capacidade da equipe em detectar o KICK, o estado dos alarmes sonoros, bem como posicionar a haste quadrada e TOOL JOINTS adequadamente para o fechamento do BOP e posterior implementação da operação de HANG-OFF. Outras tarefas a serem avaliadas envolvem o registro das pressões de fechamento, a medição do ganho de lama, com a correspondente marcação do novo nível, bem como, a estimativa do volume adicional de lama nos tanques e a medição do peso da lama no tanque de sucção. A verificação da posição das válvulas do CHOKE MANIFOLD e do sistema de BOP associado a identificação de vazamentos nestes equipamentos, bem como, a observação de fluxo na saída de lama ou na linha jusante do CHOKE e a verificação da pressão da unidade acumuladora, são pontos importantes a serem testados junto a equipe da sonda. A equipe também deve ser testada quanto a questões de segurança da plataforma envolvendo a preparação para a extinção de fontes de ignição, o alerta aos rebocadores, o preparo das cápsulas de segurança para o lançamento no mar, o posicionamento do operador de guindaste em alerta para possível evacuação do pessoal, isto é, estar testada quanto as ações referentes ao abandono da sonda. A determinação dos materiais necessários à circulação do KICK também deve ser avaliada. O tempo do teste deve ser registrado no boletim do sondador.

A equipe da sonda também deverá ser testada durante as manobras, quando a broca deverá estar no interior do revestimento. Detectar o KICK e observar os alarmes sonoros, acunhar a coluna e instalar e fechar a válvula de segurança são procedimentos a serem testados. Deve-se observar se a equipe está apta a instalar o INSIDE-BOP e abrir a válvula de segurança, e fechar o BOP anular. O registro do tempo até o fechamento do BOP anular e o registro da pressão de fechamento no CHOKE, também devem ser executados. Da mesma maneira como nos testes durante a perfuração, devem ser verificadas as posições das válvulas do CHOKE MANIFOLD e as do sistema do BOP, bem como, a possível existência de vazamentos, e fluxos na saída de lama ou na linha a jusante do CHOKE. Os procedimentos de segurança e evacuação a serem testados são semelhantes aos testes da equipe em perfuração. A equipe também deve ser testada quanto ao preparo para o STRIPPING da coluna até o fundo do poço. O tempo do teste deve ser medido e registrado no boletim do sondador.

Portanto este sub-módulo de Teste de Equipe apresenta de maneira detalhada todos os procedimentos necessários para uma correta avaliação e treinamento da equipe, para o controle do poço. Neste ponto, é importante observar o conceito de integração que está sendo aplicado nesta ferramenta computacional. Normalmente na indústria do petróleo os procedimentos de certificação e qualificação estão sob a gerência do pessoal de treinamento ao passo que os testes operacionais sob a gerência operacional. O fato de serem apresentados ambos os escopos para o engenheiro de campo, permite uma coordenação mais adequada entre estes dois segmentos, fazendo com que as equipes conheçam adequadamente suas funções no momento do controle de poço, contribuindo assim de sobremaneira para a redução do risco operacional.

Ainda nesta linha de suporte ao conhecimento implementou-se o sub-módulo Detecção, que contém um sistema baseado em conhecimento, que auxilia na caracterização de um KICK ou de anormalidades operacionais associadas. O sistema faz perguntas ao usuário e, baseado em suas respostas, propõe um diagnóstico sobre a ocorrência de um KICK ou de uma outra anormalidade operacional. Quando ocorre o KICK, o sistema para alguns casos propõe procedimentos de fechamento. A metodologia empregada para construção do sistema será apresentada no Item 3.2.

Para complementar os procedimentos de fechamento em poço de lâmina de água profunda, foram incluídos no sub-módulo de fechamento procedimentos de fechamento de poço durante a perfuração ou circulando no fundo do poço, durante manobra com tubo de perfuração em frente ao BOP, durante manobra com BHA em frente ao BOP, procedimentos de fechamento sem coluna no poço, procedimentos com fechamento para poço com ferramenta a cabo, com revestimento em frente ao BOP e procedimentos após desconexão de emergência ou rompimento do RISER. São ainda apresentado neste módulo os procedimentos de reentrada no poço tamponado, no poço LMRP desconectado, e LMRP desconectado com coluna no poço.

3.1.3- Módulo Circulação

O terceiro módulo, Circulação, suporta as fase de planejamento de combate ao KICK detectado, a fase de elaboração da planilha de controle e a fase de

circulação do KICK para fora poço utilizando o método do sondador , que é o padrão adotado no Brasil.

O sub-módulo Planejamento fornece diretrizes para a organização do controle de poço, indicando a responsabilidade de cada membro da equipe, conforme Referência 1. Assim, o pessoal envolvido no controle do poço pode ser dividido em três grupos: planejamento e coordenação, execução e apoio. O grupo de planejamento e coordenação envolve o engenheiro fiscal, o superintendente (supervisor), o técnico de operações de equipamento submarino, o encarregado de sonda e o técnico de fluidos. O grupo de execução envolve o sondador e o sondador assistente, o torrlista, os plataformistas e o técnico de fluidos. O grupo de apoio, o pessoal de navio (comandante, operador de posicionamento dinâmico) e o pessoal da manutenção (engenheiro de manutenção, mestres, mecânico e elétrico).

O sub-módulo Planilha de Controle implementa todos os cálculos e procedimentos necessários à circulação do fluido invasor e substituição da lama original pela lama nova, conforme sugerido na Referência 1. É um instrumento de fundamental importância para o engenheiro de campo pois fornece todos os passos necessários ao cálculo de pressões e volumes para o bom controle do poço. Esta planilha está dividida em sete quadros para entrada dos dados e cálculos listados a seguir:

- a) Quadro 1- Dados Gerais ;
- b) Quadro 2 - Máximas Pressões Estáticas;
- c) Quadro 3 - Capacidades, Comprimentos e Volumes;
- d) Quadro 4 - Dados de Bomba;

- e) Quadro 5 - Volumes e STROKES;
- f) Quadro 6 - Dados para Controle do KICK;
- g) Quadro 7 - Pressões Máximas Dinâmicas.

O Quadro 1- Dados Gerais - contém informações da distância da mesa rotativa ao fundo do mar (D_{ml}), a massa específica da lama (ρ_m), a massa específica equivalente de absorção (ρ_f), a profundidade vertical do poço (D_v), a profundidade vertical da sapata ($D_{cs,v}$), a pressão de teste do BOP ($P_{t,BOP}$) e a resistência a pressão interna do revestimento ($P_{i,cs,g}$).

Com base nesses dados, no Quadro 2 - Máximas Pressões Estáticas calcula-se as seguintes pressões:

- a) Pressão máxima no CHOKE baseada na fratura da sapata;

$$P_{\max, st, f} = 0,17 * (\rho_f - \rho_m) * D_{cs, v} \quad (3.6)$$

- b) Pressão máxima no CHOKE baseada na resistência do revestimento;

$$P_{\max, st, csg} = (0,8 * P_{i, cs}) - 0,17 * \rho_m * D_{wh} \quad (3.7)$$

- c) Pressão máxima no CHOKE baseada na resistência do BOP;

$$P_{\max, st, BOP} = P_{t, BOP} - 0,17 * \rho_m * D_{wh} \quad (3.8)$$

e

$$P_{\max, st, eq} = \text{Min}(P_{\max, st, csg}; P_{\max, st, BOP}) \quad (3.9)$$

A pressão máxima estática é definida como sendo a menor pressão entre as três pressões estáticas mostradas acima (Equações 3.6, 3.7 e 3.8). Normalmente a pressão mínima é aquela correspondente à pressão máxima no CHOKE baseada na fratura da sapata, no momento do fechamento do poço.

O Quadro 3 - Capacidades, Volumes e Comprimentos - tem o objetivo de calcular as capacidades, volumes e permite a entrada de dados referentes aos diâmetros e comprimentos dos elementos da coluna. Interage com o técnico para entrada de dados de tubos de perfuração, tubos pesados, 3 tipos de comandos diferentes, LINER, poço, revestimentos e CHOKE. Para os elementos da coluna de perfuração, solicita os diâmetros internos (d_1) e externos (d_2), além do comprimento. Para os demais elementos solicita os diâmetros internos (d_3) e o comprimento (L). Calcula o volume dos anulares ($C_{v,a}$) poço-comando1, poço-comando2, poço-comando3, poço-tubo pesado, poço-tubo de perfuração, revestimento-comando1, revestimento-tubos pesado, revestimento-tubo de perfuração, e riser-tubo de perfuração. Emprega as seguintes fórmulas :

a) Capacidade Interna :

$$C_{v,i} = 3,19 \cdot 10^{-3} \cdot d_1^2 \quad (3.10)$$

b) Capacidade Anular:

$$C_{v,a} = 3,19 \cdot 10^{-3} \cdot (d_3^2 - d_2^2) \quad (3.11)$$

c) Volume Interno:

$$V_i = C_{v,i} * L \quad (3.12)$$

d) Volume Anular:

$$V_a = C_{v,a} * L \quad (3.13)$$

O Quadro 4 - Dados de Bombas - possui entrada de dados para três bombas, obtendo-se dados do volume por STROKE com eficiência de 100%, e com a eficiência volumétrica. Calcula a velocidade da bomba em STROKES por minuto para as vazões de 100 gpm e 150 gpm. Ainda, para cada uma dessas vazões, são registradas as correspondentes (a) pressão reduzida, (b) perdas de carga na linha do CHOKE, (c) perda de carga nas linhas do CHOKE e KILL em paralelo, (d) perda de carga estimada no anular do revestimento. São as seguintes as fórmulas empregadas no cálculos deste quadro de bombas :

a) Volume por STROKE Corrigido :

$$\delta_{mp} = \delta_{mt} * \text{eff} \quad (3.14)$$

b) Velocidade da Bomba :

$$v_b = 42 * \frac{Q}{\delta_{mp}} \quad (3.15)$$

c) Perda de Carga Anular do Revestimento :

$$\Delta P_{an, csg} = \frac{L * t}{61 * (d_p - d_i)} + \frac{L * \mu_p * v}{304.8 * (d_p - d_i)^2} \quad (3.16)$$

O Quadro 5 - Volumes e STROKES - com base nos dados gerados nos Quadro 3, calcula-se os volumes e STROKES correspondentes ao total do poço, ao interior da coluna e ao intervalos da broca até a sapata, da broca até o BOP, da broca até a superfície pelo RISER, da broca até a superfície pelas linhas do CHOKE, e da broca até a superfície pelas linhas do CHOKE e KILL em paralelo. O total nos tanques é um dado de entrada e o sistema calcula o volume total do sistema.

O Quadro 6 - Dados para o Controle do KICK - tem como dados de entrada a vazão, a pressão de fechamento no CHOKE (SICP), a pressão de fechamento tubo de perfuração (SIDPP) e o volume do KICK. Calcula-se a pressão inicial de circulação, a densidade da lama nova, a pressão final de circulação 1 (quando a lama nova atinge a broca) e a pressão final de circulação 2, quando a lama nova chega na superfície. São as seguintes as fórmulas usadas neste quadro :

a) pressão inicial de circulação:

$$PIC = SIDPP + PRCr \quad (3.17)$$

b) densidade da lama nova :

$$\rho_{nn} = \rho_m + \frac{SIDPP}{0,17 * D_v} \quad (3.18)$$

c) pressão final de circulação 1:

$$PFC_1 = PRC_r \cdot \frac{\rho_{nm}}{\rho_m} \quad (3.19)$$

d) pressão final de circulação 2:

$$PFC_2 = PFC_1 + \Delta P_{cl} \cdot \frac{\rho_{nm}}{\rho_m} \quad (3.20)$$

O Quadro 7 - Pressões Máximas Dinâmicas - apresenta as informações de pressões máximas permissíveis na superfície relativas à posição da bolha de gás em relação à sapata. Durante a circulação do KICK, até o gás atingir a sapata, as pressões máximas são as seguintes :

$$a) \text{ manômetro do KILL} = P_{\max, st, f} \quad (3.21)$$

$$b) \text{ manômetro do CHOKE} = P_{\max, st, f} - \Delta P_{cl} \quad (3.22)$$

Após o gás passar da sapata , as pressões máximas serão:

$$a) \text{ manômetro do KILL} = P_{\max, st, eq} \quad (3.23)$$

$$b) \text{ manômetro do CHOKE} = P_{\max, st, eq} - \Delta P_{cl} \quad (3.24)$$

$$c) \text{ manômetro da bomba} = P_{\max, st, f} + PRC_r - \Delta P_{an, csg} \quad (3.25)$$

Ainda neste sub-módulo são incluídos os procedimentos a serem desenvolvidos durante a fase de circulação pela equipe de controle, que sugerem que se abra levemente o CHOKE e simultaneamente seja ligada a bomba mantendo SICP no

manômetro da linha de matar, até estabelecer a velocidade reduzida de circulação, quando a pressão de circulação será a PIC. Na seqüência, a pressão inicial de circulação e a velocidade das bombas devem ser mantidas constantes até a circulação total do anular. Durante esta fase, deve-se observar que a pressão apresentada pelo manômetro da linha de matar não deve ultrapassar a pressão máxima permissível na superfície do ponto de vista da fratura da sapata, até o gás passar pela sapata. Depois do gás passar pela sapata, a pressão no manômetro da linha de matar não deve ultrapassar a pressão calculada pela Equação 3.23. Recomenda-se observar o momento em que o gás entra na linha do CHOKE, que é indicado por flutuações no manômetro na linha de matar. A partir deste instante, ficar alerta para possíveis ajustes rápidos no CHOKE, ou mesmo circular pelas linha de CHOKE e de matar em paralelo, até que todo o gás seja removido do sistema. Neste instante, deve-se parar a circulação, manter o poço fechado e ler as pressões de fechamento, que devem ser iguais a SIDPP. Se não forem iguais, continuar com a circulação com a PIC até a remoção de todo gás para fora do poço. A seguir deve-se zerar o contador de STROKES e repetir estabelecendo uma pressão inicial de circulação, com fluido novo até que a velocidade de circulação seja estabelecida. Deve-se então manter a pressão no manômetro da linha de matar igual a SIDPP. Como consequência, a pressão de circulação cairá de PIC para PFC1, quando a lama nova atingir a broca. Na seqüência, manter a pressão de circulação igual a PFC1, até que a pressão no CHOKE caia a zero com o CHOKE totalmente aberto. A partir deste momento, a pressão de circulação subirá naturalmente até atingir PFC2 quando a lama nova chegar à superfície. Neste instante, parar a circulação e fechar o poço. Ler as pressões de fechamento que devem ser iguais a zero. Assim, fazer o procedimento para

retirada do gás trapeado, abrir o poço e circular para incorporar a margem de segurança de manobra.

Este sub-módulo inclui, ainda, simulação referente ao comportamento das pressões na sapata, no CHOKE, no tubo bengala em função do tempo e do número de STROKES bombeados. A simulação assume que a densidade do gás é desprezível, o KICK é de gás e não está misturado com a lama, o anular tem uma área com seção transversal constante, a pressão no fundo é constante, as perdas por fricção são desprezíveis e o método do sondador é aplicado. O Item 3.3 detalha a metodologia empregada no procedimento numérico de previsões de pressões.

O sub-módulo Circulação apresenta ainda um sistema especialista, para mostrar a potencialidade de auxílio ao engenheiro na condução das ações durante a circulação. Este sistema está detalhado no próximo item.

3.2- Sistemas Especialistas no PROKICK

A necessidade de aumentar o desempenho da coordenação do processo de controle de poço e a taxa de aprendizado da área operacional, sugere a necessidade de estruturar o conhecimento de forma a permeá-lo em todos os profissionais envolvidos com o controle de KICK. A alternativa empregada para atingir este objetivo foi a concepção de sistemas baseados em conhecimento.

Sistemas especialistas são programas de computadores que tem a capacidade de oferecer soluções para problemas específicos em um dado domínio ou oferecer recomendações, ambos de modo comparável a um especialista no campo em questão. Uma definição mais elaborada foi proposta por Feigenbaum [8] :

“Sistemas especialistas são programas de computador inteligentes que usam conhecimento e procedimentos de inferência para resolver problemas que são difíceis o suficiente por demandarem decisiva habilidade humana para sua solução. O conhecimento necessário para um desempenho neste nível , somado ao procedimentos de inferência, podem ser interpretados como um modelo da habilidade dos melhores praticantes do campo.”

A principal diferença que estes programas apresentam em relação à programação convencional, trata-se da separação entre o conhecimento para resolver o problema e a estrutura de controle do programa computacional. Nos programas convencionais estes dois itens são integrados. Por outro lado, os sistemas especialistas, orientados para o processamento simbólico, são altamente interativos ao passo que os programas convencionais, orientados para o processamento numérico, são sequenciais e processados em lotes.

Os primeiros sistemas especialistas foram usualmente escritos em linguagem de programação de alto nível. LISP, foi freqüentemente escolhida como linguagem de implementação. Entretanto, quando usa-se uma linguagem de programação de alto nível, dispensa-se uma quantidade de atenção desproporcional à implementação

do sistema, que não tem nada a ver com a modelagem do domínio em estudo. Isto conduziu a sistemas que, uma vez construídos, praticamente não permitiram nenhuma adaptação às mudanças do ponto de vista do domínio. Por outro lado, o conhecimento dos especialistas tem uma natureza dinâmica : conhecimento e experiência estão sujeitos à mudanças. A percepção deste fator conduziu à visão de que é altamente desejável, senão mandatório no desenvolvimento de um sistema especialista, uma separação explícita dos algoritmos para aplicação do conhecimento especializado e do conhecimento em si.

Conseqüentemente, um sistema especialista tipicamente está composto de dois componentes essenciais, conforme Referência 9, que são :

- uma base de conhecimento que captura o conhecimento de um domínio específico;
- uma máquina de inferência que consiste de algoritmos para manipular o conhecimento representado na base de conhecimento.

Atualmente, um sistema especialista raramente é construído em uma linguagem de alto nível. Normalmente são construídos em um ambiente computacional restrito, conhecido como EXPERT SYSTEM SHELL. Dentro dos conceitos anteriormente apresentados, integrou-se ao PROKICK a SHELL NEXPERT OBJECT [10], como ferramenta para processar a base de conhecimento de controle de poço .

NEXPERT é uma ferramenta para desenvolvimento de sistemas especialistas baseados em regras. O domínio é modelado em termos de objetos, classes e

propriedades. As propriedades dos objetos são chamadas SLOTS. SLOTS são usados para armazenar toda a informação que o NEXPERT reúne do domínio e tem seus atributos armazenados em META-SLOTS. Regras manipulam os SLOTS bem como as estruturas de classes e objetos.

Regras representam o conhecimento necessário para resolver problemas em um domínio particular. No NEXPERT, estão divididas em três partes, conforme mostrado na Figura 2.

- condições, no lado esquerdo;
- hipótese, que é um SLOT booleano (sim ou não);
- ações, no lado direito.

condição 1	HIPÓTESE
condição 2	
.....	Ação
condição n	

FIGURA 2: Estrutura Básica de Regra no NEXPERT

As condições representam uma série de testes para determinar se a hipótese é ou não verdadeira (TRUE). Se todas as condições são verdadeiras , então a hipótese é verdadeira e todas as ações são executadas. Da mesma maneira, se umas das condições é falsa, a regra será falsa.

As condições no lado esquerdo da regra e as ações no lado direito têm três colunas, no editor de regras do NEXPERT. A primeira coluna contém um operador usado no teste. A segunda coluna contém alguma expressão e a terceira coluna se não estiver vazia, contém parâmetros. Todas as regras têm somente uma hipótese, mas várias regras podem conduzir à uma mesma hipótese.

Desta maneira, no PROKICK a representação do conhecimento dos domínios na área de controle de poço, resultaram em um conjunto de regras que foram alimentadas no NEXPERT através de seu editor de regras. Na seqüência, estas regras são processadas pela máquina de inferência do NEXPERT, cujo método de inferência de mais alta prioridade é o BACKWARD-CHAINING. Este método revela-se o mais adequado para o domínio de controle de poço, tendo em vista tratar-se de diagnósticos de problemas, onde os objetivos foram definidos (KICK, furo na coluna, etc..) e a quantidade de dados é pequena.

Um método de inferência, do tipo BACKWARD-CHAINING começa com o estabelecimento de um ou mais objetivos a serem atingidos, como por exemplo diagnosticar um KICK. Este objetivo deve ser coincidente com uma ou mais conclusões (hipótese) das regras presentes na base de conhecimento. Todas as regras que tem sua conclusão coincidente com o objetivo são selecionadas para avaliação, como por exemplo, a regra R1 (Figura 3). Cada uma das regras selecionadas na base de conhecimentos, neste exemplo R1, tem suas condições (lado esquerdo) avaliadas, podendo resultar em fatos que serão informados pelo técnico ou em novas hipóteses a

serem avaliadas como as regras R2 e R3, na Figura 3. Isto é, se uma condição é conclusão (hipótese) de outra regra, então, esta nova regra é incluída na agenda de avaliação, e assim sucessivamente este processo é repetido recursivamente. No caso do exemplo da Figura 3 as novas hipóteses a serem testadas estão nas regras R2 e R3 e da mesma maneira para testar a hipótese da regra R2 é necessário testar as hipóteses das regras R4 e R5, conforme mostra a Figura 3. O processo de inferência termina quando um dos objetivos iniciais (hipótese da regra R1) é validada ou não. Caso a hipótese seja válida, a tarefa projetada para o sistema especialista é cumprida. E em caso contrário, o sistema especialista não tem uma resposta para o problema apresentado.

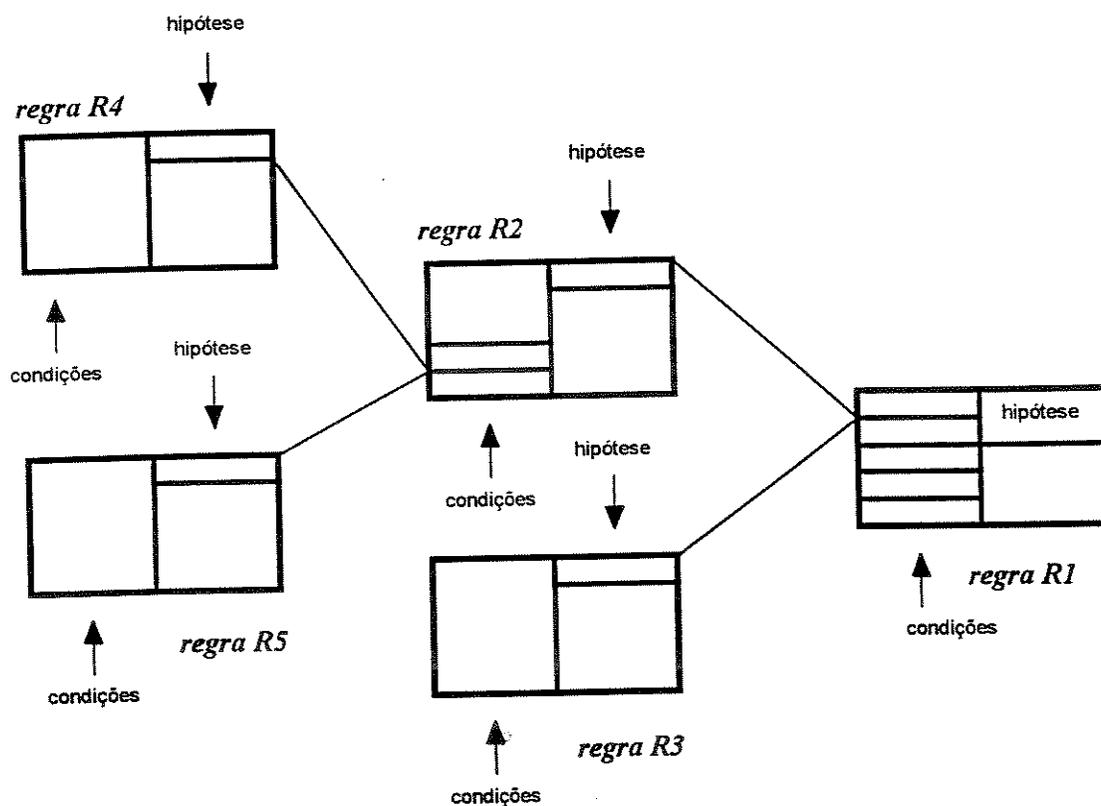


FIGURA 3: Recorrência nas Regras

3.2.1 - Tarefas de Diagnóstico no Controle de Poço em LAP

O PROKICK implementa duas tarefas de diagnóstico. A primeira, implementada no módulo Monitor, atua sobre o domínio específico de anormalidades operacionais. A segunda tarefa de diagnóstico engloba problemas relativos à fase de circulação do fluido invasor, construída no módulo de Circulação.

Ambas as tarefas de diagnóstico exigem um raciocínio simbólico, ao invés de exclusiva análise numérica e são de natureza heurística, isto é, podem ser resolvidos com conhecimentos práticos. Por outro lado, o diagnóstico de anormalidades não é uma tarefa fácil de executar, principalmente porque os problemas em controle de poços durante a circulação não são freqüentes no campo. É normal que profissionais com mais de 10 anos no campo não tenham uma única vez atuado em controle de poços em poços OFFSHORE, sendo muito mais raro profissionais que tenham atuado em controle de poços em águas profundas. Isto evidencia a grande lacuna existente entre os técnicos de campo, a quem se destina a ferramenta, e os especialistas. Este fato favorece de maneira decisiva o emprego de sistemas especialistas para o diagnóstico de problemas no controle de poços.

A concepção dos sistemas especialistas utilizados no PROKICK passou pela identificação das características dos problema, descoberta dos fatos relevantes e do conhecimento prático envolvido no diagnóstico de anormalidades operacionais da circulação do fluido invasor [11]. Passou ainda pela representação deste conhecimento sob a forma de regras e construção do sistema com uso da SHELL NEXPERT [10].

A identificação dos problemas em controle de poços envolveu entrevistas com especialistas. Foram identificados problemas durante duas etapas distintas, de um ponto de vista operacional. A primeira etapa envolveu o diagnóstico de anormalidades durante a perfuração, que teve como principal objetivo não só detectar um KICK, que é simples, como também identificar outras anormalidades que podem causar impacto sobre o controle do poço. A segunda etapa identificou problemas durante a fase de circulação do KICK, que é um conhecimento altamente especializado.

Durante a primeira etapa, foram caracterizados como problemas relevantes o KICK em manobra, KICK em perfuração, afiamento dos dentes da broca, desbalanceio do fluido de perfuração, furo na coluna, perda de circulação, pistoneio e problema com bomba de lama. Conclui ainda sobre a normalidade operacional, em alguns casos recomendando a observação dos níveis dos tanques ou o aumento do peso da lama, ou ainda, sugere avaliar poço e formação. Em caso de KICK, na sequência, o sistema recomenda os procedimentos operacionais necessários para o fechamento.

Algumas situações podem se revelar como potenciais para a existência de um KICK. Assim, por exemplo, o sistema a partir do indício de lama cortada por óleo, gás ou água salgada pode conduzir a um KICK ou a continuação da perfuração. Identificado este indício, é importante verificar se a massa específica do fluido de perfuração está corretamente medida e se foi retirada próximo à peneira de lama. Caso haja uma diminuição nesse valor, e uma inspeção visual das amostras de calha tenha sido feita indicando uma formação portadora de hidrocarboneto ou água salgada, recomenda-se continuar perfurando com cautela, pois a lama está cortada. Caso a inspeção visual

tenha indicado uma litologia que não seja portadora de hidrocarboneto, um KICK de água salgada poderá estar ocorrendo, se houver aumento de fluxo.

Se, ainda durante perfuração, houver um incremento gradual da taxa de penetração e a broca utilizada é do tipo PDC ou de insertos de tungstênio, sugere-se que seja feito o FLOW-CHECK, isto é, a parada das bombas para verificar se há influxo para o poço. Sendo negativo o resultado, porém a pressão de poros é crescente e há indícios geológicos de que a litologia não-programada indica uma região de transição para alta pressão, deve-se neste caso aumentar o peso da lama e continuar perfurando.

Um outro indício, a queda da pressão de bombeio, depende da avaliação sobre esta taxa de queda (lenta, gradual ou brusca). Se a taxa for brusca, pode haver indício de quedas nos jatos, o que sugere a imediata reavaliação da pressão reduzida de circulação uma vez que a houve alteração na perda de carga do sistema. Se a taxa de queda da pressão for lenta e estiver descartada a possibilidade de defeito na bomba, então podemos estar diante de um KICK ou um furo na coluna.

Um aumento da velocidade da bomba com uma queda da pressão de bombeio, pode também indicar um KICK, ou existência de um desbalanceio. Ao se detectar estes indícios, outros indícios devem ser procurados como o aumento da vazão de retorno ou aumento do nível de lama nos tanques. Caso positivo, o poço deve ser fechado sem FLOW CHECK, no caso de águas profundas. Em caso de crescimento de pressão estamos diante de um KICK, caso contrário estamos com um desbalanceio entre o peso dos fluidos de perfuração no interior da coluna e no anular.

O pistoneio, KICK em manobra e perda de circulação também foram estruturados, essencialmente analisando-se o volume de retorno no tanque de manobra, seja para a retirada da coluna seja para a descida.

Após o diagnóstico de um KICK, tanto em perfuração como em manobra, a seqüência de ações mapeadas com os especialistas estão associadas aos procedimentos de fechamento, fornecidos de imediato pelo sistema. Estes procedimentos, para KICK em perfuração por exemplo, são aqueles referentes a poços de lâmina de água profunda e já referidos nesta dissertação. Estes procedimentos são apresentados tanto no sistema especialista como também , podem ser acessados diretamente no Módulo Monitor.

A segunda etapa trabalhada com os especialistas diz respeito a problemas durante a fase de circulação do gás utilizando o método do sondador. Foram analisados os problemas relativos à fase do estabelecimento da pressão inicial de circulação e da circulação após o alcance desta pressão. Foram apresentados problemas tais como: furo na coluna, entupimento parcial nos jatos, entupimento total dos jatos, queda dos jatos, CHOKE entupido, perda de circulação, vazamento na superfície, fratura com perda de circulação, fratura sem perda de circulação, defeito na bomba e desmoronamento. Também na fase do estabelecimento da PIC, o sistema sugere ajustes no CHOKE para se atingir a pressão inicial de circulação. As pressões foram monitoradas pela linha do KILL pois ela permite uma melhor suposição sobre o que está ocorrendo no poço.

Na fase de estabelecimento da pressão inicial de circulação a preocupação relevante dos especialistas é ajustar vazão e a abertura do CHOKE para se atingir a pressão inicial de circulação. Por exemplo, se a pressão da linha do KILL é superior à máxima pressão permissível no CHOKE e conseqüentemente ocorre uma queda brusca da pressão da linha do KILL, pode estar ocorrendo uma fratura da formação. Essa fratura pode se dar com perda ou não de circulação. Em caso de fratura sem perda, o controle do poço poderá ser feito ainda com método sondador, pois houve regeneração da formação. Em caso de perda, fica caracterizado a necessidade de adotar um método de controle com perda de circulação. Por outro lado, se a pressão da linha do KILL é menor do que a pressão de fechamento no choke poderá ocorrer um KICK adicional, caso a velocidade da bomba já esteja estabelecida. Assim o CHOKE deverá ser fechado até que a pressão da linha do KILL seja igual a pressão de fechamento no choke, quando então, a pressão inicial de circulação será lida no manômetro do tubo bengala.

Durante a fase de circulação do fluido invasor os aumentos da pressão inicial de circulação, dependendo da taxa (gradual ou brusca), podem indicar entupimento nos jatos, no CHOKE ou desmoronamento. Por outro lado, a redução da pressão inicial de circulação pode indicar problemas de queda dos jatos, vazamento no choke, abertura do CHOKE excessiva, problemas na bomba, furo na coluna, perda de circulação e quebra de coluna. Em caso de furo na coluna, por exemplo, a posição da bolha é relevante para a ação a ser tomada.. Caso a bolha esteja abaixo do furo, recomenda-se esperar a migração do fluido para cima do furo e então circular o KICK para fora.

Concluída a fase de identificação, onde foram delimitados os problemas relevantes nas tarefas acima descritas, deu-se seqüência a fase de estruturação do conhecimento adquirido com os especialistas, sob a forma de árvores de decisão (Figura 4), que foram então implementadas na SHELL NEXPERT. Um exemplo de consulta é apresentado no capítulo de resultados.

3.2.2- Estruturação da Base de Conhecimentos no PROKICK

A base de conhecimentos foi montada tendo por referência árvores de decisão que mapearam o conhecimento dos especialistas. Estas árvores de decisão foram transformadas em regras e implementadas no editor de regras do NEXPERT. A Figura 5, mostra um esquema das regras, referente ao contexto da etapa de detecção de anormalidades operacionais e a Figura 6, mostra o contexto referente à etapa de circulação.

Os diagnósticos foram agrupados em 3 classes, conforme mostra a Figura 5. A classe da normalidade operacional (dia=normal) indicam que a operação está normal e recomendam algum procedimento. A classe de diagnóstico de KICK (dia=KICK) indicam a existência de KICK, durante a perfuração, durante a manobra, ou sem coluna no poço e a classe de outros diagnósticos (dia=anorm) indicam uma anormalidade operacional, que não é KICK, e sim afiamento dos dentes da broca, bomba centrífuga desligada, desbalanceio da lama, furo na coluna, pistoneio ou perda de circulação.

Cada classe de diagnósticos, engloba um conjunto de diagnósticos associados por uma característica comum. Por sua vez cada diagnóstico da classe tem associado um conjunto de regras específicas que no momento da consulta é avaliada. O principal objetivo desta classificação é permitir uma evolução da base de maneira organizada.

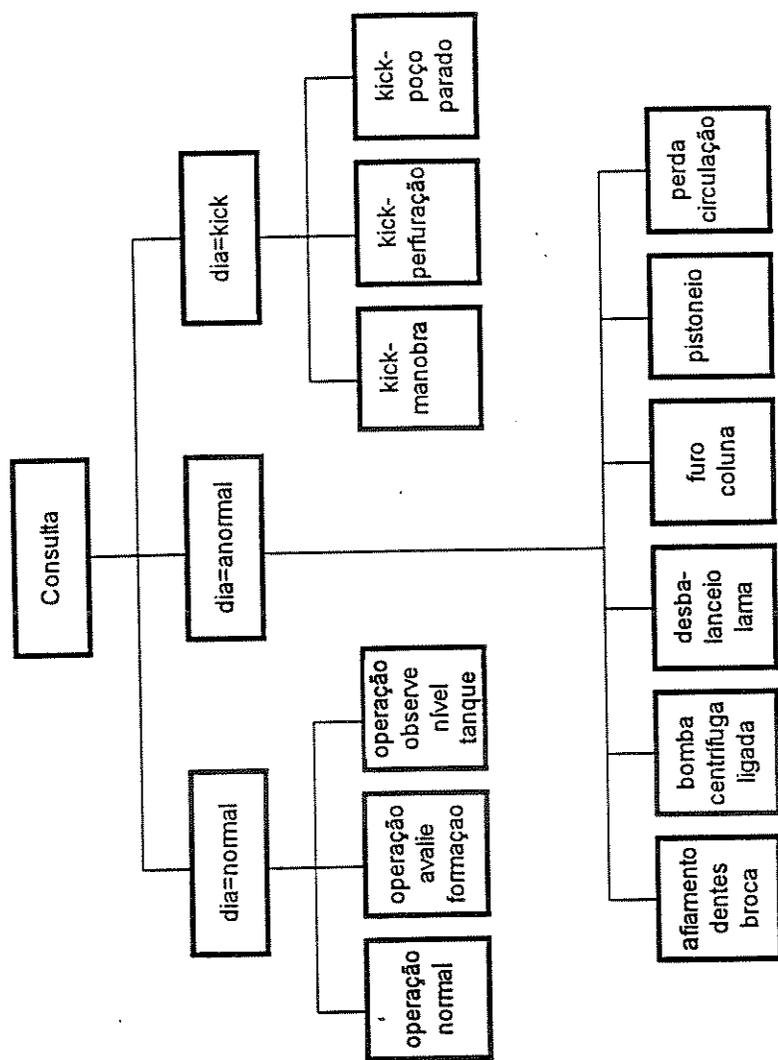


FIGURA 5: Contexto das Regras de Detecção de Anormalidades

Ao se iniciar uma consulta sobre diagnóstico, o sistema que tem como prioridade detectar KICK. Coloca então na agenda de avaliação de regras aquelas cuja hipótese é um KICK. Ao examinar o conjunto de regras que compõe um dos diagnósticos, por exemplo, KICK em perfuração, efetua questões para o técnico. De acordo com a resposta fornecida, diversas regras são eliminadas da agenda de avaliação, da mesma maneira que outras regras podem ser incluídas, ou até mesmo completar-se o diagnóstico.

Da mesma maneira, a Figura 6 apresenta um esquema das regras referentes aos diagnósticos na etapa de circulação, onde eles foram classificados quanto à posição de controle (dia=kill line). Por sua vez a classe de diagnósticos da linha do KILL foi subdividida em subclasses de diagnósticos referentes à fase de estabelecimento da PIC (pic=estab), diagnósticos de normalidade operacional (dia=normal) e diagnósticos de anormalidades durante a circulação (dia=anormal). Esta última categoria, por sua vez, foi subdividida em subclasses associadas com a localização do problema. A subclasse de “formação” engloba os diagnósticos referentes à fratura de formação (com perda e sem perda); a sub-classe “coluna” incorpora os diagnósticos relativos a problemas com jatos (entupimento, parcial e queda) e furo na coluna; e a subclasse “superfície” refere-se à diagnósticos de CHOKE entupido, defeito na bomba e vazamento na superfície.

Alguns comentários são oportunos neste ponto de conclusão dos sistemas especialistas no PROKICK. Os sistemas tem limitações, em virtude do vasto e complexo domínio de problemas em águas profundas. Pouco se conhece sobre problemas de controle de poço nestas profundidades e questões relativas à desconexão de emergência

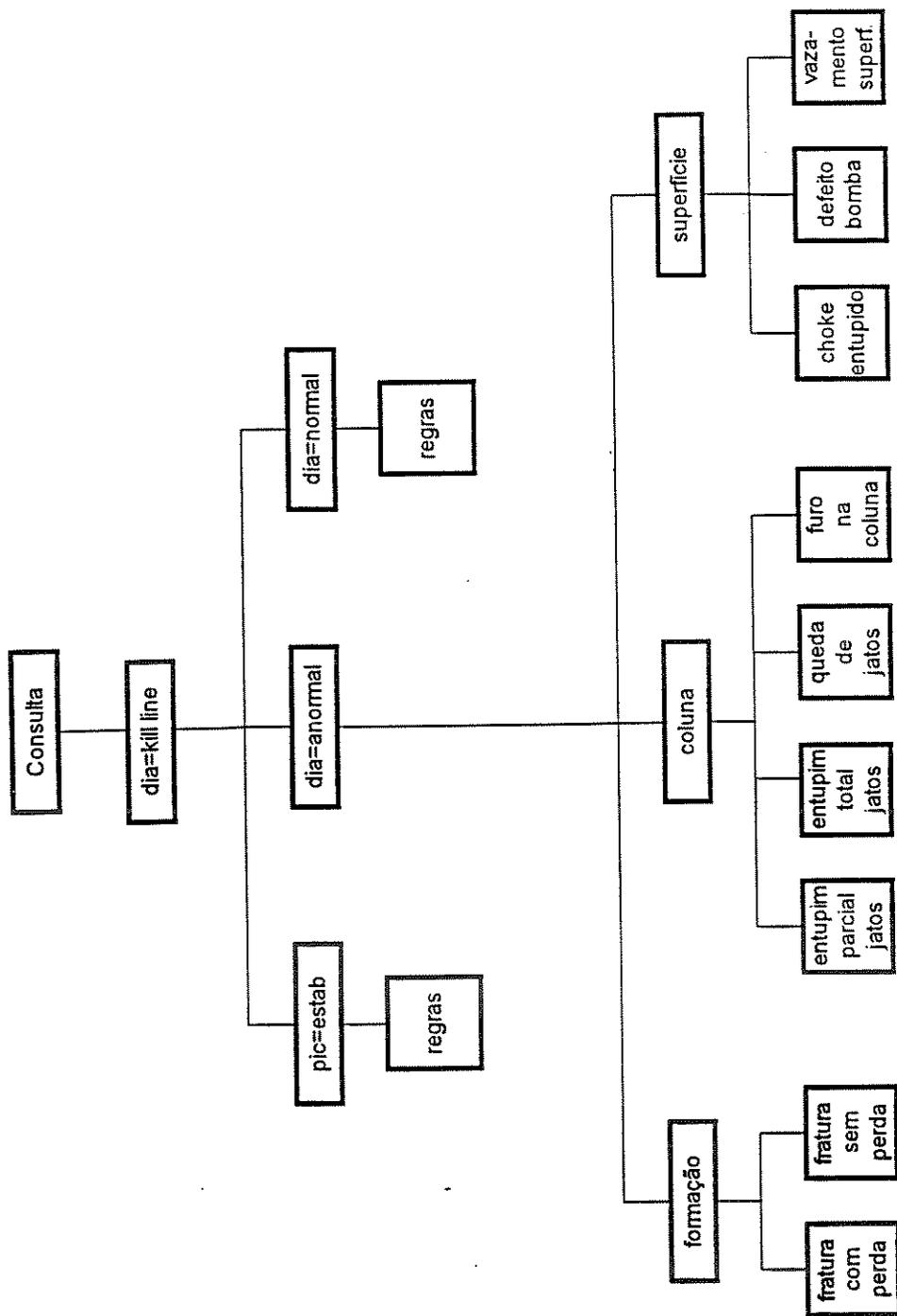


FIGURA 6 : Contexto das Regras da Etapa de Circulação

podem trazer um aumento significativo do escopo . Da forma como estão estruturadas as classes de diagnósticos à princípio, a base estaria preparada para incorporá-los. Questões referentes a problemas com equipamentos também não foram incorporadas. Sem dúvida que a parte mais complexa na elaboração de um sistema especialista é exatamente a parte de aquisição do conhecimento. A utilização de uma SHELL para reduzir a dependência do sistema da máquina de inferência demonstrou-se acertada, conforme foi colocado Item 3.2, permitindo evoluir o sistema sem a preocupação com os algoritmos computacionais da máquina de inferência.

3.3 - Previsão de Pressões

O simulador aqui construído é simples e tem o objetivo de compor o quadro de integração proposto, não se constituindo trabalho aprofundado sobre o comportamento das pressões durante o controle do poço , conforme pode ser observado nas Referências 12, 13 e 14, que certamente não está na esfera desta dissertação.

O escopo deste simulador de pressões, implementado em VISUAL BASIC [15] , considera sua aplicação em sondas flutuantes, com a broca no fundo do poço vertical e fluido a base de água. O fluido invasor é o gás, estando o reservatório portador do KICK no fundo poço. O gás é considerado ideal, sendo a densidade considerada desprezível, não se misturando o com o fluido de perfuração. Considerou-se, ainda, que a área da seção transversal do anular constante , perdas de carga friccionais são desprezíveis , a pressão no fundo é constante, o método do sondador é aplicado.

O procedimento de cálculo está composto por uma 3 etapas. A primeira etapa estabelece as condições do poço fechado. A segunda etapa simula as pressões do fundo do poço até a circulação do gás para fora do poço. A terceira etapa simula as pressões da fase de circulação da lama nova.

A etapa de fechamento é estabelecida quando cessa a entrada de gás para o poço. Neste instante as vazões de gás e fluido de perfuração são nulas na superfície. Como as pressões do anular e da coluna se estabilizam, deixa de existir a diferença de pressão entre o fundo do poço e reservatório, cessando o influxo de gás. Neste instante, estima-se a pressão da formação do seguinte modo :

$$P_{\text{form}} = 0,17 * D_v * \rho_m + \text{SIDPP} \quad (3.26)$$

onde :

P_{form} - pressão da formação no fundo do poço

D_v - profundidade do poço

ρ_m - densidade do fluido de perfuração

SIDPP - pressão de fechamento no tubo de perfuração

Ainda nesta etapa, é feito o cálculo da densidade do novo fluido de perfuração , que será deslocado para o poço, após a expulsão do gás, e tem a seguinte fórmula :

$$\rho_{nm} = \rho_m + \frac{SIDPP}{0,17 \cdot D_v} \quad (3.27)$$

onde :

ρ_{nm} - densidade da lama nova

Ainda , são calculados a pressão inicial de circulação e os STROKES entre diversos intervalos do poço.

A pressão inicial de circulação, a ser usada na fase de circulação do gás, nada mais é do que a soma da pressão de fechamento, lida no manômetro do tubo de perfuração, e a pressão reduzida de circulação, ou seja :

$$PIC = SIDPP + PRC. \quad (3.28)$$

onde :

PIC - pressão inicial de circulação

PRC_r - pressão reduzida de circulação

Durante as operações de perfuração são efetuadas medições da pressão de injeção naquelas vazões consideradas adequadas para o controle do poço. A pressão de injeção medida nestas condições é denominada pressão reduzida de circulação.

Os volumes e STROKES dos intervalos de superfície-broca, broca-topo dos comandos, broca-sapata; broca-cabeça do poço e broca-superfície são também calculados, dentro do programa, com base nas respectivas capacidades e deslocamento volumétrico real da bomba.

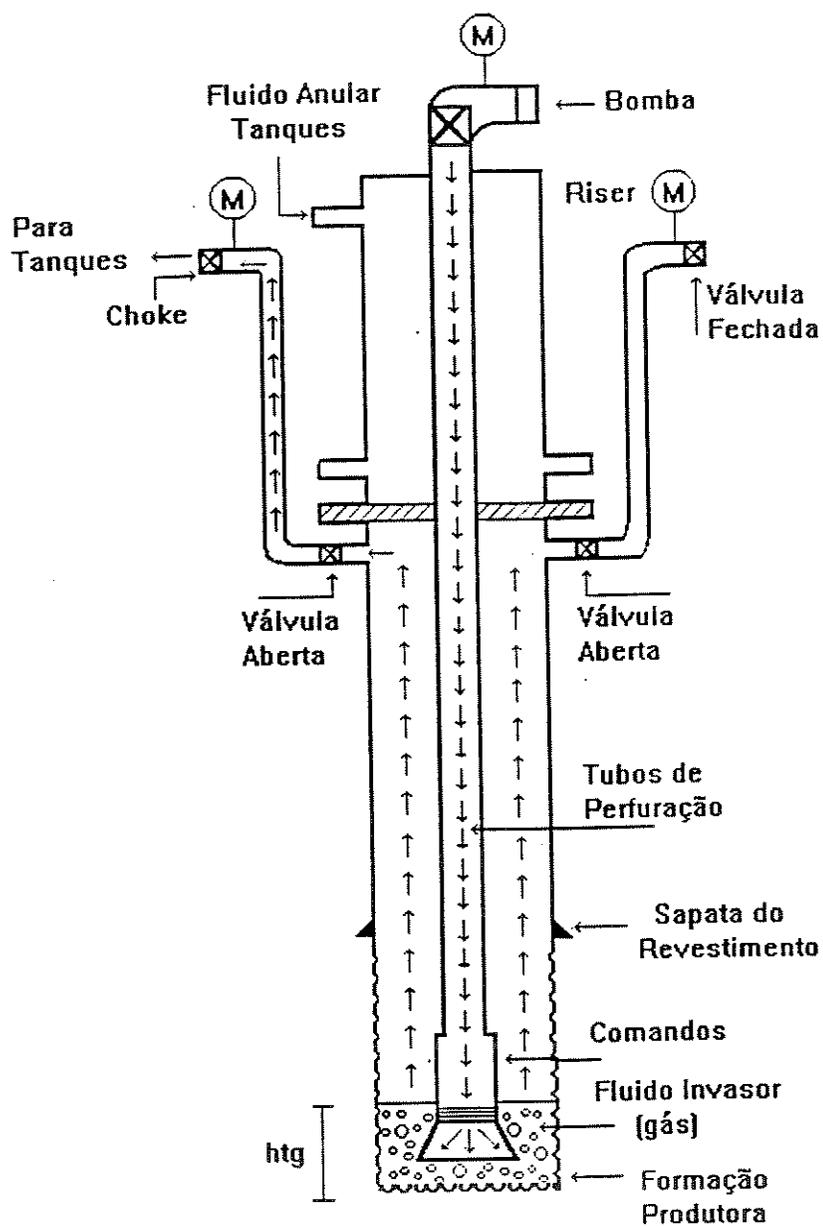


FIGURA 7 : Esquema de Poço - Fechamento

A esta altura já ficou evidente que alguns dos cálculos que são efetuados dentro do programa de previsão de pressões também o são dentro da planilha de controle. Tal postura visa deixar as funcionalidades independentes, embora integradas. Isto dá margem à opção de usar um outro simulador, ou ainda futuramente, pensar no envio dos dados para simuladores remotos.

Com base nestes cálculos são calculadas as variáveis, quando o gás se encontra no fundo do poço, conforme mostra a Figura 7. Assim a altura do fluido invasor é calculada considerando-se o volume ganho e a capacidade do anular poço-comando, ou seja:

$$htg = \frac{V_k}{C_{v,adc}} \quad (3.29)$$

onde :

htg - topo do gás, medido a partir do fundo do poço

V_k - volume ganho

$C_{v,adc}$ - capacidade do anular poço-comando.

A pressão do gás neste instante é considerada como sendo a pressão da formação, isto é :

$$P_{bg} = P_{form} \quad (3.30)$$

onde :

P_{bg} - pressão do gás

Neste instante, também a pressão do CHOKE é calculada, para permitir o cálculo da pressão sapata e na cabeça do poço. Estes três pontos o CHOKE, a sapata e a cabeça do poço serão as referências durante a circulação do gás. Assim , a pressão no CHOKE pode ser obtidas da seguinte maneira:

$$P_{choke} = P_{form} - 0,17 * (Dv - htg) * \rho_m \quad (3.31)$$

onde :

P_{choke} - pressão no CHOKE

P_{form} - pressão na formação

A pressão na sapata, que está sendo observada em relação à máxima pressão de fratura é obtida por:

$$P_{cs} = P_{choke} + 0,17 * \rho_m * D_{cs, v} \quad (3.32)$$

onde :

P_{cs} - pressão na sapata

$D_{cs,v}$ - profundidade da sapata do último revestimento

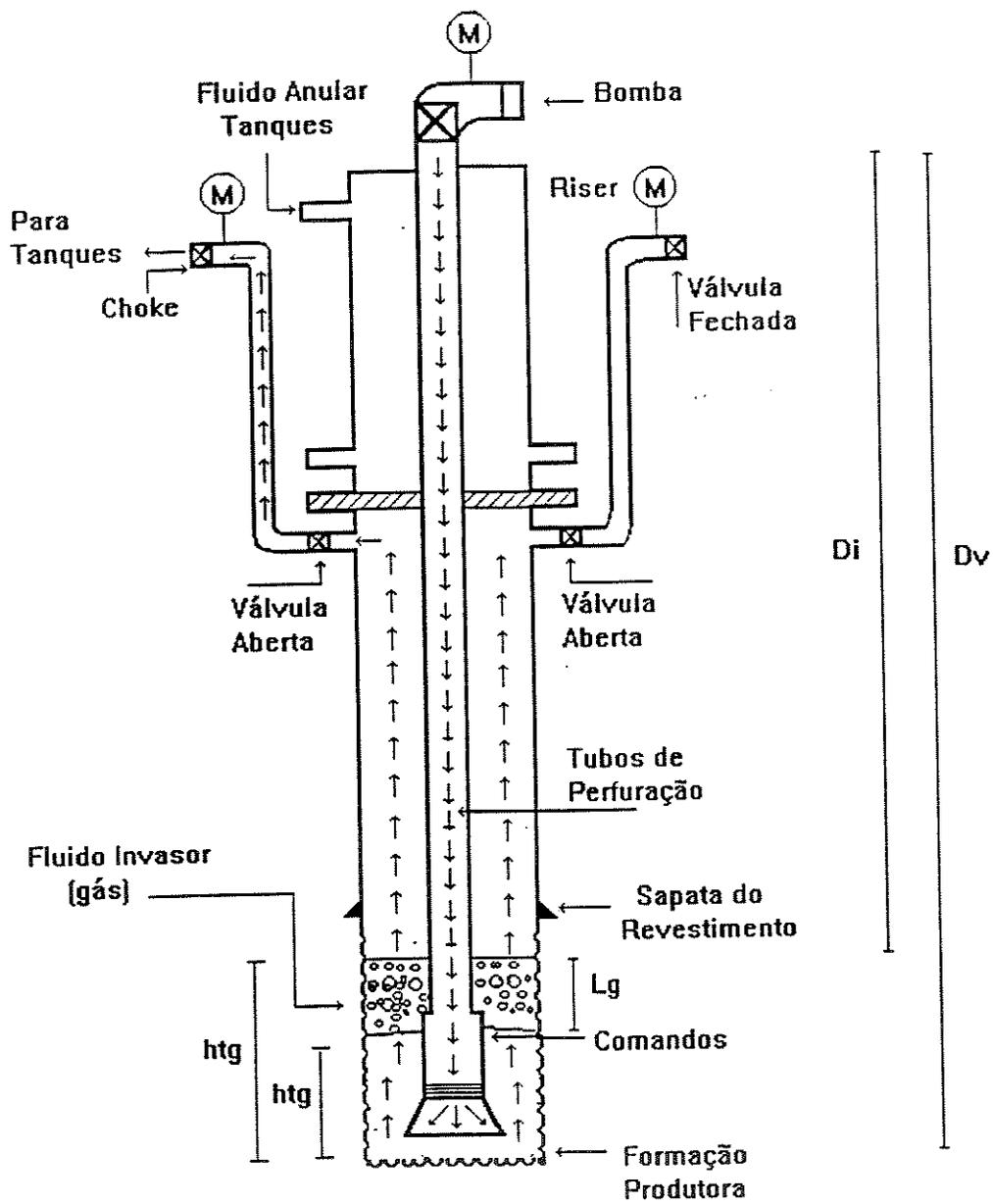


FIGURA 8 - Esquema de Poço - Circulação

A pressão na cabeça do poço, quando o gás está no fundo do poço é obtida por:

$$P_{wh} = P_{choke} + 0,17 * \rho_m * D_{wh} \quad (3.33)$$

onde :

P_{wh} - pressão na cabeça do poço

D_{wh} - profundidade da cabeça do poço

A Figura 8 mostra uma posição intermediária do KICK, antes da sapata, já caracterizando a fase de circulação do gás. Durante esta fase, o importante é manter a pressão no fundo constante e no mínimo igual à pressão do reservatório. Esta ação garante a impossibilidade de entrada de gás no poço. O controle do poço se dá através da pressão de injeção, que deve ser igual a PIC, mantendo-se a vazão de bombeio constante.

Neste instante, já foram bombeados alguns STROKES e, portanto a posição da bolha de gás é dada por :

$$h_{bg} = \frac{V_{disp}}{C_{v, adc}} \quad (3.34)$$

onde :

V_{disp} - volume bombeado, obtido através de STROKES deslocados multiplicados pelo deslocamento volumétrico efetivo da bomba.

Definida a posição da base do gás, então é possível calcular a respectiva pressão, cujos elementos já estão definidos anteriormente:

$$P_{bg} = P_{form} - 0,17 * h_{bg} * \rho_m \quad (3.35)$$

Considerando a premissa de que o gás é ideal, calculamos então o volume do gás, para posteriormente poder definir a altura do topo do gás e então calcular as pressões que estão sendo monitoradas :

$$V_{gas} = V_k * \frac{(P_{form} + 14.7)}{(P_{bg} + 14.7)} \quad (3.36)$$

onde :

V_{gas} - volume do gás à uma profundidade específica

o volume do gás então permite o cálculo do topo do gás :

$$h_{tg} = \frac{V_{gas}}{C_{v, adc}} + h_{bg} \quad (3.37)$$

De posse deste valor e, dependendo da posição do topo do gás em relação aos comandos, isto é, topo do gás é maior do que os comandos, h_{tg} terá que ser recalculado para :

$$h_{tg} = L_{dc} + \frac{(V_{gas} - (L_{dc} - h_{bg}) * C_{v, adc})}{C_{v, adp}} \quad (3.38)$$

Em um caso, ou outro, podemos então calcular as pressões acompanhadas. Então a pressão na cabeça do poço será :

$$P_{wh} = P_{bg} - 0,17 * \rho_m * (D_{wh} - h_{tg}) \quad (3.39)$$

onde :

D_{wh} - profundidade da cabeça do poço

e a pressão no choke, será :

$$P_{choke} = P_{wh} - 0,17 * \rho_m * L_{cl} - \Delta P_{cl} \quad (3.40)$$

onde :

L_{cl} - comprimento da linha do CHOKE

ΔP_{cl} - perda de carga na linha do choke.

A perda de carga na linha do CHOKE (dp_{cl}), é disponibilizada considerando-se o maior valor entre os gradientes para fluxo laminar e turbulento, calculados respectivamente por :

$$g_{lcl} = \frac{\mu_p * v_{cl}}{457,2 * d_{cl}^2} + \frac{\tau}{68,6 * d_{cl}} \quad (3.41)$$

e ,

$$g_{tcl} = \frac{\rho_m^{0,75} * v_{cl}^{1,75} * \mu_p^{0,25}}{548,6 * d_{cl}^{1,25}} \quad (3.42)$$

onde :

g_{lcl} - gradiente de perda de carga para fluxo laminar

g_{tcl} - gradiente de perda de carga para fluxo turbulento

μ_p - viscosidade plástica

τ - limite de escoamento

v_{cl} - velocidade na linha do CHOKE (pé/s), que é calculada por :

$$v_{cl} = \frac{Q}{2.448 * d_{cl}^2} \quad (3.43)$$

sendo: Q - vazão de circulação em gpm

Com os gradientes de perda de carga, a perda total na linha do CHOKE é calculada por :

$$\Delta P_{cl} = g_{lcl} * L_{cl} \quad (3.44)$$

ou

$$\Delta P_{cl} = g_{tcl} * L_{cl} \quad (3.45)$$

A pressão do topo do gás, a uma certa profundidade D_i no interior do anular, pode ser calculada pela seguinte equação biquadrática:

$$P_{Di} = \frac{b + \sqrt{b^2 + 4 * c}}{2} \quad (3.46)$$

onde P_{Di} é a pressão do topo do gás numa profundidade D_i (Figura 8).

$$b = P_{form} - 0,17 * \rho_m * (D_v - D_i) \quad (3.47)$$

$$c = \frac{0,17 * \rho_m * P_{form} * V_k}{C_{v, adp}} \quad (3.48)$$

Tal equação biquadrática é proveniente do seguinte balanço de pressões, considerando a Figura 8 :

$$P_{Di} = P_{form} - 0.17 * \rho_m * (D_v - D_i - L_g) \quad (3.49)$$

por outro lado, considerando que o gás é perfeito, temos :

$$P_{\text{form}} * V_k = P_{\text{Di}} * V_{\text{gas}} \quad (3.50)$$

como,

$$V_{\text{gas}} = C_{v, \text{adp}} * L_g \quad (3.51)$$

temos :

$$L_g = \frac{P_{\text{form}} * V_k}{P_{\text{Di}} * C_{v, \text{adp}}} \quad (3.52)$$

Substituindo (3.52) em (3.49) , temos a equação biquadrática, que resolvida fica como mostrada em (3.46).

Quando o topo do gás está se deslocando no interior da linha do CHOKE, a Equação 3.51 é modificada para:

$$L_g = L_{cl} - D_i + \left[\frac{P_{\text{form}} * V_k}{P_{\text{Di}}} - V_{\text{kcl}} \right] * \frac{1}{C_{\text{adp}}} \quad (3.53)$$

onde V_{kcl} é o volume de kick no interior da linha do CHOKE.

O parâmetro c é o mesmo da Equação 3.48, porém b é dado por:

$$b = P_{\text{form}} - 0,17 * \rho_m * (D_v - L_{cl}) - 0,17 * \rho_m * (L_{cl} - D_i) * \frac{C_{cl}}{C_{\text{adp}}} \quad (3.54)$$

onde C_{cl} é a capacidade da linha do CHOKE.

Desta maneira, aplicando estes conceitos a diversos intervalos de bombeio, foram calculadas as pressões no simulador para a circulação do fluido invasor até todo o gás ser circulado do poço, que é a fase mais crítica do processo de controle de poço.

Na seqüência o programa também faz as previsões de pressões durante a circulação da lama nova, cuja principal preocupação tem que ser manter a pressão no fundo constante e superior à pressão da formação para evitar novo KICK.

A segunda circulação começa com a previsão das pressões que ocorrem no deslocamento da lama nova até a broca, quando ocorrerá um decréscimo na pressão correspondente à diferença da pressão inicial de circulação e a pressão final de circulação da circulação do gás.

Quando a lama nova atinge o topo dos comandos, o programa calcula a pressão na sapata do revestimento :

$$P_{cs} = P_{form} - 0,17 * \rho_{flm} * L_{dc} - 0,17 * (D_{cs, v} - L_{dc}) * \rho_m \quad (3.55)$$

onde L_{dc} é o comprimento dos comandos. Na cabeça do poço, a pressão é calculada por:

$$P_{wh} = P_{form} - 0,17 * \rho_{nm} * L_{dc} - 0,17 * (D_{wh} - L_{dc}) * \rho_m \quad (3.56)$$

onde: D_{wh} é a profundidade da cabeça do poço.

e também a pressão no CHOKE :

$$P_{choke} = P_{wh} - 0,17 * \rho_m * L_{cl} - \Delta P_{cl} \quad (3.57)$$

Da mesma forma, quando a lama nova atinge a sapata são calculadas as novas pressões na sapata, na cabeça do poço e no CHOKE utilizando semelhantes fórmulas. Nesta fase ainda é necessário manter a pressão no choke, a fim de evitar novos influxos.

Define-se o Ponto de Equilíbrio Dinâmico [16] como o instante em que o poço está morto dinamicamente com o CHOKE totalmente aberto e a pressão a montante sendo zero. A partir deste ponto, as pressões no sistema irão subir uma vez que o CHOKE não pode mais ser aberto para compensar o aumento de pressão devido ao deslocamento do fluido de matar. Este ponto poderá ocorrer antes da lama nova atingir a entrada da linha do CHOKE ou após este momento, quando ela estiver já no linha do CHOKE. Para o primeiro caso, a pressão calculada para o CHOKE é negativa no instante em que a lama nova atinge a linha do CHOKE. Assim, a profundidade na qual isto ocorreu (D_{ped}) é dada por:

$$D_{ped} = D_{cs, v} - D_x \quad (3.58)$$

onde D_X é dada por:

$$D_X = (D_{cs, v} - L_{cl}) * \frac{P_{ck, cs}}{(P_{ck, cs} - P_{ck, cl})} \quad (3.59)$$

onde $P_{ck,cs}$ é a pressão no CHOKE no instante em que a lama nova passa pela sapata e $P_{ck,cl}$ é a pressão negativa calculada no CHOKE no instante em que a lama nova chega no linha do CHOKE. Se o ponto ocorreu após a lama nova ter passado da entrada da linha do CHOKE, (D_{ped}) é dada por:

$$D_{ped} = L_{cl} - D_X \quad (3.60)$$

onde D_X é dada por:

$$D_X = L_{cl} * \frac{P_{ck, cl}}{(P_{ck, cl} - P_{ck, s})} \quad (3.61)$$

onde $P_{ck,cl}$ é a pressão no CHOKE no instante em que a lama nova entra na linha do CHOKE e $P_{ck,s}$ é a pressão negativa calculada no CHOKE no instante que a lama nova chega na superfície.

Conforme notado previamente, após o ponto de equilíbrio dinâmico ser atingido, a pressão interior do sistema irá subir até a lama nova atingir a superfície. Neste instante, a pressão no fundo do poço é calculada por:

$$P_{bh} = P_{f\ddot{o}rm} + \Delta P_{cl} * \frac{\rho_{nm}}{\rho_m} \quad (3.62)$$

a pressão na sapata por:

$$P_{cs} = P_{bh} - 0,17 * \rho_{nm} * (D_v - D_{cs, v}) \quad (3.63)$$

e a pressão na cabeça do poço por:

$$P_{wh} = P_{bh} - 0,17 * \rho_{nm} * (D_v - D_{wh}) \quad (3.64)$$

Durante a segunda circulação pelo método do sondador, quando a lama nova está sendo bombeada pelo interior da coluna a pressão cairá de PIC (início da injeção da lama nova pelo interior da coluna) até PFC₁, quando a lama nova atinge a broca. A partir deste instante, a pressão de bombeio deve ser mantida constante em PFC₁, até o ponto de equilíbrio dinâmico, onde esta pressão subirá até PFC₂, quando a lama nova atinge a superfície. A segunda pressão final de circulação é dada por:

$$PFC_2 = PFC_1 + \Delta P_{cl} * \frac{\rho_{nm}}{\rho_m} \quad (3.65)$$

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS DO PROKICK

O uso desta ferramenta computacional tem o objetivo de aumentar a capacidade local (plataforma) de participar no processo de controle de poço. Assim, para apresentar as características do PROKICK, enfoca-se três grandes contribuições ao aumento da coordenação do processo, que são:

- aumento da capacidade local (plataforma) de efetuar previsão de pressões;
- aumento da capacidade local (plataforma) de resolver problemas de controle de poço;
- aumento da capacidade local (plataforma) de manusear procedimentos gerenciais e operacionais;

4.1- Aumento da capacidade local (plataforma) de efetuar previsão de pressões

Efetuar previsão de pressões em águas profundas, não é uma tarefa fácil e dentro dos recursos atuais, pode-se dizer que praticamente inexiste uma ferramenta de uso integrado como o PROKICK. Esta capacidade de previsão está potencializada pela integração em um mesmo ambiente computacional, da tradicional planilha de controle e de um simulador de pressões.

A mecanização da planilha de controle, cuja interface é apresentada na Figura 9, dá maior qualidade, rapidez e confiabilidade ao processamento dos dados, ao mesmo tempo que conduz a uma padronização, dos procedimentos de cálculo .

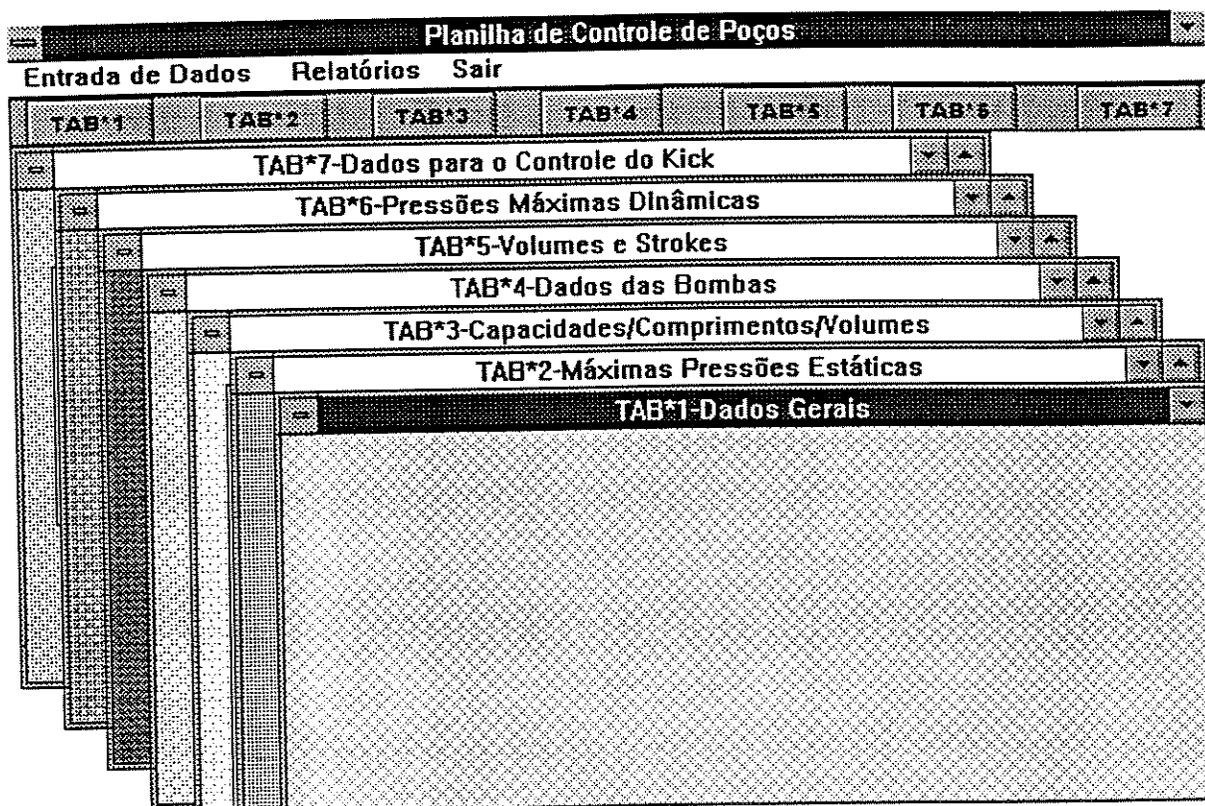


FIGURA 9: Interface da Planilha de Controle do PROKICK

Uma vez que os dados do KICK foram coletados, então o PROKICK calcula e gera o quadro de evolução das pressões. A previsão de pressões em poços de lâminas d'água profundas, está contemplada de forma a gerar também, saídas gráficas e tabeladas em função do tempo e dos STROKES bombeados. São feitas simulações de pressões, no choke, na sapata do revestimento, na cabeça do poço e no DRILL-PIPE. A Figura 10 ilustra

as tabelas resultantes da simulação em função do tempo. As Figuras 11,12,13 e 14 apresentam as interfaces da previsão de pressões de um caso. No capítulo 5 será apresentado um exemplo detalhado.

Circulação - L.A.P.									
Simulação		Pressões x Strokes			Pressões x Tempo			Anormalidades	
Primeira Circulação					Segunda Circulação				
tempo	pchoke	pcs	pdp	pwh	tempo	pchoke	pcs	pdp	pwh
7,05	520,88	4785,71	2200,	2185,71	156,44	295,17	4560,	2170,65	1960,
14,11	483,2	4748,02	2200,	2148,02	163,45	295,17	4560,	2141,3	1960,
21,16	490,75	4755,58	2200,	2155,58	170,45	295,17	4560,	2111,95	1960,
28,22	498,94	4763,77	2200,	2163,77	177,46	295,17	4560,	2082,6	1960,
35,27	507,85	4772,68	2200,	2172,68	184,47	295,17	4560,	2053,25	1960,
42,33	517,57	4782,4	2200,	2182,4	191,48	295,17	4560,	2023,91	1960,
49,38	528,22	4793,05	2200,	2193,05	198,49	295,17	4560,	1994,56	1960,
56,43	539,94	4804,77	2200,	2204,77	205,49	295,17	4560,	1965,21	1960,
63,49	552,9	4715,94	2200,	2217,73	212,5	295,17	4560,	1935,86	1960,
70,54	567,31	4560,	2200,	2232,14	219,51	295,17	4560,	1906,51	1960,
77,6	583,44	4560,	2200,	2248,26	228,82	264,4	4529,23	1906,51	1929,23
84,65	601,59	4560,	2200,	2266,41	287,39	141,33	4406,15	1906,51	1806,15
91,7	622,18	4560,	2200,	2287,	354,64	.	4406,15	1906,51	1664,83
98,76	645,73	4560,	2200,	2310,56	360,59	.	4431,2	1919,03	1677,35
105,81	672,95	4560,	2200,	2337,77	368,94	.	4628,22	2017,54	1874,37
112,87	704,74	4560,	2200,	2369,57					
119,92	742,38	4560,	2200,	2407,21					
126,98	787,63	4560,	2200,	2452,46					
134,02	2213,33	4560,	2200,	2213,33					
141,08	1960,	4560,	2200,	1960,					
149,43	295,17	4560,	2200,	1960,					

FIGURA 10: Evolução das Pressões X Tempo

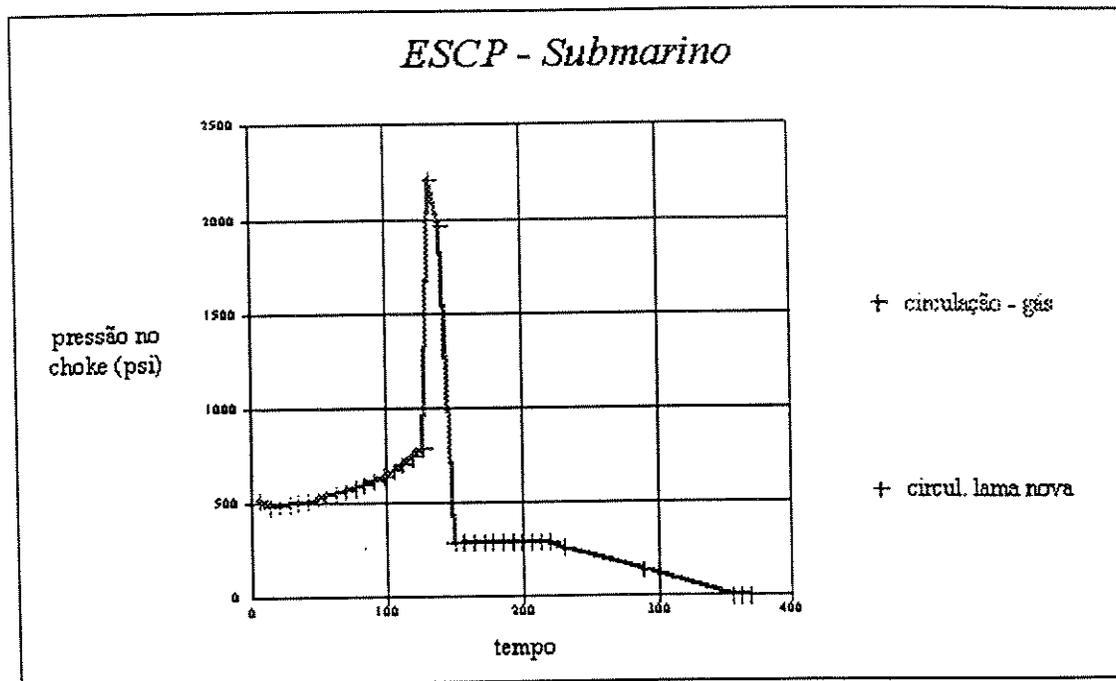


FIGURA 11: Comportamento da Pressão no Choke

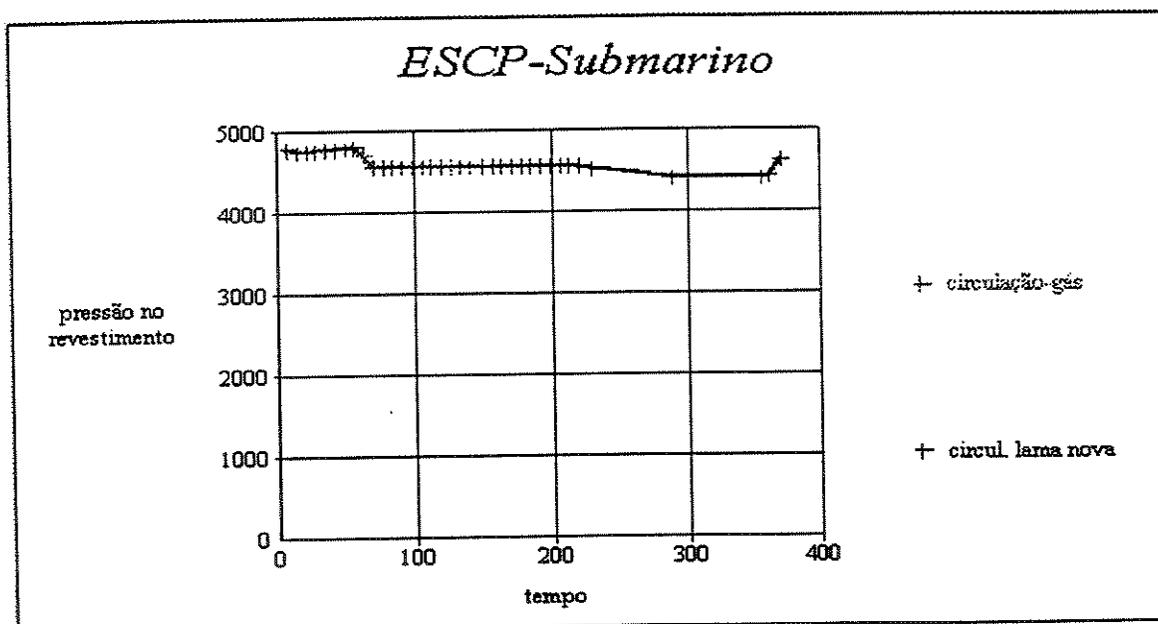


FIGURA 12: Comportamento da Pressão na Sapata do Revestimento

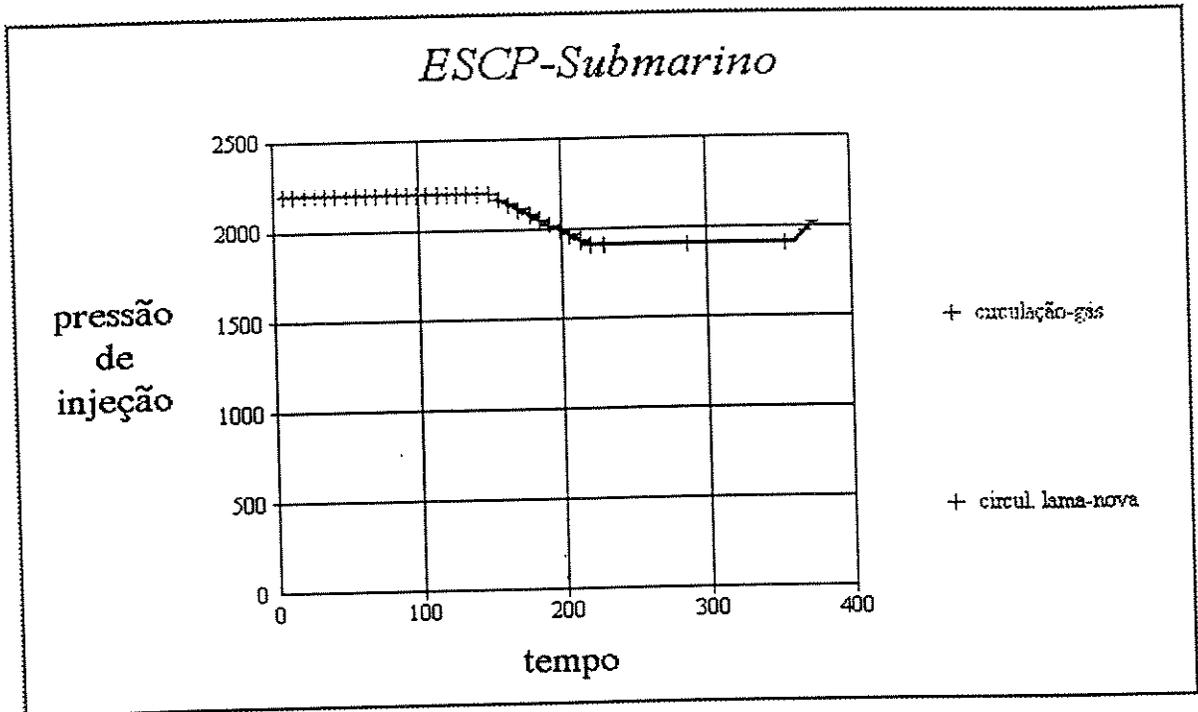


FIGURA 13: Comportamento da Pressão de Injeção

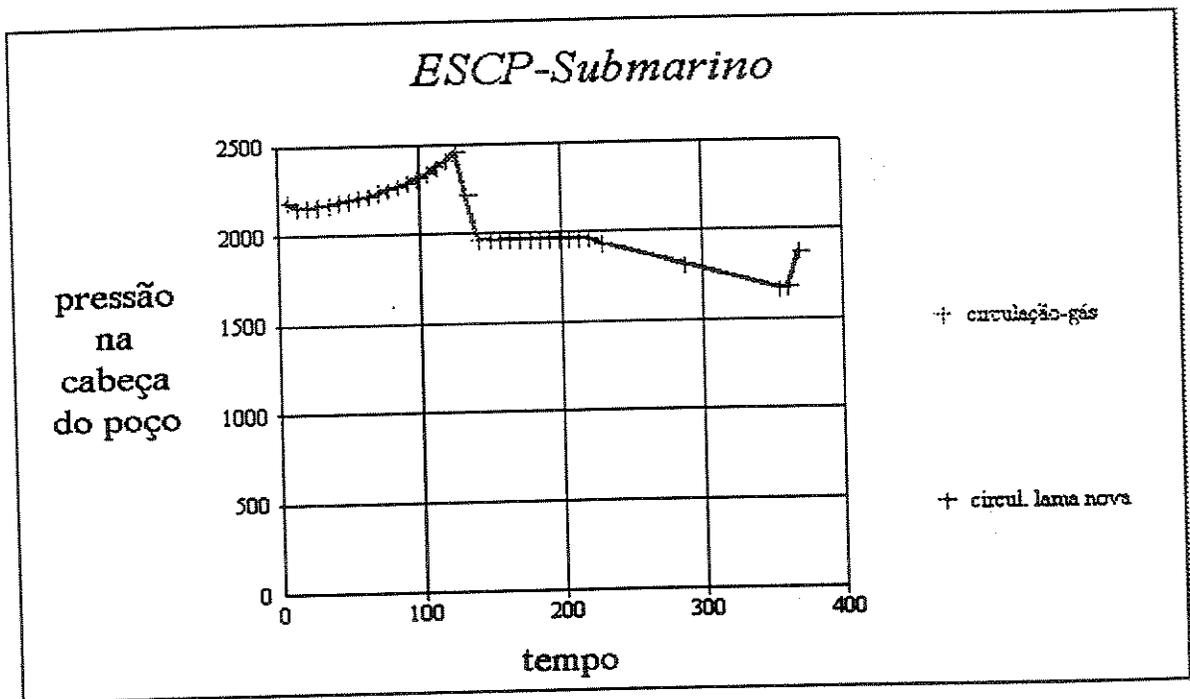


FIGURA 14: Comportamento da Pressão na Cabeça do Poço

4.2- Aumento da capacidade local (plataforma) de resolver problemas de controle de poço

Resolver problemas durante o controle de poço é uma situação crítica, onde estão as maiores possibilidades de aumento de custo e complicações operacionais. A ferramenta propõe uso de sistemas especialistas como alternativa para aumentar a eficácia do processo. Estão implementados diagnósticos para detecção do KICK e circulação, interagindo com usuário através de sessões perguntas e respostas . A Figura 15 ilustra a interface do sistema , que apresenta opções para cada uma das questões .

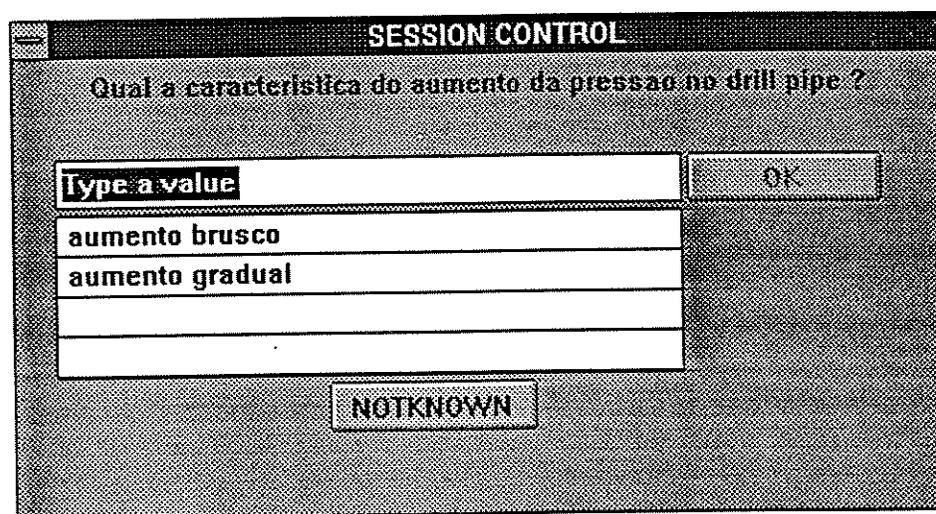


FIGURA 15 : Interface do PROKICK para Sistema Especialista.

Ainda considerando os dados anteriores, uma sessão para detectar um problema na fase de circulação , se daria da seguinte maneira :

PROKICK : Qual a fase de controle?

opções : - estabilização da PIC

- circulação do gás

usuário : circulação do gás

PROKICK : Qual o valor da pressão inicial de circulação (psi) ?

usuário : 500

PROKICK : Qual o comportamento da pressão inicial de circulação ?

opções : - permanece constante

- crescente

- decrescente

usuário : crescente

PROKICK: Qual a característica do aumento na pressão do DRILL-PIPE ?

opções : - aumento brusco

- aumento gradual

usuário: aumento brusco

PROKICK: Qual o comportamento da pressão no choke ?

opções: - aumento

- pequena diminuição

usuário : pequena diminuição

PROKICK : Houve utilização de material para combate a perda de circulação ?

opções : - sim

- não

usuário : sim

PROKICK : A circulação está normal ?

opções : - sim

- não

usuário : sim

PROKICK (conclusão): entupimento parcial dos jatos ; reduzir a vazão e estabelecer nova pressão inicial de circulação.

Uma outra interação com o usuário foi realizada, com o objetivo de mostrar a caracterização de um KICK, que é simples, mas ilustra a chamada dos procedimentos de fechamento. A sessão é a seguinte :

PROKICK: Qual o tipo de operação ?

opções : - perfuração

- manobra

- coluna fora do poço

usuário: perfuração

PROKICK: Qual o indício que está sendo observado?

opções: - aumento da vazão de lama no retorno

- elevação do nível dos tanques
- incremento da taxa de penetração
- incremento da velocidade das bombas
- lama cortada por óleo/gás
- perda de pressão de bombeio

usuário: elevação do nível dos tanques

PROKICK: Qual o resultado do FLOW-CHECK ?

opções : - com retorno de fluxo

- sem retorno de fluxo

usuário: com retorno de fluxo

PROKICK (conclusão) : diagnóstico = KICK (!)

PROKICK : Qual o tipo de BOP ?

- submarino
- superfície

usuário: submarino

PROKICK (exibe tela com os seguintes procedimentos):

" PROCEDIMENTO DE FECHAMENTO - KICK EM PERFURAÇÃO ;

. BOP=SUBMARINO;

. PARAR A MESA ROTATIVA;

. ELEVAR A COLUNA, DEIXANDO O KELLY TOTALMENTE ACIMA DA MESA ROTATIVA;

. DESLIGAR AS BOMBAS;

. FECHAR O BOP ANULAR SUPERIOR;

. FECHAR O CHOKE;

- . ABRIR A VÁLVULA SUBMARINA DAS LINHAS DE KILL E DO CHOKE IMEDIATAMENTE ABAIXO DA GAVETA SUPERIOR;
- . REGISTRAR O CRESCIMENTO DAS PRESSÕES A CADA MINUTO NA PLANILHA DE FECHAMENTO DO POÇO;
- . REGISTRAR AS PRESSÕES ESTABILIZADAS DE FECHAMENTO (SIDPP E SICP) E O VOLUME GANHO, DESCONTANDO O VOLUME DE SUPERFÍCIE E PREPARAR PARA O HANG-OFF.”

4.3- Aumento da capacidade local (plataforma) de manusear procedimentos gerenciais e operacionais.

O engenheiro ao interagir com o PROKICK encontrará funcionalidades sobre equipamentos, recursos humanos e procedimentos gerenciais e operacionais.

A interface de equipamentos (Figura 16) apresenta informações sobre equipamentos de controle, detecção e prevenção, além de dispor de três botões laterais que permitem acessar arranjos do equipamentos de segurança (Figura 18), mínimo e desejável, e do CHOKE MANIFOLD (Figura 17). As informações contidas no PROKICK dizem respeito a considerações sobre equipamentos em lâmina de água profunda .

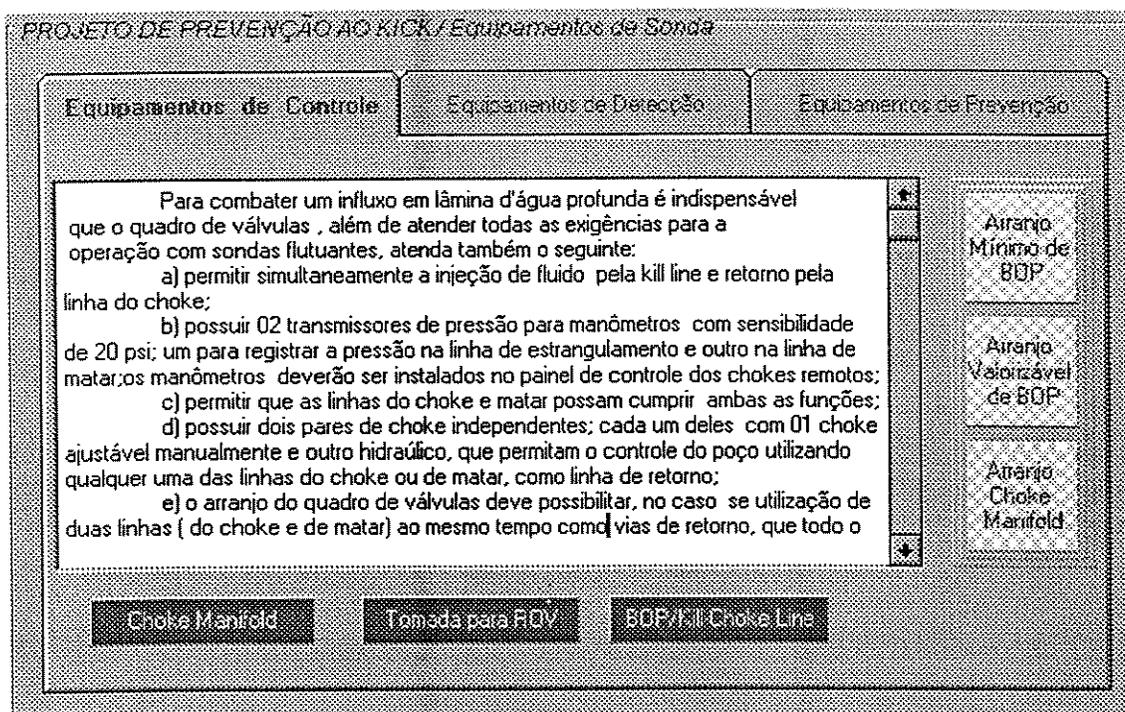


FIGURA 16: Interface para Funcionalidades de Equipamentos

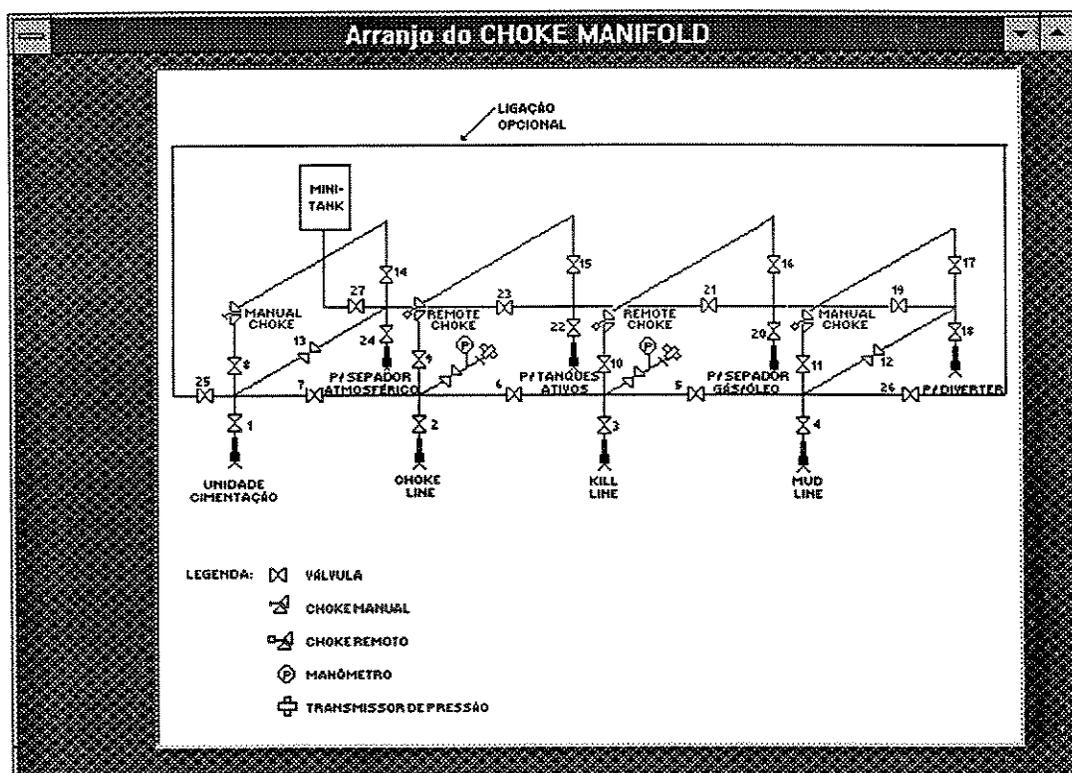


FIGURA 17: Interface com arranjo do choke em lâmina de água profunda

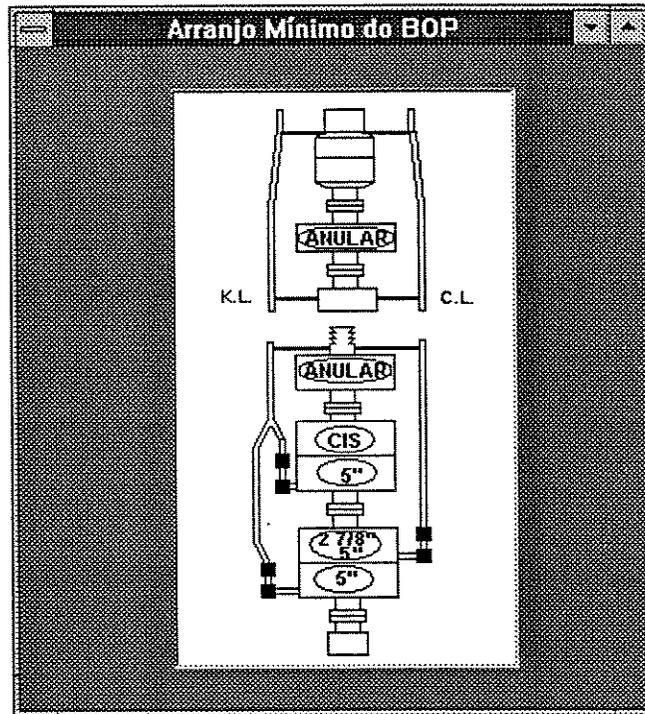


FIGURA 18: Interface para consulta de arranjo mínimo de BOP

No capítulo seguinte, apresenta-se um escopo mais detalhado de como estão disponibilizadas as informações referentes aos procedimentos, tanto de reentrada no poço ou fechamento, como também as interfaces para obter informações referentes ao pessoal da equipe, tanto a capacitação necessária a cada um da equipe, como sua atuação no instante da ocorrência KICK.

CAPÍTULO 5 - O PROCESSO DE CONTROLE DE POÇO E O PROKICK

Este capítulo tem o objetivo de focar a aplicação do PROKICK, do ponto de vista da evolução das tarefas que se desenvolvem nas etapas de prevenção, monitoramento e circulação, identificando que tipo de suporte e em que instante é dado suporte ao processo de controle de poço.

Um exemplo hipotético é apresentado neste capítulo para ilustrar a aplicação do PROKICK. Os dados foram obtidos a partir da Referência 16, e são os seguintes:

a) Dados para o projeto da fase 12 1/4"

- profundidade final da fase: 3300m
- pressão de poros esperada na profundidade final da fase: 9,5 lb/gal
- pressão de trabalho do BOP: 10000 psi
- lâmina de água: 1000m
- linha do choke: 4,5" x 3"
- riser: 21,25" x 19,75"
- sapata revestimento 13 3/8" (ID=12,415", N80, 68 lb/pé, RPI = 4930 psi):1800m
- poço: 12,25"
- viscosidade da lama: 15cp
- limite de escoamento da lama: 5 lbf/pe²

- velocidade máxima de retirada de coluna da coluna: 120 pés/s
- pressão de absorção na superfície : 857 psi
- BHA: 198 m de comandos (8"x2,813") e 113m de HWDP(5"x3")
- tubos de perfuração : 5"x4,276"

b) Informações no instante do kick

- profundidade do poço: 3049m
- volume de lama nos tanques: 1200 bbl
- bombas: A- 6,0 x 12,0; triplex; 0,10504 bbl/strk; 97% eficiência vol
- bombas: B- 6,0 x 12,0; triplex; 0,10504 bbl/strk; 97% eficiência vol
- pressões com vazões reduzidas, conforme Tabela 1:
- SIDPP: 580 psi
- SICP : 620 psi
- volume ganho 10 bbl

TABELA 1: Comportamento das Pressões X Vazões Reduzidas

vazões	100	150
PRC_r	288	512
ΔP_{cl}	90	160
ΔP_{cl+kl}	36	64
$\Delta P_{an,csq}$	0	0

A interface de apresentação do PROKICK é mostrada na Figura 19. Ao ativar cada uma dos contexto superiores aparecem os respectivos sub-módulos.

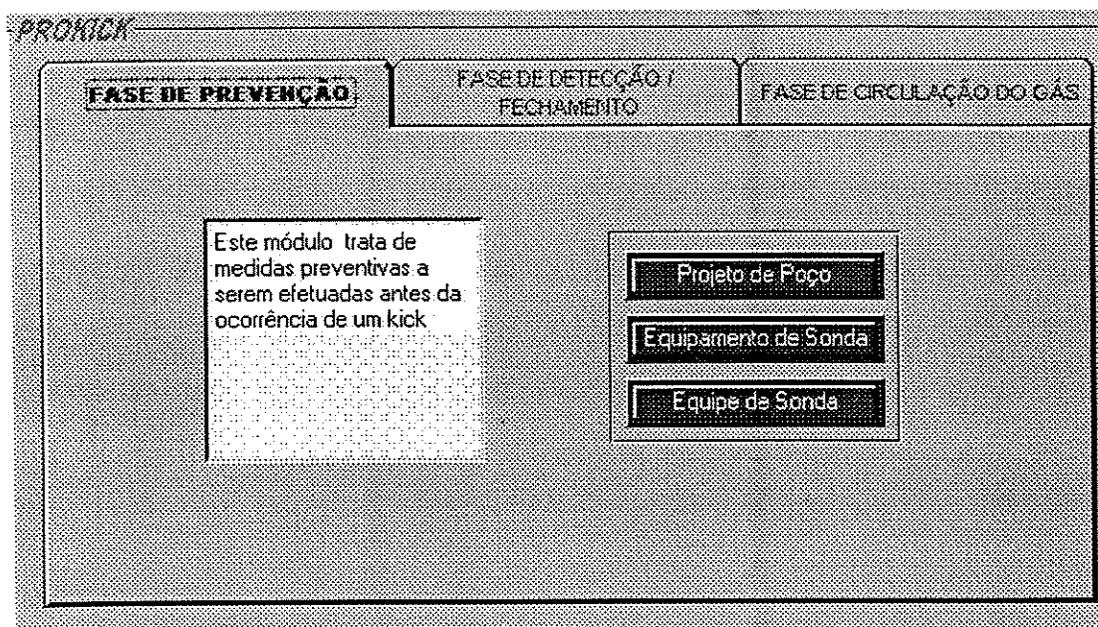


FIGURA 19 : Interface Principal -Módulo de PREVENÇÃO

Assim ao ativar o contexto de prevenção , o sistema exibirá os acessos aos sub-módulos . Ativando o sub-módulo projeto, o PROKICK apresenta a correspondente interface, cujo conteúdo está mostrado na Figura 20.

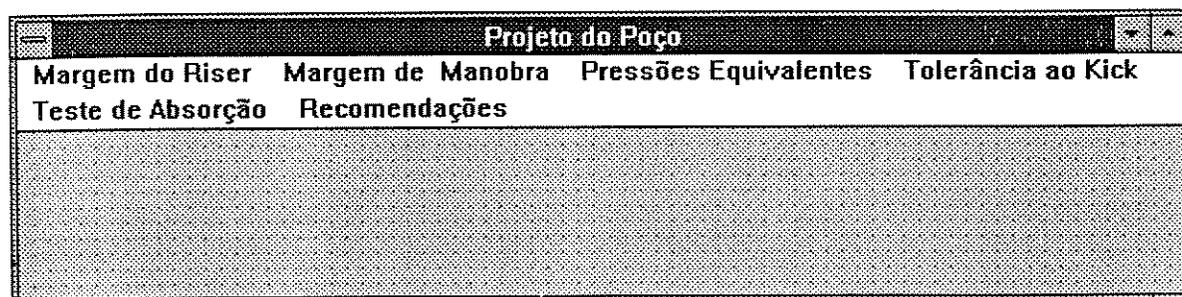


FIGURA 20: Interface sub-módulo PROJETO

Selecionando no menu principal o item de “Margem do Riser”, o sistema apresenta uma tela contendo os dados que são necessários ao cálculo deste parâmetro. A Figura 21 exibe dados de entrada para este exemplo, bem como o resultado do cálculo da margem do riser que é efetuado após ativação do botão “calcular”.

Dados de Entrada	
Espina d'água (m)	1000
profundidade do poço	3300
massa específica equivalente da pressão da formação (lb/gal)	9.5

Calcular

Resultado	
margem de segurança do riser (lb/gal)	0.4

FIGURA 21: Interface para cálculo da Margem do Riser

Da mesma maneira, nesta fase de projeto são relevantes os cálculos da margem de segurança de manobra cuja interface é mostrada na Figura 22.

Margem de Segurança de Manobra

Dados de Entrada

limite de escoamento	5
comprimento da tubulação	3300
viscosidade plástica	15
velocidade de retirada	120
diâmetro do poço	12.25
diâmetro externo tubulação	5

Calcular

Resultado

Margem de Segurança de Manobra

0.155

FIGURA 22: Interface para cálculo da Margem de Manobra

Com base na pressão de poros prevista (dado de entrada no sistema) e a margem de segurança do riser calcula-se o peso de lama estimado para a fase. Com este peso de lama, a pressão de absorção e profundidade da sapata calcula-se, também a pressão de fratura estimada. Ambos os cálculos peso de lama da fase e pressão de fratura estimada são obtidos do PROKICK através da interface “Pressões Equivalentes”, ilustrada na Figura 23.

Pressões Equivalentes

Dados de Entrada

pressão de poços esparada (lb/gal)

margem de segurança (lb/gal)

Resultado

Peso de Lama da Fase (lb/gal)

Dados de Entrada

pressão de absorção na superfície (psi)

peso de lama da fase (lb/gal)

profundidade da sapata do revestimento

Resultado

Pressão de Fratura (lb/gal)

FIGURA 23: Interface para Cálculo de Pressões

Com a pressão de fratura estimada e os demais dados de entrada exibidos na Figura 24, obtém a tolerância ao kick no fechamento do poço ao ativar o botão calcular. Foi assumida uma altura máxima de KICK de 150 metros e uma massa específica de gás de 2lb/gal.

Dados de Entrada:		Resultados:	
gradiente da fratura	12.7	Calcular	
profundidade do poço	3300		
profundidade do gradiente fratura	1800	densidade da mistura	2
peso da lama	9.9		
altura do kick	150	Tolerância ao Kick/Fechamento	11.1
densidade do fluido invasor	2		
Ziludo invasor na zona invadida	100		

FIGURA 24: Interface para cálculo da Tolerância ao KICK

Complementando o suporte à fase de projeto do ponto de vista de controle do poço, o PROKICK emite relatório impresso com recomendações sobre o poço (Anexo 1), mensagem de aviso como a ilustrada na Figura 25 e interface para dados de teste de absorção.

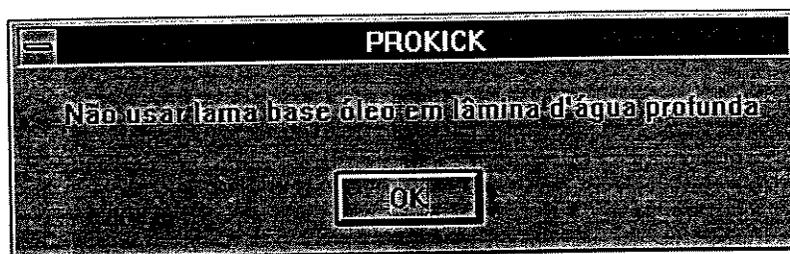


FIGURA 25: Recomendação no sub-módulo PROJETO

Ainda dentro do Módulo de Prevenção, o PROKICK apresenta uma interface para o sub-módulo de equipamentos, que é acessada a partir da Interface Principal (Figura 19). Neste sub-módulo, conforme referido no Item 3.1.1, acessam-se informações sobre equipamentos de controle, de detecção e de prevenção. Para selecionar o contexto de equipamentos a ser consultado, ativa-se um dos três escopos, quando aparece uma janela contendo um cursor lateral com as respectivas informações e procedimentos, conforme mostrado na Figura 26. Na parte inferior da janela sob consulta, sub-contextos também são definidos a fim de agilizar o acesso a informação. Nos equipamentos de controle, existe a opção de acessar arranjos mínimo e valorizável, além de sugestão de configuração do CHOKE MANIFOLD, conforme mostrado nas Figuras 16, 17 e 18 do capítulo anterior.

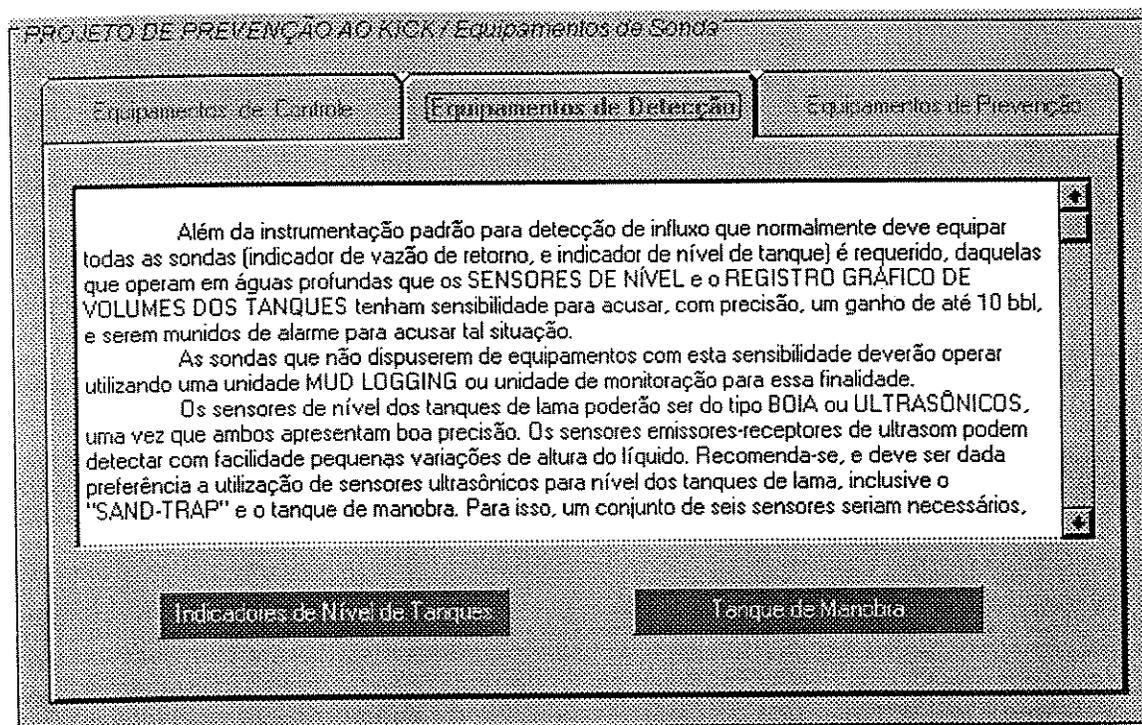


FIGURA 26: Interface para recomendações sobre equipamentos

Um terceiro contexto, dentro do Módulo de Prevenção, apoia uma análise preventiva da equipe envolvida com as operações de controle de poço, quanto à sua qualificação, cujas informações foram agrupadas no sub-módulo Equipe de Sonda. O tipo de interface construída, é semelhante à do sub-módulo de equipamentos, bem como o acesso a partir da Interface Principal, como mostrada na Figura 27. Os contextos superiores englobam as categorias de profissionais, e os sub-contextos os conhecimentos mínimos, requisitos para certificação, forma de treinamento e frequência. À esquerda da interface, são exibidas caixas de acesso “TESTE BÁSICO” e “TREINAMENTO EM COMPUTADOR”, que não têm o conteúdo implementado, constituindo-se apenas uma sugestão para futuro desenvolvimento.

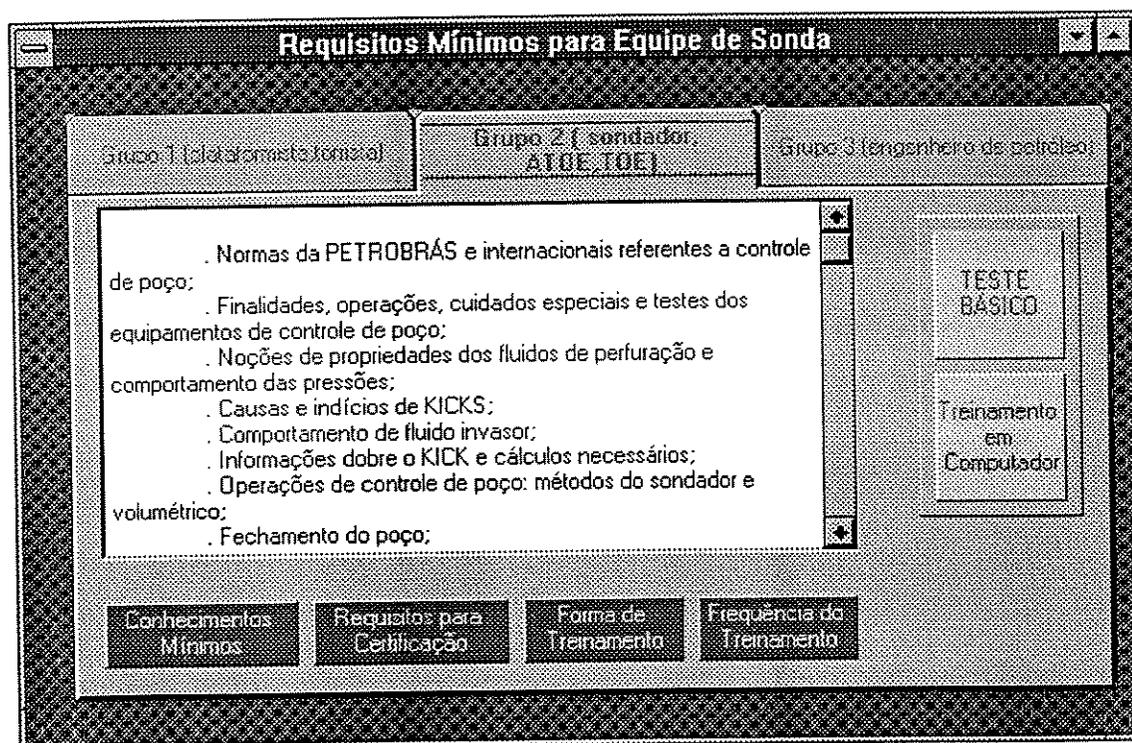


FIGURA 27: Interface para acesso ao sub-módulo de EQUIPE DE SONDA

A esta altura do processo, tanto o engenheiro de poço, como o engenheiro de projeto e o engenheiro de sonda, já podem visualizar claramente as interfaces na área de prevenção existentes entre suas atividades, o que permite ações mais adequadamente coordenadas. Por outro lado, a ausência de conhecimento específico dentro destes contextos, permite que qualquer um destes três profissionais, rápida e objetivamente aumente seu aprendizado sobre as demais áreas. Isto é, imagina-se que por um motivo qualquer, torne-se necessário calcular a margem de manobra. Prontamente, utilizando o PROKICK, o engenheiro de campo poderá fazê-lo, com razoável grau de certeza, minimizando portanto, as consequências negativas de qualquer simplificação.

Dando seqüência ao processo, o módulo Monitor do PROKICK, apoia as tarefas durante a detecção e fechamento do poço. Este módulo é acessado também a partir da Interface Principal e quando ativado apresenta os sub-módulos de Teste de Equipe, Detecção do KICK e Fechamento de Poço, conforme a Figura 28.

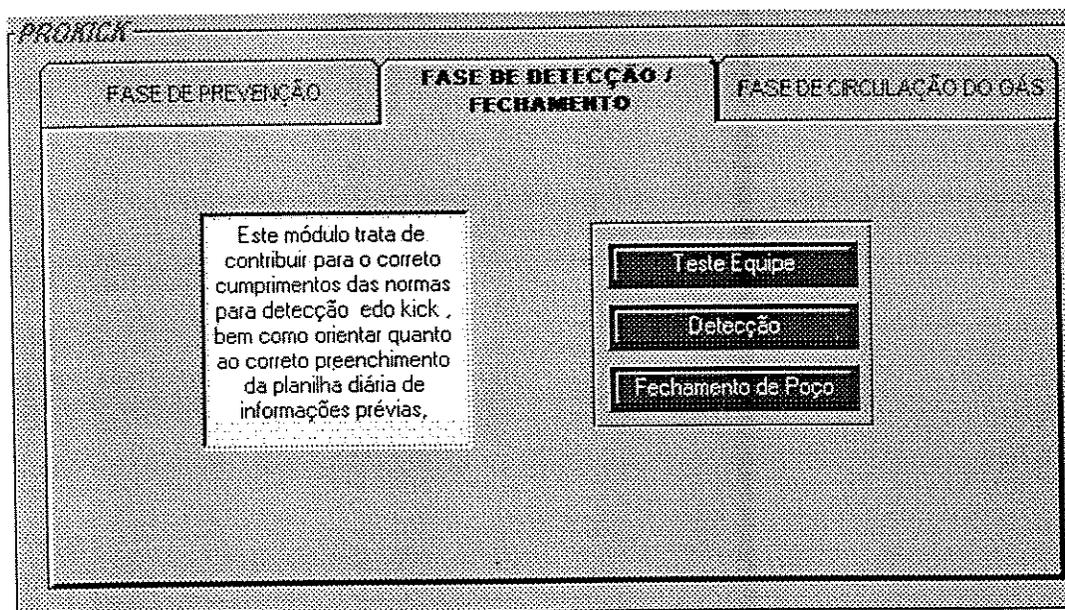


FIGURA 28: Interface Principal para o módulo MONITOR

Ao ativar o sub-módulo Teste de Equipe, o sistema apresenta uma interface com contextos das operações, colocada na parte superior, conforme mostrado na Figura 29. Ao ativar cada um dos contextos, e usando o SCROLL lateral pode-se acessar os respectivos procedimentos de testes da equipe de sonda, para as operações de manobra e perfuração. Um contexto introdutório é disponibilizado com informações sobre a periodicidade dos testes e orientações gerais.

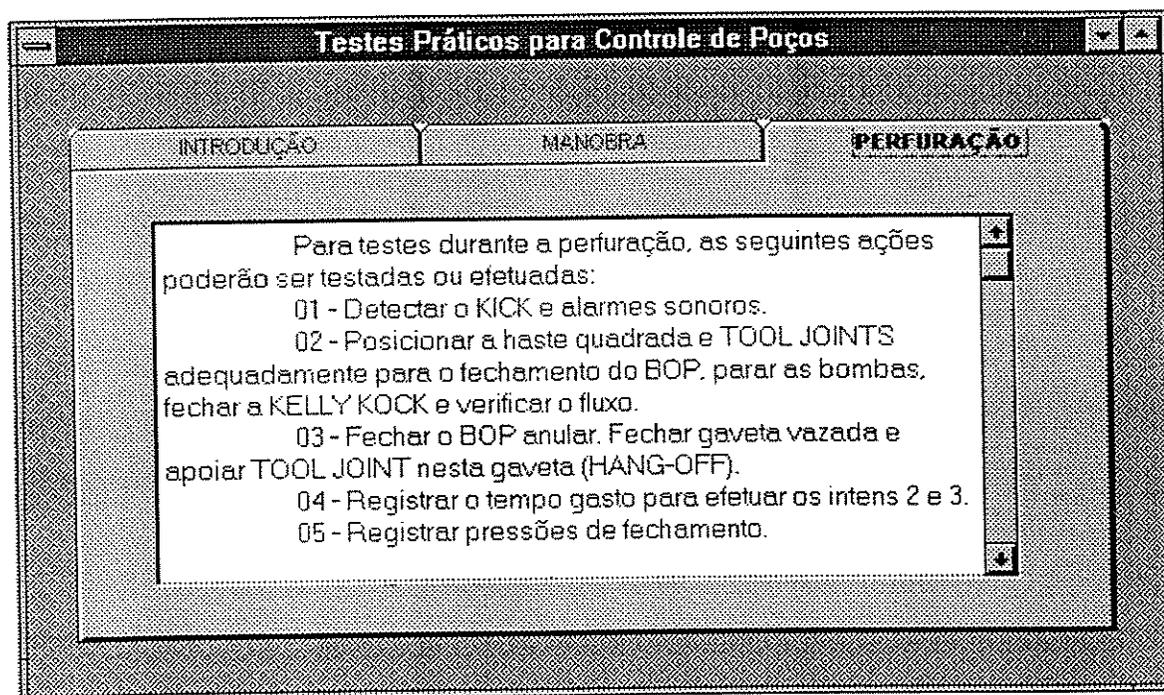


FIGURA 29: Interface para o sub-módulo TESTE DE EQUIPE

Ao ativar o sub-módulo de Detecção, acessa-se um sistema especialista para detecção de anormalidades operacionais, cujas características foram descritas no Item 3.2. Através da Interface Principal acessa-se o menu da SHELL NEXPERT. A partir deste menu, mostrado na Figura 30, carrega-se a base de conhecimentos de detecção, e inicia-se a consulta, conforme exemplificado anteriormente no Item 4.3.

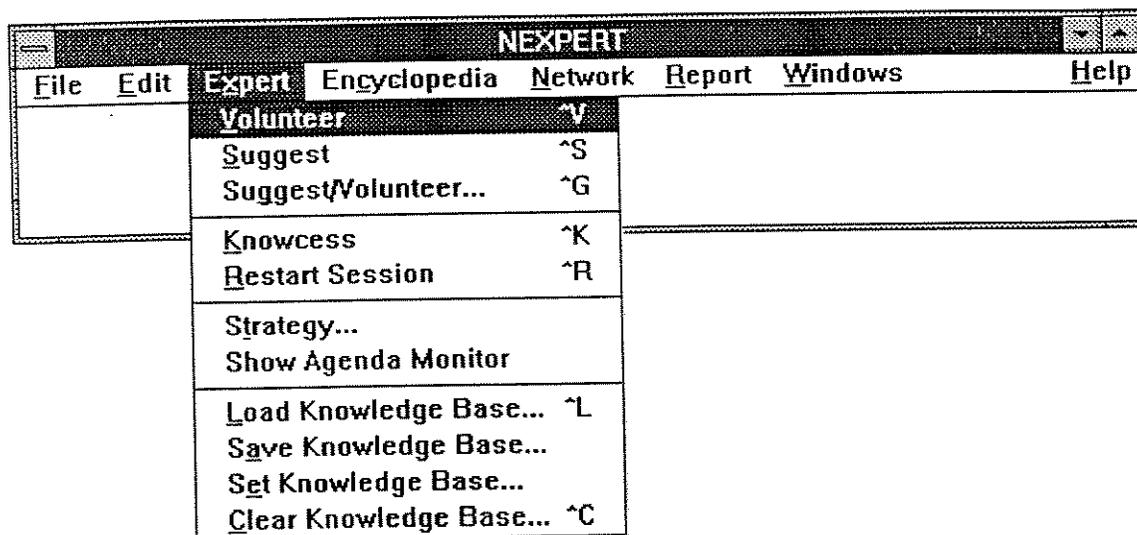


FIGURA 30: Interface da SHELL NEXPERT

A interface é interativa, conforme mostrado na Figura 15, onde o sistema efetua perguntas e apresenta opções para resposta, a partir do que gera novas perguntas, até o ponto de chegar a uma conclusão ou não. É importante observar que, uma consulta ao sistema poderá terminar sem uma conclusão prática, dependendo das respostas do usuário. Quando a consulta resulta no diagnóstico de um KICK, o PROKICK indica os procedimentos de fechamento. Por outro lado, tais procedimentos podem ser mais detalhadamente obtidos no sub-módulo de Fechamento do Poço, cujo interface é exibida na Figura 31.

Os contextos de fechamento e reentrada por sua vez, quando ativados conduzem rapidamente a sub-contextos associados à operação em curso, permitindo um rápido acesso a procedimentos operacionais detalhados, conforme mostrado no Anexo 2.

Desta maneira, as tarefas associadas ao módulo Monitor, que terminam no fechamento do poço, dão vez àquelas tarefas mais críticas no controle de poço, que são a circulação do gás e injeção de lama nova.

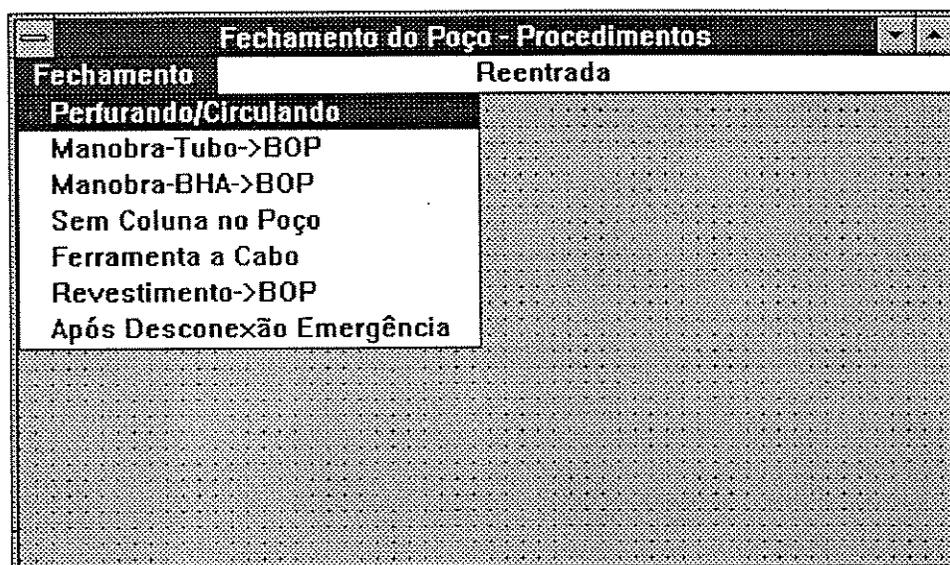


FIGURA 31 : Interface para o sub-módulo de FECHAMENTO

O sistema PROKICK disponibiliza o Módulo Circulação, ativado a partir da Interface Principal, composto dos sub-módulos de Planejamento, Planilha de Controle, Previsão de Pressões e o sub-módulo de Tratamento de Problemas, conforme exibido na Figura 32.

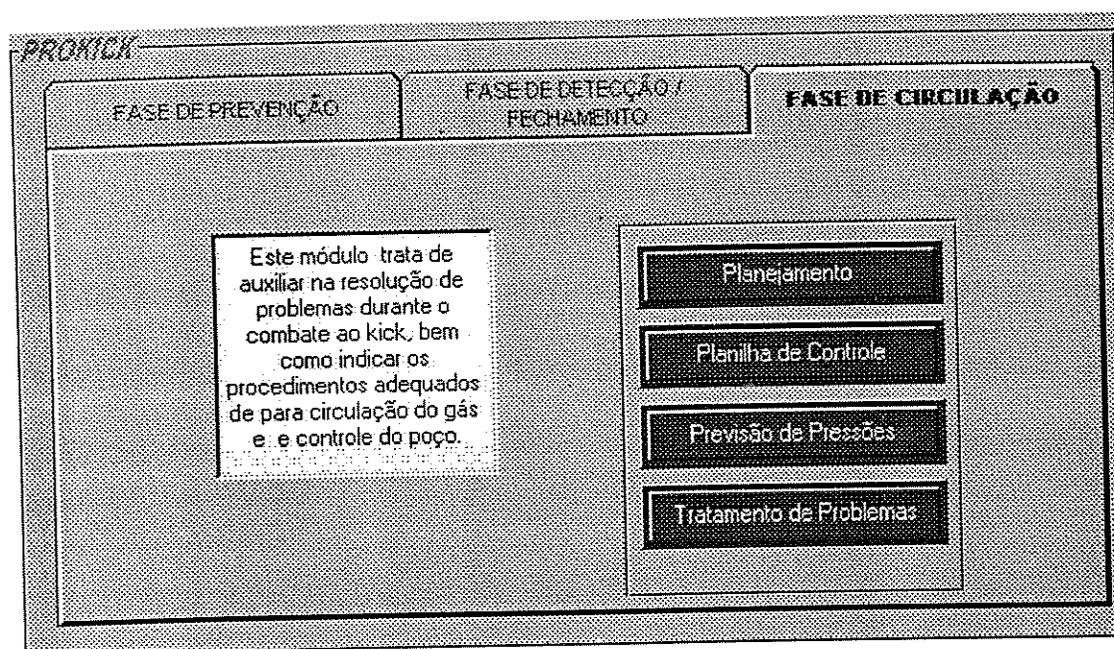


FIGURA 32: Interface Principal do módulo CIRCULAÇÃO

O sub-módulo de Planejamento, cuja interface principal é apresentada na Figura 33, introduz um vínculo entre os aspectos técnicos, propriamente dito, e os aspectos operacionais, detalhes pouco explorados nos trabalhos desta natureza, mas de grande relevância no processo de coordenação e no desempenho global do processo.



FIGURA 33: Interface do sub-módulo de PLANEJAMENTO

Assim sendo, no contexto de Atribuições, são exibidas as responsabilidades da equipe de sonda, conforme apresentado no Anexo 3. O conteúdo do contexto de comunicações não foi implementado, ficando apenas a sugestão para trabalhos futuros, em virtude de sua complexidade. No contexto de Procedimentos, são apresentados os procedimentos de controle da circulação de uma forma geral, diferentemente daqueles apresentados no sub-módulo Planilha Eletrônica, onde é apresentado um relatório específico para cada caso, no que diz respeito às variáveis da circulação.

O sub-módulo de Planilha Eletrônica, mecaniza o mais tradicional, e largamente aplicado, instrumento de controle de poço. A ótica apresentada enfoca os passos relativos a águas profundas. Quando ativado a partir da Interface Principal, exibida em cascata as tabelas de entrada de dados, conforme mostrado anteriormente na Figura 9. As tabelas estão numeradas de 1 a 7, e são maximizadas para utilização ativando-se na barra de ferramentas a tabela correspondente. Deste modo, ao ativar TAB*1, maximiza-se a janela correspondente aos Dados Gerais, cujo escopo é exibido na Figura 34. Todos os campos

devem ser preenchidos ou confirmados, quando corresponderem a dados de provenientes de entrada de dados anteriores. Uma vez que a tabela TAB*1, esteja preenchida, deve-se selecionar a tabela de Máximas Pressões Estáticas - TAB*2. Quando maximizada, à esquerda da janela possui um comando “calcular” que quando ativado efetua os cálculos para preenchimento dos campos por ela exibidos.

Planilha de Controle de Poços - [TAB*1-Dados Gerais]

Entrada de Dados Relatórios Sair

TAB*1	TAB*2	TAB*3	TAB*4	TAB*5	TAB*6	TAB*7
Distância Mesa Rotativa Fundo do Mar (D _{mf})	1000	m	Profundidade Vertical do Poço (D _v)	3300	m	
Massa Específica da Lama (P _m)	9,9	lb/gal	Profundidade Vertical da Sapata (D _{cs,v})	1800	m	
Massa Específica Equival. Absorção (P _r)	12,7	lb/gal	Pressão de Teste do BOP (P _{BOP})	10000	psi	
Resistência a Pressão Interna Revest. (P _{i,esq})	4930	psi				

FIGURA 34: Planilha de Controle - DADOS GERAIS

A Figura 35 exhibe TAB*2, já preenchida com os resultados dos dados calculados para as entradas de TAB*1.

Planilha de Controle de Poços - [TAB*2-Máximas Pressões Estáticas]

Entrada de Dados Relatórios Sair

TAB*1 TAB*2 TAB*3 TAB*4 TAB*5 TAB*6 TAB*7

calcular

Pressão Máxima Baseada na Sapata ($P_{max, st, f}$)	856,8	psi	Pressão Máx. ($P_{max, st, csg} = \min(P_{max, st, csg}; P_{max, st, BOP}$)	8317	psi
Pressão Máx. Prev $P_{max, st, csg} = (0,8 \cdot P_{ics}) - 0,17 \cdot P_{mDrm}$	2261	psi	Pressão Máx. ($P_{max, st, csg} = \min(P_{max, st, csg}; P_{max, st, BOP}$)	2261	psi

FIGURA 35: Planilha de Controle - MÁXIMAS PRESSÕES ESTÁTICAS

Na seqüência ao ser ativada a tabela de Capacidades/Comprimentos/Volumes - TAB*3 -, mostrada na Figura 36, solicita-se que sejam alimentados dados relativos aos diâmetros da coluna e os respectivos comprimentos. À medida que vão sendo preenchidos os campos o sistema vai calculando e exibindo nas células as capacidades e volumes, correspondentes à composição da coluna.

Planilha de Controle de Poços - [TAB*3-Capacidades/Comprimentos/Volumes]						
Entrada de Dados		Relatórios		Sair		
TAB*1	TAB*2	TAB*3	TAB*4	TAB*5	TAB*6	TAB*7
Interior	d1[poç]	d2[poç]	d3[poç]	Cv[bbt/m]	L[m]	V[bbt]
DP	4,276	5		0,0583265	2736	159,58136
HW	3	5		0,02871	113	3,24423
DC1	2,813	8		0,0252423	198	4,9979894
DC2	0	0		0	0	0
DC3	0	0		0	0	0
Total Interior						167,82358
Liner			0	0	0	0
Poço			12,25	0,4786393	1249	597,89551
Revest.			12,415	0,4916817	800	393,34543
Riser(t)			19,75	1,2440993	1000	1244,2993
Choke (cl)	3			0,02871	1000	28,71

Anulares

FIGURA 36: Planilha de Controle - CAPACIDADES/COMPRIMENTOS/VOLUMES

Ao completar os cálculos relativos ao interior da coluna, o comando “anulares” deve ser ativado, quando aparecerá a interface exibida na Figura 37.

Tabela dos Anulares

Anular	Cv. a (bbl/m)	L (m)	Va (bbl)
Poço DC3	0,4786993	0	0
Poço DC2	0,4786993	0	0
Poço DC1	0,2745393	198	54,358796
Poço HW	0,3989493	113	45,081273
Poço DP	0,3989493	938	374,21451
Total Poço			473,65458
Revest. DC1	0,2875217	0	0
Revest. HW	0,4119317	0	0
Revest. DP	0,4119317	800	329,54543
Total Rev			329,54543
Riser DP	1,1645493	1000	1164,5493

FIGURA 37: Planilha de Controle - Interface auxiliar

Ativando-se o comando “calcular”, são preenchidos os campos de capacidade dos anulares e confirmando os comprimentos com a tecla “TAB”, os volumes são calculados e somados, conforme mostra a Figura 37.

Planilha de Controle de Poços - [TAB*4-Dados das Bombas]						
Entrada de Dados Relatórios Sair						
TAB*1	TAB*2	TAB*3	TAB*4	TAB*5	TAB*6	TAB*7
Dados da Bomba			(bbl/st)*Ef.	Velocidade (spm)		
	pd(bbl/st)	Eficiência	pd(vol/stk)	→ 100 gpm	→ 150 gpm	
Bomba 1	0,10504	0,97	0,1018888	23,368146	35,052219	
Bomba 2	0,10504	0,97	0,1018888	23,368146	35,052219	
Bomba 3	0,10504	0,97	0,1018888	23,368146	35,052219	

Pressões com Vazões Reduzidas				
Vazão(gpm)	PRCr	DPeI	DPeII	DPan.csg
100	233	90	36	0
150	312	160	64	0

FIGURA 38: Planilha de Controle - DADOS DE BOMBAS

Ativando o comando “retornar”, a tabela de anulares é fechada e conclui-se o preenchimento de TAB*3. A TAB*4 - Dados das Bombas - exibida na Figura 38, solicita o preenchimento dos relativos a bombas e pressões nas vazões reduzidas. Os dados referentes a cálculo de volume e strokes - TAB*5 - são exibidos na Figura 38. Ativando o comando “calcular”, todos os campos são preenchidos com os resultados, obtidos a partir dos quadros anteriores, exceto o campo volume dos tanques , que deverá ser alimentado.

Planilha de Controle de Poços - [TAB*5-Volumes e Strokes]

Entrada de Dados Relatórios Sair

TAB*1 TAB*2 TAB*3 TAB*4 TAB*5 TAB*6 TAB*7

Calcular

	Vol. (bl)	Strokes = Vol/Vma	
Inferior = Total Interior	167,82358	1647,1249	stk
Da Broca até Sapata = Total Anular Poço	473,55458	4648,7404	stk
Broca até BOP = Total Anular Poço + Revestimento	803,20002	7883,1042	stk
Broca até Superfície (RS) = Broca até BOP + V _{ar}	1967,7494	19312,715	stk
Broca até Superfície (CL) = Broca até BOP + V _{i,ci}	831,91002	8164,8819	stk
Broca até Superfície (CL k) = Broca até BOP + 2*V _{id} + V _{ir}	860,62002	8446,6597	stk
Total no Poço = Interior + Broca-BOP = 2*V _{i,ci} + V _{ir}	2272,7429	22306,112	stk
Total nos Tanques = soma dos volumes nos tanques	1200		
Total do Sistema = Total no Poço + Total no Tanques	3472,7429		

FIGURA 39: Planilha de Controle - VOLUMES & STROKES

A tarefa de elaboração da Planilha de Controle prossegue com, o cálculo das Pressões Máximas Dinâmicas - TAB*6 - que são obtidas a partir da ativação do comando “calcular”, conforme mostrado na Figura 40.

Planilha de Controle de Poços - [TAB*6-Pressões Máximas Dinâmicas]

Entrada de Dados Relatórios Sair

TAB*1 TAB*2 TAB*3 TAB*4 TAB*5 TAB*6 TAB*7

Calcular

	Kick Antes Sapata (psi)		Kick Após Sapata (psi)	
Manômetro do kill	= P max.st.f	856,8	= P max.st.eq	2261
Manômetro do Choke	= P max.st.f - DPcd	766,3	= P max.st.eq - DPcd	2171
Manômetro da Bomba			= P max.st.f + PRCr-DPan.csg	1144,8

perda de carga anular x revestimento : poços de diametro >9" =zero , de 7" a 9" = 5 psi/m, <7" calcular

FIGURA 40 : Planilha de Controle - PRESSÕES MÁXIMAS DINÂMICAS

A última tabela contém Dados para Controle do KICK - TAB*7 - e solicita o preenchimento dos quadros da coluna esquerda e, à medida que vão sendo completados os campos da coluna direita, vão sendo calculados e exibidos, sendo o resultado final apresentado como mostrado na Figura 41.

Planilha de Controle de Poços - [TAB*7-Dados para o Controle do Kick]					
Entrada de Dados		Relatórios		Sair	
TAB*1	TAB*2	TAB*3	TAB*4	TAB*5	TAB*6
Vazão	100	gpm	PIC = SIDPP + PRCr	868	psi
SIDPP	580	psi	Densidade Lama Nova	11.018378	lb/gal
SICP	620	psi	PFC1 = PRCr* LN/LO	320.55209	psi
Volume do Kick	10	bbt	PFC2 = PFC1 + DPcd*LN/LO	420.72462	psi
Massa Específica do Kick	3.4	lb/gal	Baritina Adicional para Controle	235215	lbs
			Aumento do Volume devido Baritina	156.81	bbt

FIGURA 41: Planilha de Controle - DADOS PARA CONTROLE DO KICK

Uma vez completados todas as tabelas, ativando-se a opção de “relatórios” o sistema emite um relatório com os procedimentos de circulação, com os valores calculados na planilha, conforme mostrado na Figura 42, além de alimentar o sub-módulo previsão de pressões com os dados da planilha.

Prokick - Relatório de Procedimentos

CONTROLE DO KICK - PROCEDIMENTOS DE CIRCULAÇÃO

1. Abra levemente o choke e simultaneamente ligue a bomba mantendo 620 PSI no manômetro da linha de matar, até estabelecer a velocidade reduzida de circulação em 23,36 SPM, quando a pressão inicial de circulação será a PIC = 868PSI.
2. Mantenha a PIC e a velocidade da bomba constantes até a circulação total do anular = 20095,43 STKS. Durante esta fase, observar a pressão apresentada pelo manômetro da linha de matar, que não deve ser superior a pressão de 856,8 PSI, até o gás passar pela sapata = 4648,74 STKS; depois, a pressão na linha de matar não deve ultrapassar 2261 PSI, até o gás entrar na linha do choke = 7883,10 STKS.
3. Observar o momento em que o gás entra na linha do choke, que é indicado por flutuações no manômetro na linha de matar. A partir deste instante, ficar alerta para possíveis ajustes rápidos no choke, ou mesmo circular pelas linhas de choke e de matar em paralelo, até que todo o gás seja removido do sistema.
4. Neste instante, parar circulação e, mantendo o poço fechado ler as pressões de fechamento, que devem ser iguais a SIDPP = 580 PSI. Se não forem retornar ao item a.
5. Zerar o contador de strokes e repetir o item a injetando fluido novo até a velocidade de circulação seja estabelecida, quando a pressão de circulação será PIC
6. Manter a pressão no manômetro da linha de matar igual a SIDPP= 580 PSI, como consequência, a pressão de circulação cairá de PIC para PFC1= 320,55 PSI, quando a lama nova atingir a broca.
7. Manter a pressão de circulação igual a PFC1= 320,55 PSI, até que a pressão no choke caia a zero com o choke totalmente aberto. A partir deste momento, a pressão de circulação subirá naturalmente até atingir a broca.
8. Continuar com o bombeio até que o fluido atinja a superfície. Parar a circulação e fechar o poço. Ler as pressões de fechamento que devem ser iguais a zero. Assim, fazer o procedimento para a retirada do gás trapeado, abrir o poço e adicionar a margem de segurança da manobra
9. Se as pressões de fechamento for zero apenas na bomba, circular o volume do anular com PFC2= 420,72 PSI. caso contrário retornar ao item a, com os novos valores de SIDPP e SICP.

FIGURA 42: Planilha de Controle - Relatório PROCEDIMENTOS DE CONTROLE

O sub-módulo de Previsão de Pressões, conforme descrito no item 4.1, apresenta saídas gráficas do comportamento das pressões em função do tempo e dos STROKES, conforme pode ser visto na Figura 43. As Figuras 44 , 45 , 46 e 47 mostram os gráficos de saída desta funcionalidade do PROKICK, para o exemplo em questão.

Primeira Circulação					Segunda Circulação				
strokes	pchoke	pcs	pdp	pwh	strokes	pchoke	pcs	pdp	pwh
249,89	563,73	3764,03	868,	2412,79	5764,29	420,	3620,31	813,24	2269,06
499,77	541,82	3742,12	868,	2390,88	6050,45	420,	3620,31	758,49	2269,06
749,66	545,79	3746,09	868,	2394,85	6336,61	420,	3620,31	703,73	2269,06
999,55	550,03	3750,33	868,	2399,09	6622,77	420,	3620,31	648,98	2269,06
1249,44	554,56	3754,87	868,	2403,62	6908,94	420,	3620,31	594,22	2269,06
1499,32	559,42	3759,73	868,	2408,48	7195,1	420,	3620,31	539,46	2269,06
1749,21	564,65	3764,95	868,	2413,71	7481,26	420,	3620,31	484,71	2269,06
1999,1	570,28	3770,59	868,	2419,34	7767,42	420,	3620,31	429,95	2269,06
2248,99	576,37	3776,67	868,	2425,43	8053,58	420,	3620,31	375,19	2269,06
2498,87	582,97	3783,28	868,	2432,03	8339,75	420,	3620,31	320,44	2269,06
2748,76	590,16	3771,52	868,	2439,22	8658,21	382,33	3582,64	320,44	2231,39
2998,65	598,01	3620,31	868,	2447,07	11314,86	182,43	3382,74	320,44	2031,49
3248,54	606,61	3620,31	868,	2455,67	13337,49	30,24	3382,74	320,44	1879,3
3498,42	616,1	3620,31	868,	2465,16	13407,25	.	3382,74	320,44	1879,3
3748,31	626,59	3620,31	868,	2475,65	13817,87	.	3738,78	498,46	2235,34
3998,2	638,28	3620,31	868,	2487,34					
4248,09	651,37	3620,31	868,	2500,42					
4497,97	666,12	3620,31	868,	2515,18					
5049,57	2235,58	3620,31	868,	2235,58					
4997,75	2269,06	3620,31	868,	2269,06					
5478,12	420,	3620,31	868,	2269,06					

Figura 43: Evolução das Pressões X Strokes

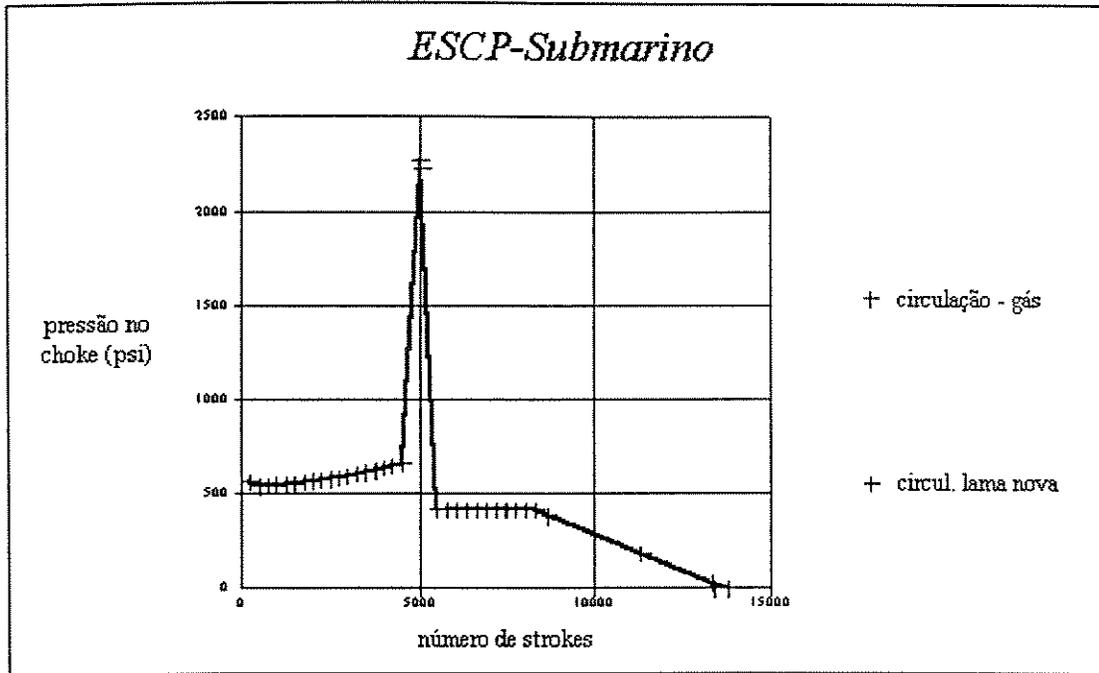


Figura 44: Comportamento da Pressão no Choke X Strokes

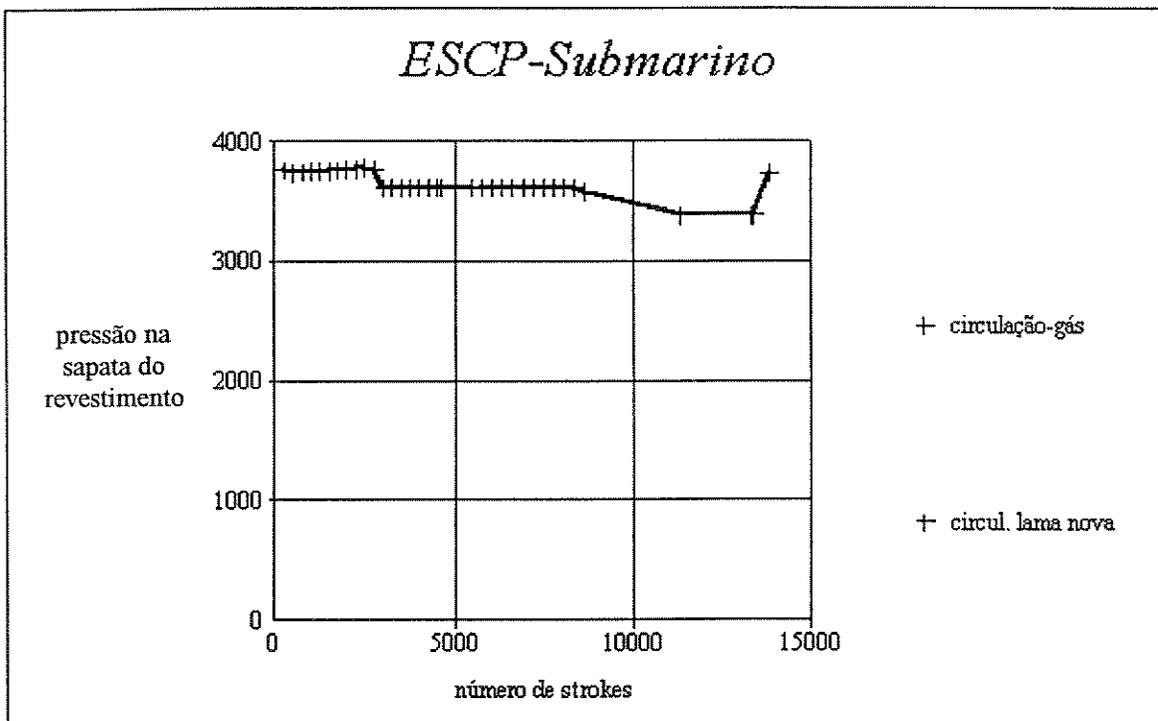


Figura 45: Comportamento da Pressão na Sapata do Revestimento X Strokes

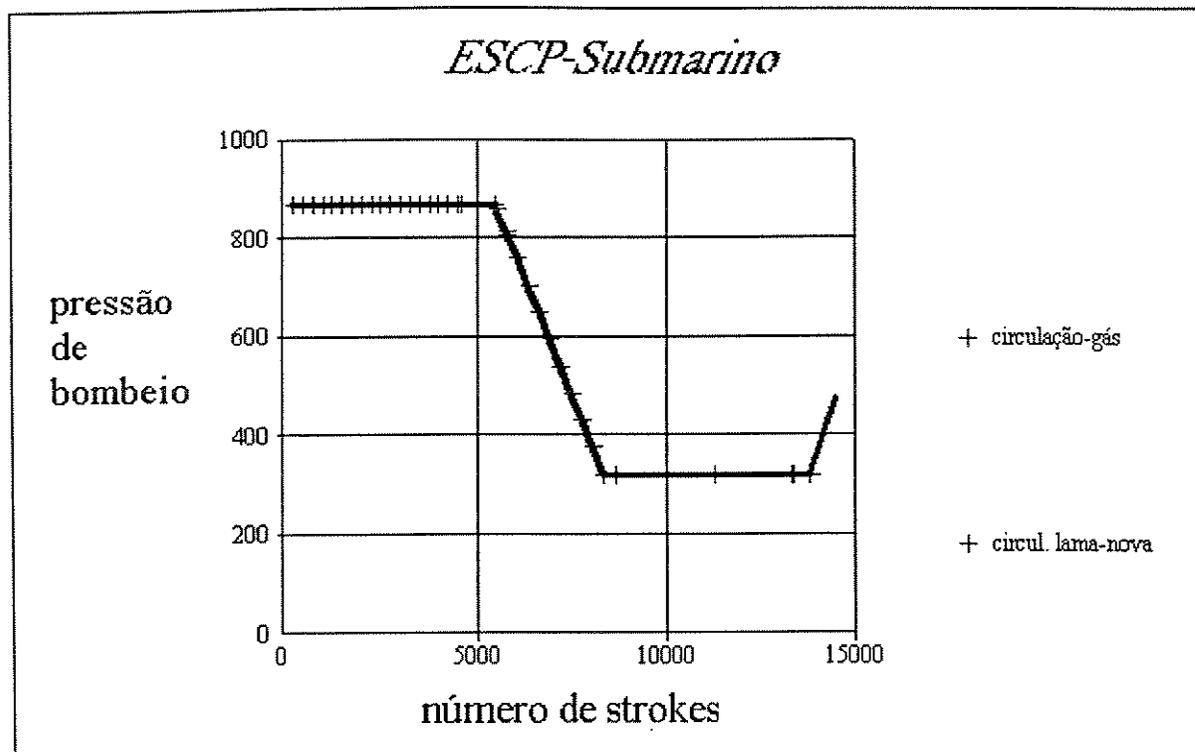


Figura 46: Comportamento da Pressão de Bombeio X Strokes

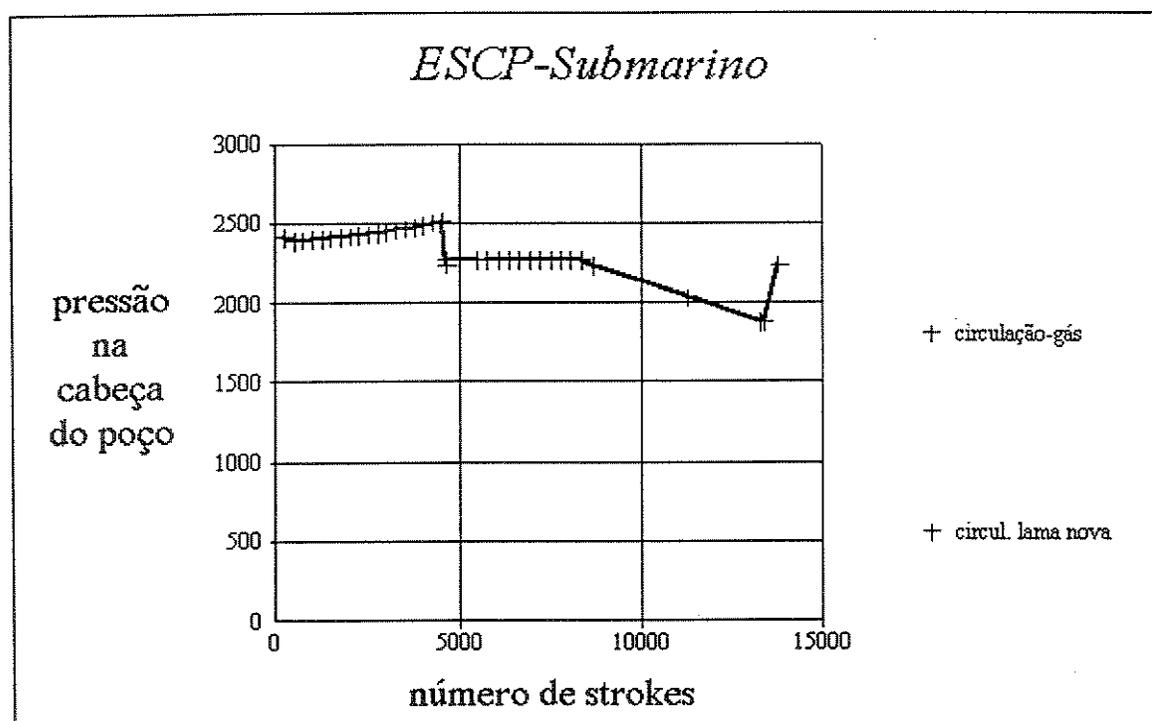


Figura 47: Comportamento da Pressão na Cabeça do Poço X Strokes

Por outro lado se, durante a circulação algum problema for observado, o submódulo de Tratamento de Problemas, pode ser ativado através da Interface Principal do PROKICK. Do mesmo que o sistema especialista anterior, a SHELL NEXPERT é chamada através de uma função do VISUAL BASIC (“shell”) [15], apresentando o menu , que permitirá carregar a base de conhecimento de problemas de circulação. Uma vez carregada a base de conhecimentos , inicia-se o processo de consulta, interagindo com o técnico através de perguntas e respostas, até que o sistema termine por apresentar um diagnóstico da anormalidade. As Figuras 48 a 54 ilustram as interações do sistema especialista de PROKICK com o usuário. Um vez terminada a consulta, retorna-se para a Interface Principal do PROKICK.

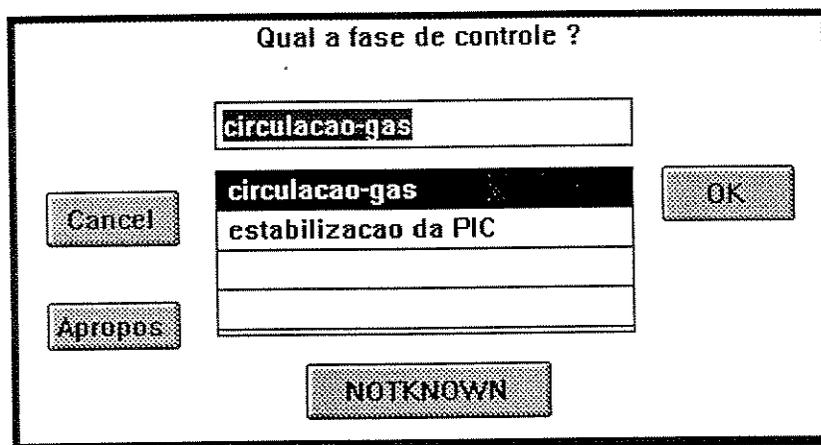


FIGURA 48: Interface do Sistema Especialista (Interação 1)

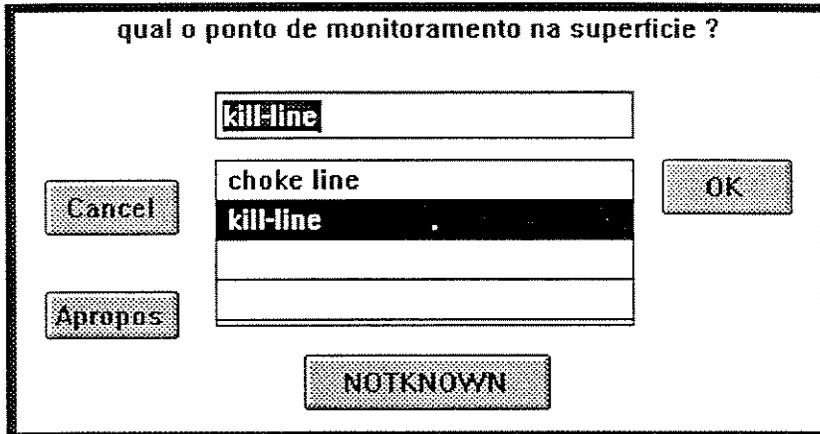


FIGURA 49: Interface do Sistema Especialista (Interação 2)

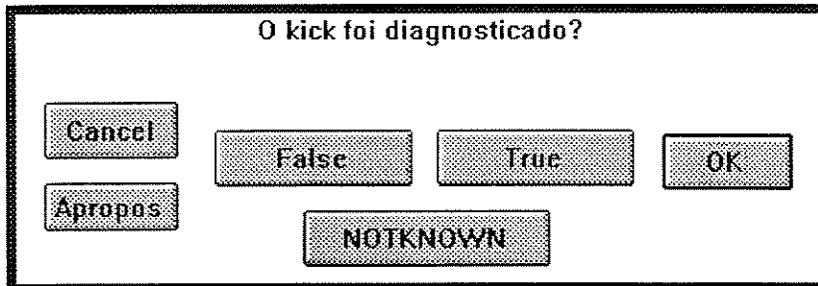


FIGURA 50: Interface do Sistema Especialista (Interação 3)

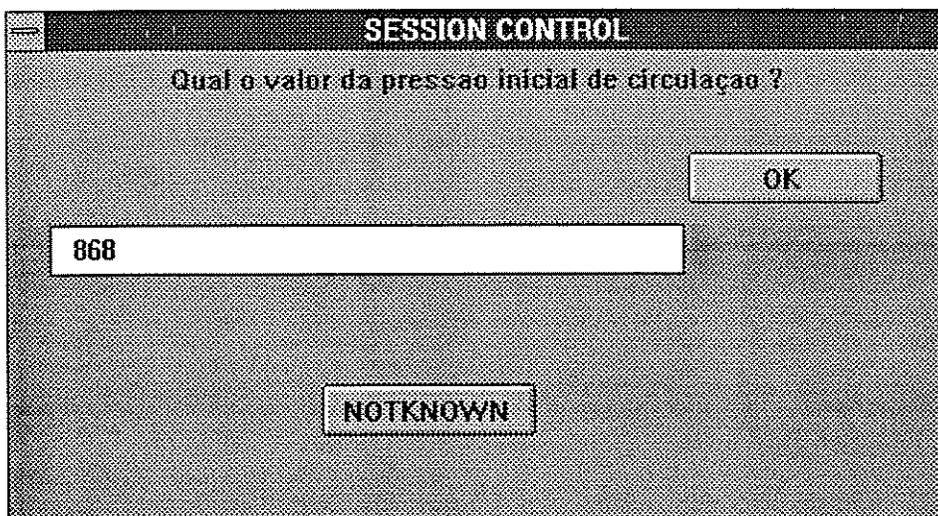


FIGURA 51: Interface do Sistema Especialista (Interação 4)

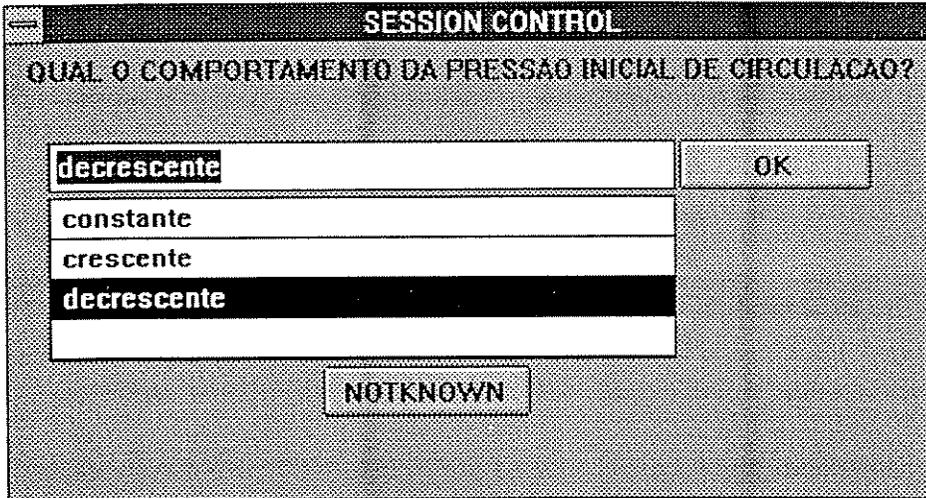


FIGURA 52: Interface do Sistema Especialista (Interação 5)

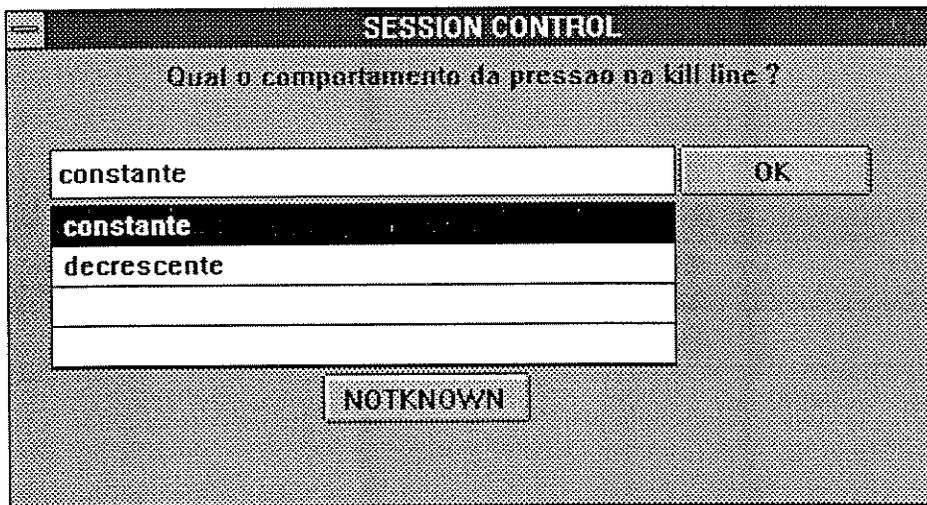


FIGURA 53: Interface do Sistema Especialista (Interação 6)

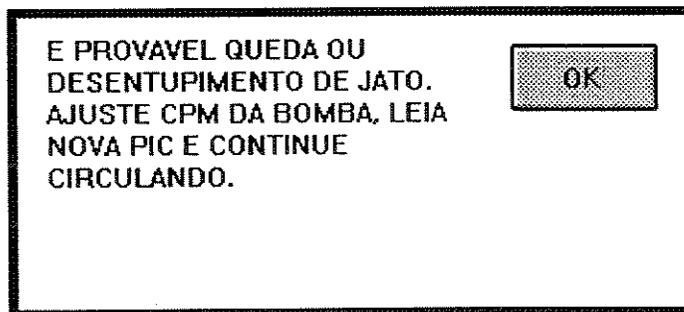


FIGURA 54: Interface do Sistema Especialista (Interação 7)

Dando seqüência ao exemplo, após o controle do poço, é possível utilizar o PROKICK para definir os novos parâmetros de perfuração até o final da fase de 12 1/4", que são:

a) Margem de Segurança do RISER: assumindo $D_w = 1000$ m, $D_v = 3300$ m e a nova massa específica equivalente de formação, que é 11 lb/gal , podemos calcular a nova margem de segurança do RISER cujo valor é 1,1 lb/gal ,utilizando novamente o sub-módulo PROJETO.

b) Peso de lama a ser usado para continuar perfurando a fase:

$$\rho_m = 11.0 + 1.1 = 12.1 \text{ lb/gal}$$

c) Margem de Segurança de Manobra : permanece a mesma no valor de 0.2 lb/gal

d) Tolerância ao KICK: assumindo-se uma altura máxima de KICK de 150 metros e uma massa específica do gás de 2 lb/gal , obtemos o valor de 12.0 lb/gal, utilizando como mostrado no início do capítulo o sub-módulo PROJETO.

Este valor indica ao engenheiro de campo que , se um KICK for tomado durante a perfuração até o final da fase devido ao aumento de pressão de poros, provavelmente haverá fratura da sapata quando o poço for fechado.

Desta forma encerra-se o exemplo de aplicação do PROKICK , passando por todas as etapas do processo de controle de poço e mostrando como o sistema foi concebido para interagir com os técnicos.

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O sistema desenvolvido (PROKICK) permitiu demonstrar a potencialidade da integração de conhecimento para filtrar dados monitorados úteis ao controle de poço com conhecimentos para resolver problemas e conhecimentos para planejar o comportamento das pressões.

Colocar o agente PROKICK na plataforma, com os conhecimentos acima descritos, permitirá aumentar a capacidade local de desempenho das tarefas de controle de poço. A dispersão geográfica e o regime de trabalho contínuo introduzem problemas de coordenação graves, dado que nem sempre aqueles agentes que dispõem do conhecimento necessário para realizar determinada tarefa podem estar disponíveis para executá-la. Desta maneira o processo de coordenação será otimizado desde um ponto de vista de minimizar os contatos, e os consequentes conflitos que daí podem surgir.

Por outro lado o PROKICK pode ter seu enfoque adaptado para uma poderosa ferramenta instrucional a fim de desenvolver uma visão integrada do processo de controle de poço, contribuindo de maneira significativa para elevar a capacidade técnica dos profissionais que atuam na área de perfuração. Sua aplicação torna-se particularmente relevante nos países de língua portuguesa.

Trabalhos posteriores poderão desenvolver a capacidade de comunicação do PROKICK, com outros sistemas, no sentido de criar um ambiente cooperativo para

tratamento de anormalidades operacionais. Sugere-se também o aperfeiçoamento das funções inteligentes introduzindo a aquisição de dados em tempo real .

BIBLIOGRAFIA

- 1- Programa de Segurança em Posicionamento Dinâmico. Relatório Interno Petrobrás, 1996.
- 2- LANDMARK CORPORATION: Manual do Usuário do WELL PLAN, Estados Unidos, 1996.
- 3- LEITÃO JÚNIOR, Hélio Caetano Frota : Método Rigoroso de Controle de KICK para Diversos Tipos de Poços, Tese de Mestrado, UNICAMP-SP, 1990.
- 4- SICHMAN, Jaime Simão et al.: "When can Knowledge-based System be called Agents?" XII Congresso da Sociedade Brasileira de Computação, 1992.
- 5- BOND, Alan H. & GASSER, Les: "Distributed Artificial Intelligence." Morgan Kaufmann Publishers, Inc., San Mateo, California, 1988.
- 6- ROCHA, Luís A.S. et al : Critério e Procedimentos para Assentamento de sapatas Baseada na Tolerância ao KICK, Relatório Interno, Petrobrás, 1994.
- 7- Programa de Segurança em Posicionamento Dinâmico. Relatório Interno Petrobrás, 1993.
- 8- FEIGENBAUM, E. et al : "The Handbook of Artificial Intelligence". Addison-Wesley, 1986
- 9- HARMON, Paul & KING, David : " Expert Systems - Artificial Intelligence in Business". Toronto, John Wiley & Sons, INC, 1985.
- 10- NEURON DATA CORPORATION: " User's Guide - NEXPERT OBJECT", United States, 1993
- 11- SOTOMAYOR, Gabriel P. G. & LOTT, Beatriz M. : Protótipo de um Sistema Especialista para Diagnóstico e Tratamento de Kicks durante a Perfuração de Poços de Petróleo. VIII Congresso Latino -Americano de Perfuração, Rio de Janeiro, Brasil, 1992.
- 12- SANTOS, Otto L.A. : "A Mathematical Model of a Gas Kick when Drilling in Deep Waters", Tese de Mestrado, Colorado School of Mines, Colorado , 1982.
- 13- NEGRÃO, Álvaro F. : Controle de Kicks em Águas Profundas. Tese de Mestrado, UNICAMP-SP, 1989.

- 14- LAGE, Antônio Carlos V. M.: Simulação do Controle de Poços de Petróleo em Erupção. Tese de Mestrado, PUC-RJ, 1990.
- 15- MICROSOFT CORPORATION: "Language Reference" - Microsoft Press, United States, 1995.
- 16- SANTOS, Otto L.A.: Controle de Kicks em Unidades Flutuantes -Petrobrás / CEN-NOR, 1997.

ANEXO 1: RELATÓRIO DO PROKICK SOBRE O POÇO PILOTO

Poço Piloto

O poço piloto tem por finalidade verificar a existência de acumulação de gás em formações superficiais permeáveis. A sua ocorrência tem sido verificada principalmente em falhas de origem profunda.

O poço piloto deverá ter diâmetro de 8 1/5" e ser perfurado até a profundidade estabelecida para o assentamento da sapata do revestimento de 20" acrescida de um fator de segurança em função de uma possível inclinação do poço. Caso existam na área falhas geológicas verticais previstas para a fase de 17 1/2", o poço piloto deverá ser perfurado até a profundidade das formações que estejam em contato com estas falhas.

Portanto, a execução do poço piloto será definida no programa de perfuração em função do grau de conhecimento da área e da ocorrência de falhas.

Na perfuração do poço piloto deverá ser utilizada uma "FLOAT VALVE" imediatamente acima da broca, a qual tem por objetivo evitar qualquer possibilidade de entrada de gás pelo interior da coluna. Uma válvula de segurança de coluna ou "INSIDE BOP" deverá ser utilizada, a fim de evitar a presença de gás na plataforma, em caso de mau funcionamento da "FLOAT VALVE".

Caso seja constatada a presença de gás superficial, abandonar a locação deixando alguma peça de aço no fundo, com tamanho e forma adequados a uma posterior localização do poço através de sonar de ROV. E, manter o monitoramento da produção de gás com barcos especiais a fim de constatar a exaustão ou não de um possível reservatório.

ANEXO 2: EXEMPLO DE RELATÓRIO DE SAÍDA DO PROKICK - PROCEDIMENTO DE CONTROLE

MANOBRANDO COM TUBO DE PERFURAÇÃO EM FRENTE AO BOP

- A) Interromper a manobra, acunhar a coluna e retirar o elevador.*
- B) Instalar a válvula de segurança de coluna (DRILL PIPE SAFETY VALVE) aberta, e em seguida fechá-la; (1) Obs: Manter disponível e em condições de uso válvula com crossover compatível com a coluna de produção.*
- C) Fechar o BOP anular superior com 900 psi de pressão de fechamento;*
- D) Fechar o choke;*
- E) Abrir a válvula submarina das linhas de KILL e do CHOKE imediatamente abaixo da gaveta superior;*
- F) Registrar o crescimento das pressões estabilizadas de fechamento (SIDPP e SICP) e a hora da estabilização e preparar para o hang-off.*

Obs: Caso ocorra a fratura na sapata do revestimento durante o fechamento, proceder a operação de STRIPPING com o inside bop conectado a coluna a fim de posicionar a coluna no fundo do poço, e atacá-lo utilizando técnicas de controle para perda de circulação acima da zona de KICK.

MANOBRANDO COM TUBO DE PERFURAÇÃO EM FRENTE AO BOP (cont)

- PREPARAÇÃO PARA HANG-OFF

A) Conectar o KELLY e posicionar a coluna na superfície de maneira que não fique TOOL JOINT e nem EXTERNAL UP-SET (reforço no "TOOL JOINT") em frente a gaveta SUPERIOR.

B) Fechar a gaveta superior com pressão hidráulica adequada para permitir o posicionamento do tool joint na gaveta (stripping para hang-off);

C) Drenar a pressão entre o anular e a gaveta superior;

D) Abrir o preventor anular;

E) Fechar o choke e uma das válvulas submarinas da linha e abrir o anular;

F) Abrir a válvula submarina da linha imediatamente abaixo da gaveta superior.

G) Transferir o peso da coluna para a gaveta de (HANG-OFF) através de ajuste de pressão do compensador e/ou descendo a catarina;

H) Aumentar a pressão hidráulica da gaveta para pressão de operação (1.500 psi);

I) Efetuar os cálculos das planilhas de controle e seguir os procedimentos de combate aplicando o MÉTODO VOLUMÉTRICO até o gás ultrapassar a broca, e em seguida utilizar o MÉTODO DO SONDADOR para controle do poço;

J) Após eliminar o fluido invasor, caso haja necessidade de adensar a lama para kill o poço, analisar se a profundidade da broca permite o controle do poço com o emprego de lama pesada deste ponto à superfície. Caso negativo, instalar o INSIDE BOP, abrir a KELLY VALVE e fazer o STIPPING da coluna;

L) Após kill o poço, descer a coluna ao fundo para homogeneizar a lama no peso adequado.

Obs: Manter observação constante na "FLOW LINE" para certificar-se que o fluido invasor não ultrapassou o BOP, ou que não está havendo vazamento pela gaveta. Caso seja constatada a presença de gás no RISER, fechar o DIVERTER, fechar outra gaveta que não impeça a circulação no RISER e circular com lama na máxima vazão possível através da linha de kill ou do CHOKE, de forma que o fluido seja injetado acima da gaveta fechada e com retorno direcionado para fora da plataforma.

(1) A SAFETY VALVE acima referida é uma válvula de segurança de coluna dotado de alças para transporte, e deve estar permanentemente ao lado do INSIDE BOP no piso de perfuração.

ANEXO 3: EXEMPLO DE RELATÓRIO DE SAÍDA DO PROKICK - ATRIBUIÇÕES

Engenheiro Fiscal - Atribuições

- *Planejar junto com o técnico de fluidos e o encarregado, todas as etapas de combate ao influxo, incluindo operações com equipamentos, pressões previstas para cada etapa da operações, pesos e volume de lama;*
- *Supervisionar as operações;*
- *Registrar os eventos de cada etapa;*
- *Determinar em conjunto com o encarregado o abandono da locação/sonda, caso o influxo se transforme em erupção.*