

3 Estado da arte da tecnologia de bombeamento multifásico submarino

3.1 Introdução ao Bombeamento Multifásico

A partir das descobertas ocorridas no Brasil, Mar do Norte, Golfo do México e Costa Oeste da África, a exploração de hidrocarbonetos em águas profundas e ultraprofundas tem sido um desafio para as companhias de petróleo, face os requisitos técnicos, econômicos e de segurança ambiental, patrimonial e humana.

Atualmente a PETROBRAS tem concessão para produzir e desenvolver aproximadamente 285 campos de petróleo no Brasil, ver Figura 3.10, com reservas do tipo total de 17,3 bilhões de barris de óleo equivalente¹, das quais cerca de 9,5 bilhões são do tipo reservas provadas, de acordo com as Normas da Sociedade dos Engenheiros de Petróleo² (*SPE Code*). Cerca de 73% das reservas provadas e 75% das reservas do tipo total estão localizadas em águas profundas e ultraprofundas, ver Figura 3.11, sendo que, somente 15% desses 75% podem ser classificadas como campos desenvolvidos. Esse cenário levou a PETROBRAS a criar em 1986 o PROCAP – Programa de Capacitação Tecnológica para Sistemas de Produção em Águas Profundas (Assayag e Coelho, 2000). Por essa razão o PROCAP 2000 considerou essencial o desenvolvimento de algumas concepções de sistemas de reforço/estimulação submarinos (*boosting*) e zelando para que tais desenvolvimentos atingissem a fase de desenvolvimento de protótipo e uso dos mesmos numa real aplicação. O Apêndice B apresenta os métodos de *boosting* para aplicação submarina, desenvolvidos ou/em desenvolvimento nesse Programa e naqueles que o sucederam (i.e., PROCAP-2000 e PROCAP-3000). De forma similar, outros centros de excelência também viriam a criar seus programas de pesquisa e desenvolvimento voltado para tal cenário de interesse de exploração. – por exemplo, o DEMO 2000 criado na Noruega.

¹ Tal unidade resulta da adoção, em termos de poder calorífico e valor econômico, de que cada 1000 m³ de gás corresponde a 1 m³ de óleo.

² Sociedade âmbito internacional com sede nos EUA e seções espalhadas pelo mundo, incluindo o Brasil.

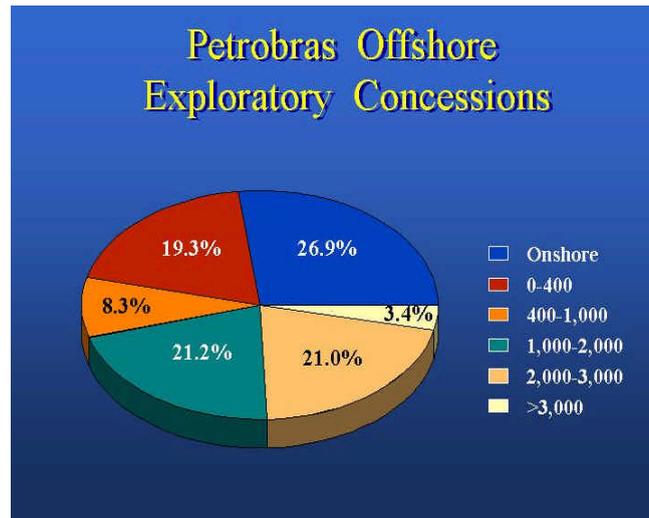


Figura 3.10 – Áreas de Concessões Exploratórias da PETROBRAS
(Assayag e Coelho, 2000)

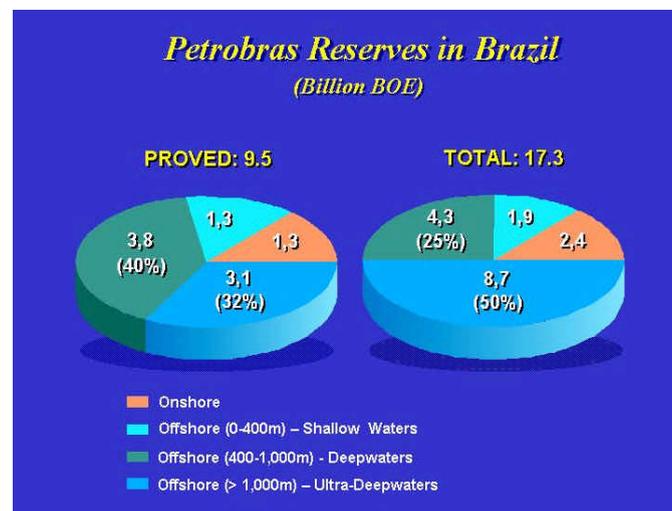


Figura 3.11 – Reservas Brasileiras de Hidrocarbonetos
(Assayag e Coelho, 2000)

3.2 Bombas multifásicas – tipos e características

A.J. Macintyre (1982) oferece a seguinte e interessante definição para bombas.

“São máquinas hidráulicas, do tipo geratrizes, cuja finalidade é realizar o deslocamento de um líquido por um escoamento. Sendo uma máquina geratriz ela transforma o trabalho mecânico que recebe para seu funcionamento em energia, que é fornecida ao líquido sob as formas de energia de pressão e cinética. O modo pelo qual é feita tal transformação do trabalho em energia hidráulica e o recurso para cedê-la ao líquido aumentando sua pressão e\ou sua velocidade permite classificar as bombas em:

- *deslocamento positivo, volumógenas ou volumétricas*
- *turbobombas, rotodinâmicas ou hidrodinâmicas.*”

Rotodinâmica ou Hidrodinâmica

A movimentação do fluido é produzida por forças (momento angular) que se desenvolvem na massa do fluido, em consequência da rotação de um eixo (impelidor), ver Figura 3.20. A pressão depende da variação da velocidade e da densidade do fluido. A depender da posição relativa do movimento geral do fluido e do eixo de rotação, podemos distinguir três tipos fundamentais:

- Centrífugas – quando o movimento geral do fluido dá-se em direção normal ao eixo de rotação.
- Axiais – quando o movimento geral do fluido dá-se em direção paralela ao eixo de rotação.
- Hélico - quando o movimento geral do fluido dá-se em direção inclinada ao eixo de rotação.
- Hélico-axial - quando o movimento geral do fluido dá-se em direção combinada, inicialmente inclinada em relação à direção do eixo de rotação e ao final paralela a direção de tal eixo.

O conceito da configuração hélico-axial é aquele historicamente utilizado nas bombas do tipo BCS. Quando dos primórdios do bombeamento multifásico, se teve uma frente de trabalho liderada pelo IFP (Instituto Francês de Petróleo) que adotou uma configuração hidráulica do tipo BCS e incorporou uma série de modificações que viriam a culminar na hoje referida bomba multifásica com

hidráulica do tipo hélico-axial. Nessas máquinas, se têm conjuntos desses pares de impelidores, radiais e axiais, os quais, numa descrição simplificada, são os respectivos responsáveis pela cessão de energia ao fluido e pela mistura desse fluido após ter o mesmo recebido energia. Observe que no processo de cessão de energia, aumento da energia cinética do fluido através da centrifugação do mesmo, tende igualmente a ocorrer e de forma indesejada uma separação desses fluidos constituintes da mistura função de suas respectivas densidades naquela condição do escoamento/centrifugação.

As bombas do tipo hélico-axial são tipicamente máquinas de média à alta vazão, com incrementos de pressão de baixo a médio valores e, pelo próprio princípio de funcionamento, dependentes da densidade da mistura do fluido sendo bombeado. Igualmente, pode ter limitações no valor da razão de compressão (relação dos valores das pressões de descarga e de sucção).

Do ponto de vista histórico a literatura registra que a primeira concepção de um sistema de bombeamento multifásico submarino teve seu início em 1984, com formação de uma Joint Industry Program (JIP) entre o Instituto Francês de Petróleo (IFP) e as companhias de petróleo TOTAL (França) e STATOIL (Noruega), e recebeu o nome Projeto Poseidon (Vangen, 1992). As responsabilidades tecnológicas de cada parceiro eram basicamente:

- IFP – desenvolvimento da bomba multifásica;
- Statoil – estudo e desenvolvimento de metodologias associadas ao escoamento multifásico;
- Total – foco na operação, manutenção e arranjo do sistema de bombeamento multifásico submarino.

Apesar da atratividade oferecida pela bomba de deslocamento positivo, o consórcio fez opção pela bomba rotodinâmica pelos os seguintes motivos:

- Menos sensível a sólidos, o que permitiu assumir uma redução de manutenção,
- Maior compacticidade,
- Menor dificuldade de marinização.

A partir de melhorias do conceito helico-axial, o projeto foi desenvolvido especialmente para trabalhar com altas taxas de fração de gás, e após seis anos de

pesquisas e desenvolvimentos o projeto atingiu as seguintes características que teriam sido incorporadas no protótipo P-300 (de aplicação em terra)³:

- Vazão total (condição de entrada) – 30 000 bbl/d,
- Fração volumétrica de gás (condição de entrada) – 0 a 95 %,
- Pressão de entrada (min. e max.) – 5 a 150 bar,
- Diferencial de pressão (RGL 0 a 10) – 20 a 30 bar,
- Rotação (RGL 0 a 100) – 2.000 a 5.500 rpm,
- Eficiência – 42% para RGL 10.

Desde tal oportunidade, vários sistemas foram construídos e instalados – grande parte em conveses de embarcações – e operados satisfatoriamente ainda que sob condições de baixos e médios valores de FVG e propiciando baixos a médios incrementos de pressão.

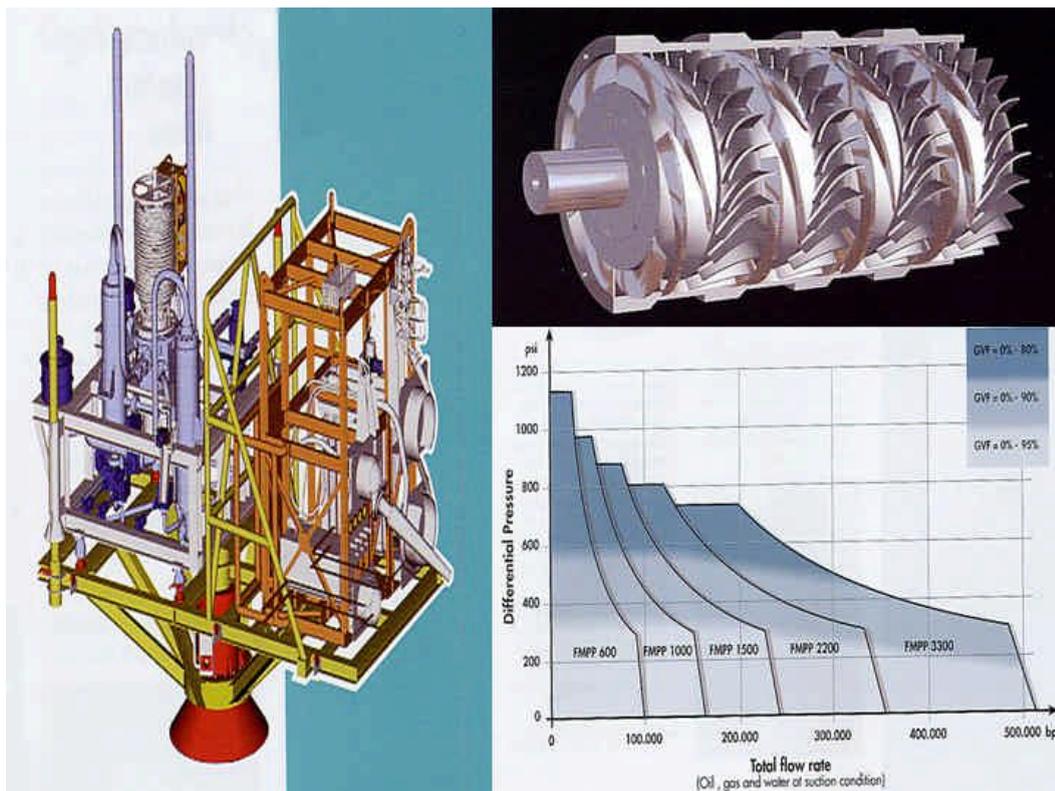


Figura 3.20 – Bomba Multifásica Rotodinâmica tipo Hélico-axial – corte esquemático e curvas características

³ Na verdade os referidos e altos valores de FVG nunca foram reportados como tendo sido atingidos em qualquer operação ininterrupta.

Volumétricas ou de Deslocamento Positivo

A movimentação do fluido é diretamente causada pela movimentação de um órgão mecânico da bomba, que obriga o fluido a executar o mesmo movimento de que ele está animado. O fluido sucessivamente enche e é expulso de espaços com volume determinado no interior de bomba. As forças transmitidas ao fluido têm a mesma direção do movimento geral do fluido, ver Figura 3.21. Tais bombas são classificadas em:

- Alternativas (bombas volumétricas alternativas, também chamadas de êmbolos ou pistão, são máquinas do tipo em que a cada ciclo elas deslocam um volume fixo de líquido, sem permitir seu retorno)
- Rotativas (e.g., Duplo Parafuso)

As bombas de duplo-parafuso consistem em dois fusos trabalhando acoplados sem contato, sendo mantidos em fase através de um par de engrenagens (ditas de passo), onde o fluido é empurrado pelo movimento helicoidal dos fusos. Encontra-se na literatura a citação de que a bomba de duplo parafuso pode ser compreendida como uma bomba de pistão ou embolo com curso infinito. Nestas bombas a pressão de descarga é governada pelo sistema onde tal bomba está aplicada. E enquanto igualmente exhibe alta eficiência volumétrica, tais bombas quando operando sob escoamento multifásico, tal eficiência se aproxima da unidade.

As bombas volumétricas do tipo duplo-parafuso são tipicamente máquinas de baixa a média vazão, com incrementos de pressão de médio a altos valores e, pelo próprio princípio de funcionamento, independentes da densidade da mistura do fluido sendo bombeado. Igualmente, não apresentando limitações no valor da razão de compressão (relação descarga para a sucção).

Um outro registro histórico na literatura (Dal Porto e Larson, 1996) informa que em 1992, um *Joint Industry Program* (JIP) – Programa Multi Cliente - formado pela Chevron, Texaco e PETROBRAS, testou distintas concepções de bombas multifásicas no Humble Flow Loop da TEXACO em Houston (EUA). A facilidade desse sítio de testes permitiu que diferentes misturas multifásicas de óleo, gás e água pudessem ser medidas e disponibilizadas na sucção da bomba para pressurização dentro de proporções desejadas. Importante registrar que essas companhias são aquelas que mais fortemente tem feito uso e/ou liderado o

desenvolvimento da concepção do tipo volumétrica de duplo-parafuso, testada com sucesso no referido JIP.

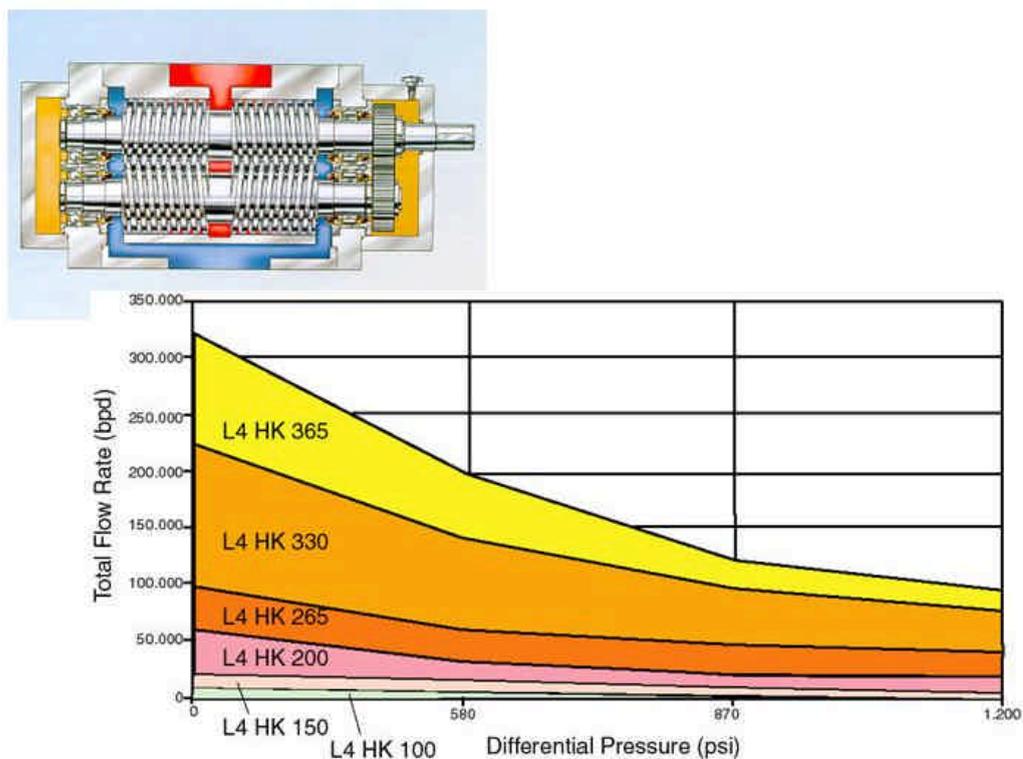


Figura 3.21 – Bomba Multifásica Volumétrica tipo Duplo-parafuso – corte esquemático e curvas características

Duplo-Parafuso versus Hélico-Axial

Em função do exposto com relação as bombas mais largamente utilizadas no bombeamento multifásico, ou seja, rotodinâmica do tipo hélico-axial e volumétrica do tipo duplo-parafuso, pode-se ainda apresentar as seguintes constatações e/ou comparações:

- Nas bombas de duplo-parafuso, há uma proporcionalidade, isto é, uma relação constante entre a vazão de descarga e a velocidade de rotação da bomba ($D = K.V$). Esta proporcionalidade é evidente porque a descarga é proporcional à velocidade do órgão mecânico que impulsiona o fluido, no caso os fusos, os quais por sua vez tem uma velocidade proporcional à velocidade da bomba. Nas bombas rotodinâmicas, (e.g., hélico-axial) a

vazão de descarga é função da velocidade da bomba e da densidade do fluido, mas não guarda proporcionalidade com nenhuma delas ($D = f(\rho.V)$);

- As bombas volumétricas (e.g., de duplo-parafuso) transmitem energia ao fluido sob a forma exclusiva de pressão, isto é, só aumenta a pressão e não a velocidade; na verdade, tal bomba transporta o fluido de um nível de pressão, ditado pela sucção da bomba, para um outro, existente na descarga da máquina e ditado pelo sistema onde tal máquina está inserida. Nas bombas rotodinâmicas, a energia é transmitida ao fluido sob a forma de energia cinética e pressão, ou seja, no interior do volume de controle ditado pela máquina, tanto ocorrem aumentos de pressão como aumentos de velocidade no fluido bombeado;
- As bombas volumétricas (e.g., de duplo-parafuso) dependem mais fortemente que as rotodinâmicas de folgas dimensionais para manutenção de sua operacionalidade. Assim, se tornam máquinas mais sensíveis a presença de sólidos no bombeamento (e.g., produção de areia pelo poço);
- As bombas volumétricas (e.g., de duplo-parafuso) por operarem em rotações mais baixas que as rotodinâmicas usualmente são de acionamento direto, no que tange a rotação dos acionadores. Isso já não ocorre para as máquinas rotodinâmicas, as quais fazem uso de caixas de ampliação acopladas a motores elétricos ou acionamento via turbina (no caso submarino, via turbina hidráulica e no caso da aplicação a seco, via turbina a gás);
- As bombas volumétricas (e.g., de duplo-parafuso) tendem a serem maiores que as rotodinâmicas, quando operando sob as mesmas condições de vazão e FVG. Tendem também a serem mais pesadas (uma vez que propiciam maiores pressões de operação) e por tais aspectos, resultam em sistemas de mais complicada marinização.

3.3

Programa da Petrobras em bombeamento multifásico submarino

3.3.1

O programa

A PETROBRAS, após certificar-se dos impactos positivos que novas tecnologias na área de produção multifásica, particularmente bombeamento multifásico, poderiam trazer para o seu negócio e ao mesmo tempo reconhecendo o salto tecnológico que teria que ser praticado e ainda o volume de recursos e riscos envolvidos decide: (Caetano *et alii*, 1995)

- liderar um projeto de cooperação tecnológica internacional que viesse a desenvolver um sistema de bombeamento multifásico adequado a suas necessidades e associados nichos de aplicação;
- selecionar companhias, dentre vários aspectos tais como, interesse no desenvolvimento, potencial de sucesso, capacidade financeira, para atuarem com parceiras nesse desenvolvimento e sendo responsáveis por um componente específico ou pela interligação de subsistemas desse sistema;
- conceber, projetar e construir uma instalação de testes (Sítio de Testes) que exibindo alto grau de representatividade quando comparado com as reais instalações/operações de campo e ainda uma flexibilidade operacional tipicamente encontrada nos laboratórios, viesse a contribuir nos testes e desenvolvimentos de todos os componentes desse almejado sistema de bombeamento multifásico submarino.

Esse referido Sítio foi construído nas instalações da unidade PETROBRAS/UN-SEAL (Complexo de Produção de Atalaia) no município de Aracaju (SE) e vem operando desde sua inauguração em 28/10/1994.

De modo a propiciar um entendimento a respeito das diversas dificuldades a serem suplantadas com o objetivo de atender as especificações requeridas para todo o sistema de bombeamento, podemos classifica-las em três grandes grupos,

cujos aspectos principais de critérios de desenvolvimento e qualificação foram estabelecidos pela PETROBRAS, ou sejam:

- Comerciais e de Desenvolvimento Tecnológico – grupo de aspectos relacionados, entre outros, as condições financeiras das empresas fabricantes, suas capacidades de recursos materiais e humanos, sua capacidade investigativa e suas ligações com o segmento da Academia (universidades e centros de pesquisa e desenvolvimento tecnológico);
- Segurança Humana e de Meio Ambiente – atualmente de suma importância, devido aos requisitos das agências ambientais e dos programas de SMS (segurança, meio ambiente e saúde).
- Engenharia – engloba de uma forma geral, os problemas relacionados à robustez referentes aos princípios de funcionamento do protótipo do sistema, sua instalação e operação no meio submarino. É importante atentar que tal sistema nunca havia antes sido concebido e fabricado para tal cenário e/ou exibindo o porte (e.g., vazão, incremento de pressão, potência de eixo, tensões de alimentação, profundidade de instalação etc.) requerido para o mesmo.

Em 1996, função dos desenvolvimentos na PETROBRAS e no mundo, a tecnologia de bombeamento multifásico para aplicação a seco (i.e., terrestres ou em conveses de embarcações quando no mar) era considerada segura para aplicações industriais nessa companhia e desde então tal tecnologia vem sendo utilizada com sucesso.

Em 1997, após concluir o desenvolvimento básico de vários componentes - considerados críticos para a funcionalidade do sistema, foi formalmente iniciado o desenvolvimento conjunto do sistema que viria a ser denominado SBMS-500 (Sistema de Bombeamento Multifásico Submarino – 500, relativo a sua capacidade de 500 m³/h de vazão total). Para tal desenvolvimento foram celebradas parcerias tecnológicas com várias companhias, detentoras dessas de concepções para alguns dos requeridos componentes e as quais foram julgadas de maior potencial de sucesso quando de sua aplicação submarina no sistema protótipo. Este protótipo batizado de SBMS-500, após ter seus principais componentes aprovados em testes laboratoriais e de fábrica, teria os seus

subsistemas motor-bomba-acionador e de monitoramento e controle testados no especialmente concebido e construído Sítio (testes com escoamentos multifásicos). Com o sucesso esperado em tais testes, em curso, o SBMS-500 então será instalado pioneiramente no par hospedeiro poço/plataforma, numa lâmina d'água de 720 metros, no campo de Marlim na Bacia de Campos, para ser submetido a campanha de qualificação (campanha de 24 meses de operação).

3.3.2

Sistema de bombeamento multifásico submarino 500 (SBMS-500)

A PETROBRAS, como empresa líder, decide então desenvolver um Projeto de Implementação Tecnológica (TIP), que propiciará o pioneiro desenvolvimento e instalação em águas profundas de um Sistema de Bombeamento Multifásico Submarino – SBMS-500 (Fig. 3.30) no par hospedeiro 7-MRL-72D-RJS e plataforma P-20 no Campo de Marlim, na Bacia de Campos (Kujawski e Caetano, 1999).

A partir de um completo conjunto de documentos de projeto, a PETROBRAS seleciona e celebra várias parcerias tecnológicas com companhias fabricantes de equipamentos – tais companhias foram selecionadas dentre aquelas interessadas e julgadas com potencial de sucesso para tal desenvolvimento. Dentre tais parcerias celebradas destacam-se aquelas com: Westinghouse (EUA), Leistriz (Alemanha), Kvaerner (Noruega, Inglaterra, Brasil), Tronic (Inglaterra), ODI (EUA), Robicon (EUA) e Pirelli (Brasil). Na parceria tecnológica celebrada com a Westinghouse e Leistriz, responsáveis pelo desenvolvimento do subsistema motor-bomba, foi igualmente atrelado um projeto do tipo multi-cliente; nesse, a PETROBRAS e essas parceiras atuam como executoras do desenvolvimento, enquanto tem-se como clientes desse desenvolvimento as companhias de petróleo BP-AMOCO, CHEVRON, MARATHON e ORIX.

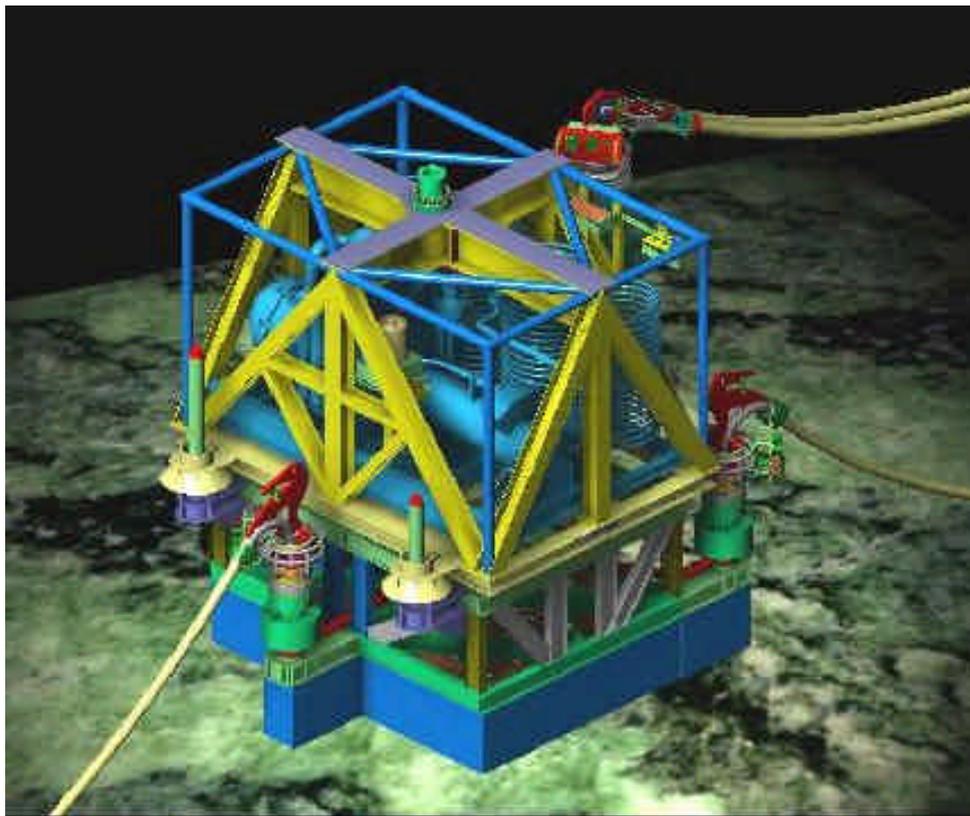


Figura 3.30 – SBMS-500

3.3.2.1 Configuração básica do SBMS-500

- **Filosofia do Sistema**

A filosofia de projeto do sistema pode ser traduzida pelas seguintes definições implementadas: (1) usar toda a tecnologia disponível sempre que possível; (2) praticar extensões tecnológicas quando necessário e limitando-as ao requerido no nicho alvo do sistema; (3) para componentes pioneiros implementar sempre redundância; (4) adotar um único fluido @ base óleo para as funções de lubrificação, lavagem e selagem em selos mecânicos e transferência de calor; (5) ter um sistema integrado e autônomo; (6) o subsistema submarino ser de instalação @ cabo, recuperável e permitindo que a produção ocorra ainda que o sistema esteja em modo de falha; (7) e, fazendo uso, desde a fase de projeto até a campanha submarina, do ferramental de CDM – Confiabilidade, Disponibilidade e Manutenibilidade. Todos os componentes foram projetados e qualificados para trabalhar em uma lâmina d'água de 1000 m. A Figura 3.31 apresenta as curvas

características, em termos de capacidade volumétrica, incremento de pressão e potência de eixo, que compõem a família de unidades da concepção SBMS (da qual o SBMS-500 é o protótipo das unidades dessa família).

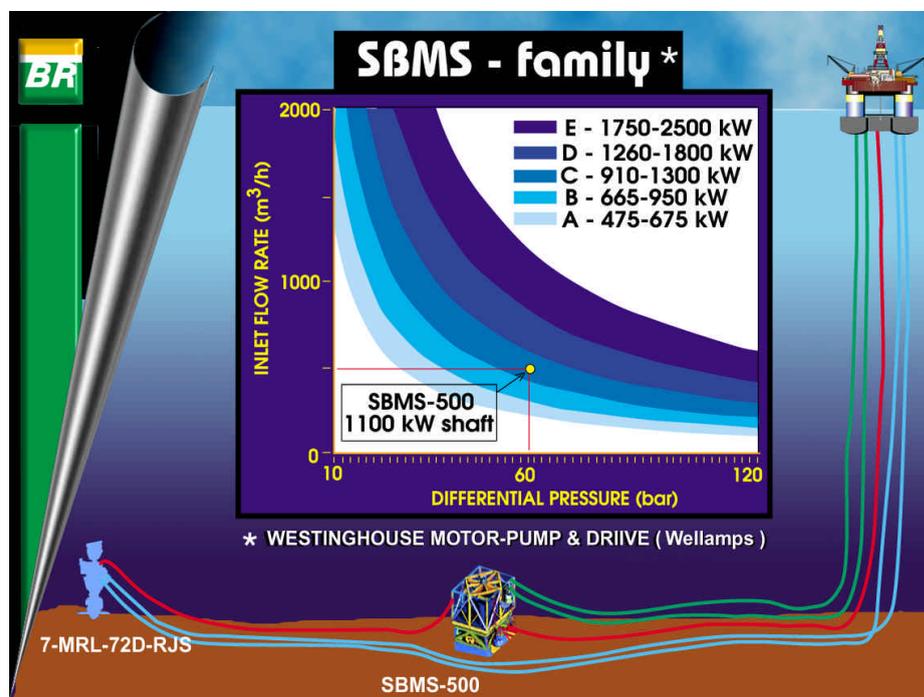


Figura 3.31 - Curvas Características da Família SBMS (Kujawski e Caetano, 1999)

- Subsistema Submarino (Bomba, Motor, Permutador de Calor, Umbilicais, Conectores de Potência e Unidade de Monitoramento e Controle)

A bomba selecionada para esta aplicação foi uma bomba volumétrica, rotativa e do tipo duplo parafuso, capaz de operar fluidos com altas taxas de fração de gás (*gas void fraction*) e viscosidade.

O equipamento foi projetado para uma vazão de 500 m³/h, um incremento de pressão de 60 bar, trabalhar com fluidos de baixa à alta viscosidade e uma fração de gás de até 95% (acaso fosse adotada uma recirculação de líquido, poder-se-ia igualmente atingir frações volumétricas de até 100 % de gás na sucção). A bomba é constituída por uma carcaça onde são diretamente montados os parafusos duplos (isto é, não são utilizadas camisas), mancais, selos e a caixa de engrenagem de acionamento. Um inovador sistema de lubrificação e selagem foi desenvolvido para o conjunto bomba-motor – tal sistema cumpre ainda a função de transferência de calor (e o fluido de utilização, @ base óleo, é dito multitarefa).

O motor elétrico é do tipo de indução, 3 fases, 4 polos e com potência de eixo de 1268 kW (1700 hp). Do ponto de vista mecânico é um motor hermético (*canned*),

porém sem fazer uso de selos mecânicos, e no qual seu estator e rotor são, respectivamente, encapsulados (material metálico) – quando da montagem é originada uma folga anular entre a superfície cilíndrica e interna do estator e a superfície cilíndrica e externa do rotor. Os mancais são do tipo de deslizamento e o dito fluido multitarefa flui forçosamente pelo interior desse motor e se constituindo no fluido de operação dos referidos mancais bem como, naquele que remove o calor internamente gerado. Tal concepção de motor recebeu modificações de projeto e de materiais o que veio a permitir seu uso com fluidos @ base óleo (originalmente tal motor era utilizado em sistema de propulsão de submarinos e porta-aviões e fazendo uso da água como tal fluido de trabalho) bem como, a operação em médias tensões (até 7 kV) e fazendo igualmente uso de variadores de tensão. Tais níveis de tensão permite dispensar o uso de transformadores de tensão em aplicações de curta e média distância submarina, afora permitir a utilização de cabos elétricos (umbilicais de potência) de diâmetros reduzidos, não havendo assim a necessidade do uso de umbilicais especiais. Tal motor foi projetado para uma vida útil de 20 anos. O conjunto variador de tensão, motor e bomba opera na faixa de 20 a 60 Hz o que propicia rotações na faixa de 600 a 1800 rpm – desde que a bomba é volumétrica, sua vazão é diretamente à proporcional a rotação e assim torna-se possível “ajustar” a vazão desejada no poço hospedeiro desse conjunto através do valor da frequência da tensão de alimentação do motor elétrico. A potência elétrica recebida da superfície chega ao motor através do dito umbilical de potência (e de sinais óticos) e de conectores de potência – de conexão molhada (1000 m LDA, 8 kV, 200 A) na interface umbilical-sistema submarino e de conexão sêca (11 kV, 200 A) na interface cabo elétrico submarino-terminais do motor. A utilização de um conector de potência molhado permite que o sistema seja eventualmente trazido à superfície sem requerer a igual recuperação do referido umbilical.

Os outros sistemas auxiliares submarinos são: permutador de calor e o sistema de pressurização, ambos fazendo parte de um novo sistema de lubrificação, resfriamento e selagem, o qual foi particularmente desenvolvido para esse sistema de bombeamento. O permutador de calor (baterias de tubos conformados como helicóides e diretamente molhados pelo água do mar) supre a necessidade de resfriamento do conjunto moto-bomba. O sistema de pressurização mantém a pressão do sistema positiva e acima da pressão reinante na sucção do mesmo

(inclusive para a situação em que o poço é fechado na UEP – condição de *shut-in*). O fluido de pressurização é recebido de uma unidade instalada na UEP e dita OSU (*Oil Supply Unit*); a interconexão desses dois subsistemas é realizada através de um umbilical submarino – dito umbilical eletro-hidráulico. O SBMS-500 nesse seu subsistema submarino dispõe também de um módulo de controle submarino (SCM - *Subsea Control Module*). O SCM é um sistema multiplexado e que recebe o sinal da instrumentação montada no conjunto submarino e os transmite para a estação de controle central (MCS) na superfície, fazendo uso do umbilical de potência e ótico (através de via ótica) e do umbilical eletro-hidráulico (através de via elétrica). Afora monitorar e/ou controlar um conjunto de parâmetros operacionais (e.g., temperatura de mancais, temperatura do estator, temperatura e pressão de sucção e descarga da bomba e vibração mecânica do conjunto) a SCM é igualmente responsável pelo controle do suprimento de fluido dito multitarefa para tal subsistema submarino. Os subsistemas complementares submarinos são projetados para uso e conexão às demais facilidades de produção (e.g. ANM e UEP).

- Subsistema de Superfície

O subsistema de superfície é composto pela: (1) Estação Central de Controle (*Master Control Station – MCS*); (2) Variador de Frequência (*Variable Frequency Drive – VFD*); e, (3) Unidade de Suprimento de Óleo (*Oil Supply Unit – OSU*).

A Estação Central de Controle (*Master Control Station – MCS*) afora receber os sinais oriundos da instrumentação instalada no subsistema submarino, recebe também os sinais de monitoramento oriundos dos demais componentes de superfície. Tal Estação tem a finalidade de:

- Monitorar o funcionamento e as rotinas do VFD, OSU, interface com a plataforma e o conjunto submarino (moto-bomba e demais subsistemas submarinos)
- Proteger o conjunto submarino de problemas externos.
- Limitar a consequência de danos devido a problemas durante a operação do conjunto submarino.
- Monitorar e Controlar a operação do conjunto submarino.

O sistema consiste de um controlador lógico programável (PLC) acoplado a um computador pessoal (PC) para propiciar a interface homem-máquina, permitindo ao operador a intervenção no sistema. A MCS fornece todas as informações necessárias para OSU, além de comunicar-se com VFD e com o módulo de controle submarino (*Subsea Control Module – SCM*). Todo o sistema é interligado ao sistema de parada de emergência da plataforma (*Emergency Shutdown System – ESD*) pela MCS.

O variador de frequência (VFD) está projetado para uma tensão de saída de 7,2 kV e potência de saída de 1659 kW. Fornece energia com baixa distorção harmônica, de acordo com a norma IEEE-519. Esta característica é importante devido à utilização em grande distâncias, permitindo o sistema operar com máxima eficiência, criando a oportunidade de sua utilização economicamente em sistema de bombeamento multifásico submarino. O VFD está acondicionado num compartimento (*container*) dotado de toda a infraestrutura requerida para operar em áreas classificadas (e.g., paredes A60, sistema de detecção de chama e/ou fumaça); tal compartimento foi certificado pelo Det Norske Veritas (DNV) para operar em ambientes agressivos e classificados pela Norma IEC-79 como pertencendo ao Grupo IIa, Zona II e de Temperatura T-3.

A unidade de suprimento de óleo é projetada para manter automaticamente a pressão de óleo no sistema e no conjunto submarino. O módulo é montado numa base própria, no convés principal da plataforma, e tem suas funções controladas pela MCS. Similarmente ao VFD, está também sendo certificado pela DNV para o mesmo tipo de ambiente agressivo. Tal módulo é composto de um tanque de armazenamento de óleo (1000 galões de capacidade), duas bombas de engrenagens acionadas eletricamente, sendo cada bomba capaz de bombear óleo a alta pressão na vazão requerida, um acumulador e, duplo elemento filtrante hidráulico. Durante a operação a OSU armazenará e fornecerá óleo proveniente da plataforma hospedeira para o SBMS através do umbilical eletro-hidráulico.

Baseado no exposto, a Tabela 3.30 apresenta as principais características técnicas do protótipo SBMS-500.

MOTOR	• Fabricante WESTINGHOUSE EMD (EUA)
	• Conceção Hermético
	• Tensão Elétrica de entrada 6,6 a 6,9 kVac (3 fases, 4 pólos, 60 Hz)
	• Potência no eixo 1,3 MW (nominal)
	• Serviço de partida velocidade variável (VFD)
	• Rotação 600 a 1800 rpm
BOMBA	• Fabricante LEITRITZ (Alemanha)
	• Conceção Duplo parafuso (L4HK)
	• Vazão Total de 500 m ³ /h (nominal)
	• Pressão de sucção 1 a 120 bar
	• Pressão diferencial 60 bar (max.)
	• FVG 0 a 95 % (sem recirculação)
VARIADOR DE FREQUÊNCIA (VFD)	• Fabricante ROBICON (USA)
	• Dupla Tensão Elétrica de entrada 4,16 e 6 kVac
	• Sem uso de transformador
	• Variação da frequência de saída 6,9 a 7,2 kVac
	• Frequência 20 a 60 HZ
	• IEEE – 519 (distorção harmônica)
UMBILICAL SUBMARINO DE POTÊNCIA & COMUNICAÇÃO ÓTICA	• Fabricante PIRELLI (BRASIL)
	• Condutor (240 mm ² com 10 / 20 kVac)
	• Cabo ótico (com 12 fibras)
	• Caternaria livre da plataforma (2000m LDA)
CONECTORES SUBMARINOS DE POTÊNCIA	• Fabricante TRONIC (UK)
	• Conexão Seca (11 kVac e 200 A.)
	• Conexão Molhada (1000m LDA, 8 kVac, 200 A.)
SISTEMA DE MONITORAÇÃO	• Fabricantes KVAERNER (UK), WESTINGHOUSE (USA), LANCO (USA), ODI (USA), TRONIC (UK)
	• Multiplexado
	• Ótico e Elétrico de Sinais (com conectores molhados)
	• 1000m LDA
FILOSOFIA GERAL DO PROJETO	• Uso em LDA de 400 a 1000m
	• Vida útil 20 anos (2 anos sem manutenção)
	• Instalação <i>Guidelineless</i>

Tabela 3.30 –Principais Características Técnicas do SBMS-500 (Baruzzi *et alii*, 2001)

3.3.2.2

Programa de testes no Sítio de Atalaia

O complexo de testes do Sítio de Atalaia foi projetado para receber e testar os principais componentes do SBMS-500. A Tabela 3.31 resume o programa de qualificação do SBMS-500 nesse Sítio, programa esse cujos principais objetivos são:

- Demonstrar o desempenho (funcional, energético, exergético) do conjunto moto-bomba quando operando com escoamentos multifásicos (óleo, água e gás) e sob regimes permanentes e transientes;
- Demonstrar o desempenho dos principais subsistemas desse sistema (e.g., permutador de calor, fluido de lubrificação e selagem, monitoramento e controle);
- Demonstrar a adequada interação entre todos os componentes e subsistemas desse sistema;
- Determinar o conjunto de distorção harmônica ocorrente no umbilical de potência frente à alimentação em frequência ajustável;
- e, acumular cerca de 1000 horas de operação ininterrupta desse sistema.

SÍTIO	TESTES PRELIMINARES	
	•	Alinhamento motor e bomba
	•	Direção da rotação
	•	Conexões de controle e elétrica
	•	Montagem da tubulação e verificação da limpeza
	•	Verificação do sistema de monitoração
	•	Teste de escorregamento do motor sob carga
DE	TESTES OPERACIONAIS	
TESTES	•	Teste de desempenho com água
	•	Teste operacional com óleo vivo (re-combinado)
	•	Teste de partida do conjunto moto-bomba-variador de frequência
DE	•	Teste de aceleração do conjunto moto-bomba-variador de frequência
	•	Teste de desaceleração do conjunto moto-bomba-variador de frequência
ATALAIA	•	Teste de desempenho das características do conjunto moto-bomba-variador de frequência.
	•	Teste elétrico do conjunto moto-bomba-variador de frequência
	•	Monitoração da vibração e operabilidade da instrumentação
	•	Teste de ponto da garantia.
	•	Teste de longa duração (1000 h @ 170 a 500 m ³ / h)

Tabela 3.31 – SBMS-500 Programa de Qualificação e Testes no Sítio de Atalaia (Caetano *et alii*, 1997)

3.3.2.3 Programa de testes no Campo de Marlim

O poço hospedeiro está situado a cerca de 4 Km a sudoeste da plataforma P-20, essa instalada em lâmina d'água de 630 m. Tal poço foi perfurado e completado em Agosto de 1999 e sua ANM está em 730 m de LDA. A escolha dessa locação deve-se as características do referido poço, tais como, vazão, fração de gás na sucção (FVG) e pressão de descarga na bomba para a locação requerida. A expectativa é de que as condições de operação possam fornecer um adequado cenário de testes para a avaliação geral do desempenho do sistema. A instalação do SBMS-500 poderá aumentar o pico de produção em 60%. O SBMS-500 será instalado em LDA de 640 m e cerca de 3 km a montante da UEP P-20. Na Tabela 3.32 são resumidamente apresentados os planos de testes para o sistema.

CAMPO DE MARLIM	TESTE NA LOCAÇÃO
	<ul style="list-style-type: none"> • Testar instalação e conexões • Teste operacional após um mês
	TESTE DE DURABILIDADE
	<ul style="list-style-type: none"> • Teste operacional de 24 meses com relatórios de teste a cada seis meses
	CARACTERÍSTICAS MONITORADAS
	<ul style="list-style-type: none"> • Desempenho da bomba (capacidade, pressão e eficiência) • Desempenho do variador de frequência (voltagem, forma de onda de corrente, potência) • Monitoração da vibração do conjunto moto-bomba • Desempenho e operabilidade da instrumentação

Tabela 3.32 – SBMS-500 Programa de Qualificação e Testes no Campo de Marlim (Caetano *et alii*, 1997)

3.4 Programa de capacitação tecnológica do governo norueguês - DEMO 2000

3.4.1 O Programa

É um programa de iniciativa do Governo Norueguês, iniciado em meados de 1999, e que objetiva acelerar a Pesquisa & Desenvolvimento no seguimento *upstream* de óleo e gás naquele país. Constituindo-se de uma carteira de 54 projetos e demandando o total de recursos de aproximadamente 100 milhões de dólares americanos, dos quais 25% são aplicados pelo governo e o restante pelas empresas participantes. Importante registrar que metade desses recursos é de aplicação no desenvolvimento de sistemas submarinos (aplicáveis esses na produção e transporte de petróleo). Os objetivos do programa são (Wiencke, 2001):

- Desenvolver novos campos de petróleo, na plataforma continental da Noruega, utilizando novas tecnologias e baixos custos;
- Garantir a melhoria de custo e prazo na execução dos projetos;
- Desenvolver novos produtos da indústria norueguesa aumentando sua participação no cenário mundial.

Dentre os projetos, podemos destacar o SMPM 335 (*Subsea Multiphase Pumping Module*), equipamento projetado e em construção pelo consórcio Kvaerner (projeto e integração), Bornemann (bomba) e Loher (motor) com instalação prevista para o Campo de Sogn no Mar do Norte da empresa Norsk Hydro.

3.4.2

Subsea Multiphase Pumping Module – SMPM 335

O módulo submarino de bombeamento multifásico (*subsea multiphase pumping module*) está sendo desenvolvido e qualificado em cooperação entre as empresas Kvaerner (Noruega) e Bornemann (Alemanha). Esse projeto é assistido financeiramente e tecnicamente pelo programa do Governo Norueguês (DEMO 2000) e pela companhia de petróleo Norsk Hydro (Stinessen, 2001). A Tabela 3.40 apresenta as principais características técnicas do sistema SMPM 335 (Fig. 3.40).



Fig. 3.40 Unidade de Bombeamento Submarino (*subsea pump unit*)

- A bomba Bornemann é uma bomba de deslocamento positivo (volumétrica) de duplo parafuso, projetada para trabalhar em condições onde a fração volumétrica de gás na sucção possa variar entre 0 a 100%. A entrada de fluido na bomba é realizada pelo centro com a área de alta pressão dos dois lados dos parafusos. Este arranjo tem o objetivo de minimizar a deflexão e a tensão nos parafusos (eixo), aumentando assim a vida útil do equipamento. A direção de escoamento do fluido do centro para cada lado da bomba permite também minimizar o efeito de mudanças dimensionais dos componentes no interior da bomba devido ao transiente térmico e pela alta pressão externa que ocorre em águas ultra profundas. Mancais e selos são protegidos pela pressão positiva do sistema de lubrificação. Todos os componentes da bomba foram projetados para operação contínua de no mínimo de 5 anos, ver Figura 3.41 curvas características da família.

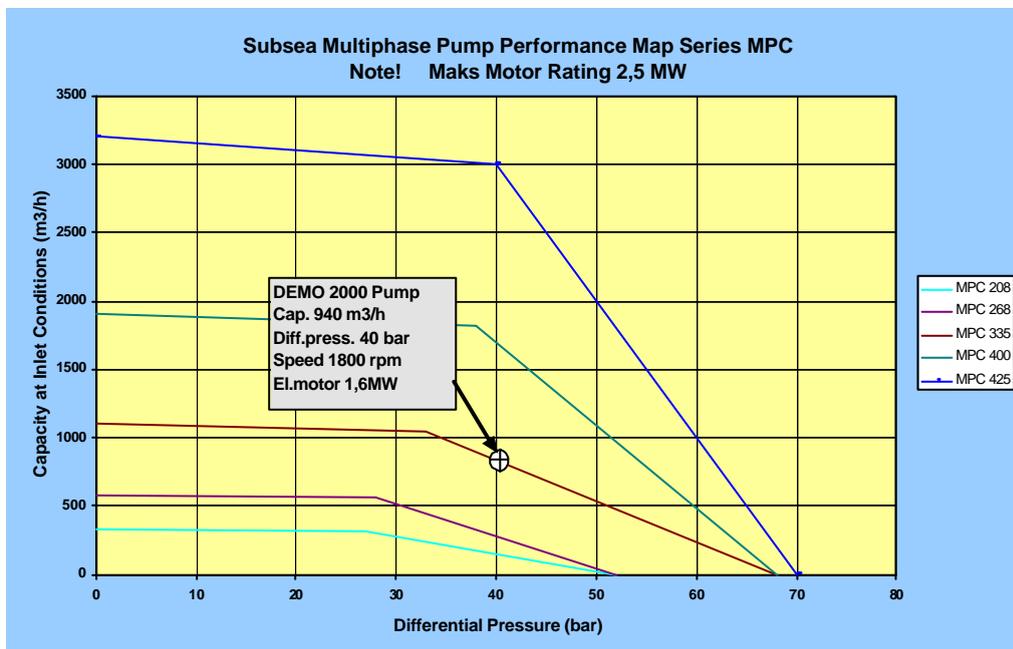


Figura 3.41 – Curvas Características da Família – SMPM - 335

- Motor Elétrico Submarino

O motor elétrico de fabricação Loher é assíncrono e trabalha preenchido com óleo (dielétrico). Tal motor tem selos mecânicos e assim tal óleo fica confinado e submetido apenas a refrigeração pelo segundo óleo – aquele que é suprido por uma unidade hidráulica montada na superfície. Tem uma eficiência de 87% e uma potência de 1,6 MW. A tensão de operação do motor é de 6 kV e está projetado para trabalhar com um variador de frequência para um nível de isolamento elétrico de até 11 kV.

- Compensação de Volume e Pressão do Sistema de Lubrificação e Refrigeração.

Tanto o motor como a bomba usam o mesmo sistema de lubrificação e refrigeração. O sistema mantém uma pressão positiva acima da pressão de descarga da bomba, assegurando uma baixa e constante pressão através dos selos mecânicos da bomba. O sistema de compensação absorve todas as variações de volume e pressão, devido à mudança do volume específico do óleo no resfriador e no circuito de lubrificação, causado pela variação de temperatura.

- Sistema de Instrumentação

O sistema de instrumentação monitora as temperaturas de entrada e saída do fluido, a temperatura do circuito de refrigeração do motor, a temperatura de cada enrolamento (estator) e o nível de vibração da bomba e do motor.

- Conectores elétricos para o motor

Os conectores molhados (submarino) elétrico de potência do motor são de 6 kV e 2 MW. Vários fabricantes estão se qualificando para fornecimento e entre eles podemos destacar: Deutsch, Tronic, Ocean Design e ABB-Mecon.

- Programa de Testes

O programa de testes abrangerá: qualificação dos componentes, teste e qualificação dos subsistemas, teste de integração do módulo de bombeamento e por último a avaliação da eficiência operacional do módulo de bombeamento multifásico submarino, de acordo com as condições do Campo de Sogn (Noruega).

Características Gerais de Projeto	• Lâmina d' Água 2000 Metros
	• Vida Útil do Equipamento 24 Anos
	• Peso 45 Ton.
	• Pressão 250 bar
Bomba	• Duplo Parafuso, Fabricante BORNEMANN (Alemanha)
	• Fração Volumétrica de Gás (FVG) 0 a 100%
	• Incremento de Pressão 40 bar
	• Quantidade Máxima de Areia 20 ppm
	• Temperatura de Entrada < 120° C
	• Diâmetro dos Parafusos 335 mm
	• Vazão Máxima 940 m ³ /h
Motor Elétrico	• Fabricante LOHER (Alemanha)
	• Potência 1,6 MW
	• Tensão Elétrica de 6 a 11 kV
	• Rotação 1800 rpm
Sistema de Controle	• Kvaerner (Noruega)
Integração e Projeto do Sistema	• Kvaerner (Noruega)

Tabela 3.40 – SMPM 335, Principais Características Técnicas (Jahnsen *et alii*, 2000)

3.5

Aplicações e Benefícios do Bombeamento Multifásico Submarino

O desenvolvimento da tecnologia de bombeamento multifásico submarino objetiva um sistema que afora possa conferir maiores flexibilidades operacionais a produção de petróleo, quer seja de acumulações gigantes em ambientes hostis ou mesmo de acumulações marginais em áreas de menor hostilidade, possa igualmente trazer viabilidade técnica e econômica e segurança operacional nessas explorações. Naturalmente, o impacto a ser obtido é função da própria especificidade da acumulação e de seu ambiente de inserção e assim generalizações *a priori* desses níveis de impacto são difíceis de serem apresentadas. Entretanto, ao examinarmos as próprias características desses sistemas de bombeamento nos é possível já antever alguns desses modos de utilização, da flexibilidade operacional oferecida e dos ganhos de produção passíveis de obtenção os quais não de nos propiciar um quadro, ainda que qualitativo, desse impacto a ser obtido na produção submarina através de sistemas de bombeamento multifásico.

3.5.1

Aplicabilidade

O sistema de bombeamento multifásico submarino pela sua intrínseca flexibilidade – quer seja pelo seu princípio de funcionamento, o qual não requer nenhum prévio condicionamento dos fluidos em bombeamento, quer pela sua buscada padronização ou que permitirá fazer uso desse sistema mesmo frente a aplicações de pequeno intervalo entre a definição da tecnologia e uso da mesma –

oferece inúmeras aplicações no rol das fases de exploração de um campo. Assim, muitas das vezes se acredita que as decisões de uso ficarão a cargo da atratividade econômica e porquanto fortemente do nicho em estudo para aplicação da tecnologia.

Cenário (1)

Podendo ser aplicado num par hospedeiro poço/unidade estacionaria de produção para (1) teste de longa duração, (2) viabilizar a produção de um poço satélite marginal em área remota, (3) viabilizar a produção de um poço em grande lâmina d'água onde ainda não seja possível ancorar UEP's, (4) aumentar a produção de um poço e assim antecipando seu fluxo de receitas – em algumas situações isso igualmente pode propiciar um aumento do fator de recuperação, ou ainda (5) instalar em poços em forte declínio objetivando diminuir o valor de suas pressões de abandono.

Cenário (2)

Num par hospedeiro poço/*manifold* ou *manifold*/plataforma. Tal cenário pode ser resultante de concepção primeira de exploração ou pode ser ainda resultante de um sistema de produção para UEP que foi substituído por um sistema submarino de bombeamento multifásico (e.g., desmobilização de uma UEP por altos custos de produção). O cenário que envolve *manifolds*, por ser aquele escolhido para este estudo, será oportunamente mais detalhadamente descrito.

3.5.2 Requisitos para Aplicação do Bombeamento Multifásico Submarino

Ao objetivar-se a instalação de um Sistema de Bombeamento Multifásico Submarino deve-se ter consideração aos seguintes aspectos:

- a alternativa do método de produção escolhido deve considerar a vida produtiva do campo;
- os dados (reservatório, características do fluido, etc.) a respeito do campo devem ter satisfatório grau de confiabilidade;
- previsão da produção através de simuladores de estudo de reservatório e de escoamento multifásico;
- instituir o requerido tempo mínimo entre falhas para cada componente do sistema;
- instituir a requerida capacidade da UEP em termos de geração e suprimento de energia elétrica, capacidade de processamento dos fluidos produzidos, espaço e peso para residência dos componentes de superfície do sistema.

Em sendo um sistema de bombeamento instalado no leito submarino, o SBMS, no caso de um sistema típico de produção e transporte de petróleo, poderia ser instalado no intervalo que vai desde a ANM (o mais a montante) até a região da base do *riser* de produção (o mais a jusante). Deve-se igualmente registrar que é possível termos mais de uma posição que resulte na mesma produção de líquido, logicamente que neste caso fazendo uso de sistemas de tamanhos distintas. Em termos de eficiência energética, a instalação mais a montante possível (próxima ou na ANM) irá oferecer a melhor locação; entretanto, razões econômicas podem

não ratificar o acerto de tal locação (e.g., devido ao custo dos umbilicais de suprimento, os quais tem seu custo função da distância UEP ponto de utilização do SBMS). Entretanto em sistemas de produção no mar, face as limitações dos meios de instalação ou até mesmo a situação geográfica (e.g. lâmina d'água) dos equipamentos envolvidos (ANM, cabeça de poço, *manifold*, conjunto moto-bomba e UEP) devem ser considerados os seguintes fatores:

- No caso da ANM já se encontrar instalada, é requerido, devido ao processo de instalação submarina da linha de produção, uma distância mínima igual à lâmina d'água do local, podendo ser admitido uma folga de 20% neste valor.
- Após a análise do escoamento (e.g., perda de carga x aumento de vazão) o SBMS deve ser instalado levando em consideração as limitações dos umbilicais de suprimento (e.g., umbilical de potência) eventualmente existentes.

3.5.3 Benefícios

É evidente que o completo desenvolvimento de um sistema de bombeamento multifásico submarino oferecerá para as companhias de petróleo uma ferramenta versátil e proporcionará um impacto econômico positivo na operação dessa indústria, especialmente na prospecção de petróleo em ambientes hostis (e.g. águas profundas). Entre os principais benefícios e impactos podemos citar (Kujawski e Caetano, 1999):

- Antecipação dos volumes exploráveis (aumento das taxas de vazão dos poços) com reflexo direto na antecipação de receitas;

- Potencial aumento do fator de recuperação - maiores volumes recuperáveis;
- Potencial redução do CAPEX devido à necessidade de menor número de poços para os mesmos volumes exploráveis;
- Potencial redução do CAPEX tanto para as facilidades de produção como para as linhas de transporte da produção, devido à possibilidade de escoamento da produção a longas distancias para outras infra-estruturas (e.g. UEP) existentes;
- Potencial redução do OPEX, pela simplificação das infra-estruturas de produção devido a uma maior confiabilidade no sistema, permitindo o uso de sistema especialista;
- Potencial de otimização no uso de linhas de escoamento da produção, devido à possibilidade de se produzir concomitantemente campos de diferentes características;
- Possibilidade de produção rentável de campos marginais que se encontrem distantes de existentes e capacitadas facilidades de produção;
- Permitir a avaliação de um nova descoberta através da instalação de um sistema de produção antecipada;
- Possibilitar a produção onde não seja permitido a queima de gás e/ou seja antieconômico a produção do gás desassociado do óleo;
- Permitir o enriquecimento da produção, no sistema de coleta e/ou na planta de processamento primário, aumentando o valor agregado da produção, através de misturas de diversas áreas de produção (mistura de diferentes tipos de óleos vivos com finalidade de enriquecimento);
- Manter constante e previsível a taxa de vazão de produção do poço para as facilidades de produção (reduzir a influencia das flutuações naturais dos poços – golfadas).

Assim, um sistema de bombeamento multifásico submarino, pela transferência direta de energia é capaz de permitir o transporte a longa distâncias de misturas multifásicas (óleo, água e águas e ainda alguma tolerância a existência de areia) para as plantas de processo, eliminando ou reduzindo a necessidade de separação. O bombeamento multifásico pode aumentar a produção proveniente de um poço, normalmente limitado pela pressão do separador de 1º estágio, e, com isso, permitir a produção de campos satélites que estejam a grandes distâncias das facilidades de processamento central. Num futuro próximo o bombeamento multifásico submarino será comum e confiável suficiente para aumentar ainda mais a atratividade da prospecção em águas profundas, trazendo uma nova dimensão econômica na produção de petróleo nesse cenário.