

CLEDSON WAGNER SOUTO SANTANA

RELATÓRIO DE ESTÁGIO

MONITORAMENTO E OTIMIZAÇÃO DISTRIBUÍDOS E EM TEMPO
REAL DO ESCOAMENTO DA PRODUÇÃO TERRESTRE DE PETRÓLEO
DO RIO GRANDE DO NORTE – MODELAGEM HIDRÁULICA



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
ÁREA DE RECURSOS HÍDRICOS

CAMPINA GRANDE – PB

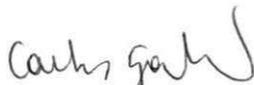
Janeiro – 2004

Título:

Monitoramento e otimização distribuídos e em tempo real do escoamento da produção terrestre de petróleo do Rio Grande do Norte – Modelagem hidráulica

Local:

Laboratório de sistemas distribuídos – LSD/DSC/CCT/UFCG



Orientador:

Dr. Carlos de Oliveira Galvão

galvao@dec.ufcg.edu.br



Co-orientador:

Dr. Francisco Vilar Brasileiro

fubica@dec.ufcg.edu.br



Orientando:

Cledson Wanger Souto Santana

cledsonsouto@yahoo.com.br

Coordenador de estágio supervisionado:

Walter Santa Cruz

walter@dec.ufcg.edu.br

Coordenador do curso de Engenharia Civil:

Ademir Montes Ferreira

ademir@dec.ufcg.edu.br

CAMPINA GRANDE – PB

Janeiro – 2004



Biblioteca Setorial do CDSA. Julho de 2021.

Sumé - PB

AGRADECIMENTOS

Gostaria de deixar marcado neste documento o meu sincero agradecimento a Carlos Galvão, por sempre acreditar no meu potencial, por me incentivar e guiar, e por me dar a oportunidade de trabalhar neste projeto, o qual me permitiu um grande amadurecimento profissional. Agradeço a Francisco Brasileiro (Fubica) e a Esther Brasileiro pela paciência e pelos ensinamentos, eu aprendi muito com vocês.

Um eterno “muito obrigado” a minha equipe de trabalho: Ademar Izu, André Gomes, Bruno Catão, Érica Machado, Kennedy Flávio e Mônica Muniz, aprendi muito com vocês também. Agradeço a todos que contribuíram, conscientemente ou não, de alguma forma com o meu trabalho: a todos do Laboratório de Sistemas Distribuídos, aos professores Manoel Cordeiro e Janiro Rego, a Rohit e Pasqueline, aos colegas de Engenharia Civil, ao pessoal do Laboratório de Hidráulica, a familiares e amigos.

Agradeço a Deus, por me dar as ferramentas das quais eu preciso, corpo e mente saudáveis, e por me fazer acreditar que é o homem o dono do seu próprio destino.

Resumo

Os sistemas de monitoramento e controle automático de malhas de dutos para escoamento de petróleo são complexos por vários requisitos, dentre os quais estão as restrições econômicas, operacionais, ambientais e institucionais. Planejou-se implementar um sistema computacional que servirá, inicialmente, como um “diagnosticador” do estado da rede como um todo, sugerindo a adoção de ações no controle dos sistemas de bombeamento com a finalidade de atingir a eficiência máxima, ou seja, transportar o máximo de petróleo pelo menor custo respeitando todas as restrições. Para isto, estes sistemas computacionais utilizam simuladores do comportamento hidráulico da malha, cuja implementação utiliza métodos que descrevem os processos em cada um dos seus elementos. Primeiramente, foi utilizado um método cujo algoritmo se constitui em uma generalização, para malhas complexas, do método clássico de resolução gráfica para associação, em uma malha de escoamento ramificada simples, de múltiplas bombas. Mas, por questões relacionadas à complexidade do fluido a ser transportado, optou-se por substituir o método anterior por um baseado na resolução simultânea das equações, possibilitando uma maior velocidade no desenvolvimento do sistema computacional. A equipe de desenvolvimento, formada por profissionais de computação e de engenharia civil, concebeu o *software* de forma incremental, ou seja, implementou-se uma versão simples e a partir dela, através de várias iterações, realizavam-se melhoramentos e incrementos, sempre avaliados por testes.

Índice

1. Introdução.....	6
2. Atividades desenvolvidas.....	8
3. O software.....	11
4. Definições.....	16
5. Método gráfico.....	21
6. Método iterativo.....	31
6.1 Dutos em paralelo.....	33
6.2 Regra da mistura.....	35
7. Conclusões.....	39
8. Bibliografia.....	40
9. Anexo – Plano de estágio.....	41

1. Introdução

A unidade de negócios do Rio Grande do Norte e Ceará (UN – RNCE) da Petrobrás atua, entre outras atividades, no processo de extração terrestre de petróleo, explorando mais de sessenta campos, onde estão mais de 4 mil poços de produção, numa área que abrange grande parte do oeste do Rio Grande do Norte, seu litoral norte, atingindo também o litoral do Ceará. Todo o petróleo é transportado, através de dutos ou navios, até a estação de tratamento localizada na cidade de Guamaré – RN, de onde parte para as refinarias do país. A produção média de petróleo na região é estimada em 18.500 m³/dia, este valor corresponde a cerca de 13% da produção nacional de petróleo.

Cada poço está ligado, através de tubulações individuais, a uma estação coletora, onde a produção é armazenada em tanques. As estações coletoras satélites (ECS) são pequenas e têm a principal função de testar o fluido que está chegando dos poços. Através destes testes é possível ter informações sobre a produção do poço, a vazão, o teor de água extraído juntamente com o óleo (BSW), além do teor de gás. As estações coletoras centrais (ECC) recebem o petróleo das ECSs (em alguns casos uma ECS pode escoar a sua produção diretamente para o duto principal, sem passar por uma ECC), armazenando-o em tanques. Das ECCs, o petróleo escoar pelo duto principal para a estação de tratamento de óleo (ETO) em Guamaré, onde é embarcado em navios petroleiros.

A automatização dos poços já está em andamento, onde microcontroladores são utilizados para captarem informações sobre o funcionamento do poço, além de fornecer dados sobre sua vazão. Estas informações são transmitidas via rádio para servidores de dados que estão localizados nas estações, onde podem ser lidas remotamente, possibilitando atuar nos poços a partir dos centros de operação. Além disso, mais de 80% das estações também já foram automatizadas. A rede de comunicação utilizada é privada e atende os requisitos de segurança no transporte de dados definidos pela empresa.

Atualmente o controle do sistema é baseado em equipamentos de segurança e regras simples de operação. Os tanques das estações têm sensores de nível que permitem identificar quando se atinge patamares máximos e mínimos de utilização. Quando o nível máximo é atingido, o conjunto motor-bomba associado ao tanque é acionado para iniciar o

escoamento do petróleo armazenado, por exemplo. Pressostatos, instalados na saída das estações, monitoram a pressão no oleoduto compartilhado e controlam o funcionamento das bombas.

Em alguns casos, o operador responsável por uma estação pode decidir iniciar o escoamento da produção usando outras diretrizes, por exemplo, antes dos horários de pico, em que a Petrobrás paga mais pela energia consumida, ligar todas as bombas e deixar os tanques vazios, para que não quebrem a produção dos poços. Entretanto, para que esse processo funcione de maneira satisfatória, é necessário que um escalonamento global do sistema seja realizado, de forma que a entrada em operação das várias bombas esteja devidamente sincronizada, evitando que todas bombeiem na mesma hora, gerando sobrepressão no duto principal; ou que não fiquem desligadas por muito tempo, provocando decantação nos tanques. Atualmente, este procedimento de escalonamento é feito através de uma negociação direta entre os operadores das várias estações envolvidas.

A não otimização do transporte de petróleo no oleoduto principal pode não só aumentar o custo de energia, como também prejudicar a produção, como nos casos em que é necessário parar o bombeamento em poços, por exemplo. A produção continua crescendo e demandando mais tempo de bombeamento e um uso mais intenso dos dutos compartilhados, requerendo cada vez mais uma expansão da rede. Por outro lado, quando há otimização, através de um escalonamento de todas as bombas da rede, promove-se um melhor aproveitamento dos dutos, evitando-se a necessidade de novos investimentos na rede de escoamento, ajudando a baixar o custo de produção; reduz-se, também, a pressão média nos mesmos, diminuindo os custos de bombeamento, ou seja, de operação.

Planejou-se implementar um *software* que servirá, inicialmente, como um “diagnosticador” do estado da rede como um todo, sugerindo a adoção de ações no controle dos sistemas de bombeamento com a finalidade de atingir a eficiência máxima, ou seja, transportar o máximo de petróleo pelo menor custo respeitando todas as restrições. Para isto, estes sistemas computacionais utilizam simuladores do comportamento hidráulico da malha, cuja implementação utiliza métodos que descrevem os processos em cada um dos seus elementos. O objetivo deste trabalho é mostrar os dois métodos utilizados na confecção do software, desenvolvidos ao longo do estágio.

2. Atividades desenvolvidas

Como pode ser observado na seção 9. Anexo – Plano de estágio, as atividades a serem desenvolvidas ao longo do estágio estão divididas em quatro etapas: concepção, elaboração, construção e transição. As quais não foram realizadas separadamente; sempre que houve a necessidade de conceber a solução para um problema, eram realizadas pesquisas, discussões, surgiam soluções para elaboração e construção do modelo e, eram, então, confeccionados a especificação do problema, o modelo e um teste para avaliá-lo.

Concepção do sistema: Esta fase se concentrou muito no início do estágio, onde foi consumido tempo estudando a necessidade do cliente através de documentos cedidos pelo mesmo, pesquisando o sistema de oleodutos, seus elementos e suas características, como se processa a operação de cada elemento ou do sistema como um todo, como são tomadas as decisões operacionais frente a diferentes cenários ou anormalidades, identificando as ações urgentes ou qualquer informação interessante ao funcionamento da rede.

Decidiu-se por implementar um modelo simples, que consistia em um sistema formado por um tanque produtor, uma bomba, um duto e um tanque receptor, nesta seqüência. Esta primeira malha permitiu a investigação de cada um dos elementos, da implementação da previsão da vazão, de entrada e de saída, para os tanques, produtor e receptor, respectivamente, e do controle da bomba. O cálculo do custo era ainda muito simples, consistia em aplicar um preço à potência consumida pela bomba.

A concepção foi uma atividade permanente, isto aconteceu por causa do caráter adotado para o desenvolvimento do software – incremental – então, sempre que surgia uma necessidade, buscava-se por soluções simples, mas com embasamento técnico-científico, que a remediavam. Alguns exemplos de funcionalidades que surgiram ao longo do desenvolvimento são: a existência de um “verificador de inconsistências”, a equalização de tanques, o algoritmo para solucionar os dutos em paralelo e a mistura de fluidos com temperaturas diferentes. Até o método gráfico para solucionar redes hidráulicas complexas também é um exemplo.

O verificador de inconsistências é uma ferramenta que verifica a existência de erros ou ausência de informações importantes na malha a ser simulada. Caso seja encontrada alguma inconsistência o *software* informa onde e qual o problema e não permite a simulação até que ele seja solucionado. Alguns exemplos de inconsistências são: ausência ou valor fora de limites aceitáveis de alguma informação importante em qualquer elemento da rede, existência de algum elemento desconectado da malha, ausência de tanques nas extremidades da malha, direção de escoamento (indicada pelas setas dos dutos) do fluido incorreta, inexistência de previsão ou controle, entre outros.

A equalização de tanques surgiu da necessidade de representar a flexibilidade de conexão entre o manifold, os tanques e as bombas de uma estação, onde é possível ter um grupo de tanques recebendo fluido, independentes de um outro grupo transferindo fluido, com uma configuração que possa variar ao longo do tempo. Quanto ao algoritmo para resolução hidráulica dos dutos em paralelo, era uma funcionalidade prevista, mas por se tratar de um algoritmo iterativo dentro de outro, precisava ser bastante eficiente, ou seja, deveria convergir sempre e de forma muito rápida; possui ainda a limitação de aceitar apenas a associação de dois dutos, este algoritmo é explicado na seção 6.1 Dutos em paralelo.

Considera-se o método gráfico como uma concepção quando se analisa sua aplicação em malhas complexas, como será explicado na seção 5. Método gráfico, este método é uma generalização, para redes complexas, do método clássico de resolução gráfica para associação, em uma rede de escoamento ramificada simples, de múltiplas bombas centrífugas. Desta concepção nasceram dois artigos que foram publicados em um evento nacional e outro internacional [9] [10].

Até a última versão do *software*, o escoamento adotado foi o monofásico, por esta razão, adotou-se todas as equações convencionais da hidráulica para representar o sistema de oleodutos. Mas se sabe que, no transporte de petróleo, não é somente um único tipo de óleo que escoar, nas tubulações correm uma variada gama de óleos que se misturam entre si e com a água, vapor e até gás, oriundos da prospecção do petróleo.

Para representar o fluido monofásico é necessário agrupar quatro informações, e acompanhá-las por toda a malha, são elas: o volume (a vazão), a temperatura, a massa

específica e a equação que representa a viscosidade cinemática. Foi neste ponto que o método gráfico não permitiu o desenvolvimento do *software* de forma amigável, por isto houve a mudança para o método iterativo. De qualquer forma, o método gráfico contribuiu para um maior entendimento do funcionamento do sistema como um todo, facilitando a solução de problemas que surgiram com a adoção do outro método.

Elaboração do sistema: Esta fase consistiu em organizar as informações da concepção do problema em algoritmos, regras, restrições e parâmetros que serviam de apoio para o desenvolvimento do modelo computacional de representação do sistema e de sua operação. Estas idéias eram discutidas em reuniões semanais, e quando necessário, em reuniões rápidas, com toda ou parte da equipe.

Estas informações – as especificações – eram guardadas e organizadas para servirem de documentação do modelo, permitiam uma busca rápida das funcionalidades do *software*, dinamizando o seu caráter incremental, realizado em ciclos (iterações). Cada iteração era fechada por uma versão do *software*. Estas especificações serviram de base para a produção da documentação técnica que acompanha o *software*, realizada na fase de Transição.

Construção do sistema: Esta fase consistiu em auxiliar os desenvolvedores (estagiários de sistemas e computação) na reprodução computacional do sistema, sempre quando necessário. Nesta fase, foram realizadas algumas viagens à cidade de Natal-RN com o intuito de adquirir, verificar e validar (confirmar) dados do sistema real, através da pesquisa em mapas, catálogos, históricos, entrevistas, telefonemas e monitoramento eletrônico. Todas as informações adquiridas contribuíram para que se pudesse conhecer todo o sistema de transporte de petróleo, assim como permitir uma representação da operação da rede frente a cenários operacionais hipotéticos mais próximos da realidade.

Transição: Esta fase consistiu em auxiliar na transferência de todo conhecimento adquirido à Petrobrás, na formulação de documentos, relatórios, publicações e outras formas de transferência referentes a este estudo. Foram escritos vários artigos, dos quais dois estão citados neste relatório. Participou-se, também, da confecção de uma vasta documentação que se distribui em documentação técnica, manual do usuário e do desenvolvedor, que acompanham o *software*.

3. O software

O *software*, denominado *SmartPumping*, foi concebido com o objetivo de simular a operação de redes de escoamento de líquidos produzidos na extração terrestre de petróleo, de forma a garantir a máxima eficiência do transporte com o menor custo de energia, redução da pressão nos dutos, dos riscos de falhas operacionais e de poluição ambiental e da perda de produção. É uma ferramenta computacional que visa dar suporte aos operadores das redes de oleodutos, os quais, amparados pela sua experiência, tomam decisões que nem sempre garantem a otimização dos processos envolvidos, nem permitem a possibilidade de tornar os processos mais automatizados e, portanto, menos dependentes de falhas humanas.

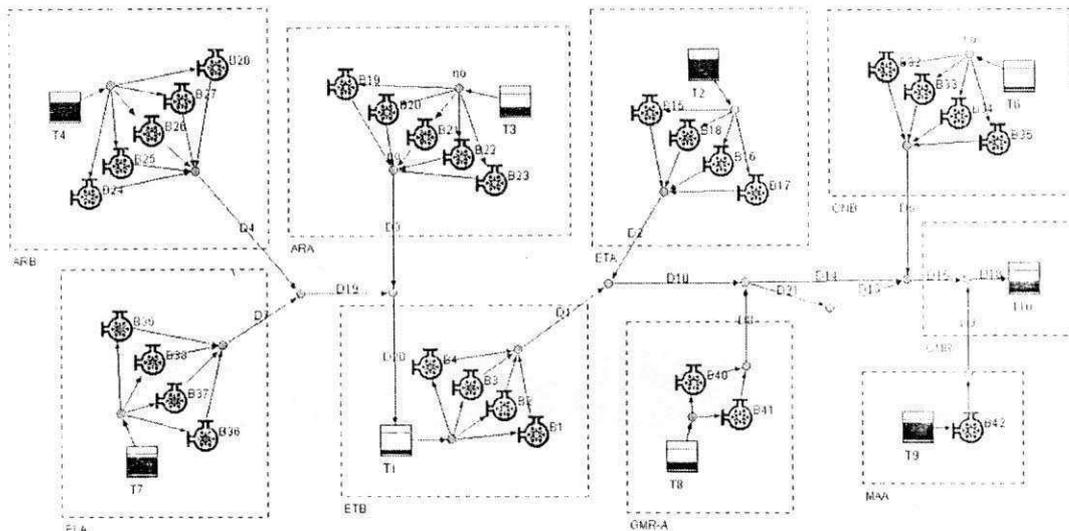


Figura 1 - Configuração básica da rede hidráulica.

A configuração básica da rede hidráulica (Figura 1) é do tipo ramificada, composta por cinco elementos principais: tanques, bombas, nós, dutos e estações. A implementação final do modelo de simulação se baseia na resolução simultânea de um grupo de equações para análise e previsão do comportamento hidráulico de redes para uma série de cenários operacionais desejados. O simulador tem potencial para simular a operação de redes que apresentem:

- Várias associações de dois dutos em paralelo;
- Mistura de fluidos com propriedades diferentes e variáveis ao longo do tempo;
- Tanques funcionando como vasos comunicantes;
- Configuração variável no tempo;

- Bombas centrífugas e volumétricas trabalhando em conjunto;
- Várias unidades consumidoras de energia;
- Várias redes interdependentes (sub-redes).

Em cada passo da simulação, o *Software* permite obter os valores de vazão e velocidade em cada duto, da pressão em cada nó da rede e dos níveis nos tanques, assim como, das propriedades do fluido em todos os pontos da rede, derivados da mistura dos diferentes fluidos extraídos dos poços de petróleo. Também é possível obter o custo da operação simulada, resultante do custo relativo ao consumo e à demanda de energia. É possível visualizar os gráficos de todas as informações acima citadas e imprimir tabelas com os resultados da simulação.

As seguintes equações são utilizadas no cálculo hidráulico:

Equação 1 - da continuidade:

$$Q = a \cdot v$$

Onde: Q = vazão escoada (m^3/s);

a = área da seção interna do duto (m^2);

v = velocidade média de escoamento (m/s).

Equação 2 - Número de Reynolds:

$$Re_y = \frac{4 \cdot Q}{v \cdot \pi \cdot D}$$

Onde: Re_y = número de Reynolds (adimensional);

v = viscosidade cinemática do fluido (m^2/s);

D = diâmetro interno do duto (m).

Equação 3 - Fator de atrito:

Se $Re_y < 2300$ (escoamento laminar):

$$f = \frac{64}{Re_y}$$

Se $Re_y \geq 2300$ (escoamento turbulento):

$$f = \{-2 \cdot \log_{10}[M \cdot \log_{10}(N)]\}^{-2}$$

Onde: f = fator de atrito (adimensional);

$$M = \frac{\varepsilon}{3,7.D} - \frac{5,02}{Re y};$$

$$N = \frac{\varepsilon}{3,7.D} + \frac{14,5}{Re y};$$

ε = rugosidade absoluta das paredes internas da tubulação (m);

A Equação 3 [7] está sendo utilizada em substituição à fórmula de Colebrook-White por evitar cálculos iterativos.

Equação 4 - Equação Universal da perda de carga:

$$\Delta h = \frac{8.f.L.Q^2}{g.\pi^2.D^5}$$

Onde: Δh = perda de carga (mcf = metro coluna de fluido);

L = comprimento do duto (m);

g = a aceleração da gravidade (m/s^2).

Equação 5 - Equação da curva característica da bomba:

$$H_{man} = a.Q^2 + b.Q + c$$

Onde: H_{man} = altura manométrica (mcf);

Q = vazão que passa pela bomba (m^3/s);

a, b, c = coeficientes da curva característica.

Equação 6 - Altura manométrica da bomba:

$$H_{man} = PJB - PMB$$

Onde: PJB = pressão a jusante da bomba (mcf);

PMB = pressão a montante da bomba (mcf).

Equação 7 - Pressões nos dutos:

$$PM = CJ + PJ + \Delta B - CM$$

$$PJ = CM + PM - \Delta B - CJ$$

Onde: CM = cota a montante do duto (m);

CJ = cota a jusante do duto (m);

PM = Pressão a montante do duto (mcf);

PJ = pressão a jusante do duto (mcf).

Equação 8 - Rendimento da bomba:

$$\eta = i.Q^2 + j.Q + k$$

Onde: η é o rendimento da bomba (%);

i, j, k são os coeficientes da curva do rendimento da bomba.

Equação 9 - Balanço hídrico no tanque:

$$n_{t+\Delta t} = n_t + \frac{(qe - qs) \cdot \Delta t}{Ab}$$

Onde: $n_{t+\Delta t}$ = nível atual de fluido (m);

n_t = nível anterior de fluido (m);

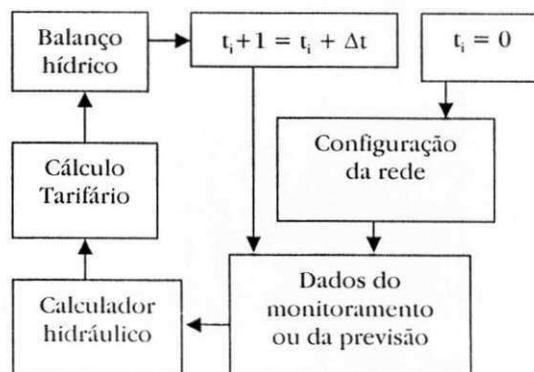
Ab = área da base (m^2);

Δt = tempo do passo da simulação (s);

qe, qs = vazão de entrada e de saída (m^3/s).

Os simuladores do comportamento hidráulico de redes, geralmente, utilizam métodos que descrevem os processos em cada um dos elementos da rede. Para simular isto, são utilizadas muitas informações sobre a rede hidráulica, que podem ser estáticas ou variáveis no tempo, estas últimas provenientes da previsão ou do monitoramento. A simulação, normalmente, obedece ao procedimento indicado na Figura 2.

Figura 2 - Fluxograma da simulação.



Onde: $t_i = 0$ representa o início do módulo de simulação no tempo $t_i = 0$; $t_{i+1} = t_i + \Delta t$ representa a finalização de cada passo da simulação; Δt é o passo de cálculo para a simulação (configurável).

Configuração da rede: Entrada das informações estáticas de cada elemento: tanques: níveis máximos e mínimos, físicos e de controle, área da base, cota do fundo, dados do fluido; bombas: equações das curvas características e dos rendimentos, rendimento do motor, cota do eixo, unidade consumidora; duetos: comprimentos, diâmetros, rugosidades, entre outros; nós: cotas. Os dados de configuração são lidos apenas uma vez.

Dados do monitoramento: Obtenção dos dados dinâmicos de alguns elementos: bombas: estado (ligada ou desligada); tanques produtores: vazões de entrada e níveis atuais; tanque final: vazão de saída e nível atual; fluido: equação da viscosidade cinemática, massa específica, BSW e temperatura do fluido; para cada passo da simulação.

Calculador hidráulico: Realização dos cálculos das vazões, perdas de carga, pressões e potências consumidas pelas bombas.

Cálculo tarifário: Cálculo do consumo de energia e da demanda de potência para cada passo da simulação. No final da simulação são calculados os custos relativos ao consumo e o custo total do sistema para toda a simulação.

Balanço hídrico: Determinação dos novos níveis dos tanques com os valores das vazões obtidas através do monitoramento e do calculador hidráulico.

4. Definições

Os tanques são classificados em receptores e produtores de fluido. Alguns tanques podem ser, ao mesmo tempo, receptores e produtores, estes tanques definem redes interdependentes (sub-redes) dentro da rede hidráulica. O fluido escoa dos tanques produtores para os outros elementos e, destes para o tanque receptor. Quando há redes interdependentes (sub-redes), o fluido passa pelos tanques intermediários (receptor de uma sub-rede e produtor de outra) e, destes para o tanque receptor final.

Bombas e tanques são conectados através de dutos, enquanto que a conexão entre dutos se dá somente em pontos virtuais, definidos como nós. O fluido que escoa através de um nó pode ser oriundo de vários dutos, porém, é assumido que apenas um único duto pode estar conectado à jusante de um nó, como se observa na, com exceção dos casos de bombas conectadas em paralelo.

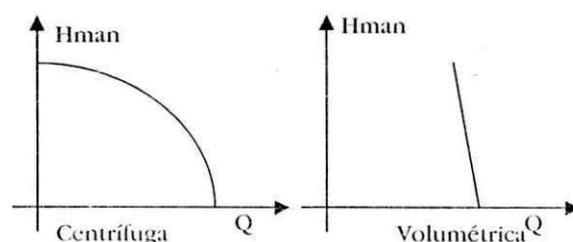


Figura 3 - Curvas características das bombas.

As bombas se classificam em dois grupos: centrífugas e volumétricas (alternativas e rotativas). As primeiras operam injetando energia cinética ao fluido que entra na rede, a qual é convertida, imediatamente, em energia de pressão; o segundo grupo trabalha injetando um volume praticamente constante de fluido, permitindo uma variação na pressão na rede mais acentuada do que as centrífugas. Na Figura 3 estão representados, genericamente, os comportamentos das curvas características dos dois tipos de bombas.

As seguintes informações sobre as bombas são necessárias ao cálculo hidráulico: cota do eixo, equação da curva característica e equação do rendimento da bomba, rendimento do motor e o seu estado inicial (ligada ou desligada). A versão final do *Software* é aplicável para qualquer configuração em paralelo entre as bombas, desde que as

cotas de uma bomba e dos dois extremos dos dutos conectados a ela sejam iguais, não representa o funcionamento de bombas em série ou *boosters* (o método gráfico não contém esta restrição). O rendimento do motor, para qualquer tipo de bomba, é considerado constante.

São os elementos de conexão dos dutos. É onde ocorre a mistura de fluidos. As únicas informações requeridas são: a descrição do nó e sua cota. As cotas de um nó e dos extremos dos dutos conectados a ele deverão ser iguais. Os dutos são os elementos de conexão entre bombas e tanques, enquanto que se conectam entre si através dos nós. Os dutos possuem um comprimento, um diâmetro e uma rugosidade, que são utilizados para o cálculo da perda de carga, e, as cotas dos extremos.

Outros dados são necessários: limites máximo e mínimo de trabalho para pressões e velocidades. O escoamento, ao longo do duto, é considerado constante, isto é, todas as características do fluido (vazão, massa específica, viscosidade cinemática, temperatura e BSW) não mudam ao longo do seu comprimento. A variação da rugosidade do duto não é considerada, a qual deveria variar conforme a alternância entre a incrustação de resíduos no seu interior decorrente da qualidade do petróleo escoado e da limpeza realizada periodicamente nos mesmos.

Os tanques são os elementos de armazenamento do fluido na rede. Podem ser utilizados sozinhos ou como vasos comunicantes (equalizados). As seguintes informações são requeridas: área da base, altura, níveis máximo e mínimo de controle e características iniciais do fluido contido nele. É aceita a equalização de tanques de qualquer dimensão (altura e área da base); permite-se a programação da equalização dos tanques no tempo através de um editor, com o qual é possível definir quais grupos de tanques equalizados deverão ser criados em períodos determinados.

Em cada estação haverá apenas um grupo *Recebendo* e um *Transferindo*, o restante dos grupos ficará no estado *Neutro*. Um grupo poderá ficar nos estados *Recebendo* e *Transferindo*, ao mesmo tempo, somente no caso em que ele for o único em uma estação. O estado dos tanques é definido de acordo com as seguintes regras:

- Quando o nível de um grupo que está Transferindo atingir o nível mínimo de controle, escolhe-se outro para esta tarefa, escolhe-se aquele que estiver com maior volume ocupado;
- Quando o nível de um grupo que está Recebendo atingir o nível máximo de controle, escolhe-se outro para esta tarefa, escolhe-se aquele que estiver com maior volume disponível.

As estações são elementos utilizados para organização gráfica dos outros elementos da rede, não interferem em nenhum cálculo hidráulico e nem na estratégia de controle. Na Figura 1 estão representadas nove estações, sendo uma estação intermediária (ETB), uma estação de tratamento (GMR) e as demais estações são produtoras de petróleo.

Observa-se que em um sistema ramificado o fluido escoar nos dutos em um só sentido, desta forma, denomina-se a extremidade onde o fluido “entra” no duto, montante e, de onde o fluido “sai”, jusante (Figura 4).



Figura 4 - Sentido de escoamento do fluido no duto.

As características do fluido (vazão, massa específica, viscosidade cinemática, temperatura e BSW) não mudam ao longo do comprimento do duto, em um determinado instante. A variação da temperatura do fluido ao longo do seu comprimento não está sendo considerada.

As pressões à jusante nos dutos afluentes (PJ1 e PJ2) e a montante nos dutos efluentes (PM3 e PM4) devem ser iguais (Figura 5).

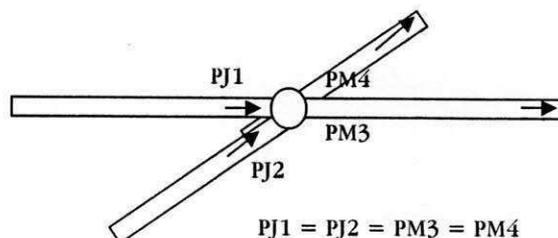


Figura 5 - Pressões nas conexões entre dutos.

A diferença entre as pressões à jusante (PJB) e à montante na bomba (PMB) é igual a sua altura manométrica (Hman) (Figura 6).

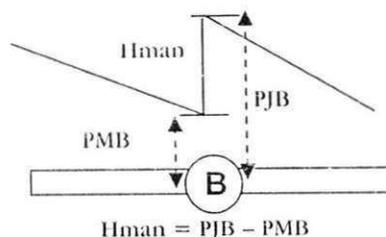


Figura 6 - Altura manométrica da bomba.

Cotas no entorno de uma bomba: As cotas dos extremos dos dutos conectados a uma bomba devem ser iguais à sua cota (Figura 7).

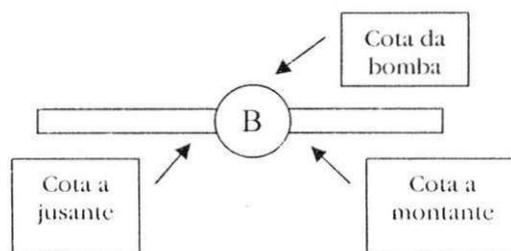


Figura 7 - Cota da bomba.

Cotas no entorno de um nó: As cotas dos extremos dos dutos conectados a um nó devem ser iguais à sua cota (Figura 8).

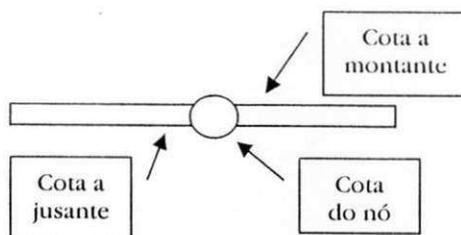


Figura 8 - Cota do nó.

Em um duto conectado a um tanque, a pressão no ponto de conexão é tomada como sendo numericamente igual ao nível do fluido no tanque, adicionado da cota de fundo e subtraído da cota do extremo do duto (Figura 9). O *Software* considera apenas o caso em

que os dutos estão conectados no extremo inferior do tanque, ou seja, a pressão a montante do duto será igual ao nível de fluido do tanque.

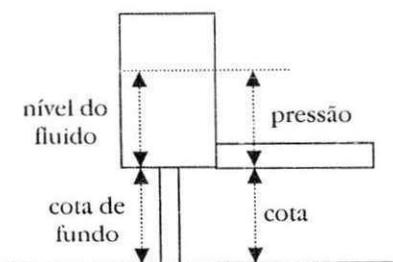


Figura 9 - Pressão no extremo do duto conectado ao tanque.

Volume ocupado é o volume preenchido por fluido em um tanque ou em um grupo de tanques equalizados.

Volume disponível é o volume que falta para encher um tanque ou um grupo de tanques equalizados até o menor nível máximo de controle (Figura 10);

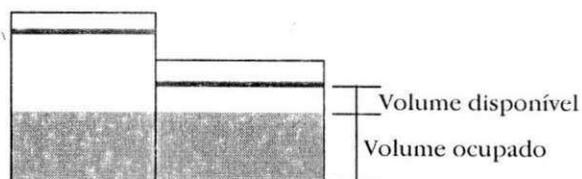


Figura 10 - Volumes nos tanques.

5. Método gráfico

O algoritmo é uma generalização, para redes complexas, do método clássico de resolução gráfica para associação, em uma rede de escoamento ramificada simples, de múltiplas bombas centrífugas [5]. O princípio teórico é o do equilíbrio hidráulico na rede, de tal modo que os pontos de trabalho de todas as bombas são resultado da interdependência operacional entre elas.

Todas as curvas dos dutos e das bombas do sistema são convertidas em uma única curva, a qual conserva a influência de cada elemento da rede e indica o valor da vazão de entrada no tanque final. A composição desta curva é iniciada nos tanques produtores, onde:

A curva a montante do duto conectado a um tanque produtor é igual à pressão provocada pelo nível do tanque conectado a ele:

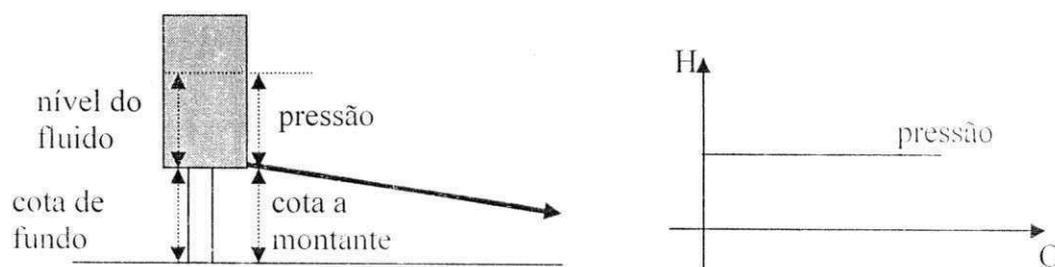


Figura 11 - Duto conectado a um tanque produtor.

A curva a jusante de qualquer duto é igual a curva a montante menos a curva do duto, ou seja, parte da energia piezométrica a montante de um duto dissipa-se ao longo do mesmo segundo a curva do duto:

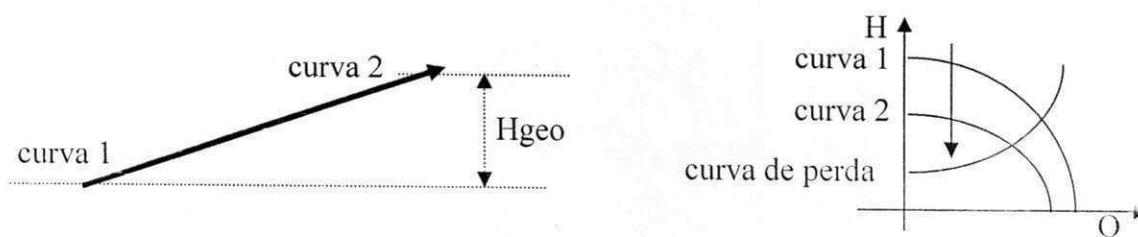


Figura 12 - Curva a jusante de um duto.

A curva a jusante de qualquer bomba é igual à curva a montante somada à curva da bomba, ou seja, toda a energia piezométrica que chega a uma bomba soma-se à energia da mesma segundo a curva da bomba:

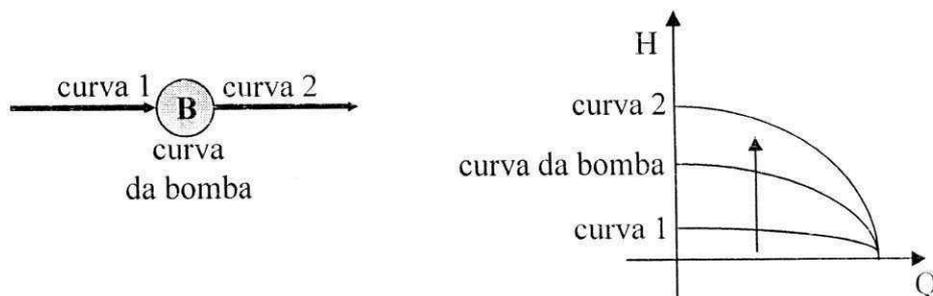


Figura 13 - Duto conectado a uma bomba.

A curva a jusante de um nó é igual a soma das abscissas das curvas a montante do mesmo:

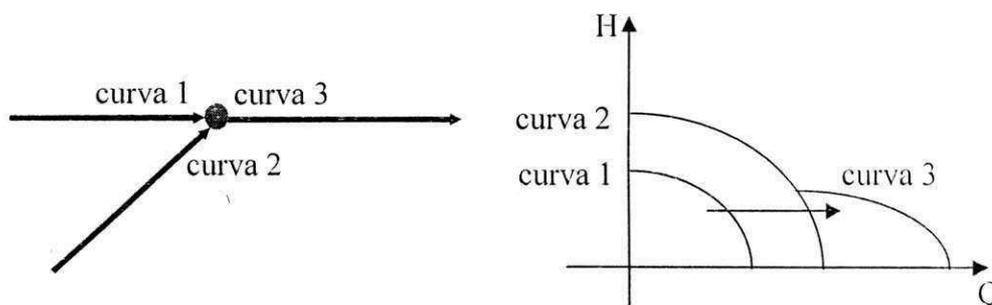


Figura 14 - Duto conectado a uma bomba.

A intersecção entre a curva a jusante do duto conectado ao tanque final e o valor da pressão provocada pelo nível de fluido do tanque neste duto, indica o valor da vazão do duto. Esta vazão é única ao longo do duto, então, se for inserida na curva a montante deste duto indica a pressão a montante do mesmo:

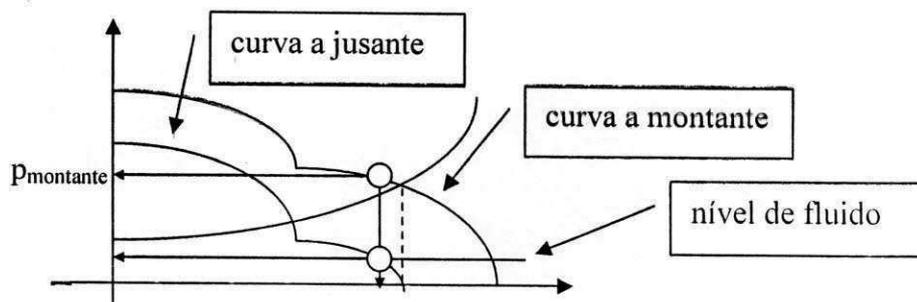


Figura 15 - Pressões no duto.

Quando a pressão a montante é encontrada em um duto conectado a um nó, esta pressão é a mesma para os outros dutos conectados no mesmo nó, então, se o valor desta pressão for inserida nas curvas a jusante dos outros dutos, indicará a vazão que passa por cada um:

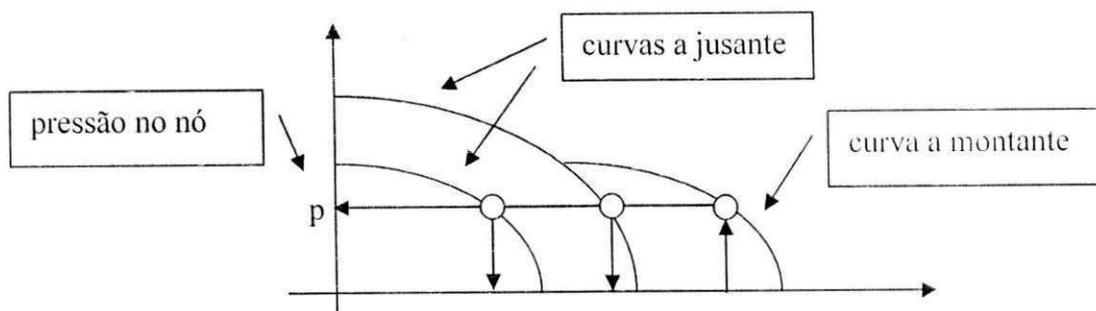


Figura 16 - Vazões nos dutos conectados em um mesmo nó.

No final do processo, possui-se todos os valores das pressões nos nós e das vazões nos dutos da rede hidráulica, permitindo calcular a perda de carga em cada duto, a altura manométrica de cada bomba e, a potência e consumo de energia de cada conjunto motor-bomba. A partir dos dados disponíveis da rede exemplo, constrói-se as curvas das bombas e dos dutos, segundo a equação de cada um; no quadro 1, é possível observá-las em destaque. As curvas b1, b2 e b3 representam o comportamento das bombas 1, 2 e 3, respectivamente, em função da vazão. E, as curvas d1, d2, d3, d4, d5 e d6 representam o comportamento dos dutos.

O próximo passo, é encontrar duas curvas para cada duto, onde a primeira representa o comportamento da rede até a montante do duto e, a segunda representa o comportamento até a jusante, elas devem ser construídas a partir dos dutos conectados nos tanques produtores. Na rede exemplo, há três destes dutos (1, 2 e 6). No quadro 2, observam-se as três curvas a montante dos dutos 1, 2 e 6 (p_{1m} , p_{2m} e p_{6m} , respectivamente); as curvas p_{1m} e p_{2m} foram formadas pela soma das ordenadas das curvas das bombas 1 e 2 ao valor dos níveis de fluido nos tanques 1 e 2; enquanto a curva p_{6m} é uma reta horizontal igual ao valor do nível no tanque 6.

No quadro 3, observam-se as três curvas a jusante dos dutos 1, 2 e 6 (p_{1j} , p_{2j} e p_{6j}), cada uma foi formada pela subtração das ordenadas da curva a montante do duto pelas ordenadas da curva do mesmo, ou seja, $p_{1j} = p_{1m} - d_1$, $p_{2j} = p_{2m} - d_2$ e $p_{6j} = p_{6m} - d_6$.

Nota-se que as curvas p_{1j} e p_{2j} são idênticas. A curva p_{3m} é encontrada somando-se as ordenadas das curvas p_{6j} e b_3 , ou seja, da curva anterior à bomba 3 e desta bomba. Por outro lado, a curva p_{4m} (a montante do duto 4) é encontrada a partir da soma das abscissas das curvas a jusante dos dutos 1 e 2 (p_{1j} e p_{2j}), devido ao efeito do nó N1 (ver quadro 4).

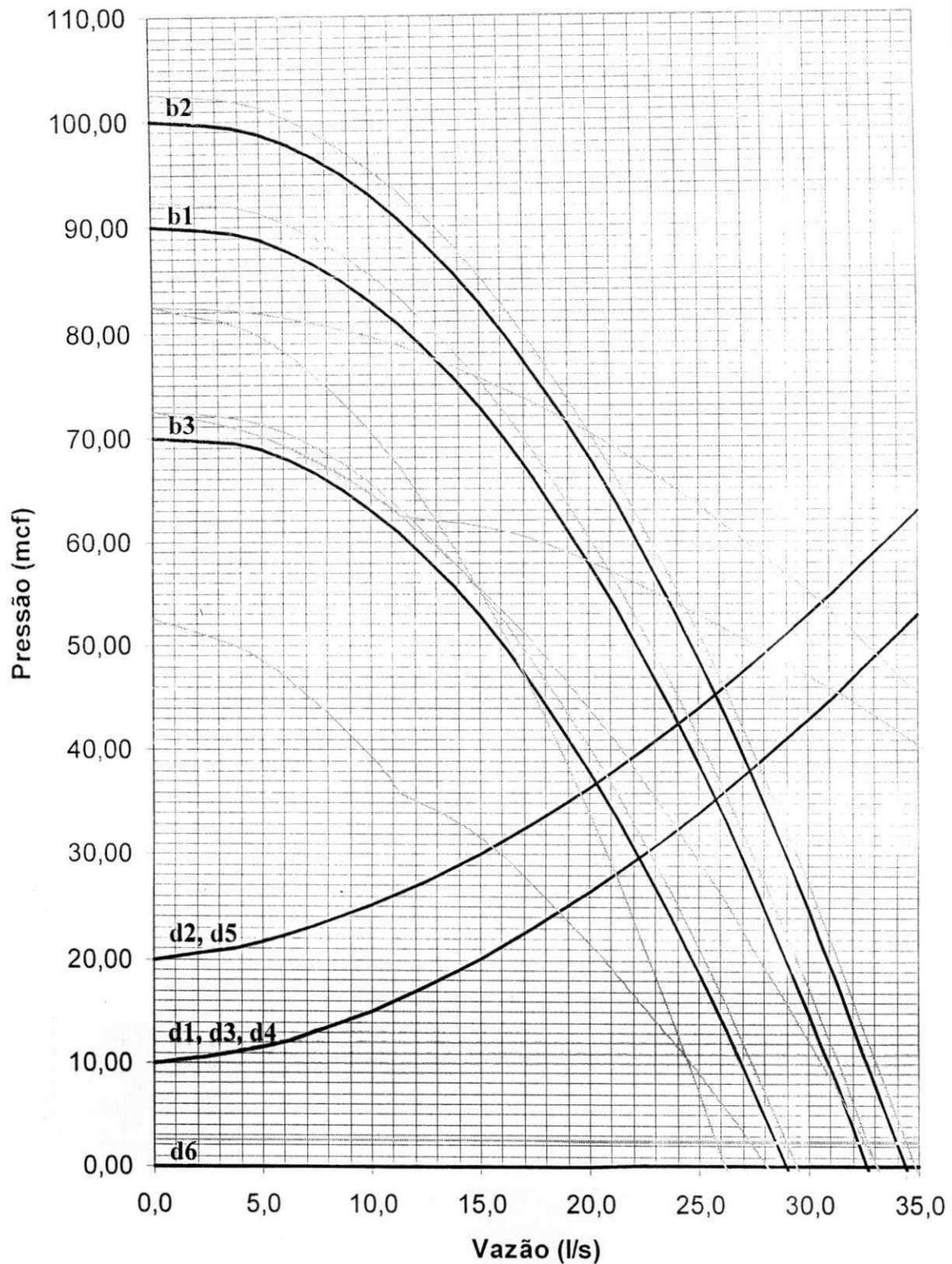
No quadro 5, observam-se as duas curvas a jusante dos dutos 3 e 4 (p_{3j} e p_{4j}), cada uma foi formada pela subtração das ordenadas da curva a montante do duto pelas ordenadas da curva do mesmo, ou seja, $p_{3j} = p_{3m} - d_3$ e $p_{4j} = p_{4m} - d_4$. A curva a montante do duto 5 (p_{5m}) é encontrada a partir da soma das abscissas das curvas a jusante dos dutos 3 e 4 (p_{3j} e p_{4j}), devido ao efeito do nó N2. A curva a jusante do duto 5 (p_{5j}) é formada pela subtração das ordenadas da curva a montante do duto pelas ordenadas da curva do mesmo, ou seja, $p_{5j} = p_{5m} - d_5$. Ainda, no quadro 6, é possível observar a reta horizontal que representa o nível de fluido no tanque 5, a intersecção entre esta reta e a curva p_{5j} indica o valor da vazão que passa pelo duto 5 e entra no tanque 4 (Q_5). O valor desta vazão inserido na curva p_{5m} indica o valor da pressão a montante do duto 5 (pressão do nó N2).

Com o valor da pressão do nó N2, que é igual às pressões a jusante dos dutos 3 e 4, inserido nas curvas p_{3j} e p_{4j} , são encontrados os valores das vazões nos dutos 3 e 4 (Q_3 e Q_4), ver quadro 5 novamente.

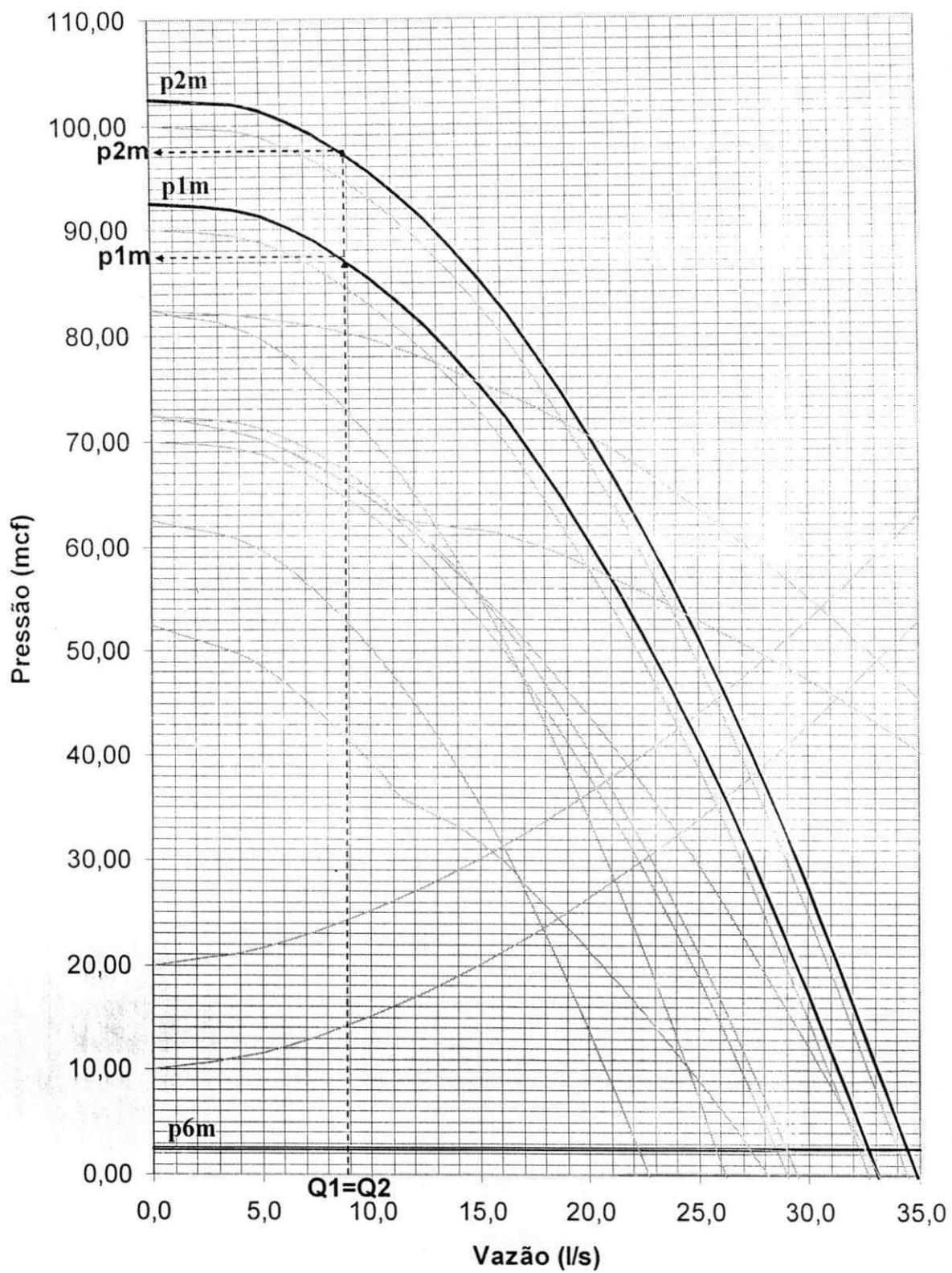
Retornando ao quadro 4; com os valores das vazões Q_3 e Q_4 inseridos nas curvas a montante dos respectivos dutos, são encontrados os valores das pressões a montante de cada um. A pressão a montante do duto 4 (pressão do nó N1) é igual às pressões a montante dos dutos 1 e 2, então, com o valor da pressão do nó N1 inserido nas curvas p_{1j} e p_{2j} são encontrados os valores das vazões nos dutos 1 e 2 (Q_1 e Q_2), que são iguais, ver quadro 3.

Com os valores das vazões Q_1 e Q_2 inseridos nas curvas a montante dos respectivos dutos, são encontrados os valores das pressões a montante de cada um (ver quadro 2). A vazão no duto 6 é igual a do duto 3. Agora são conhecidas todas as vazões e pressões da rede hidráulica.

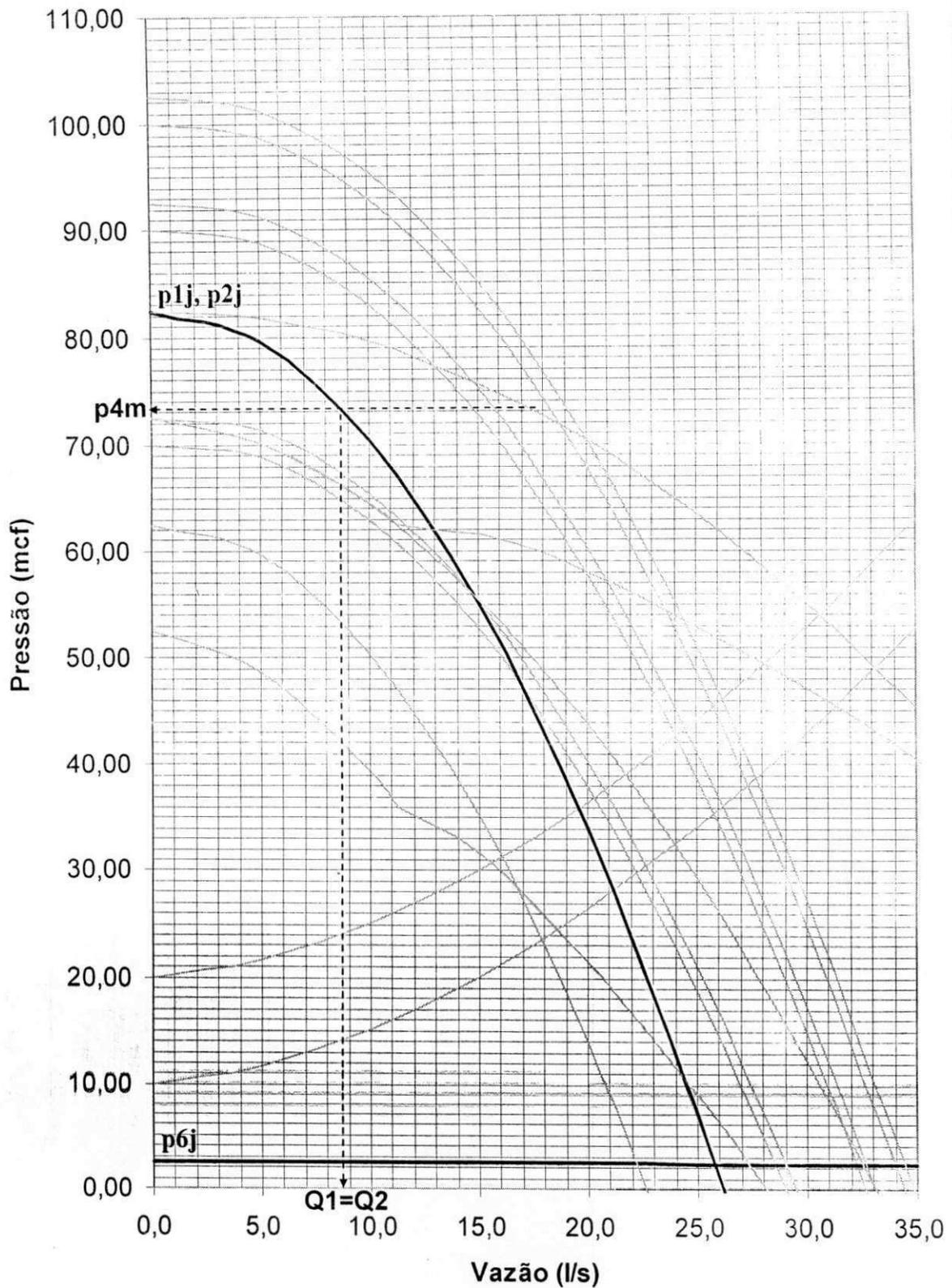
Método Gráfico - quadro1



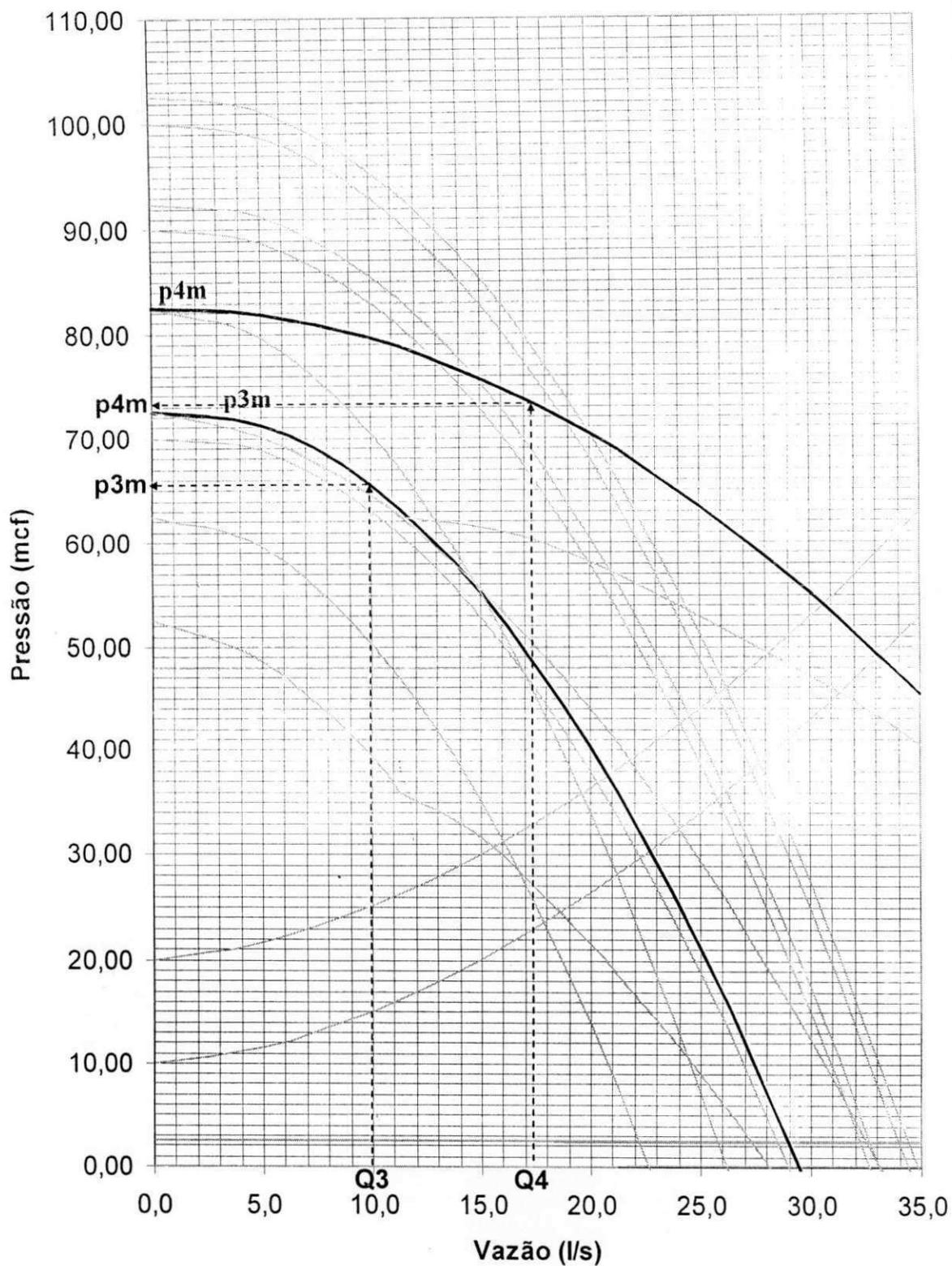
Método Gráfico - quadro 2



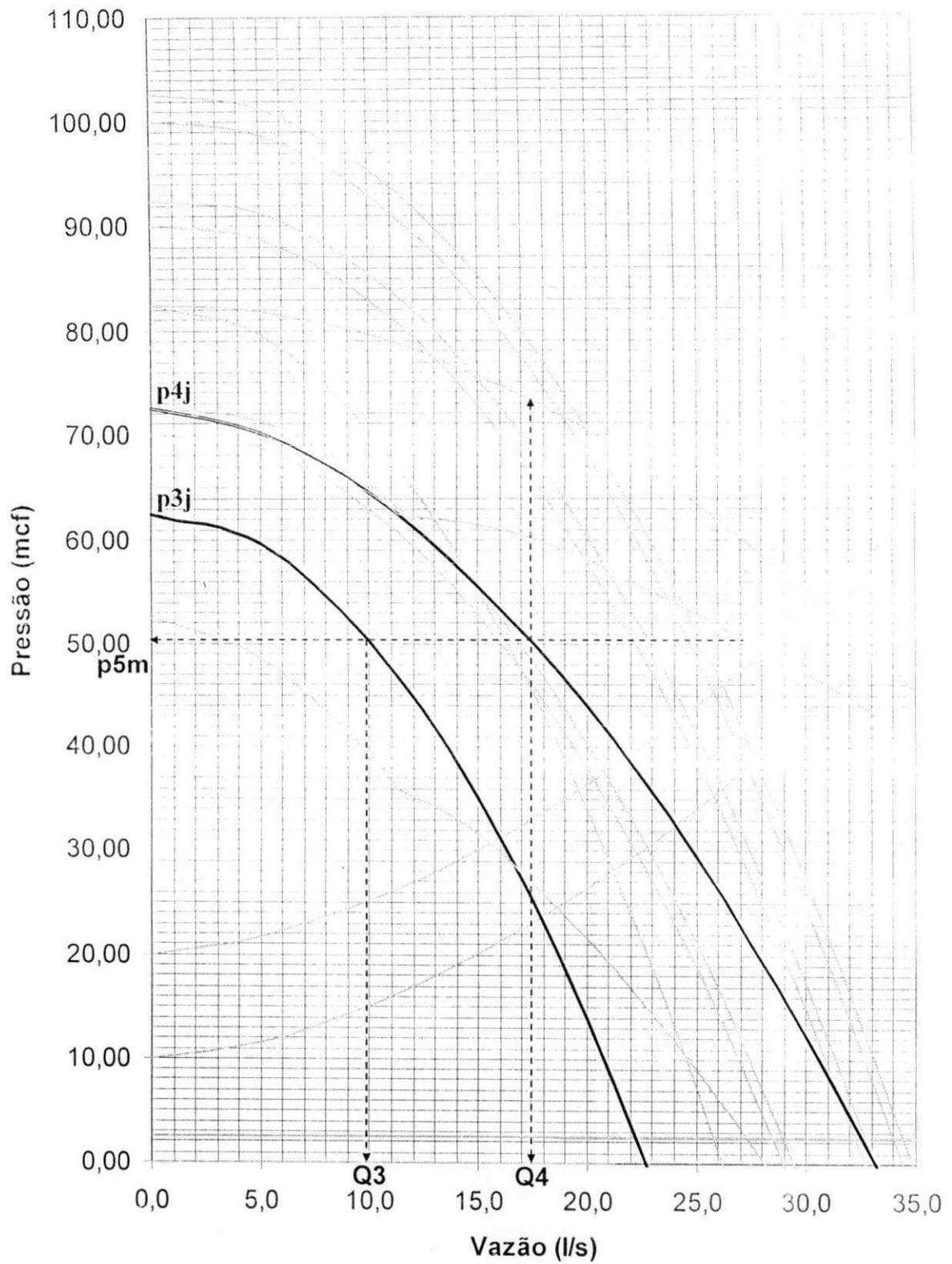
Método Gráfico - quadro 3



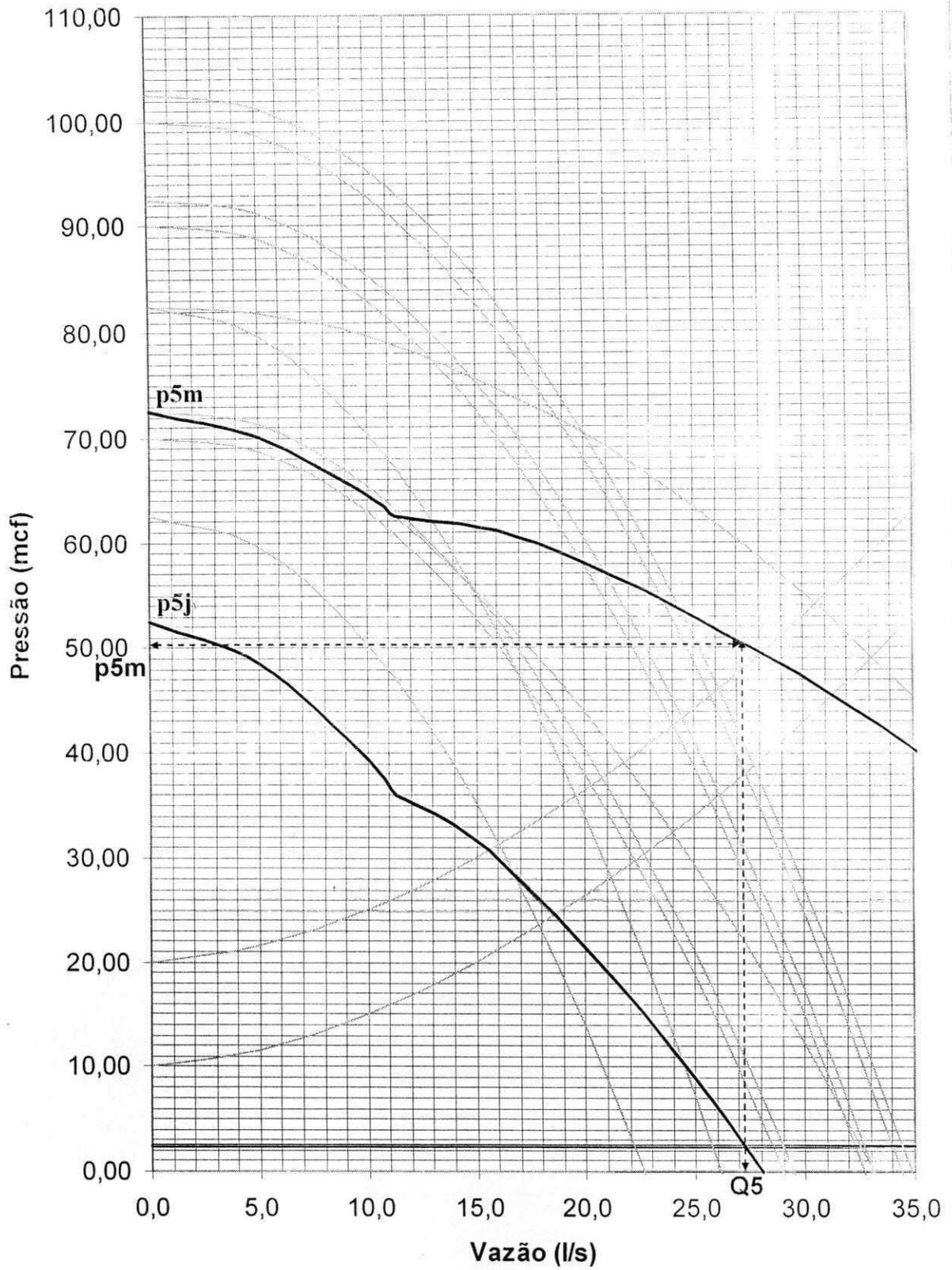
Método Gráfico - quadro 4



Método Gráfico - quadro 5



Método Gráfico - quadro 6



6. Método iterativo

O que se deseja na simulação é a obtenção do equilíbrio hidráulico da rede, ou seja, encontrar o ponto de funcionamento do sistema que garanta o contínuo escoamento dentro de limitações físicas e operacionais impostas. Equilibrada a rede, informações importantes podem ser extraídas de cada elemento, para uma dada configuração da rede em um determinado instante. Para tanto, arbitra-se, inicialmente, o ponto de trabalho de cada bomba, calcula-se o comportamento da rede (vazões, perdas de carga, pressões, etc.), e verifica o atendimento ao equilíbrio hidráulico (critério de parada). Se esse não for atendido, realizam-se novos cálculos iterativamente, partindo-se das novas vazões encontradas, até que o critério de parada seja ativado.

O procedimento de cálculo é composto das seguintes etapas:

Estimativas iniciais das vazões das bombas: Para cada bomba, estima-se uma vazão inicial. Convencionou-se que, para as bombas centrífugas, a vazão estimada inicial é igual à metade da vazão resultante da resolução da equação de sua respectiva curva característica obtida para altura manométrica igual a zero, enquanto que, para as bombas volumétricas, a vazão estimada inicial é igual a vazão resultante da resolução da equação da sua curva característica para altura manométrica igual a zero (Figura 17).

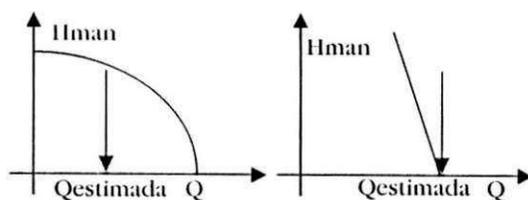


Figura 17 - Vazão estimada para as bombas centrífugas e volumétricas.

Segundo Driedger [2], a curva característica das bombas volumétricas é basicamente linear. Apesar de produzirem fluxo pulsante, as bombas alternativas, com vários êmbolos (duplex, triplex ou multiplex) e/ou com duplo efeito, descarregam uma vazão aproximadamente constante ao longo do tempo, recaindo no gráfico das bombas volumétricas da Figura 18.

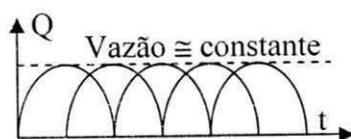


Figura 18 - Vazão estimada para as bombas alternativas.

Adotadas as vazões para as bombas determinam-se as vazões estimadas em cada duto da rede até o tanque receptor final (Equação 6); quando houver dutos em paralelo, a vazão é inicialmente dividida pelo número de dutos e depois é redistribuída. De posse das vazões estimadas para cada duto, calculam-se as perdas de carga nos dutos a partir das Equações 1, 2, 3, 4 e 5.

Determina-se a pressão a jusante do duto conectado ao tanque final e a pressão a montante dos dutos conectados aos tanques produtores. Calcula-se a pressão a montante e a jusante de todos os dutos sequencialmente, até encontrar a pressão a jusante e a montante de todas as bombas, utilizando as Equações 8 e 9.

Pode ocorrer de ser encontrada alguma pressão maior que a maior pressão de trabalho de uma bomba centrífuga (para vazão igual a zero), quando isto ocorre, diminui-se progressivamente (de 10 em 10 por cento do valor inicial máximo estimado) a vazão estimada das bombas volumétricas.

Calcula-se a altura manométrica de cada bomba pela diferença de pressão a jusante e a montante da mesma (Equação 7). De posse das alturas manométricas, calcula-se uma nova vazão de descarga para todas as bombas, a partir da inserção deste valor na sua curva característica, através da Equação 6. Toma-se como nova vazão estimada esta vazão de descarga calculada.

Comparam-se as vazões calculadas e as estimadas até que a diferença entre as duas seja menor que um valor mínimo preestabelecido (critério de parada), senão, repete-se todo procedimento anterior, assumindo que a nova vazão estimada é igual a vazão calculada.

Obtidos os valores reais das vazões (atendido o critério de parada), realiza-se o balanço hídrico nos tanques, onde é calculado o nível atual de cada um (Equação 9) e se calcula os consumos de energia envolvidos, com isso, finaliza-se um passo da simulação.

6.1 Dutos em paralelo

O *Software* é capaz de simular redes hidráulicas com associações de dois dutos em paralelo. Na Figura 19, pode-se observar um exemplo de configuração de rede, na qual os dutos 10 e 19 estão em paralelo.

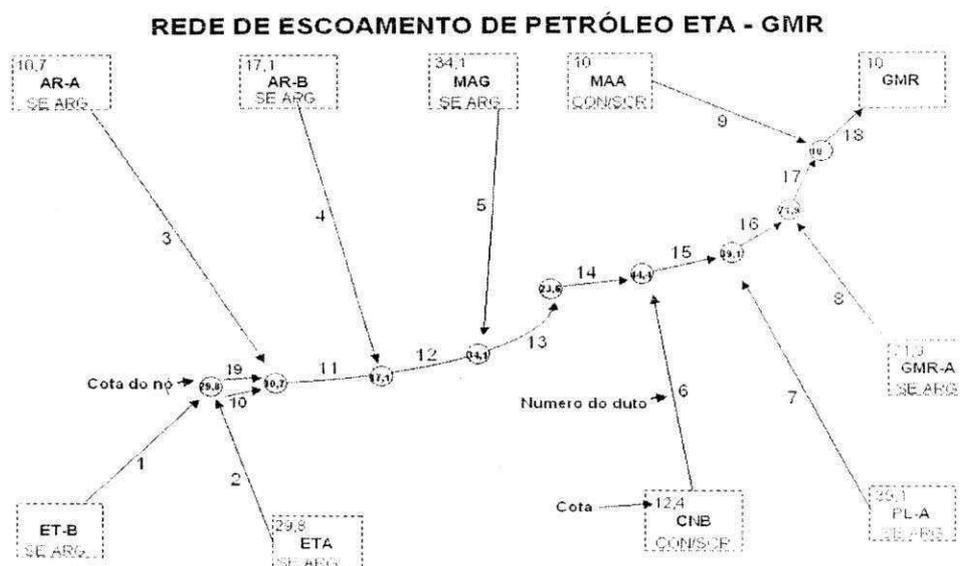


Figura 19 - Rede com dutos em paralelo.

Sabe-se que, quando a rede hidráulica está em equilíbrio, as pressões nas extremidades de todos os dutos que compartilham um mesmo nó são iguais, isto ocorre com as pressões a montante e/ou a jusante de dutos que estão em paralelo. Na Figura 20, por exemplo, a pressão a montante de D4 é igual às pressões à jusante de D1 e D3, a pressão a montante de D3 é igual a pressão à jusante de D2 e, as pressões a montante de D1 e D2 devem ser iguais. A pressão à jusante de D0 será igual ao valor da pressão a montante de D1, quando este valor for igual a pressão a montante de D2, situação de equilíbrio.

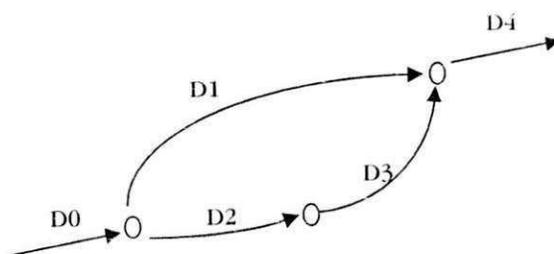


Figura 20 - Pressões nos dutos em paralelo.

No cálculo hidráulico, arbitram-se vazões nas extremidades a montante da rede que são conduzidas até o tanque receptor final, de onde se origina o cálculo de todas as pressões do sistema, acompanhando a conexão entre os elementos. Quando, na execução dos cálculos regressivos, existem dutos em paralelo, geralmente, a igualdade das pressões a montante não é obtida de imediato. Para que isso ocorra, utiliza-se então, um método iterativo, que consiste em ponderar a vazão que passa por cada um dos dois dutos através da comparação de suas pressões a montante. Através do seguinte procedimento:

- Inicialmente, adota-se que em cada duto passa a vazão de montante dividida pelo número de dutos (neste caso, dividido por 2);
- Quando o cálculo iterativo da rede hidráulica “regressa”, encontra-se o valor da pressão a jusante dos dois dutos, com este valor, juntamente com as vazões arbitradas para cada um, é possível obter todas as suas informações, inclusive a pressão a montante dos dois, as quais, geralmente, não são iguais, para igualá-las:
- Verifica-se a pressão a montante de um dos dutos (D1);
- Adota-se a vazão do duto D1 como sendo igual a uma constante multiplicada pela vazão que chega. Inicialmente, esta constante é igual a $1/n$, sendo n o número de dutos;
- Adota-se a vazão do duto D2 igual a que chega menos a anterior ($Q - Q_{D1}$);
- Se a pressão do duto D1 for maior que a do duto D2, subtrai da constante uma parcela;
- Se a pressão do duto D1 for menor que a do duto D2, soma-se à constante uma parcela;
- Verifica-se a diferença entre os valores das pressões a montante dos dois dutos; toda vez que a diferença entre os valores das pressões a montante dos dois dutos mudar de sinal, o valor da parcela diminui na proporção de 10^{-k} , $k = 1, 2, 3, 4, \dots$
- Se esta diferença for menor que um valor preestabelecido, o valor das pressões a montante dos dois dutos é igual a média dos dois valores encontrados finais.

6.2 Regra da mistura

Certos sistemas, como os de escoamento de petróleo, apresentam a particularidade de reunir fluidos com diferentes características (massa específica, temperatura, viscosidade cinemática, etc.) nos tanques, extraídos de vários poços de um campo produtor e, não há, portanto, garantia de que apenas um único fluido está em movimento pelo sistema, como ocorre em um sistema de distribuição de água.

É possível, através de ensaios, determinar algumas características do fluido extraído em cada poço produtor, porém essa caracterização torna-se mais complexa ao longo da rede de escoamento (dutos); principalmente, porque ocorrem alterações em função da temperatura e das vazões nos dutos ao longo do tempo, influenciando o comportamento da rede como um todo.

O conhecimento de algumas destas características do fluido em cada ponto é importante, porque elas entram diretamente no cálculo do equilíbrio hidráulico. Estas características são a massa específica, que entra no cálculo da potência consumida pelo conjunto motor-bomba, a viscosidade cinemática, que entra no cálculo da perda de carga do duto e, a temperatura do fluido, que influencia o comportamento das duas anteriores.

Na entrada de cada estação que possui tanques produtores, informam-se cinco dados básicos do fluido efluente naquele ponto do sistema, são esses: o valor da vazão, da massa específica, do BSW, da temperatura e, a equação da viscosidade cinemática.

BSW, temperatura e massa específica: Após um nó ou na entrada de um tanque produtor, quando recebem mais de um fluido, considera-se que a temperatura, o BSW e a massa específica do fluido derivado são resultados da média ponderada das temperaturas, dos BSW e das massas específicas dos fluidos primitivos com relação ao somatório das suas vazões, para isto, utilizam-se as seguintes equações:

Equação 10 - do BSW:

$$BSW_3 = \frac{BSW_1 \cdot Q_1 + BSW_2 \cdot Q_2}{Q_1 + Q_2}$$

Equação 11 - da temperatura:

$$T_3 = \frac{T_1 \cdot Q_1 + T_2 \cdot Q_2}{Q_1 + Q_2}$$

Equação 12 - da massa específica:

$$\rho_3 = \frac{\rho_1 \cdot Q_1 + \rho_2 \cdot Q_2}{Q_1 + Q_2}$$

Onde: T_i = temperatura do fluido ($^{\circ}\text{C}$);

BSW_i = BSW do fluido (%);

Q_i = vazão do passo de cálculo (m^3/s);

ρ_i = massa específica para determinada temperatura (Kg/m^3).

É considerado apenas um único fluido em cada tanque, que será sempre igual ao fluido que entra na estação. Ou seja, a regra da mistura é realizada apenas com relação aos fluidos que entram na estação, desprezando-se o fluido que já está contido no tanque, à exceção do BSW, como será discutido na.

Viscosidade cinemática: A regra da mistura é aplicada de dois em dois fluidos primitivos diferentes para o caso da viscosidade cinemática. Um fluido é diferente de outro se sua equação da viscosidade cinemática for diferente daquele a ser misturado. Uma equação é diferente de outra quando seus coeficientes diferem.

O processo da regra da mistura só pode ser feito a partir das informações de dois fluidos primitivos, ou seja, caso haja mistura de mais de 2 fluidos, o cálculo deve ser feito dois a dois. O princípio é o seguinte: cada duto contém um único fluido com informações bem definidas a jusante de seu comprimento, e para o duto que está após um nó, é necessário aplicar a regra da mistura (quando necessária) para determinar o fluido a sua montante (Figura 21).

Para encontrar a viscosidade cinemática de um fluido derivado da mistura de outros dois (primitivos) é necessário, inicialmente, conhecer a equação de todos os fluidos primitivos que entram no cálculo da regra da mistura. Essa equação é obtida, normalmente,

através de medições em laboratório e representa o comportamento da viscosidade cinemática em função da temperatura e tem a forma da seguinte equação:

Equação 13 - da viscosidade cinemática:

$$\nu = p \cdot T^q$$

Onde: ν = viscosidade cinemática (m^2/s);

T = é temperatura ($^{\circ}C$);

p e q = são coeficientes da equação do fluido, obtidos através da regressão.

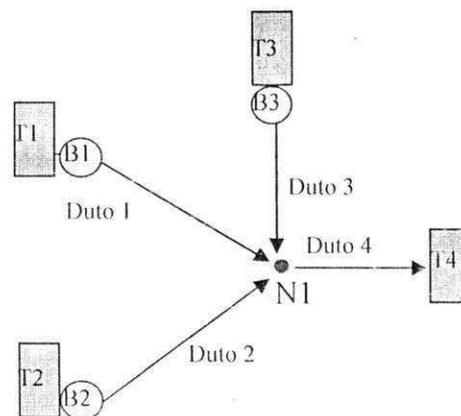


Figura 21 - Regra da mistura de fluidos.

Para fluidos com a mesma temperatura, determinam-se as duas viscosidades cinemáticas dos fluidos primitivos (ν_1 e ν_2). Com estes valores é possível calcular o valor da viscosidade cinemática do fluido derivado para a respectiva temperatura, que inclui a influência das porcentagens da vazão de contribuição dos mesmos na vazão da mistura, através da equação:

Equação 14 - da viscosidade cinemática:

$$\nu_3 = a \cdot e^{h \cdot pc}$$

Onde: ν_3 = viscosidade do fluido derivado (m^2/s);

$$a = e^{[\ln(\nu_{maior}) - 100 \cdot b]} \text{ (adimensional);}$$

$$b = \frac{\ln(\nu_{maior}) - \ln(\nu_{menor})}{100} \text{ (adimensional);}$$

$$pc = \frac{100 \cdot Q_{\nu_{maior}}}{Q_{\nu_{menor}} + Q_{\nu_{maior}}} \text{ (%);}$$

v_{maior} = fluido de maior viscosidade (m^2/s);

v_{menor} = fluido de menor viscosidade (m^2/s);

pc = porcentagem da vazão de contribuição do fluido de maior viscosidade.

Para o caso de fluidos com temperaturas diferentes, segue-se o seguinte procedimento: 1- Identificam-se as duas temperaturas dos fluidos primitivos; 2- Aplica-se a regra da mistura (como foi explicado anteriormente) para cada uma das seguintes temperaturas: 10°C, 30°C, 50°C, 70°C e 90°C; 3- Encontram-se cinco valores da viscosidade cinemática do fluido derivado; 4- Constrói-se, através de regressão não-linear, a nova equação da viscosidade cinemática a partir destes pontos; 5- Refaz-se o procedimento quando há mistura de mais de dois fluidos com temperaturas diferentes; 6- Encontra-se a temperatura do fluido primitivo (através da média ponderada da vazão), aplicando-se este dado na equação da viscosidade cinemática encontrada por regressão não-linear para o fluido derivado, encontra-se seu respectivo valor.

Para a construir a equação da viscosidade cinemática do fluido derivado a partir dos pontos encontrados, utilizam-se as seguintes equações:

Equação 15 - coeficiente da Eq. da viscosidade cinemática:

$$q = \frac{n \cdot \sum (Lt \cdot Lv) - \sum (Lt) \cdot \sum (Lv)}{n \cdot \sum (Lt)^2 - (\sum Lt)^2}$$

Equação 16 - coeficiente da Eq. da viscosidade cinemática:

$$p = 10^{(\log_{10} v_{50} - q \cdot \log_{10} T_{50})}$$

Onde: $Lt = \log_{10} T_i$;

$Lv = \log_{10} v_i$;

n é o número de pontos;

p e q = parâmetros da equação da viscosidade cinemática do fluido derivado (Equação 13). A equação de p é aplicada para 50°C.

7. Conclusões

A equipe de trabalho atingiu os objetivos traçados com a Petrobrás, ao ter apresentado um *software* capaz de auxiliar no processo de automação da operação das redes de produção e escoamento terrestre de petróleo, no sentido de permitir um melhor aproveitamento das malhas existentes, possibilitando aumentar a produção e reduzir os custos de bombeamento.

Dentro disto, o simulador, e mais especificamente o algoritmo para resolução hidráulica e todas as funcionalidades auxiliares cumpriram os seus papéis. Mesmo considerando que todo modelo computacional é meramente uma representação simples da realidade. É bom lembrar que o *software* está na sua primeira versão e, já foram detectados pontos que precisam de melhoramentos, principalmente, naqueles relacionados à variabilidade das características físicas do escoamento e químicas do fluido transportado.

É justamente neste último ponto onde o método gráfico falhou, ele não permitiu uma simplicidade de implementação computacional quando passou a tratar de fluidos variáveis no tempo e mistura de fluidos, também não garantiu um tempo menor de processamento em comparação com o método iterativo. Contudo, o método gráfico pode ser ainda melhorado. A sua grande qualidade é permitir uma visibilidade clara e mais abrangente do funcionamento da rede hidráulica, tendo aplicação acadêmica.

O método iterativo permitiu um desenvolvimento mais simples e acelerado do simulador e das funcionalidades auxiliares (dutos em paralelo e regra da mistura, por exemplo), e garantiu um tempo de simulação compatível com os objetivos do *software*, mesmo tratando de redes de escoamento relativamente complexas com todas as características supracitadas. Porém, ele ainda necessita de melhoramentos para poder representar toda a complexidade hidráulica que ocorre no transporte de petróleo.

8. Bibliografia

- [1] BLACK, P. O., Bombas, Ao Livro Técnico Editora S/A, 2ª Edição, Rio de Janeiro, 1979.
- [2] DRIEDGER, W., Controlling Positive Displacement Pumps, 2000, http://www.driedger.ca/ce2_pdp/CE2_PDP.html
- [3] FOCKE, R. J., Bombas rotativas, Editora Libreria Del Colegio, Buenos Aires.
- [4] HICKS, T. G., Bombas su seleccion y aplicacion, Compania Editorial Continental, S.A. 12ª Impression, México, 1977.
- [5] MACINTYRE, A. J., Bombas e instalações de bombeamento, Editora LTC, 1997.
- [6] NEVES, E. T., Curso de hidráulica, Editora Globo, Porto Alegre, 1974.
- [7] OLUJIC. Z., Compute friction factors fast for flow in pipes, Chemical Engineering, p.91-93, dezembro, 1981.
- [8] PORTO, R. M., Hidráulica básica, EESC/USP – São Carlos, 1998.
- [9] SANTANA, C. W. S., *et al.*, Automatização de um método gráfico para associação de bombas em malhas de dutos para escoamento de petróleo, 2º Congresso brasileiro de P&D em petróleo e gás, Rio de Janeiro, 2003.
- [10] SANTANA, C. W. S., *et al.*, Automatização de um método gráfico para associação de bombas em redes hidráulicas ramificadas complexas, Planificación, proyecto y operación de redes de abastecimento de água, Valencia, Espanha, 2002.
- [11] SILVESTRE, P., Hidráulica geral, Livros Técnicos e Científicos Editora, Rio de Janeiro, 1979.

9. Anexo – Plano de estágio

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Ciências e Tecnologia
Departamento de Engenharia Civil
Área de Recursos Hídricos

PLANO DE ESTÁGIO: MONITORAMENTO E OTIMIZAÇÃO
DISTRIBUIDOS E EM TEMPO REAL DO ESCOAMENTO
DA PRODUÇÃO DE PETRÓLEO NO RIO GRANDE DO NORTE

Aluno: Cledson Wagner Souto Santana
Orientador: Carlos de Oliveira Galvão

Campina Grande – PB – Novembro 2002

PLANO DE ESTÁGIO:

Aluno: Cledson Wagner Souto Santana

Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

Curso: Engenharia Civil

Matrícula: 2.971.1193-6

Período: 11^o (décimo primeiro)

Duração do estágio: 3 meses, com início em Dezembro de 2002¹

Orientador do estágio: Carlos de Oliveira Galvão – Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Civil da UFCG

INTRODUÇÃO:

A progressiva automação da malhas de dutos para escoamento da produção de petróleo permite a implantação de sistemas computacionais de monitoramento e controle, com possibilidade de obtenção de resultados relevantes em termos de redução de custos e consumo de energia, e de riscos ao meio ambiente, aumentando a produção e a segurança operacional.

A PETROBRAS em parceria com a UFPB planeja a implantação de um sistema que atuará no Rio Grande do Norte. O problema que será abordado diz respeito à otimização do processo de escoamento do fluido pelo oleoduto Mossoró-Guamaré. O objetivo é o desenvolvimento de um sistema computacional para o monitoramento remoto, distribuído, e em tempo real do sistema de escoamento de fluidos produzidos na extração de petróleo, de forma a garantir vários a máxima eficiência do sistema.

ETAPAS DO TRABALHO:

Concepção do sistema: pesquisar, juntamente com a equipe de trabalho, o sistema de oleodutos, seus elementos e suas características, como se processa a operação de cada

¹ Obs.: O tempo total de estágio foi bem maior, de janeiro de 2001 a fevereiro de 2004.

elemento ou do sistema como um todo, como são tomadas as decisões operacionais frente a diferentes cenários ou anormalidades, identificar as ações urgentes.

Elaboração do sistema: auxiliar no desenvolvimento de um modelo computacional para representação do sistema e de sua operação.

Construção do sistema: auxiliar na reprodução computacional do sistema, aquisição, verificação e validação de dados com o sistema real, como também da representação da operação do mesmo frente a cenários operacionais hipotéticos.

Transição: auxiliar na transferência de conhecimentos adquiridos para a PETROBRAS na formulação de documentos, relatórios, publicações e/ou outras formas de transferência referentes a este estudo.

O desenvolvimento e a implementação do sistema computacional serão controlados por um processo baseado no RUP (Rational Unified Process). O processo a ser usado define quatro fases principais no desenvolvimento de um sistema computacional: concepção, elaboração, construção e transição. As fases de concepção e elaboração foram realizadas pelo estagiário anteriormente. Nesta etapa, o estagiário desenvolverá tarefas dentro das duas últimas fases de desenvolvimento.

CRONOGRAMA:

Atividades	Mês				
	Nov (2002)	Dez (2002)	Jan (2003)	Fev (2003)	Mar (2003)
Concepção					
Elaboração	x				
Construção	x	x	x	x	x
Transição			x	x	x

Campina Grande, 13 de Novembro de 2002.

Cledson Wagner Souto Santana

Carlos de Oliveira Galvão