

# INSTALAÇÕES E DESENVOLVIMENTO DE BOMBAS CRYOGÊNICAS<sup>1</sup>

## Otimização do NPSH para solução de problemas de cavitação e melhoramento do desempenho global das instalações

Sébastien Prat

### Resumo

As bombas são provavelmente os componentes mais críticos nas instalações de produção e distribuição de líquidos criogênicos, o projetista enfrenta problemas no momento da concepção, ligados ao fenômeno de cavitação e disponibilidade de Altura Líquida Positiva de Sucção (NPSH). Esse trabalho pretende mostrar de maneira didática e simples a influência dos principais parâmetros termodinâmicos e hidráulicos (componentes da linha de aspiração, posições relativas dos elementos físicos, elementos mecânicos e pressão de vaporização) sobre o design das bombas e instalações criogênicas. Pretendemos cobrir aplicações com bomba centrífugas e de pistão, abordando os aspectos e cuidados a serem tomados para compra, montagem, e manutenção de equipamentos.

**Palavras-chave:** Bombas criogênicas; NPSH; Cavitação; Instalações criogênicas

### DEVELOPMENTS IN CRYOGENIC PUMPS, THEIR INSTALLATION

### Abstract

After remembering general theory for pumps and definition of main parameters for cryogenic installations, this paper gives suggestion on how to improve NPSH, acting on global design of installations, and how to avoid cavitation problems. Applications on centrifugal and reciprocal pumps, shows the importance of global approach for cryogenic installation project management.

**Key words:** Cryogenic applications; NPSH; Cavitation; Pump installation.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao XXI Encontro de Produtores e Consumidores de Gases Industriais, Porto Alegre, RS, 16 a 18 de agosto de 2006.

<sup>2</sup> Engenheiro mecânico graduado pelo Instituto Nacional de Ciências Aplicadas de Lyon, França; Engenheiro de vendas para o Brasil e América do Sul - Cryostar

## 1 INTRODUÇÃO

Após um rápido estudo dos parâmetros hidráulicos e termodinâmicos chaves para o funcionamento das bombas, cruzamos as observações e os resultados para propor soluções para projetar instalações criogênicas. Abordamos as relações entre o NPSH e o fenômeno da cavitação, extendendo nossas conclusões para aplicações práticas de instalações criogênicas.

## 2 TEORIAS GERAIS PARA AS BOMBAS

### 2.1 NPSH

#### 2.1.1 Definição do NPSH

O NPSH é a denominação para Net Positive Suction Head que em português significa Altura Líquida Positiva de Sucção – ALPS

O NPSH corresponde ao excesso de pressão acima da pressão de saturação do fluido.

**NPSHa(Available)** é definido como altura de líquido disponível a um determinado momento. O NPSH disponível é determinado pelo projetista do circuito

**NPSHr** corresponde ao NPSH requerido pela bomba, baseando-se nos critérios de design da bomba. Seu valor é fornecido pelo fabricante da bomba

#### 2.1.2 Cálculo do NPSH

Tratando agora de uma instalação hidráulica de bombeamento com uma entrada e uma saída, podemos escrever a equação da energia para o escoamento unidirecional de um fluido real em regime

$$H_{\text{inicial}} + H_{\text{sistema}} = H_{\text{final}} + H_{p \text{ Totais}} \quad (1)$$

onde H é altura manométrica (metros)

$$\Rightarrow H_{\text{sistema}} = H_S = (H_{\text{final}} - H_{\text{inicial}}) + H_{p \text{ Totais}} \quad (2)$$

**H<sub>final</sub> – H<sub>inicial</sub>** corresponde à altura entre a linha de líquido e a altura média do tubo de saída da bomba (diferença entre a carga total inicial e final)

**H<sub>pTotais</sub>** corresponde as perdas de cargas devidas a instalação de bombeamento

#### Nota 1

*Ao aquecer um líquido, ele se expande, e a força de atração das moléculas do mesmo diminui, o que leva a uma diminuição da viscosidade e em consequência a uma diminuição das perdas de carga. Para o estado gasoso, é exatamente o contrário*

#### 2.1.3 Termos de cálculo da altura manométrica

H corresponde a energia hidráulica necessária para vencer as perdas de cargas

$$H = z + \frac{p}{\gamma} + \alpha \frac{v^2}{2g} \quad (3)$$

Z : carga potencial

$P/\gamma$  : carga de pressão  
 $\alpha$  : coeficiente cinético (4000 turbulento, 2000 laminar)  
 $v^2/2g$  : carga cinética

#### 2.1.4 Fórmula universal de cálculo de perdas (reconhecida pela ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas)

$$H_{\text{perdas}} = f \times \frac{(L + Le)}{D_H} \times \frac{v^2}{2g} \quad (4)$$

$L$  : comprimento da tubulação incluindo tubos e acessórios,

$Le$  : comprimento equivalente dos acessórios hidráulicos, ou seja, comprimento fictício de tubo que ao substituir a singularidade propicia uma perda distribuída igual a perda singular causada pela singularidade em questão;

$f=64/Re$  : o coeficiente de perda de carga distribuída, ou fator de atrito de Darcy, que no caso do escoamento laminar é igual a  $64/Re$

Re: número de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho \times v \times D_H}{\mu} \quad (5)$$

DH = diâmetro Hidráulico

V = velocidade de escoamento

$\rho$  = massa específica

$\mu$  = viscosidade (Influenciada pela temperatura)

Os termos da fórmula poem em evidência os parâmetros físicos a serem levados em consideração pelo projetista durante a concepção da instalação:

- **dados iniciais da captação do fluido**, o que equivale a dizer que conhece sua carga total inicial, ou seja,  $H_{\text{inicial}}$ ,
- **dados necessários para a descarga do fluido** o que equivale a conhecer a carga total final, ou seja,  $H_{\text{final}}$ ,
- **tipo de fluido** a ser transportado o peso específico (ou sua massa específica), a sua **viscosidade**, sua **pressão de vapor**, o dados da vazão desejada, parâmetro fundamental para o desenvolvimento do projeto, que vai determinar  $H_p$  Total

## 2.2 Definição do Líquido Saturado

### 2.2.1 Definição

O líquido saturado corresponde a uma condição termodinâmica na qual o líquido está em equilíbrio num ponto da curva de vapor para uma determinada temperatura e pressão. Qualquer redução de pressão ou aumento da temperatura partindo desse ponto leva à vaporização do líquido.

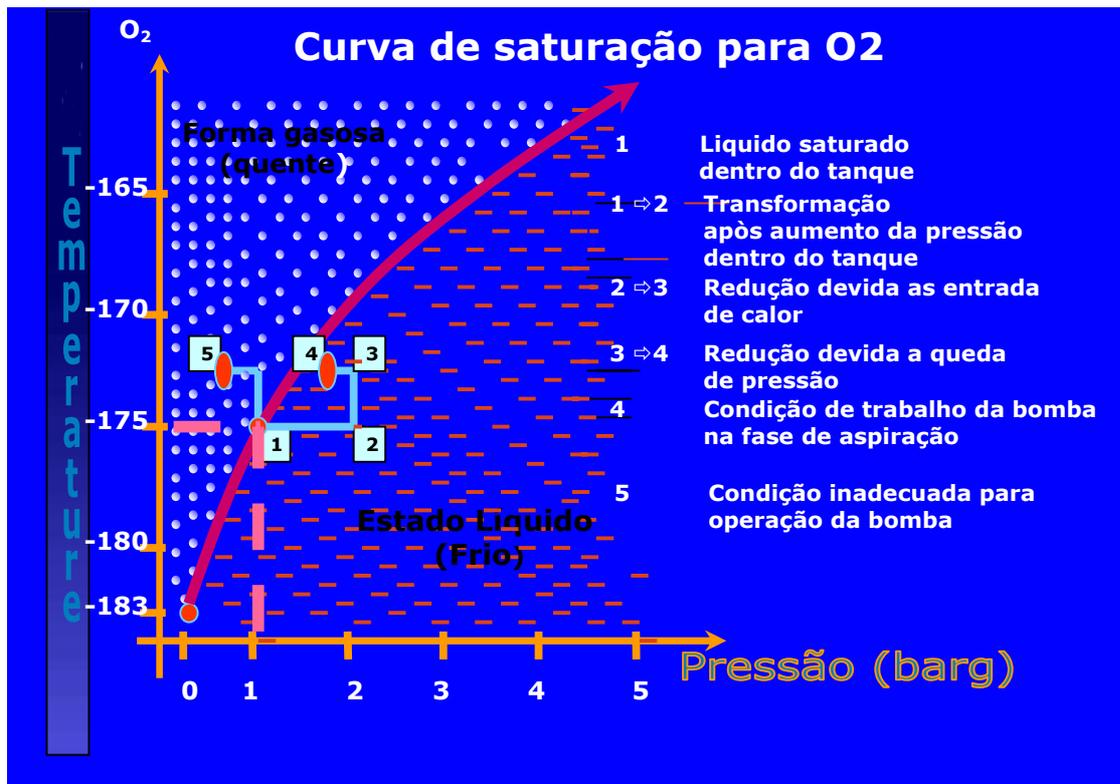


Figura 1. Curva de saturação O<sub>2</sub>

### 2.2.2 Curvas de vapor saturado durante o funcionamento da bomba

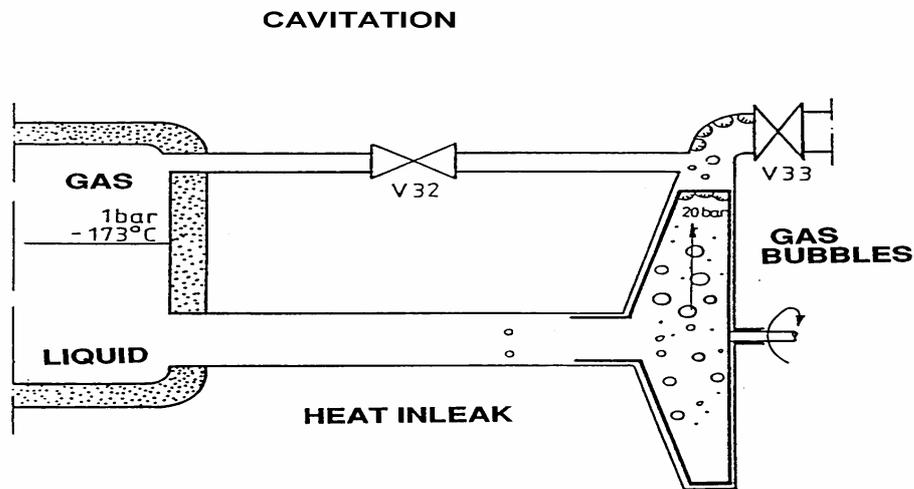
O estudo aprofundado da curva de saturação do O<sub>2</sub> mostra as fases de transformação e os diversos estados do fluido, durante a circulação dentro da linha de sucção. A aspiração do líquido provoca mudanças das condições termodinâmicas do fluido.

Quando o líquido está saturado, ele está em equilíbrio num ponto da curva. Observamos que um aumento de pressão dentro do tanque, coloca o fluido em estado líquido estável. (Ponto 2 – Figura 1)

As condições práticas de funcionamento nos levam a um aquecimento do líquido devido a entradas de calor na linha de aspiração (Ponto 3 – Figura 2)

As quedas de pressão provocadas pelos fatores acima enumerados levam o líquido no estado líquido (ponto 4 – Figura 1).

### 3 CAVITAÇÃO



**Figura 2.** Representação do fenômeno de cavitação

#### 3.1 Definição

A cavitação corresponde ao momento da formação de bolhas dentro da linha de sucção, causada por uma queda de pressão, abaixo da pressão de saturação do líquido. Depois de passar pela bomba, as bolhas condensam, devido ao aumento de pressão.

Este fenômeno ocorre quando a pressão de entrada é menor ou igual a pressão de vaporização (Ponto 1 Figura 1), o que equivale a dizer que ocorrerá uma vaporização (pelo menos em parte) do líquido à temperatura constante.

#### 3.2 Consequências

Acontece um fenômeno de condensação do fluido que é convertido em vapor em sua entrada, portanto temos um aumento da energia dissipada. Após a vaporização ocorre a recondensação em líquido, o que implica uma nova perda de energia. Temos um aumento da potência dissipada, que propicia uma diminuição do rendimento da bomba hidráulica

Podemos ainda ter uma diminuição do tempo vida da máquina, isto devido as eventuais erosões dos materiais que constituem a bomba hidráulica.

O equipamento sofre também o surgimento de vibrações indesejáveis, que provocam desgastes maiores dos elementos mecânicos.

## 4 RELAÇÃO ENTRE CAVITAÇÃO E NPSH

### 4.1 Condição Necessária e Suficiente

O NPSH ou Altura Líquida Positiva de Sucção – ALPS é o parâmetro chave para definir as condições de trabalho das bombas, e evitar o aparecimento de cavitação.

Ao longo do planejamento de instalações de bombeamento criogênico, deve se respeitar a seguinte condição necessária e suficiente para não haver ocorrência do fenômeno de cavitação.

$$\text{NPSH}_{\text{disponível}} > \text{NPSH}_{\text{requerido}} \quad (6)$$

- ñ NPSH<sub>r</sub> sendo o valor do NPSH ideal necessário, para o funcionamento da bomba sem cavitação. Valor fornecido pelo fabricante da bomba
- ñ NPSH<sub>a</sub> é o NPSH<sub>disponível</sub> no sistema ou nível estático do líquido dentro do tanques, incluindo as quedas de pressão, e entradas de calor na linha de aspiração (posição 2=>3 – Figura 1). Valor calculado pelo projetista
- ñ A tubulação e a bomba sofrem desgaste e envelhecimento, é fundamental ter uma reserva (  $\text{NPSH}_{\text{disponível}} - \text{NPSH}_{\text{requerido}}$ ) para evitar o fenômeno de cavitação.

### 4.2 Cálculo do NPSH, Verificação do Fenômeno de Cavitação,

O fabricante de bombas fornece as Curvas Características da Bomba (CCB) e sobre elas traçando-se as Curvas Características da Instalação (CCI) Figura 3.

Obtém-se o ponto de trabalho, que é representado pelo cruzamento da CCI com a CCB ( $H_B=f(Q)$ ), onde determina-se a altura manométrica do ponto de trabalho ( $H_B$ ), a vazão do ponto de trabalho (Q), o rendimento da bomba e o **NPSH<sub>requerido</sub>** (Figura 3)

A Curva Característica de Instalação CCI, planejada corresponde a uma equação de forma generica  $H_B=f(Q)$

$$H_B = H_{\text{estático}} + B_{\text{inst}} \times Q^2 \quad (7)$$

- ñ  $H_{\text{estático}}$  = carga estática, que é caracterizada pelos termos da equação da CCI que não dependem da vazão
- ñ  $B_{\text{inst}}$  = constante da instalação que é caracterizada pelos termos da equação da CCI que dependem da vazão

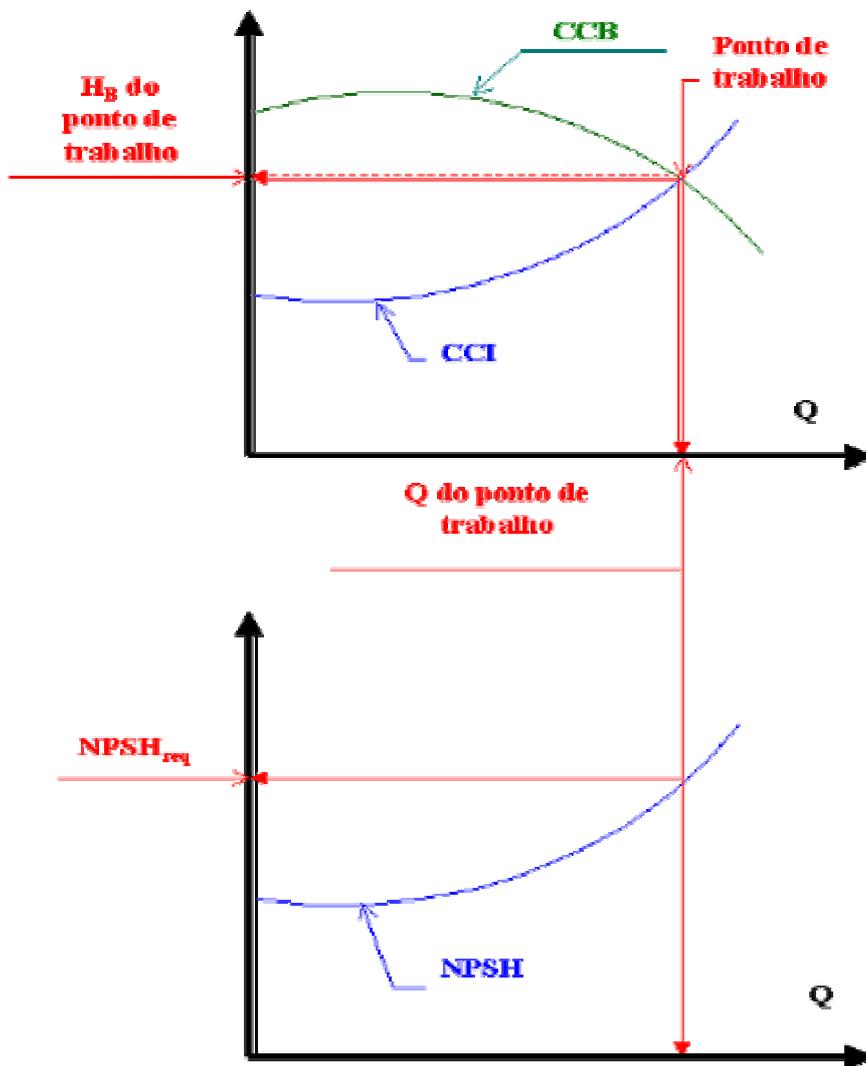


Figura 3. Curvas características de bombas e instalações

A partir da vazão determinada com o ponto de trabalho calcula-se o  $NPSH_{disponivel}$ , com uma fórmula que inclui, altura estática, perda de carga, entrada de calor. Esse valor deve ser maior que o  $NPSH_{requerido}$ , lido no **ponto de trabalho**. (Figura 3 gráfico 2)

## 5 APLICAÇÃO DOS RESULTADOS PARA AUMENTAR O DESEMPENHO DAS INSTALAÇÕES

Após mostrar a importância dos diversos parâmetros hidráulicos e termodinâmicos, podemos sugerir tomar alguns cuidados nas instalações.

## 5.1 Melhoria do NPSH

### 5.1.1 Diminuição das perdas de carga na aspiração.

O comprimento da linha de aspiração antes da bomba deve ser o menor possível. Esta redução diminui os atritos na linha e consequentemente diminui as perdas de carga. (carga cinética)

Redução do número de descontinuidade da linha. Na tubulação antes da bomba deve-se usar somente as singularidades necessárias, resultando numa soma dos comprimentos equivalentes, o menor possível  $\Sigma L_{eq}$  (eq 4). Pelo mesmo motivo reduz-se a quantidade de elementos de medição na linha e as descontinuidades. Evita-se descontinuidade usando válvulas com diâmetro pleno.

### 5.1.2 Melhoria do design da linha

Melhorar o isolamento: O isolamento térmico garante uma perda menor de calor e uma margem de trabalho suficientemente ampla para manter em fase líquida apesar da entrada de calor (Figura 1).

Eliminar configurações onde há tubulações sem saída, que tendem a formar pequenas reservas de gás (gas trap), e podem provocar cavitação.

### 5.1.3 Aumento da pressão estática

Aumentar ao máximo a cota da entrada  $Z_e$  de Altura da linha de líquido no tanque de abastecimento, tomando cuidado para não deixar a instalação improdutivo (Gasto de energia para o enchimento)

## 5.2 Aplicação para o Caso da Instalação do Termosifão no Caso de Bomba de Pistão (Circuito de Cool-down)

• A instalação com termosifão tem como requisitos, conexões de tubulações na parte inferior interna do tanque. (Figura 4)

• A tubulação da linha de sucção tem uma inclinação constante subindo, a tubulação da linha de retorno para o tanque tem um ângulo de  $10^\circ$ .

Esse design é importante para estabelecer a boa circulação do fluido. Além de provocar uma **circulação do líquido** de forma que o líquido aquece e sube facilmente.

• É importante considerar os três principais componentes (Tanque, bomba, tubulações) como um conjunto integrado de sistema de bombeamento. Conforme as considerações acima observadas, é de maior importância conservar o menor comprimento possível para as conexões com o tanque

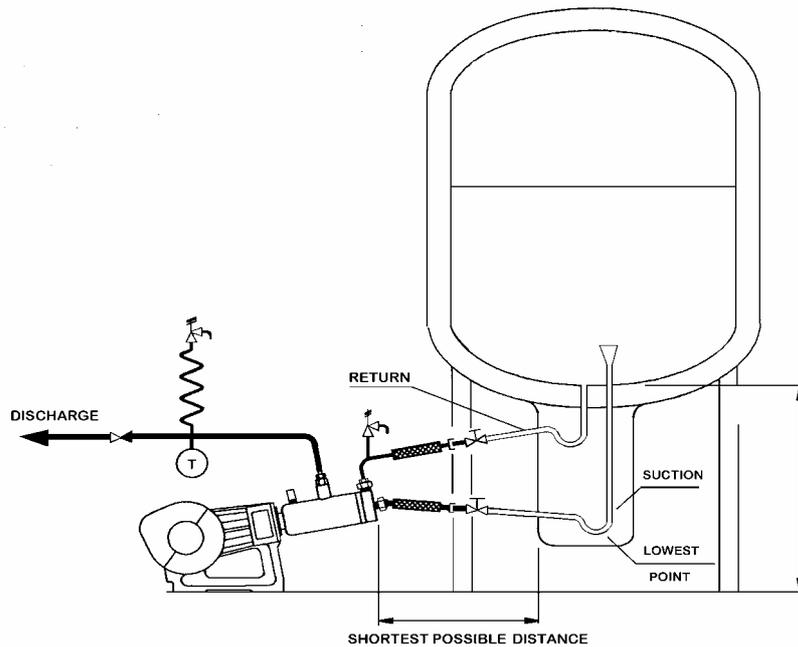


Figura 4. Instalação de bomba com tanque Termosifão

### 5.3 Design das Configurações de Várias bombas em Paralelo (Figuras 5 e 6)

No caso de uma linha de sucção com duas bombas, deve-se preparar a instalação com tubulações de diâmetros iguais, em configurações idênticas (configuração Y). Cada linha deve-se dedicada para cada bomba. Montada em paralelo conseguimos um aumento da vazão

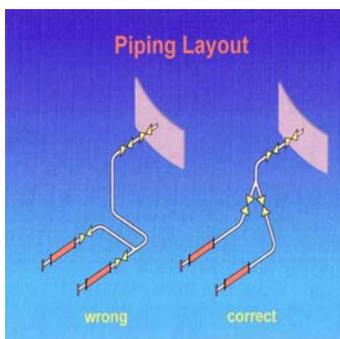


Figura 5. Linha de sucção em Y

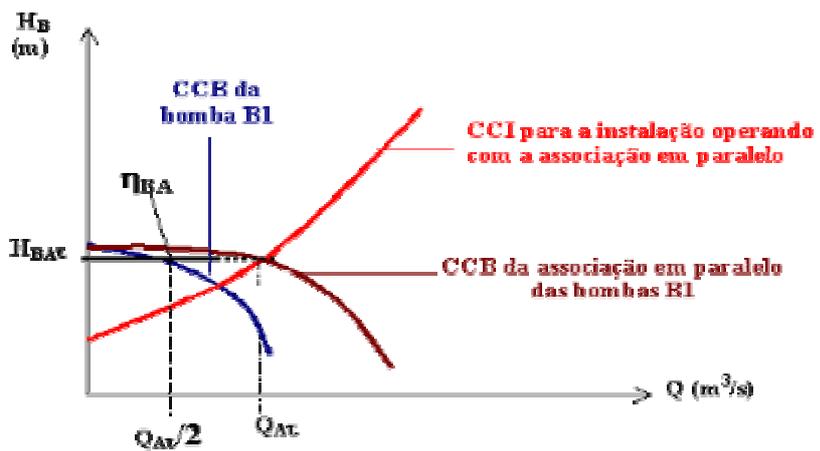


Figura 6. Associação em paralelo

## CONCLUSÃO

O conhecimento dos parâmetros hidráulicos e termodinâmicos de funcionamento de instalação de bombeamento criogênico, é muito importante para realizar uma abordagem global para concepção dos equipamentos. Torna-se imprescindível considerar os três principais componentes (tanques, bombas e tubulações) como um conjunto integrado.

## BIBLIOGRAFIA

- ñ Sean Hardy – Bernhard Balduin –CRYOSTAR, “ Development in Cryogenic Pumps Their installations” 01 jan-2006
- ñ Thermodynamique, Bases et Explication . Froussard & Julien-Sciences Sup 2005
- ñ Reynaldo Gomide - POLI/USP,– Flúidos na Indústria – Operações Unitárias - Volume II. 1997
- ñ Centrifugal Pumps Design and Application, Second Edition/ Lobanoff, Ross, 1992
- ñ Artigos Eletrônicos Raimundo Ferreira Ignácio : Curso de Mecânica dos Fluidos para Engenharia Mecânica - Consulta Abril 2006) 2006 <http://www.escoladavida.eng.br/mecfluquimica>