

# “Critérios para o Uso Eficiente de Inversores de Frequência em Sistemas de Bombeamento de Água”

Autor: Wlamir Rodrigues

Orientador: Prof. Dr. Edevar Luvizotto Junior

Tese de Doutorado apresentada a Comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil, na área de concentração de Recursos Hídricos. Campinas, SP 2.007

“Numa imensa maioria de projetos de sistemas de bombeamento, estruturas superdimensionadas em relação a demanda real do processo, conforme Europump and Hydraulic Institute (2.004), ABB (2.005) e Gambica (2.007). Ainda de acordo com o Europump and Hydraulic Institute (2.004), estima-se que 75% dos sistemas de bombeamento se encontrem nessa condição e, seguramente mais de 20%. A justificativa apresentada, em alguns casos, era a de que se primava por uma margem de segurança. Obviamente, há um gasto desnecessário com equipamentos que muitas vezes jamais serão utilizados em sua plenitude, sem falar do desperdício de energia com o pleno funcionamento dos mesmos.”

“Com raríssimas exceções, como são as chamadas “energias limpas” (por ex.: a solar e a eólica) - cujo potencial também tem suas limitações - todas agridem severamente o meio ambiente, principalmente aquelas mais utilizadas pelo homem. Muitos ambientalistas discordam inclusive dessa consideração, intuindo que todas, sem exceção, são danosas ao meio ambiente.”

“De acordo com Gambica (2.007), estima-se ainda que no Reino Unido, sistemas de bombeamento sejam responsáveis pela emissão de 2,7 milhões de toneladas de Carbono na atmosfera.”

“Segundo Lora e Teixeira (2.001), a produção de energia tem grande impacto sobre a natureza por dois fatores:

- Desmatamento;
- Emissão de Poluentes.
- 

Como consequência disso se tem hoje efeitos de mudanças climáticas (aquecimento global), a perda de áreas cultiváveis (desertificação), poluição dos solos e águas subterrâneas, entre muitos outros fatores.”

“Segundo o Europump and Hydraulic Institute (2.004), tanto o governo norte-americano como o de países europeus, tem oferecido incentivos na forma de redução de impostos e subsídios, as indústrias que aderirem aos programas de uso eficiente de energia com a consequente substituição e adequação de seus sistemas. Carter (2.006) apresenta a mesma observação.”

“Nesse sentido, o inversor de frequência tornou-se a principal peça hoje disponível para, de forma ordenada e eficiente, otimizar o uso de energia elétrica sem afetar os processos de produção, reduzir a demanda mundial de energia administrando as fontes já existentes e, principalmente, diminuir o severo impacto ao meio ambiente que tem afetado, indistintamente, povos ricos e pobres em escala global.”

## MOTOR ELÉTRICO

“Toda linha de produção industrial é dotada de sistemas diversos interligados ou não, compondo cada qual uma das diversas engrenagens que formam o processo como um todo. As bombas, ventiladores, pontes rolantes, esteiras, elevadores, entre outros, são alguns dos exemplos de sistemas bastante utilizados pelas indústrias. Na grande maioria deles está presente o motor elétrico cuja função é fornecer energia mecânica necessária aos equipamentos e, conseqüentemente, ao processo.

Especificamente, nas empresas de saneamento o emprego de motores elétricos é muito diversificado, passando por quase todas as etapas do processo. Porém, o seu uso mais significativo está ligado aos sistemas de bombeamento. Acoplado diretamente a uma bomba centrífuga, o motor elétrico passa a fazer parte do chamado conjunto moto-bomba, responsável pelo fornecimento de toda energia cinética necessária para que o fluido, no caso a água, alcance os mais distantes pontos do sistema em quantidade suficiente ao atendimento das demandas. Sendo o motor elétrico o propulsor de todo sistema de bombeamento e tendo como fonte de alimentação a energia elétrica, faz-se necessário o seu conhecimento, mesmo que de forma primária, para compreensão de toda a proposta investigativa deste trabalho.”

Em linhas gerais, os motores elétricos têm como definição básica a transformação de energia elétrica em energia mecânica. Fundamentalmente o motor elétrico pode ser dividido em duas partes: estator e rotor. Na Figura 3.2 se vê em detalhe um motor elétrico de indução. No Brasil são produzidos para uma frequência de 60 Hz com tensões que podem ser:

- Trifásicas - 220, 380, 440, 460 e 480 V
- Monofásicas - 110, 115, 127, 220, 240, 254 e 508 V

Os motores podem ser construídos para operar em corrente contínua ou corrente alternada. O motor de corrente contínua varia sua velocidade de zero até a nominal mantendo constante o seu conjugado (torque). Apresenta ótima regulação e precisão no estabelecimento da velocidade operacional. É possível obter rotações acima da nominal utilizando-se do chamado “enfraquecimento de campo”, que é conseguido com a redução do fluxo magnetizante com consequente aumento de rotação (Wilk, 2.000). Esse tipo de motor necessita de uma fonte de corrente contínua de energia ou de um dispositivo para conversão de corrente alternada em contínua.

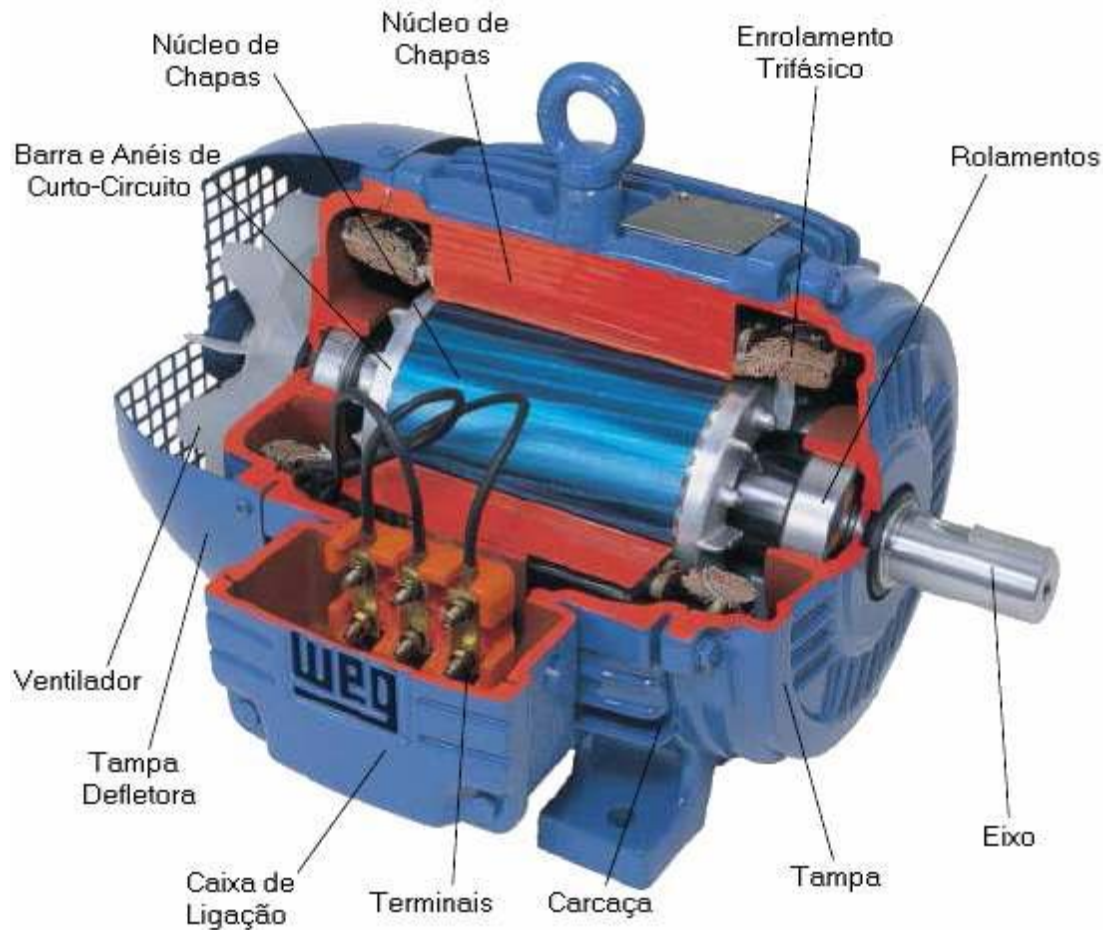


Figura 3.2 - Motor de indução trifásico. Fonte: Catálogo do fabricante WEG (2.005)

Wilk (2.000) divide os motores elétricos de corrente alternada em duas categorias: síncronos e assíncronos (indução).

Os síncronos são motores de velocidade constante e proporcional a frequência da rede. A velocidade do rotor é a mesma do campo girante, pois os pólos do motor seguem o campo girante imposto pelo estator. Seu limite está ligado a máxima potência cedida antes da perda de sincronismo ocasionando a parada do motor (tombamento). Seu uso com conversor de frequência é indicado quando se necessita de uma precisão de velocidade aliada a variação de carga.

O motor assíncrono ou de indução com rotor tipo gaiola (Squirrel Cage) e o mais utilizado na indústria por ser o mais barato. De acordo com Garcia (2.003), esse motor é responsável por mais de 90% da energia motriz produzida através da eletricidade no país. Tem como característica a robustez, alta confiabilidade, simplicidade, baixo custo, relativa alta eficiência e de fácil manutenção, sendo também o preferido em associações com inversores de frequência (Europump and Hydraulic Institute, 2.004). Em teoria, nesse tipo de motor, o rotor também teria a velocidade síncrona desde que operando em vazio e sem perdas. Porém, seu rotor diminuiria a velocidade proporcionalmente e de forma oposta ao conjugado externo. Isso pode ser entendido pela perda por escorregamento.

O “escorregamento”, nada mais é do que a diferença entre a velocidade síncrona no estator (por ex.: 1.800 rpm) e a velocidade do rotor que é medida na ponta do eixo com auxílio de um tacografo.

Obviamente sendo o motor de indução uma máquina robusta, conforme menção anterior, a sua vida útil é muito dependente da isolação do bobinado, a qual está relacionada ao envelhecimento gradual do material isolante e do desgaste mecânico dos rolamentos (Mascheroniet al., 2.003). Todavia, esse processo pode ser acelerado devido ao aumento da temperatura em virtude da operação com o uso de inversor de frequência a baixas velocidades.

A classe de isolamento dos motores é um dos principais problemas encontrados quando se pretende instalar inversores de frequência. Segundo Casada et al. (2.000) e Pemberton (2.005), a frequência de chaveamento ou pulsos de disparos dos transistores que compõem o circuito eletrônico do inversor, acaba por produzir picos de tensão que podem causar danos nas bobinas dos motores. Almeida et al. (2.005) vai mais além, dizendo que esse fator é geralmente agravado em motores velhos, que não são uma raridade no mercado, conforme

observado por Tarquin e Dowdy (1.989) e Brown (2.001). O aumento da temperatura no motor é outro grave problema apontado quando se deseja associar um inversor de frequência a motores velhos, cujo dimensionamento original não considerou a operação acima de um certo limite de temperatura, conforme observado por Casada et al. (2.000), Irvine e Gibson (2.002) e Almeida et al. (2.005).

A geometria do motor elétrico tem relação direta com o torque produzido pelo mesmo. O torque de saída designa geralmente a saída do motor em termos de potencia, mas deve ser lembrado que o motor na verdade é fonte de torque. Portanto, quanto maior a sua dimensão, maior o torque que ele pode entregar.

Evidentemente, sendo o motor elétrico um equipamento eletromecânico nem toda energia elétrica por ele consumida se transforma em trabalho (torque). Isso se deve as perdas que se dão prioritariamente na forma de calor. O índice que define essa relação é conhecido como rendimento ( $\eta$ ). O parâmetro rendimento do motor mede a proporção de potencia elétrica que é transformada pelo mesmo em potencia mecânica, enquanto que a diferença existente entre a potência efetivamente transmitida ao eixo do motor e a potencia elétrica absorvida pela rede é denominada por perdas e podem ser: perdas no enrolamento estatórico (perdas no cobre); perdas no rotor; perdas por atrito e ventilação; perdas magnéticas no núcleo (perdas no ferro).

Avaliando o item rendimento é possível encontrar dois grupos de motores, o modelo básico ou padrão com rendimento médio em torno de 85%, e os de alto rendimento, cujo rendimento médio é superior a 90%, segundo os fabricantes. É intuitivo que o preço final do produto é diferenciado. Contudo, o uso e o desgaste vão, ao longo do tempo, alterando essa curva de rendimento.

Em 11/12/2002, foi criado pelo Governo Federal, o Decreto nº 4.508, que estabelece em seu capítulo segundo, a regulamentação específica que define os níveis mínimos de eficiência energética de motores elétricos trifásicos de indução rotor gaiola de esquilo, de fabricação nacional ou importados, para comercialização e uso no Brasil. Para tanto, o Art. 5º do mesmo decreto, apresenta uma tabela onde se encontra os níveis mínimos de rendimento nominal a serem atendidos por ambos os modelos (padrão e alto rendimento). A tabela a seguir reproduz esses valores através dos quais se nota claramente que quanto menor o motor, menor será o seu rendimento mínimo exigido.

Tabela 3.2 – Rendimentos nominais mínimos para motores elétricos no Brasil. Fonte: ANEEL – Decreto nº 4.508/02 (2.002)

Potência Nominal		Padrão				Alto Rendimento			
		Número de Pólos				Número de Pólos			
cv	KW	2	4	6	8	2	4	6	8
1,0	0,75	77,0	78,0	73,0	66,0	80,0	80,5	80,0	70,0
1,5	1,1	78,5	79,0	75,0	73,5	82,5	81,5	77,0	77,0
2,0	1,5	81,0	81,5	77,0	77,0	83,5	84,0	83,0	82,5
3,0	2,2	81,5	83,0	78,5	78,0	85,0	85,0	83,0	84,0
4,0	3	82,5	83,0	81,0	79,0	85,0	86,0	85,0	84,5
5,0	3,7	84,5	85,0	83,5	80,0	87,5	87,5	87,5	85,5
6,0	4,5	85,0	85,5	84,0	82,0	88,0	88,5	87,5	85,5
7,5	5,5	86,0	87,0	85,0	84,0	88,5	89,5	88,0	85,5
10	7,5	87,5	87,5	86,0	85,0	89,5	89,5	88,5	88,5
12,5	9,2	87,5	87,5	87,5	86,0	89,5	90,0	88,5	88,5
15	11	87,5	88,5	89,0	87,5	90,2	91,0	90,2	88,5
20	15	88,5	89,5	89,5	88,5	90,2	91,0	90,2	89,5
25	18,5	89,5	90,5	90,2	88,5	91,0	92,4	91,7	89,5
30	22	89,5	91,0	91,0	90,2	91,0	92,4	91,7	91,0
40	30	90,2	91,7	91,7	90,2	91,7	93,0	93,0	91,0
50	37	91,5	92,4	91,7	91,0	92,4	93,0	93,0	91,7
60	45	91,7	93,0	91,7	91,0	93,0	93,6	93,6	91,7
75	55	92,4	93,0	92,1	91,5	93,0	94,1	93,6	93,0
100	75	93,0	93,2	93,0	92,0	93,6	94,5	94,1	93,0
125	90	93,0	93,2	93,0	92,5	94,5	94,5	94,1	93,6
150	110	93,0	93,5	94,1	92,5	94,5	95,0	95,0	93,6
175	132	93,5	94,1	94,1		94,7	95,0	95,0	
200	150	94,1	94,5	94,1		95,0	95,0	95,0	
250	185	94,1	94,5			95,4	95,0		

## VARIAÇÃO DE ROTAÇÃO DE BOMBAS POR INVERSOR DE FREQUÊNCIA

Os sistemas de bombeamento convencionais são operados usualmente através do controle da vazão obtido por válvulas tipo globo, gaveta ou borboleta, sendo manobradas de acordo com as necessidades operacionais de demanda.

Nessa operação o que se faz é o deslocamento do ponto de operação (intersecção da curva da bomba com a curva do sistema) através do aumento da perda de carga, progressivamente sobre a curva da bomba até se encontrar o ponto desejado para uma determinada vazão (Figura 3.9), com a bomba operando com rotação constante  $n$ .

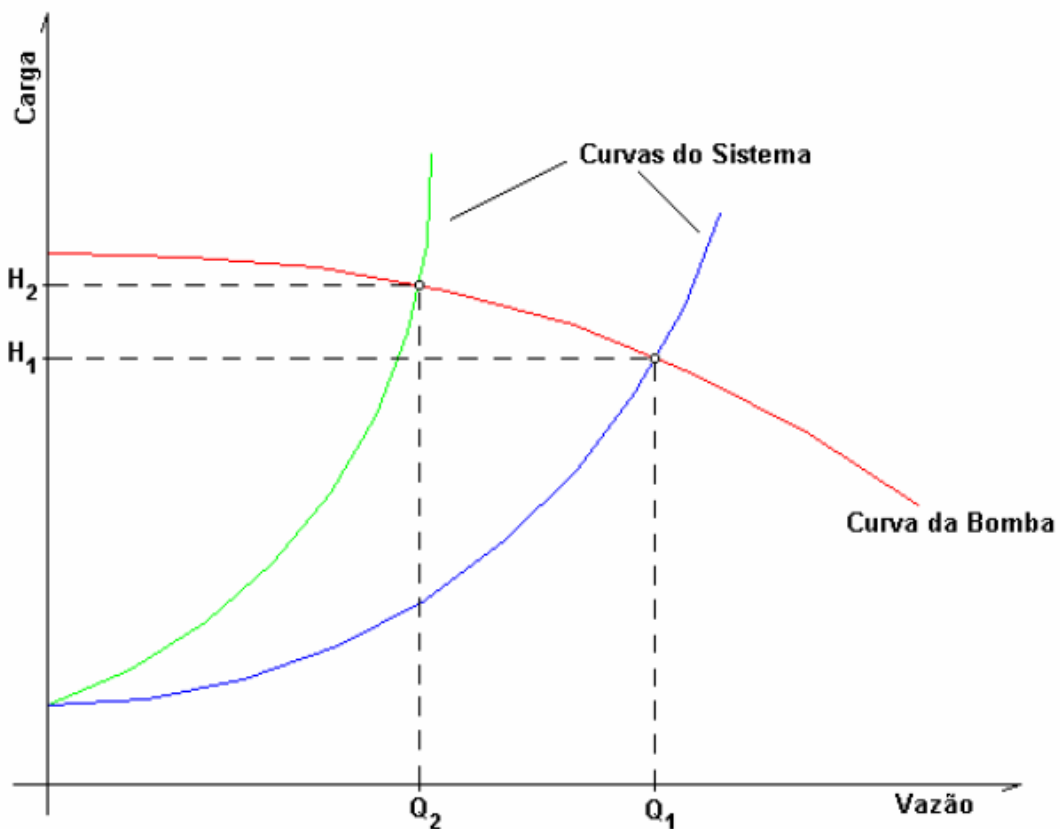


Figura 3.9 – Curva do sistema convencional com controle da vazão através de válvulas



O uso desse expediente operacional penaliza de forma drástica o sistema acarretando diversas desvantagens, uma delas é que a vazão máxima possível a ser controlada é aquela que passa pela tubulação quando o sistema não atua, ou seja, com a válvula de regulagem totalmente aberta, não possibilitando assim nenhum incremento de vazão. Outra desvantagem é talvez a principal delas, é que a ação de regulagem da válvula vai aumentando a perda de carga local e elevando, por conseguinte, a carga a montante da válvula de controle. Como a potência consumida pela bomba é proporcional a vazão e a carga, o que se tem é uma redução gradativa da vazão bombeada com um aumento de consumo (Armintor e Connors, 1.987; Brignol, 2.000; Viana, 2.001). Naturalmente, a vida útil dos equipamentos será comprometida, além do que toda essa energia excedente pode ser transmutada em vibração, provocando danos ao sistema de bombeamento, tubulações e válvulas, conforme observa Pemberton (2.005).

Wood e Reddy (1.994) definem muito bem esse tipo de operação dizendo ser o mesmo que “[...] conduzir um carro com o freio de mão acionado: o resultado é o desperdício desnecessário de energia” .

Em Brown (2.001), Irvine e Gibson (2.002), se observa exatamente a mesma citação. Ainda segundo Brown (2.001), estima-se que de toda energia elétrica utilizada pela indústria, 65% seja destinada a motores elétricos e que, do montante relativo a esse percentual, 20% seja desperdiçado por mecanismos de controle (ex. : válvula).

Deve-se considerar ainda quanto a conservação de energia, que os sistemas de bombeamento são projetados em função de uma vazão e altura manométrica, tendo como pano de fundo as curvas de eficiência das bombas. Nesses casos, a mudança do ponto de operação, acarretaria num rendimento inferior das bombas aumentando o consumo de energia elétrica.

A alternativa aqui discutida é visivelmente prejudicial a operação da bomba, pois a mesma opera com rotação constante  $n$  e vazão  $Q_1$ , enquanto que a instalação opera ao longo de sua rotina com outras vazões  $Q_2, Q_3, \dots$ , etc. , e que no máximo serão iguais a  $Q_1$ . Em geral ou na maioria do tempo  $Q_1 > Q_2$  e  $Q_1 > Q_3$  (Viana, 2.001).

Em contraposição a operação anteriormente descrita, o inversor de frequência, através do controle da rotação do motor, promove a alteração da curva da bomba mantendo-se constante a curva do sistema ou instalação (Figura 3.10). Isso faz com que o consumo de energia seja proporcional a rotação do motor, ou seja, nem mais nem menos, apenas o necessário. Ainda com relação ao consumo de energia, nos projetos com inversores de frequência geralmente tem-se a preocupação de se analisar cuidadosamente as curvas de rendimento das bombas. Souza et al. (1.978), Vallilo et al. (1.981), Europump and Hydraulic Institute (2.004) e Gambica (2.007) sugerem, para o melhor aproveitamento do rendimento da bomba, que o ponto referente a demanda máxima esteja situado a direita da curva de melhor rendimento, com isso na maior parte do tempo de operação o sistema de bombeamento se encontrara nas máximas possibilidades de eficiência do equipamento. Crespo (2.001), em seu estudo sobre “Elevatórias nos Sistemas de Esgoto”, também apresenta a mesma sugestão.

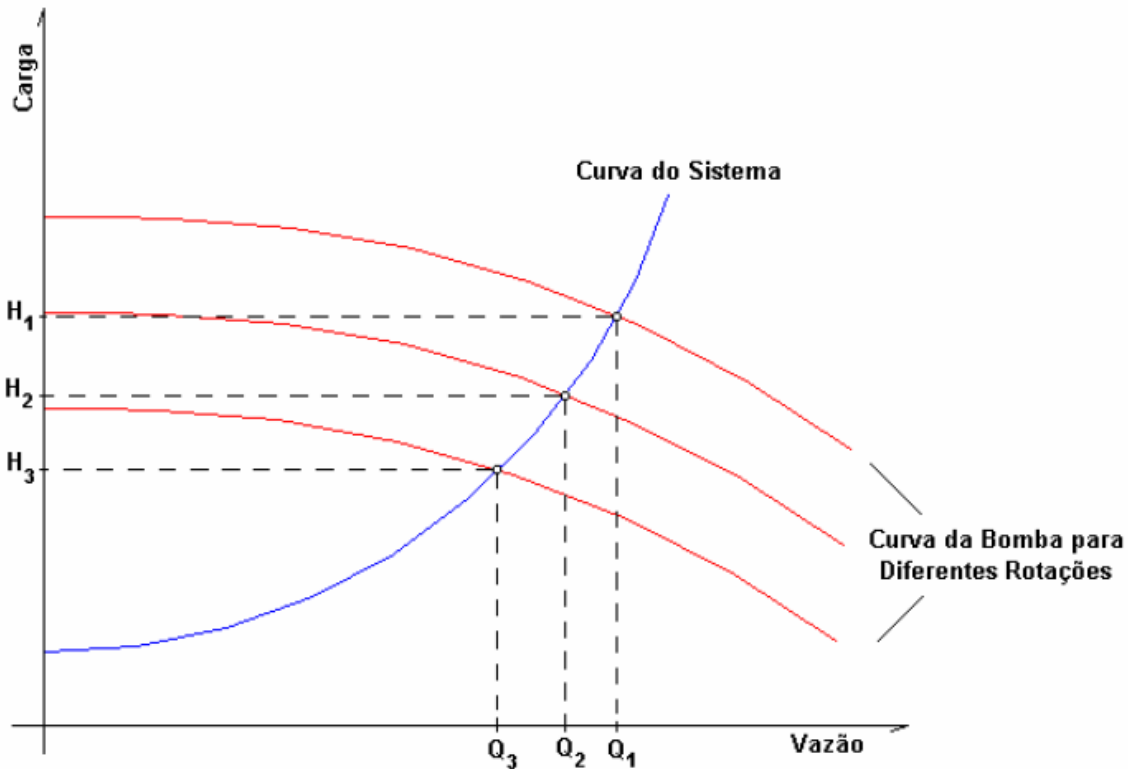


Figura 3.10 – Curva do sistema operado com inversor de frequência

Viana (2.001) sugere, como linha de conduta, em primeiro lugar a seleção adequada das bombas para as condições de trabalho desejadas, escolhendo aquelas de melhor rendimento. No quesito conservação de energia, esse mesmo autor enfatiza que um grande erro é a seleção da máquina superdimensionada, ou seja, muito além do que seria necessário para o sistema projetado, gerando um consumo excessivo de energia. Entretanto, essa sempre foi uma prática comum dos projetistas, cuja justificativa se baseava na garantia de uma margem de segurança ao sistema, conforme já citado anteriormente (Europump and Hydraulic Institute - 2.004, ABB - 2005 e Gambica - 2007).

Conforme Armintor e Connors (1.987), Oliveira Jr. (1.993), Wood e Reddy (1.994),

Allen-Bradley (1.995), Casada et al. (2.000), Ilinski (2.000), Silva e Cortez (2.001), Brown (2.001), Irvine e Gibson (2.002), Mascheroni et al. (2.003), Rooks e Wallace (2.004), Europump and Hydraulic Institute (2.004), Almeida et al. (2.005), Pemberton (2.005) e Carter (2.006), as principais vantagens de sistemas dotados de inversores são:

- economia significativa de energia elétrica - pelas leis de semelhança, sendo a vazão diretamente proporcional a rotação, e a potência diretamente proporcional a rotação elevada ao cubo, verifica-se que para um menor valor de vazão recalcada haverá também uma potência consumida correspondente muito menor;
- controle de velocidade submetendo assim o conjunto a uma carga muito menor - conforme evidenciado na Figura 3.10, cada valor de vazão corresponderá a um valor de carga que será menor em função da redução de rotação, se comparado com o sistema convencional de controle de vazão (Figura 3.9);
- boa eficiência - estudos mostram que o uso associado de Inversores de Frequência sugere a avaliação do ponto ou faixa de operação em que o sistema mais opera e sua relação com as curvas de rendimento do conjunto moto-bomba, buscando assim explorar a maior possibilidade de ganho. Testes de rendimento do motor, do “drive” de inversor de frequência e do conjunto associado apresentaram excelentes índices. Somente os Inversores de Frequência apresentaram rendimento acima de 95%;
- As pressões no sistema são mantidas bem próximas aos níveis mínimos requeridos;
- as perdas físicas, diretamente ligadas a pressão, se minimizam;
- controle operacional das bombas simplificado - a ação de controle da vazão se dá diretamente com a mudança da rotação, o que acontece de forma suave, segura e confiável. Essa ação pode ser feita diretamente no painel elétrico

da Casa de Bombas ou mesmo a distancia pelo Centro de Controle Operacional (CCO) fazendo o ajuste requerido;

- Melhor resposta em situações emergenciais - aumento de vazão para atendimento a incêndio, fechamentos em casos de rompimentos com minimização dos efeitos do regime transitório, etc.;
- Eliminação do transitório causado com o acionamento e a parada de bombas - como a ação do inversor de frequência se faz de forma lenta e gradativa, tanto no acionamento como na parada, existe um tempo entre a intervenção propriamente dita e o resultado final esperado, ou seja, o conjunto moto-bomba vai acelerando ou desacelerando, de acordo com a parametrização da rampa, de forma lenta e continua. Com isso desaparecem as perturbações geradas pelos transitórios. As ações de acionamento e parada com o inversor reduzem o “stress” no motor, bomba e acoplamento;
- Controle do fator de potencia, uma vez que o lado da rede tem contato com o retificador não controlado, resultando assim um excelente fator de potencia (próximo de 1);
- “By-pass” de operação em caso de falha do inversor. Se o inversor falhar, o motor pode ser operado diretamente na linha de entrada em operação continua convencional;
- Eliminação da alta corrente de partida e redução do pico de demanda (kVA) - o inversor de frequência se adapta para evitar sobrecargas causadas pela aceleração de alta carga de inércia;
- Manutenção sem necessitar estar conectado ao sistema, bem como a redução desses custos;
- Alimenta tanto motores assíncronos como síncronos;
- O Sistema de pulsos (PWM - Pulse Width Modulation) permite uma faixa de variação de frequência de 0 a 100%;
- A tensão constante no circuito intermediário alimenta um barramento DC onde e possível conectar vários inversores de frequência em paralelo, um banco

de baterias ou um banco de capacitores para suprimento de energia em caso de queda da rede;

- Aumento da vida útil da bomba, mancais e vedações pela diminuição do desgaste mecânico - como o sistema dotado de inversor atua na medida exata das necessidades operacionais, haverá uma preservação maior dos equipamentos e acessórios aumentando a vida útil;
- Redução do nível de ruído e vibração - em sistemas convencionais as condições de baixa vazão são sempre acompanhadas por ruídos e vibrações, geralmente causadas pela válvula de controle que se encontram nesse caso parcialmente abertas, além de efeitos de cavitação;
- Operação simultânea com vários motores;
- Emprego em áreas e ambientes sensíveis, como aquelas em que se requerem motores a prova de explosão, resistência a ambientes e atmosferas químicas agressivas, entre outras;
- Método de interfaceamento simplificado para sinais de controles externos (0 - 10 V ou 4 - 20 mA) proveniente de transmissores;
- Redução de problemas de cavitação no sistema de bombeamento associados a operação de válvulas de controle a baixo fluxo;
- Simplificação na rede de dutos através da eliminação de válvulas para o controle da vazão;
- Redução da emissão de CO<sub>2</sub> e gases na atmosfera, quando se avalia o processo industrial como um todo - a queda no consumo de energia elétrica conduzirá a menor necessidade de geração, principalmente quando isso se dá por termelétricas ou geradores a óleo diesel. Com isso os impactos ao meio ambiente tendem a se reduzirem.

Já as desvantagens, segundo Allen-Bradley (1.995), Casada et al. (2.000), Irvine e Gibson (2.002), Mascheroni et al. (2.003), Everhart (2.004), Europump and Hydraulic Institute (2.004), Almeida et al. (2.005), Pemberton (2.005) e Gambica (2.007), são:

- Custo inicial relativamente alto;
- O inversor de frequência requer conversores de potência além de técnicos especializados, devido aos circuitos sofisticados;

- Introdução de distorções harmônicas da tensão, provocada pelo processo de conversão de potencia e emissão de interferências eletromagnéticas - alteração da onda senoidal perfeita da rede elétrica concessionária. Nos Estados Unidos existe legislação especifica a respeito desse assunto que limita a emissão de correntes harmônicas;
- Elevação da temperatura na superfície dos motores localizados em áreas de risco, ultrapassando o limite máximo de temperatura permitida para o local- estando a ventilação acoplada ao eixo do motor, a redução da rotação promovera um aumento na temperatura do mesmo o que poderá causar explosões se instalado em locais ou atmosferas de risco (produtos inflamáveis). Esse e um problema muito comum em indústrias petroquímicas;
- Atenção especial deve ser dedicada aos cabos que devem ser de baixa impedância para alta frequência -como a frequência de chaveamento ou acionamento dos Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) e alta, alguns tipos de cabos podem não suportar provocando a queima por aquecimento;
- Limitada distancia entre o drive do inversor de frequência e o motor -em casos de distancia muito grande entre o Inversor e o Motor, excedendo o limite Maximo, implicará na necessidade de inserção de outros equipamentos adicionais, tais como: filtro de Interferência de Frequência de Radio (RFI) e reator de linha;
- Retorno discreto dos benefícios ou subutilização do equipamento em virtude da má localização de sensores no sistema, cuja função essencial é a emissão de parâmetros que servirão de referencia ao inversor de frequência para as correções necessárias na velocidade - implementação de sensores de pressão, vazão e nível em pontos críticos do sistema aumentando o custo do investimento;
- Limitação do uso em sistemas de bombeamento de líquido com partículas em suspensão -esse tipo de sistema requer uma velocidade mínima de bombeamento e sem a qual haverá deposição de partículas ao longo da tubulação, podendo

vir a ocorrer o comprometimento da capacidade de transporte pela obstrução parcial da seção da tubulação de recalque;

- Alteração dos Parâmetros da Bomba – a operação com o inversor de frequência afetará parâmetros significativos da bomba com a mudança de velocidade como: o rendimento, o Net Positive Suction Head (NPSH), a potencia, etc.;
- Possibilidade de dano na isolação dos motores, provocado pelos altos picos de tensão decorrentes da rapidez do crescimento dos pulsos gerados pelo inversor de frequência, bem como a alta frequência com que esses pulsos são produzidos. O aumento da temperatura decorrente da redução de velocidade e consequente queda na ventilação também poderá afetar os materiais isolantes do motor;
- O inversor de frequência pode requerer a instalação em ambientes menos agressivos dos que os motores geralmente ficam. Os componentes eletrônicos são menos tolerantes a locais corrosivos e com umidade.

De qualquer maneira tão importante quanto as análises técnicas, são as análises dos custos relacionados com o consumo operacional. Lembrando Viana (2.001) quando diz “[...] custos iniciais, muitas vezes, podem ser altos para que o operacional (custo), ao longo de um tempo, torne-se baixo” .



## EFEITO DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA NO BOMBEAMENTO

Com a alteração da rotação, observada as leis de semelhança física das máquinas hidráulicas rotativas (Allen-Bradley - 1.995; Wilk - 2.000; Crespo - 2.001; Viana - 2.001; Brown - 2.001; Lee - 2.001; Alves et al. - 2.002; Irvine e Gibson - 2.002; Everhart - 2.004; Europump and Hydraulic Institute - 2.004; Pemberton - 2.005; Theisen - 2.005; Gambica - 2.007), definidas nas equações de 1 a 5, as curvas de funcionamento da bomba (carga x vazão, etc.) são alteradas, mudando assim o ponto de operação do sistema (Figura 3.10).

$$\frac{Q_1}{N_1} = \frac{Q_2}{N_2} \quad \text{Relação vazão x rotação} \quad (1)$$

$$\frac{H_1}{N_1^2} = \frac{H_2}{N_2^2} \quad \text{Relação carga x rotação} \quad (2)$$

$$\frac{P_1}{N_1^3} = \frac{P_2}{N_2^3} \quad \text{Relação potência x rotação} \quad (3)$$

$$\frac{T_1}{N_1^2} = \frac{T_2}{N_2^2} \quad \text{Relação torque x rotação} \quad (4)$$

$$\frac{NPSH_{R1}}{N_1^2} = \frac{NPSH_{R2}}{N_2^2} \quad \text{Relação NPSH Requerido x rotação} \quad (5)$$

Para exemplificar o controle exercido pela variação da rotação sobre as características do bombeamento, com base nas leis de semelhança fornecidas acima, seja a curva carga x vazão (H x Q), para a rotação nominal (ou de referência  $N_R$ ), dada por um ajuste polinomial de segunda ordem da curva do fabricante:

$$H = a + bQ + cQ^2 \quad \text{Curva carga x vazão para a rotação nominal } N_R \quad (6)$$

a curva carga x vazão para uma rotação qualquer N, poderá ser escrita com base nas equações de 1 a 6 como:

$$H = \left(\frac{N}{N_R}\right)^2 a + b\left(\frac{N}{N_R}\right)Q + cQ^2 \quad \text{Curva carga x vazão para rotação } N \text{ qualquer} \quad (7)$$

sendo, a, b e c coeficientes de ajuste da curva. A dependência da rotação N com a frequência f, sem levar em consideração o efeito do escorregamento, e dada pela relação:

$$N = \frac{120 \times f}{P} \quad (8)$$

Onde: P e o número de pólos do motor AC. Tomando a rotação nominal para a frequência de 60 Hz, então a equação 7 pode ser posta na dependência da frequência como:

$$H = \left(\frac{f}{60}\right)^2 a + b\left(\frac{f}{60}\right)Q + cQ^2 \quad (9)$$

η

Correção do rendimento

Sabe-se que a correção do rendimento pode sofrer variações com a rotação. Essa correção pode ser feita introduzindo-se os rendimentos na equação de potencia, considerando para isto o rendimento  $\eta_1$  em rotação nominal e o rendimento  $\eta_2$  para uma rotação qualquer, que pode ser obtido a partir da expressão empírica 12 a seguir. Comolet (1.961) também propôs uma outra expressão empírica para essa correção (equação 13).

$$\eta_2 = 1 - \left[ (1 - \eta_1) \times \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^{0,1} \right] \quad (12)$$

$$\eta_2 = \frac{\eta_1}{\eta_1 + (1 - \eta_1) \times \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^{0,17}} \quad (13)$$

Onde:

$\eta_1$  – representa o rendimento do conjunto moto-bomba correspondente à rotação  $N_1$

$\eta_2$  – representa o rendimento do conjunto moto-bomba correspondente à rotação  $N_2$

$N_1$  e  $N_2$  – representam as rotações do conjunto nas situações 1 e 2 (rpm)

A mencionada correção da equação 3 esta apresentada na expressão 14 a seguir.

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{N_2^3}{N_1^3} \times \frac{\eta_2}{\eta_1} \quad (14)$$