

RESUMO

Bombas centrífugas são largamente utilizadas principalmente no setor industrial. Em muitos casos operam com eficiência muito abaixo do que deveria, ocasionando grande impacto no consumo de energia elétrica. Uma das principais razões para isso, se deve ao fato da bomba operar em pontos de operação considerados como sendo de baixa eficiência. Para que essa eficiência seja maximizada sem que haja necessidade de dispositivos adicionais de medição, métodos de monitoramento das principais variáveis de operação de uma bomba, pressão e vazão, são de fundamental importância. Métodos de estimação do ponto de operação de uma bomba, sem o uso de sensores externos, baseando-se somente no uso de inversores de frequência, tem se mostrado eficaz na disponibilidade de informações de variáveis de saída como pressão e vazão. Este trabalho apresenta o estudo de métodos tradicionais utilizados para identificação da vazão e pressão de uma bomba com e sem o uso de sensores externos, usando o inversor de frequência como principal ferramenta. Após discussões abordadas em cada um dos métodos, será apresentado um modelo de estimação implementado em ambiente de lógica de diagrama de escada (*Ladder*), que busca maior precisão na estimação das variáveis pressão e vazão utilizando informações disponíveis através do inversor de frequência. De posse dos dados de pressão e vazão obtidos através dos estimadores, o controle de uma variável chamada altura manométrica (pressão diferencial aplicada sobre a bomba) será abordado. Adicionalmente, para cada um dos métodos, resultados experimentais serão discutidos e a aplicabilidade do método proposto será avaliada.

Palavras chave: Vazão, Altura manométrica, Válvula de estrangulamento, Inversor de frequência, Bomba centrífuga, Curva característica, Estimador, Leis de afinidade, WLP®.

ABSTRACT

Centrifugal pumps are widely used mainly in the industrial sector. In most cases, they operate with lower efficiency than they should, causing a big impact on energy consumption. One of the main reasons that explain this behavior is due to the low-efficiency operating point. In order for the efficiency to be maximized with no use of additional external sensors, monitoring methods of the main variables of the pump, pressure and flow, are of crucial importance. Estimation methods for the pump operating point, discarding the use of external sensors, meaning only information provided by the frequency inverter is available, have become extremely useful to determine the values of the main output variables, pressure and flow. This thesis presents the study of traditional methods utilized to identify flow and pressure of a pump with and without external sensors, using the frequency inverter as the main tool for that achievement. After discussions on each method are carried on, a new method is proposed, built in *Ladder* environment which uses only the data from the frequency inverter for estimating the variables of interest, pressure and flow, with acceptable accuracy. Having the pressure and flow data, obtained with the estimating methods, the control of the pump head (differential pressure over the pump) is presented. Additionally, for each estimation methods, laboratory measurements are discussed, and the applicability of the proposed new method is evaluated.

Keywords: Flow, Head, Control valve, Frequency inverter, Centrifugal pump, Characteristic curve, Estimation, Affinity Laws, WLP®.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	33
1.1	OBJETIVOS DO TRABALHO	34
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	35
2	OPERACÃO DE BOMBAS ACIONADAS POR SISTEMAS DE VELOCIDADE VARIÁVEL	37
2.1	COMPOSIÇÃO TÍPICA DE UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO	37
2.1.1	Bombas	38
2.1.2	Motor de Indução Assíncrono Trifásico	47
2.1.2.1	Campo Girante	50
2.1.2.2	Estator e rotor	54
2.1.2.3	Conjugado desenvolvido pelo motor de Indução Trifásico Assíncrono	55
2.1.2.4	Curva do conjugado x velocidade	57
2.1.2.5	Equações do Motor de Indução Trifásico Assíncrono	58
2.1.3	Inversor de frequência	60
2.1.3.1	Estrutura de potência e controle de um Inversor de frequência	61
2.1.3.2	Modulação por largura de pulsos PWM e Modulação por vetores espaciais SVM	65
2.1.3.3	Métodos de controle usados no inversor de frequência	67
2.2	PONTO DE OPERAÇÃO DA BOMBA CENTRÍFUGA	71
2.2.1	Curva do sistema	71
2.2.2	Alteração do ponto de trabalho da bomba	72
2.2.3	Efeitos da mudança de rotação nas curvas características	74
3	ESTIMAÇÃO DA LOCALIZAÇÃO DO PONTO DE OPERAÇÃO DA BOMBA COM USO DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA	76
3.1	MÉTODO EMPREGANDO O USO DE SENSORES – MODELO Q x H	77
3.2	MÉTODO EMPREGANDO SOMENTE MEDIÇÕES DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA – MODELO Q x P	79

3.3	MÉTODO EMPREGANDO SOMENTE MEDIÇÕES DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA – MODELO CURVA DO PROCESSO	82
3.4	MÉTODO EMPREGANDO SOMENTE MEDIÇÕES DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA – MODELO HÍBRIDO	84
3.5	FONTES DE ERROS DOS MODELOS DE ESTIMAÇÃO	88
3.5.1	Curvas características da bomba	88
3.5.2	Propriedade dos fluidos.....	90
3.5.3	Uso das leis de afinidade	90
3.5.4	Estimações fornecidas pelo inversor de frequência.....	90
3.6	MÉTODO EMPREGANDO SOMENTE MEDIÇÕES DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA – MODELO $I_q \times Q$	91
3.6.1	Detalhamento do algoritmo de estimação	94
3.6.1.1	Bloco de aquisição de pontos das curvas características.....	94
3.6.1.2	Bloco de identificação da região de rotação.....	100
3.6.1.3	Bloco de identificação da região de torque	102
3.6.1.4	Bloco interpolador de Vazão da curva $I_q \times Q$	103
3.6.1.5	Bloco interpolador da altura manométrica da curva $H \times Q$	106
3.6.1.6	Bloco de Controle de altura manométrica.....	108
4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	112
4.1	APRESENTAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	112
4.1.1	Motor de Indução Trifásico + Bomba centrífuga	112
4.1.2	Inversor de Frequência	113
4.1.3	Placa de expansão de funções	115
4.1.4	Sensores de Pressão	116
4.1.5	Sensor de Vazão	118
4.1.6	Bancada do sistema de bombeamento	119
4.1.7	Esquemas de ligação utilizados	120
4.2	CURVAS CARACTERÍSTICAS DA BOMBA OBTIDAS NO ENSAIO	121

4.3	TESTE FUNCIONAL DA ESTIMAÇÃO DA VAZÃO E ALTURA MANOMÉTRICA	123
4.4	TESTE FUNCIONAL DO CONTROLE DA ALTURA MANOMÉTRICA.....	130
5	CONCLUSÃO GERAL.....	135
	REFERÊNCIAS	139
	APÊNDICE A – RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA OUTRAS ROTAÇÕES	140
	APÊNDICE B – RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA OUTROS VALORES DE VARIÁVEL DE PROCESSO	148

1 INTRODUÇÃO

Sistemas de bombeamento são largamente utilizados na indústria e são responsáveis por uma parcela significativa do consumo mundial de energia elétrica. Segundo (AHONEN, 2011), é estimado que 40% de toda a energia elétrica consumida no setor industrial é demandada por aplicações envolvendo bombas. Tradicionalmente, bombas são acionadas por motor elétrico sem controle de rotação, onde uma das formas clássicas de controlar a variável de processo, seja pressão ou vazão, é realizado através de válvula de estrangulamento. Ao abrir ou fechar a válvula, a pressão e vazão variam, e como o motor encontra-se sempre na rotação nominal e a válvula de estrangulamento introduz perdas ao sistema, a eficiência é comprometida. Hoje em dia, processos industriais estão procurando por novas estratégias para melhorar o desempenho da planta e uma das principais formas é através da maximização da eficiência de sistemas de bombeamento.

A avaliação do custo-benefício das vantagens técnicas e econômicas obtidas pela substituição do método de controle através de válvula de estrangulamento pelo uso de inversores de frequência, tem sido largamente publicado nos anos recentes e seu uso nos processos industriais tem aumentado em grande escala (AHONEN, 2011), (AHONEN, TAMMINEN e AHOLA, 2011). O uso de inversores de frequência no acionamento de bombas permite que as variáveis pressão e vazão sejam controladas por variação na rotação do motor mediante determinações do processo, com isso a eficiência é maximizada e, conseqüentemente, economia de energia é obtido.

Sistemas de bombeamento são equipados na maioria dos casos com somente medições relacionadas ao processo, sendo que não são medições apropriadas para determinação de variáveis como pressão e vazão. Com o advento dos inversores de frequência onde variáveis como rotação, torque e potência estão disponíveis através de parâmetros, o ponto de operação da bomba determinado pela pressão e vazão pode ser obtido. A eficiência de uma bomba é determinada pelo seu ponto de operação, que pode ser traduzido por parâmetros como pressão, vazão e potência consumida. Atualmente, o ponto de operação de uma bomba é determinado através do uso de sensores externos de pressão e vazão, porém, tais medições raramente estão disponíveis e/ou são difíceis de serem implementadas nos processos industriais. Podem ser citadas desvantagens do uso de sensores externos como sendo:

- Para que a maior economia de energia seja obtida em sistemas de bombeamento, o sensor precisa ser instalado remotamente, ou seja, distante da bomba, implicando em custos adicionais de instalação mecânica e elétrica.

- A posição exata do sensor no sistema é geralmente difícil de se determinar.
- Sensores são muito susceptíveis a falhas, isso implica em custos de instalação e parada de planta.
- Sensores necessitam constante calibração, como consequência, custos de instalação são adicionados ao processo.

Para evitar o uso de medições diretas das variáveis de pressão e vazão por meio de sensores externos, soluções de métodos de estimação baseados em modelos estão disponíveis hoje no mercado (AHONEN, 2011), (AHONEN, TAMMINEM e AHOLA, 2011). Inversores de frequência podem hoje em dia estimar a potência consumida e rotação do motor com boa precisão, e isso torna possível a estimação do ponto de operação da bomba descartando o uso de sensores externos de pressão e vazão. O princípio do uso de modelos para estimação das variáveis se baseia no uso de curvas características de potência/vazão e altura manométrica/vazão para estimar o ponto de operação da bomba. Podem ser citados como exemplos de modelos de estimação os métodos $Q \times H$ e $Q \times P$. Esses métodos usam da informação de rotação e potência disponíveis pelo inversor como entradas para os modelos. Tais modelos serão abordados no decorrer dos capítulos desse trabalho. As curvas características $Q \times H$ e $Q \times P$ fornecidas pelo fabricante de bomba são usadas como modelo desses métodos em combinação com o que é chamado de leis de afinidade (AHONEN, 2011). As leis de afinidade são cruciais para que novas curvas características da bomba possam ser construídas para rotações diferentes da publicada pelo fabricante, que é a nominal somente. Geralmente, os modelos de estimação não levam em consideração que as leis de afinidade não são exatamente corretas quando a rotação da bomba difere de mais de 20% da rotação nominal, pois a eficiência é afetada pela variação de rotação e isso altera o ponto de operação da bomba.

1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO

Este trabalho tem como objetivo inicial realizar o estudo de métodos de estimação de vazão e pressão em sistemas de bombeamento fazendo uso de um inversor de frequência. Estes métodos utilizam as estimações de potência, torque e rotação do motor de indução que está conectado a bomba. Será abordado em cada método a estrutura utilizada, assim como seu desempenho na estimação das variáveis de interesse através de resultados experimentais realizados pelos criadores dos métodos.

O principal objetivo desse trabalho é apresentar um método de estimação do ponto de operação da bomba, que usa um algoritmo de controle desenvolvido em ambiente de

programação do tipo diagrama de escada (*Ladder*) funcionando dentro de um controlador lógico programável, integrado a um inversor de frequência. Esse método utiliza a corrente de torque do motor e rotação como variáveis de entrada, diferente do que é usado atualmente pelos modelos tradicionais. Dessa forma espera-se minimizar os erros causados pela mudança de rotação nas equações das leis de afinidade necessárias para o funcionamento do modelo desse projeto. Um segundo objetivo traçado para esse trabalho é poder controlar a variável de processo, altura manométrica da bomba, usando as informações fornecidas pelos estimadores de vazão e pressão.

Este trabalho propõe-se também a demonstrar, através de um algoritmo desenvolvido em ambiente de programação *Ladder*, um novo método de estimação de variáveis vazão e pressão de uma bomba centrífuga utilizando dados fornecidos por um inversor de frequência. Esse algoritmo irá operar dentro de um controlador lógico programável disponível em uma placa de expansão de funções instalado dentro do inversor. Variáveis como rotação e corrente de torque disponíveis pelo inversor serão utilizadas para que o ponto de operação seja então determinado com boa precisão. Acredita-se que usando a corrente de torque e rotação como variáveis de entrada para o método, ao invés de potência e rotação, onde a estimação depende da eficiência e esta é alterada com a mudança de rotação, os erros de estimação sejam minimizados. Para a obtenção da maior precisão possível, algumas curvas de rotação eleitas aleatoriamente foram obtidas experimentalmente. Ao contrário das abordagens atuais, onde não é possível utilizar os resultados obtidos pelos métodos de estimação para propósitos de controle por conta da falta de precisão, espera-se obter resultados satisfatórios para que o principal objetivo desse trabalho seja alcançado, o controle da altura manométrica de uma bomba centrífuga usando controlador do tipo PI.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está estruturado da seguinte forma:

No Capítulo 2 é apresentada a composição básica de um sistema de bombeamento, detalhes contendo funções e características básicas de cada componente, motor de indução assíncrono trifásico, bomba e inversor de frequência também serão abordados. Definições sobre ponto de operação de uma bomba, curva do sistema e efeitos causados pela alteração de rotação também serão discutidos neste capítulo.

No Capítulo 3 são apresentados os métodos tradicionais de estimação do ponto de operação de uma bomba com e sem sensor de realimentação disponíveis no mercado. São feitas

discussões a respeito de como esses métodos funcionam, assim como serão mostrados os resultados experimentais de cada um e suas fontes de erros. Ainda dentro desse capítulo, apresenta-se em detalhes o método de estimação proposto para este projeto, o $I_q \times Q$. Detalhes sobre a estrutura de funcionamento do algoritmo como, blocos de aquisição das curvas características, de região de identificação de rotação e torque e o método de interpolação utilizado serão também discutidos.

No Capítulo 4 é apresentado a configuração utilizada para cada componente integrante do sistema de bombeamento utilizado no experimento. Esquemas de ligação dos sensores, do inversor de frequência, do motor elétrico e da placa de expansão de funções serão mostrados. Adicionalmente, resultados experimentais dos estimadores de vazão e altura manométrica serão compartilhados, assim como o teste funcional de controle da altura manométrica, tema principal desse trabalho.

Finalmente, o Capítulo 5 encerra o trabalho com as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

5 CONCLUSÃO GERAL

Sistemas de bombeamento são largamente utilizados na indústria e representam uma parcela significativa no consumo mundial de energia elétrica. É estimado que 25% do consumo de energia elétrica no setor industrial seja representado por aplicações envolvendo bombas centrífugas. Estudos mostram que geralmente esses sistemas operam com uma eficiência mais baixa que poderiam e por essa razão há um grande potencial para obtenção de economia de energia em aplicações envolvendo esse tipo de carga. Para identificar a operação de bombas centrífugas operando com baixa eficiência, métodos de estimação sem o uso de sensores usando inversores de frequência podem ser usados para informação do ponto de operação, e assim podem ser controladas para que operem em regiões mais eficientes. O presente trabalho se propôs a investigar métodos tradicionais como $Q \times H$, $P \times Q$, CURVA DO PROCESSO e HÍBRIDO como métodos de estimação das variáveis vazão e altura manométrica de uma bomba do tipo centrífuga com rotor de fluxo radial, como também apresentar um novo algoritmo de estimação de tais variáveis e, conseqüente, controle da variável de processo altura manométrica utilizando um controlador do tipo PI sem o uso de nenhum sensor adicional, somente variáveis fornecidas pelo inversor de frequência.

No Capítulo 2 desse trabalho foi apresentado a composição típica de um sistema de bombeamento, onde cada componente, bomba centrífuga, motor de indução e inversor de frequência como partes integrantes, foram superficialmente estudados. Ainda no capítulo introdutório, informações básicas para o entendimento de conceitos como, curva do sistema, ponto de operação de uma bomba centrífuga e alteração do ponto de operação foram abordados.

Foi discutido no Capítulo 3 os métodos tradicionais de estimação de vazão e altura manométrica utilizados no monitoramento do ponto de operação de uma bomba centrífuga. Cada um dos modelos $Q \times H$, $P \times Q$, CURVA DO PROCESSO e HÍBRIDO foram apresentados juntamente com suas particularidades relacionadas ao algoritmo de estimação, fontes de erros para tais métodos de estimação, assim como resultados experimentais também foram abordados. Ainda no Capítulo 3 foram discutidos pontos como as curvas características das bombas, onde ficou claro a dependência do funcionamento e precisão dos modelos de estimação frente as tolerâncias permitidas aos fabricantes de bombas para fornecimento de tais curvas. O conceito de leis de afinidade, crucial para que fosse possível o funcionamento dos métodos utilizados tradicionalmente e o proposto por esse trabalho, o $I_q \times Q$ também foi apresentado. Como os fabricantes de bomba fornecem somente as curvas características de uma bomba na sua rotação nominal, as leis de afinidade permitem que as curvas nas diversas rotações sejam

construídas dentro do controlador. Conforme pôde ser visto, as equações das leis de afinidade mostram que a eficiência da bomba não é levada em consideração e isso é um dos principais geradores de erro dos métodos de estimação propostos.

Nesse mesmo capítulo foi abordado o método de estimação proposto por esse projeto, o $I_q \times Q$, onde ao invés de variáveis como potência, rotação, vazão e altura manométrica, variáveis como corrente de torque, rotação, vazão e altura manométrica foram utilizados para dois propósitos, o de estimar as variáveis de vazão e altura manométrica e controlar um determinado valor de variável de processo sem o uso de sensores externos. Conforme exposto, esse método utiliza um algoritmo matemático implementado para funcionamento em um controlador lógico programável. Esse método de controle sem sensor oferece vantagens como: redução de custo devido a exclusão dos sensores de pressão e vazão, aumento de confiabilidade do sistema devido à ausência de sensores, cabos, conexões, que são susceptíveis a falhas.

No Capítulo 4 foram apresentados os componentes integrantes do sistema de bombeamento utilizados no experimento, assim como os detalhes dos esquemas de ligação e conexões entre os componentes. O experimento propôs a verificação do desempenho do método de estimação dentro de um range de variação de velocidade de 2250 a 3430rpm, onde utilizando a válvula de estrangulamento foi possível gerar pontos de operação distintos da bomba e dessa forma o rastreamento das variáveis de vazão e pressão foi possível de ser demonstrado. Conforme pode ser visto através dos resultados experimentais, o erro médio máximo foi de 2.8% para a vazão e 3.7% para a altura manométrica, resultados estes muito melhores do que o esperado que era de 10% de erro médio. A título de comparação conforme mostrado no Capítulo 3, os métodos de estimação existentes fornecem erros da ordem de 3 a 12% para a vazão e de 3 a 7% para a altura manométrica quando a bomba opera na rotação nominal e para rotações abaixo de 70% da rotação nominal os erros podem chegar a 28% para a vazão. Para o método $I_q \times Q$ proposto, o erro médio de vazão para uma condição de rotação de 65% da rotação nominal da bomba foi de aproximadamente 1.3%.

Para o experimento de controle da variável de processo, pontos aleatórios de altura manométrica foram estabelecidos para que fossem controlados ao longo de perturbações inseridas ao sistema, como por exemplo, degraus de vazão impostos pela abertura ou fechamento repentinos da válvula de estrangulamento. Os erros médios produzidos foram da ordem de no máximo 2% comparado ao valor dado pela leitura do sensor. Isso comprova que, é possível controlar uma variável de processo usando métodos de estimação sem sensores e obter precisões aceitáveis.

Como sugestões para trabalhos futuros podem ser citados:

- Controle de bomba centrífuga sem sensor, para que opere somente dentro de pontos específicos definidos por uma curva de controle do sistema, podendo essa curva ser de funções do tipo quadráticas, constante e linear.
- Estimação de variáveis de vazão e altura manométrica sem sensor, para sistemas com mais de uma bomba.
- Controle de variável de processo sem sensor, para sistemas com mais de uma bomba.