

JOÃO DALLAMUTA
HENRIQUE AJUZ HOLZMANN
(ORGANIZADORES)

Collection:

APPLIED ELECTRICAL ENGINEERING

Atena
Editora
Ano 2022

JOÃO DALLAMUTA
HENRIQUE AJUZ HOLZMANN
(ORGANIZADORES)

Collection:

APPLIED ELECTRICAL ENGINEERING

Atena
Editora
Ano 2022

Editora chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Editora executiva

Natalia Oliveira

Assistente editorial

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto gráfico

Camila Alves de Cremo

Daphynny Pamplona

Gabriel Motomu Teshima

Luiza Alves Batista

Natália Sandrini de Azevedo

Imagens da capa

iStock

Edição de arte

Luiza Alves Batista

2022 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2022 Os autores

Copyright da edição © 2022 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

Conselho Editorial**Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Profª Drª Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná



Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora
Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista



Diagramação: Camila Alves de Cremo
Correção: Yaidy Paola Martinez
Indexação: Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão: Os autores
Organizadores: João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

C697 Collection: applied electrical engineering / Organizadores
João Dallamuta, Henrique Ajuz Holzmann. – Ponta
Grossa - PR: Atena, 2022.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-5983-858-5

DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.585222801>

1. Electrical engineering. I. Dallamuta, João
(Organizador). II. Holzmann, Henrique Ajuz (Organizador). III.
Título.

CDD 621.3

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora

Ponta Grossa – Paraná – Brasil

Telefone: +55 (42) 3323-5493

www.atenaeditora.com.br

contato@atenaeditora.com.br



DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.



DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, *desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.



APRESENTAÇÃO

A engenharia elétrica tornou-se uma profissão há cerca de 130 anos, com o início da distribuição de eletricidade em caráter comercial e com a difusão acelerada do telégrafo em escala global no final do século XIX.

Na primeira metade do século XX a difusão da telefonia e da radiodifusão além do crescimento vigoroso dos sistemas elétricos de produção, transmissão e distribuição de eletricidade, deu os contornos definitivos para a carreira de engenheiro eletricista que na segunda metade do século, com a difusão dos semicondutores e da computação gerou variações de ênfase de formação como engenheiros eletrônicos, de telecomunicações, de controle e automação ou de computação.

Produzir conhecimento em engenharia elétrica é portando pesquisar em uma gama enorme de áreas, subáreas e abordagens de uma engenharia que é onipresente em praticamente todos os campos da ciência e tecnologia.

Neste livro temos uma diversidade de temas, níveis de profundidade e abordagens de pesquisa, envolvendo aspectos técnicos e científicos. Aos autores e editores, agradecemos pela confiança e espírito de parceria.

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann

SUMÁRIO


CAPÍTULO 1..... 1

A MODEL BASED DESIGN APPROACH FOR KNOCK CONTROL IN INTERNAL COMBUSTION ENGINES USING MACHINE LEARNING

Eduardo Vieira Falcão

Vinicius Mafra Melo

Péricles Rezende Barros

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5852228011>

CAPÍTULO 2..... 15

DEVELOPMENT OF A COMPUTATIONAL TOOL FOR DIMENSIONING AND ANALYZING THE ECONOMIC FEASIBILITY OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS


David Coverdale Rangel Velasco

Elivandro Tavares Lôbo

Welder Azevedo Santos

Wagner Vianna Bretas


Rodrigo Martins Fernandes

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5852228012>

CAPÍTULO 3..... 21

OTIMIZAÇÃO DE OPERAÇÕES MODULARES ATRAVÉS DO USO DE PSEUDO-MÓDULOS

Augusto Cezar Boldori Vassoler

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5852228013>


CAPÍTULO 4..... 33

OTIMIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA USANDO SIMULAÇÃO MATEMÁTICA E TESTES EXPERIMENTAIS

Eduardo G. Silva

Alexandre S. Caporali

Cesar da Costa

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5852228014>

CAPÍTULO 5..... 49

MAPAS COGNITIVOS FUZZY DINÂMICOS ADAPTATIVOS APLICADOS EM PROCESSO INDUSTRIAL

Márcio Mendonça

Francisco de Assis Scannavino Junior

Wagner Fontes Godoy

Lucas Botoni de Souza

Marta Rúbia Pereira dos Santos

Fábio Rodrigo Milanez

Carlos Alberto Paschoalino


Michele Eliza Casagrande Rocha

Vicente de Lima Gongora

Ricardo Breganon

Marcio Aurélio Furtado Montezuma

Emanuel Ignacio García

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5852228015>


CAPÍTULO 6..... 61

DESENVOLVIMENTO DE MATERIAL DIDÁTICO SOBRE FILTROS PROBABILÍSTICOS EMPREGADOS NA SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE LOCALIZAÇÃO EM ROBÓTICA MÓVEL

José Lucas Araújo dos Santos

Luciano Buonocore

Luiz Eugênio Santos Araújo Filho


 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5852228016>

CAPÍTULO 7..... 74

EFFECTO DE LA IMPLANTACIÓN DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA ESPAÑOLA

Paula Romo Santos

Begoña Lapeña Barrio

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5852228017>

CAPÍTULO 8..... 90

INSTALAÇÃO DE MEDIÇÃO NOS ALIMENTADORES DAS SUBESTAÇÕES

Adalberto Leandro da Silva

Fabio Coelho de Santana

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5852228018>

CAPÍTULO 9..... 106

PROJETO DE OUVIDORIA DA DISTRIBUIÇÃO DA EDP SÃO PAULO – ANÁLISE DE DEMANDA DE MAIOR IMPACTO

Márcia Lúcia Lopes de Souza Jesus

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5852228019>

CAPÍTULO 10..... 114

DIAGNÓSTICO, CRESCIMENTO E ATENUAÇÃO DE RISCOS DE INSTALAÇÕES ELÉTRICAS EM FAVELAS

Márcio Mendonça

Marta Rúbia Pereira dos Santos

Fábio Rodrigo Milanez

Wagner Fontes Godoy

Rodrigo Henrique Cunha Palácios

Marco Antônio Ferreira Finocchio

Carlos Alberto Paschoalino


Francisco de Assis Scannavino Junior

Vicente de Lima Gongora

Lucas Botoni de Souza

Michele Eliza Casagrande Rocha


José Augusto Fabri

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.58522280110>

CAPÍTULO 11..... 127

ANÁLISE COMPARATIVA DE UM SISTEMA DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM UMA EDIFICAÇÃO DA CIDADE DE PORTO VELHO - RO


Angelina Lidiane Moura Cunha
Felipe Alexandre Souza da Silva
Antonio Carlos Duarte Ricciotti
Viviane Barrozo da Silva
Paulo de Tarso Carvalho de Oliveira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.58522280111>

CAPÍTULO 12..... 140

O DESEMPENHO E EFICIÊNCIA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EM PALMAS - TO: ANÁLISE EM FUNÇÃO DO PONTO CARDEAL E VARIAÇÃO ANGULAR DAS PLACAS


Aline Silva Magalhães
Jabson da Cunha Silva

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.58522280112>

CAPÍTULO 13..... 153

SIMULADOR DE CARGA UTILIZANDO MECANISMO DE FRENAGEM ELETROMAGNÉTICA PARA ENSAIOS DE COMPORTAMENTO DE MÁQUINAS ASSÍNCRONAS


Murilo Meneghetti Caramori
Alexandre Dalla Rosa

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.58522280113>

CAPÍTULO 14..... 184

PROPOSTA DE GEOMETRIAS DE NÚCLEOS USADOS EM ACOPLAMENTOS DE SISTEMAS ATRAVÉS DO FLUXO MAGNÉTICO

Lucas Lapolli Brighenti
Walbermark Marques Dos Santos
Denizar Cruz Martins


 <https://doi.org/10.22533/at.ed.58522280114>

CAPÍTULO 15..... 198

DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DE LIGAÇÕES CRUZADAS EM BORRACHA DE ESTIRENO-BUTADIENO (SBR) PARA DIFERENTES SISTEMAS DE VULCANIZAÇÃO

Harison Franca do Santos
Arthur Pimentel de Carvalho
Carlos Toshiyuki Hiranobe
Eduardo Roque Budenberg
Gabriel Deltrejo Ribeiro
Giovanni Barrera Torres
Jose Francisco Resende
Leonardo Lataro Paim
Leandra Oliveira Salmazo
Miguel Ángel Rodríguez Pérez

Renivaldo José dos Santos

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.58522280115>

SOBRE OS ORGANIZADORES	210
ÍNDICE REMISSIVO.....	211

OTIMIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA USANDO SIMULAÇÃO MATEMÁTICA E TESTES EXPERIMENTAIS

Data de aceite: 10/01/2022

Data de submissão: 20/10/2021

Eduardo G. Silva

Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP)
São Paulo – SP – Brasil

Alexandre S. Caporali

Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP)
São Paulo – SP – Brasil

Cesar da Costa

Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP)
São Paulo – SP – Brasil

RESUMO: Ao longo da história, os sistemas de distribuição de água apresentam considerável desperdício no volume de água e perda de cargas hidráulicas. O consumo de eletricidade do grupo bomba representa uma proporção significativa do custo total do sistema de distribuição de água. O sistema de distribuição de água representa aproximadamente 2,5% da matriz elétrica do Brasil, e cerca de 95% de seus gastos referem-se a sistemas de bombeamento (conjunto de bombas). Este trabalho apresenta um estudo de bombas de frequência fixa com válvulas de fluxo, que podem ser utilizadas para iniciar, parar e regular o fluxo de água e bombas de frequência variável, utilizando inversor de frequência (VFD), para controlar o fluxo. Na primeira etapa, foi analisado o método de bombas de frequência fixa

com estrangulamento da válvula de fluxo, onde o consumo de energia elétrica era registrado de acordo com o ajuste de uma determinada faixa de fluxo. Na segunda etapa, foram analisadas bombas de frequência variável, utilizando um inversor de frequência, onde era registrado o consumo de energia, mantendo a válvula de fluxo 100% aberta. Uma simulação matemática de um modelo dinâmico de distribuição de água, para as duas condições do grupo de bombas (fixa e variável), foi realizada para comparar os resultados do modelo matemático com o modelo experimental. O modelo permitiu simular o comportamento do sistema e ao mesmo tempo encontrar os caminhos possíveis para a sua otimização. Os resultados indicam que a partir da simulação dos modelos matemáticos é possível otimizar efetivamente o consumo de energia elétrica, no modelo experimental, utilizando um conjunto de bombas de frequência variável.

PALAVRAS-CHAVE: Eficiência energética, sistema de distribuição de água, inversor de frequência, bomba centrífuga.

OPTIMIZATION OF A WATER DISTRIBUTION SYSTEM USING MATHEMATICAL SIMULATION AND EXPERIMENTAL TESTS

ABSTRACT: Throughout history, water distribution systems have shown considerable waste in the volume of water and loss of hydraulic loads. The electricity consumption of the pump group represents a significant proportion of the total cost of the water distribution system. The water distribution system represents approximately 2.5% of the electric matrix in Brazil, and about

95% of its expenses refer to pumping systems (group of pumps). This work presents a study of fixed frequency pumps with throttle valves that can be used to start, stop and regulate the flow rate and variable frequency pumps, using a frequency inverter (VFD) to control the flow rate. In the first stage, the method of fixed frequency pumps with throttling of the flow valve was analyzed, where the consumption of electrical energy was registered according to the adjustment of a certain flow range. In the second stage, variable frequency pumps were analyzed, using a frequency inverter, where energy consumption was recorded, keeping the flow valve 100% open. A mathematical simulation of a dynamic water distribution model, for the two conditions of the pump group (fixed and variable) was performed to compare the results of the mathematical model with the experimental model. The model allowed to simulate the behavior of the system and at the same time to find the possible ways for its optimization. The results indicate that from the simulation of the mathematical models it is possible to effectively optimize the consumption of electric energy, in the experimental model, using a group of pumps of variable frequency.

KEYWORDS: Energy efficiency, Water distribution system, Frequency Inverter, Centrifugal pump.

1 | INTRODUÇÃO

O sistema de distribuição de água é uma infraestrutura crítica em áreas urbanas (YU et al, 2018). Sua gestão operacional é objeto de crescente interesse, levando-se em consideração os fatores econômicos e ambientais (OLSZEWSKI, 2016). Sua otimização envolve muitos aspectos, como layout da rede de dutos, consumo de água, tipos de grupos de bombas, e custo de eletricidade (ZHANG et al, 2020; ZHANG et al, 2016). O acionamento ideal do grupo de bombas provou ser um método prático e eficaz para reduzir os custos de operação de todo o sistema (MENKE et al, 2017; MARCHI et al, 2012; GEORGESCU et al, 2017). De acordo com o número de variáveis e objetivos de otimização, o problema de acionamento do grupo de bombas pode se tornar muito complexo, especialmente em grandes sistemas. Diversas literaturas têm estudado este problema, introduzindo diferentes abordagens como apresentadas a seguir.

Os principais componentes de um sistema de abastecimento de água, como motores de indução, grupo de bombas e inversores de frequência foram apresentados em (MARCHI et al, 2012). O objetivo do artigo era propor uma avaliação do consumo energético de um sistema de distribuição de água. Os autores abordaram as possibilidades de economizar energia no sistema utilizando bombas de velocidades fixas e bombas de velocidade variável, ou seja, com o uso do inversor de frequência. Além disso, abordaram a seleção dos tipos de motores de indução, dimensionamento, ciclo de trabalho do grupo de bombas e perdas de cargas.

Um sistema eletrônico para acionamento e operação de um grupo de bombas foi desenvolvido por Huang et al, 2019, constituído por um sensor de alto desempenho combinado com um circuito de medição digital e sistema de aquisição de dados. Ao

processar os vários indicadores da bomba medidos pelo sensor e compará-los com os valores teóricos calculados, o desempenho da bomba em teste é avaliado. O sistema de teste tem interação humana-computador, com alto grau de automação, velocidade e precisão de teste. No trabalho de Zhang et al, 2020, o enfoque foi no nível de água de um tanque de água e a otimização combinatória do grupo de bombas de captação de água. O método adota a programação dinâmica para prever a tendência da produção nas próximas 24 horas. Os resultados experimentais mostram que 4,20% de economia de eletricidade pode ser alcançada.

No artigo de Van Rhyne et al, 2018, os autores descrevem a redução no consumo de energia em sistemas de bombas centrífugas acionadas por motor de indução, otimizando os principais componentes do sistema e controlando-os do ponto de vista do sistema. Os mais recentes desenvolvimentos em motores elétricos de indução, com controle de acionamento de frequência variável (VFD) apresentam uma oportunidade para modernizar aplicações de sistemas de distribuição de água mais antigos, com sistemas de bombeamento centrífugo, com frequência fixa, de maneira economicamente viável. Um estudo é proposto em Li et al, 2018, para análise combinada do fluxo de água e energia de redes integradas de eletricidade e abastecimento. Com foco num sistema de distribuição de água regional composto de um sistema de distribuição de energia desequilibrado e rede municipal de distribuição de água. O problema do fluxo de água é formulado com o grupo de bombas. Os resultados numéricos de um sistema de teste que compõe um sistema de distribuição de energia com 33 barramentos e um sistema de distribuição de água com 9 nós são usados para verificar a análise integrada de fluxo de energia e distribuição de água proposta.

Este trabalho analisa o desempenho da eficiência energética de um sistema de distribuição de água. Para a análise experimental foram avaliados dois métodos de acionamento do grupo de bombas: (i) Método de operação por estrangulamento da válvula de vazão de fluxo com bomba de frequência fixa; (ii) Método de operação por variação da rotação da bomba de frequência variável, utilizando inversor de frequência. Por meio da plataforma de software MATLAB/Simulink foi realizada a simulação dos dois métodos analisados experimentalmente, a partir de um modelo dinâmico virtual de acionamento das bombas, configurado com as características de um sistema de distribuição de água real. Os resultados da simulação foram comparados com os dados obtidos experimentalmente, em uma Planta didática de distribuição de água, instalada no IFSP - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo.

2 | CARACTERÍSTICAS DAS BOMBAS CENTRÍFUGAS

O desempenho de uma bomba centrífuga está relacionado com uma determinada velocidade, fluxo e altura manométrica da bomba (Q-H), fluxo e potência (Q-P), fluxo e eficiência (Q- η), fluxo e altura de sucção a vácuo e a cavitação (ZHANG et al, 2020). As

curvas Q-H da bomba de frequência fixa podem ser dadas pela Eq. (1).

$$H = H_x - Q^2 \quad (1)$$

Onde:

Q é o fluxo da bomba de frequência fixa, H é a altura manométrica da bomba de frequência fixa e H_x são parâmetros de ajuste da bomba.

A variação da vazão por efeito do estrangulamento da válvula (fechamento de registro) em sistemas de bomba de frequência fixa provoca a inclinação da curva do sistema podendo deslocar o ponto de operação para uma região de baixo rendimento. Conforme mostra a Fig. 1, observa-se que o deslocamento do novo ponto de operação contribui para o aumento das perdas de cargas e a redução da vazão de trabalho. A energia dissipada provocada pela elevação das perdas de cargas é compensada com o aumento no consumo de energia da bomba, já que ela levará mais tempo para cumprir um determinado trabalho (MARCHI et al, 2012). As fricções provocadas no interior da bomba também são perdas de carga que representam uma parcela da altura manométrica total do sistema. A altura manométrica do sistema já considerando as perdas de cargas existentes na tubulação contribui expressivamente para o aumento do consumo de energia.

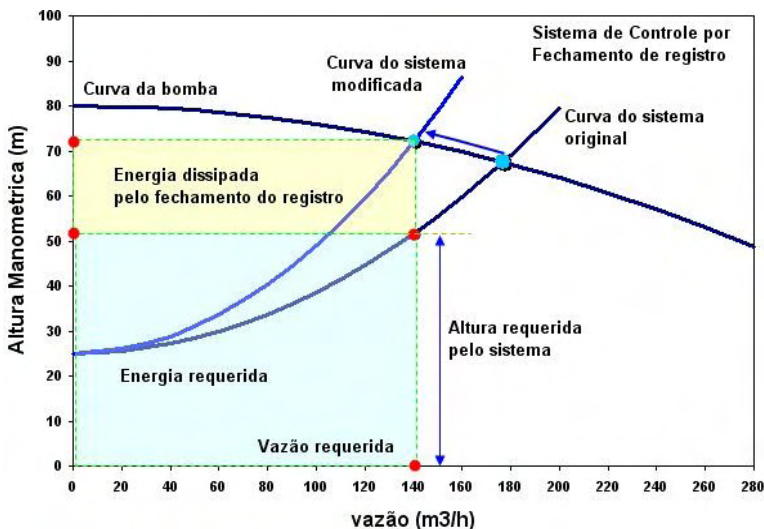


Fig. 1. Efeito na curva da bomba por estrangulamento.

As curvas Q-N (vazão do sistema em função da potência) da bomba de frequência variável podem ser dadas pela Eq. (2).

$$N = a + bQ + cQ^2 \quad (2)$$

Onde:

N é a potência da bomba de frequência variável, a , b e c são parâmetros de ajuste da bomba.

As Leis de Afinidade de bombas definidas pelas Eq. (3), Eq. (4) e Eq. (5), definem mudanças na capacidade da bomba, carga e BHP – potência absorvida pela bomba, quando ocorrem variações na velocidade da bomba [9]. As equações mostram que a relação entre vazão e velocidade são diretamente proporcionais, mas a altura manométrica do sistema, definida como pressão do sistema, tem uma relação quadrática e a potência de consumo do motor tem uma relação cúbica.

$$\frac{Q}{Q_N} = s \quad (3)$$

$$\frac{H}{H_N} = s^2 \quad (4)$$

$$\frac{N}{N_N} = s^3 \quad (5)$$

Onde:

s é a razão de velocidade, Q_N , H_N , N_N são fluxo, altura manométrica e potência da bomba de frequência variável, respectivamente sob a velocidade nominal.

A curva de desempenho da bomba de frequência variável é dada pela Eq. (6) e Eq. (7). Os parâmetros são determinados pelo fabricante da bomba.

$$H = s^2 H_x - Q^2 \quad (6)$$

$$N = as^3 + bs^2 Q + cs Q^2 \quad (7)$$

A variação da vazão por controle da rotação em sistemas de bomba de frequência variável, Fig. 2, provoca o deslocamento na curva da bomba e, conseqüentemente, o novo ponto de operação para uma região de alto rendimento. O novo ponto de operação da bomba condiciona a redução proporcional da vazão, porém o efeito provoca uma redução quadrática nas perdas de cargas do sistema e uma redução cúbica no consumo de energia elétrica, que são regidos pela lei da afinidade, conforme Eq. (3), Eq. (4) e Eq. (5).

Quando a bomba está funcionando, sua condição de funcionamento não depende apenas das características da própria bomba, mas também depende do sistema hidráulico da bomba e da mudança do nível de água ou outros fatores.

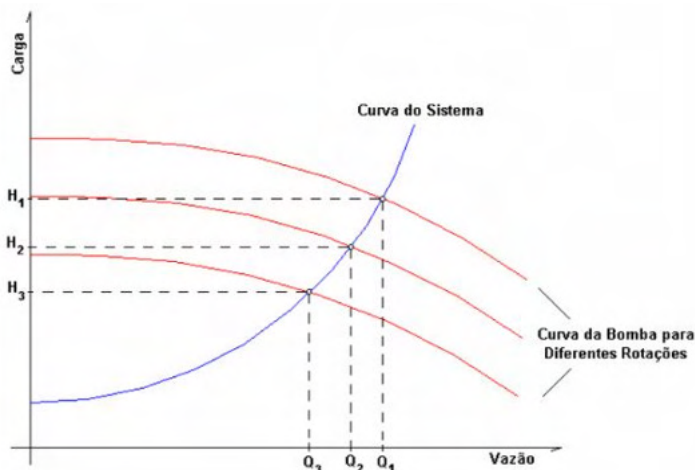


Fig. 2. Efeito na curva da bomba por variação da rotação.

3 I MODELAGEM MATEMÁTICA

Para desenvolver o modelo matemático de uma bomba centrífuga de frequência fixa e frequência variável foi utilizado o software MATLAB/Simulink, a partir das equações da continuidade e a equação de Navier Stokes (GEVORKOV et al, 2018; ENEMUOH et al, 2013; e GEVORKOV et al, 2018). A equação da continuidade representa a conservação do fluido e a equação de Navier-Stokes representa o transporte do fluido no momento linear em todo o domínio computacional.

3.1 Bomba de frequência fixa

O modelo do sistema de uma bomba de frequência fixa em partida direta, simula uma bomba operando em sua máxima rotação, ou seja, na frequência de 60 Hz e um controle de vazão por estrangulamento da válvula reguladora de fluxo. O modelo é constituído por uma fonte de alimentação trifásica, o motor assíncrono de indução trifásico e um bloco de controle manual da vazão, que simula o estrangulamento da válvula reguladora de fluxo. O modelo é apresentado na Fig. 3.

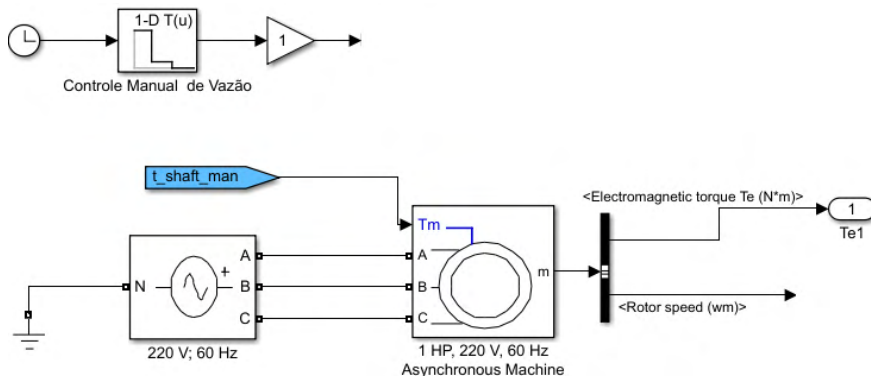


Fig. 3. Modelo de operação de bomba de frequência fixa com controle de vazão por estrangulamento da válvula reguladora de fluxo.

3.2 Bomba de frequência variável

O modelo do sistema de uma bomba de frequência variável por inversor de frequência, simula uma bomba operando em velocidade variável e controle de vazão pelo método da variação da rotação da bomba. O modelo é constituído por um inversor de frequência, o motor assíncrono de indução trifásico e um conjunto de blocos, que simulam o disparo dos transistores de potência IGBT do inversor com o objetivo de variar a sua frequência de saída. O modelo é mostrado na Fig. 4.

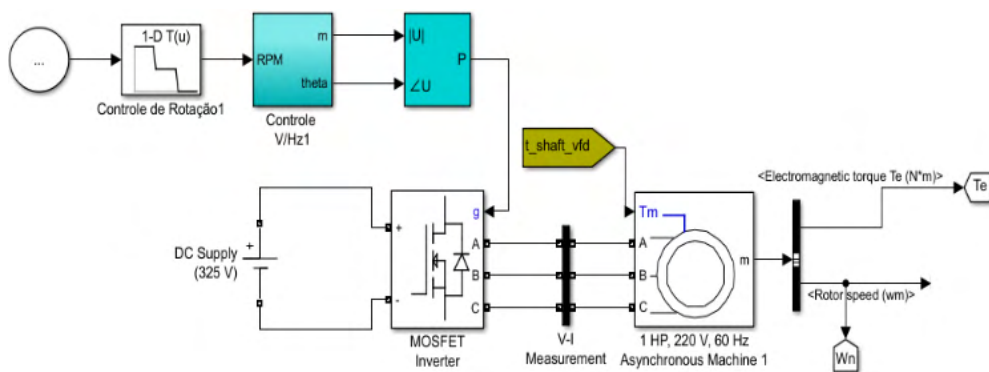


Fig. 4. Modelo operação de bomba de frequência variável com controle de vazão por variação da rotação da bomba.

Quando o modelo simula o controle de vazão com bomba de frequência fixa, o sistema hidráulico é acionado pelo sistema elétrico da Fig. 3, que realiza o controle da abertura da válvula reguladora (estrangulamento) de vazão, através de sinais gerados e mantém a bomba na frequência fixa em sua máxima rotação. Quando o modelo realiza o controle de vazão com bomba de frequências variável, o sistema hidráulico é acionado pelo

sistema elétrico da Fig. 4, que mantém a válvula reguladora de vazão 100% aberta e varia a velocidade da bomba por intermédio da variação da frequência no inversor. Os modelos matemáticos permitem simular o comportamento do sistema de distribuição de água e ao mesmo tempo encontrar os caminhos possíveis para sua otimização.

4 | MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

Para o desenvolvimento da parte experimental deste trabalho foi utilizada uma bancada de testes, que se encontra no Laboratório de eficiência energética do Instituto Federal de São Paulo (IFSP). A planta simula um sistema de distribuição de água, que permite ao usuário configurar o sistema para avaliar o desempenho energético de um sistema real de distribuição de água. A Fig. 5 ilustra a Planta de Eficiência Energética.



Fig. 5. Laboratório de eficiência energética do Instituto Federal de São Paulo.

A planta dispõe de um microcomputador, instrumentação, bomba centrífuga, inversor de frequência, tubulação hidráulica, tanques e um sistema supervisor SCADA, que permite simular, controlar e monitorar os ensaios experimentais. A planta de eficiência energética disponibiliza dois motores, sendo um convencional e outro de alto rendimento. O sistema supervisor permite a seleção dos motores de forma automática, sem a necessidade de fazer a instalação elétrica. O sistema hidráulico condiciona a coleta das variáveis de pressão por um sensor transmissor de pressão (PIT-01), a vazão por um sensor transmissor de vazão (FIT-01) e a leitura dos níveis nos reservatórios (LIT-01). O sistema também permite o controle da válvula reguladora de fluxo (FV-01) e seu acionamento manual (bomba fixa - estrangulamento) ou acionamento por inversor de frequência (bomba variável).

A Fig. 6 apresenta a tela principal do sistema supervisorio da Planta de Eficiencia Energetica onde foram realizados os testes experimentais.

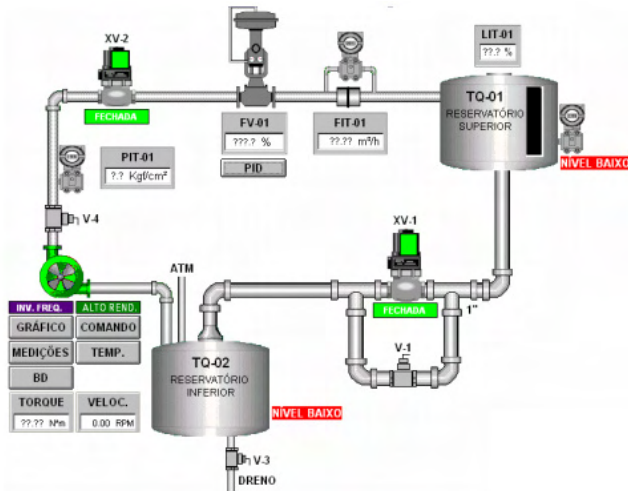


Fig. 6. Tela principal do sistema supervisorio da Planta de Eficiencia Energetica do Instituto Federal de São Paulo.

4.2 Metodologia

4.2.1 Teste com Bomba de Frequência Fixa

Neste teste experimental do sistema de distribuicao de agua a bomba centrifuga opera na frequencia fixa de 60 Hz (3425 RPM), acionamento por partida direta, controle da vazao pelo metodo de estrangulamento da valvula controladora de vazao.

Nesta configuracao foi avaliado experimentalmente o rendimento energetico do sistema de distribuicao de agua operando na vazao de 2 m³/h, pouco acima da vazao minima da bomba (1,6 m³/h), posteriormente, explorou-se outras vazoes aumentando a vazao a taxa de 1m³/h, para cada avaliacao de rendimento, até atingir a vazao maxima que o sistema permitia. Para cada vazao ajustada, o tempo de operacao do sistema de distribuicao era programado para recalcar durante 20 minutos, a fim de avaliar o comportamento de todas as variaveis relevantes do processo e integrar o consumo de energia para obter-se a potencia consumida pelo motor.

O esquema indicado na Fig. 7 ilustra o procedimento de avaliacao experimental do desempenho energetico da bomba de frequencia fixa, operando por partida direta e controlando a vazao pelo metodo do estrangulamento da valvula reguladora de fluxo.

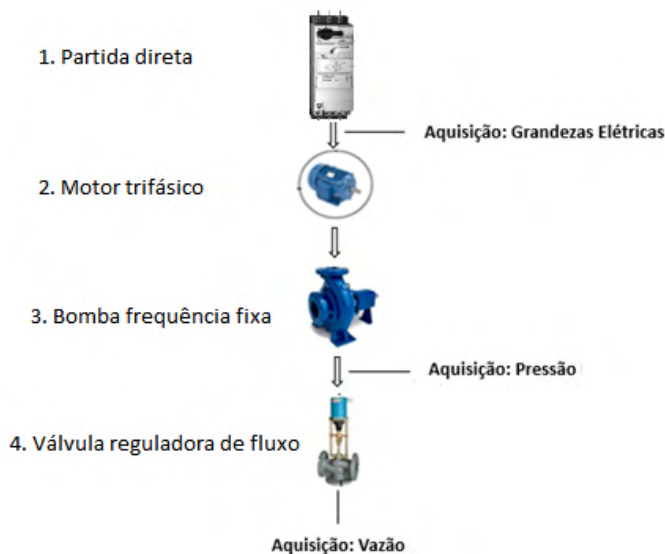


Fig. 7. Sistema de distribuição de água operando com bomba de frequência fixa e estrangulamento da válvula reguladora de fluxo.

A Tabela 1 apresenta as variáveis hidráulicas e elétricas medidas na Planta de distribuição de água operando com bomba de frequência fixa, rotação de 3425 RPM com estrangulamento da válvula reguladora de fluxo (FV-01). De acordo com a Tabela 1, observa-se que quando a válvula reguladora de fluxo é estrangulada em 57%, 50,5% e 48,5% para reduzir as vazões em 4m³/h, 3m³/h e 2m³/h, ocorre uma queda da corrente elétrica. Embora ocorra uma redução na corrente elétrica, não significa que o sistema seja eficiente, pois o efeito do estrangulamento da válvula reguladora de fluxo aumenta as perdas de carga que, por sua vez, provocam a inclinação na curva do sistema (Fig. 1) e deslocam o ponto de operação da bomba para uma região de baixo rendimento.

Abertura [%]	Pressão H[bar]	Vazão Q[m ³ /h]	Tensão [V]	Corrente [A]	Potência [W]	Energia [KWh]
48,50	3	2	212,2	3,1	1080	0,336
50,50	2,7	3	209,6	3,5	1125	0,375
57	2,4	4	209,6	3,6	1201	0,403
100	2,4	4,1	211,3	3,7	1212	0,403

Tabela 1 - Variáveis elétricas e hidráulicas – bomba frequência fixa

4.2.2 Teste com Bomba de Frequência Variável

Nesta fase de teste experimental foi avaliado o desempenho energético do sistema

de distribuição de água, operando com bomba variável por inversor de frequência, na vazão de $2 \text{ m}^3/\text{h}$, pouco acima da vazão mínima da bomba ($1,6 \text{ m}^3/\text{h}$), posteriormente, explorou-se outras vazões aumentando a vazão à taxa de $1 \text{ m}^3/\text{h}$, para cada avaliação de desempenho energético, até atingir a máxima vazão do sistema. Para cada vazão ajustada, o tempo de operação do sistema de abastecimento foi programado para recalcar durante 20 minutos a fim de avaliar o comportamento das variáveis hidráulicas e elétricas e integrar o consumo de energia para obter-se a potência consumida pelo inversor. O esquema indicado na Fig. 8 ilustra o procedimento de avaliação experimental do desempenho energético da bomba de frequência variável, controlando a vazão do fluido pela rotação da bomba.

A Tabela 2 apresenta as variáveis hidráulicas e elétricas medidas na Planta de distribuição de água operando com bomba de frequência variável por inversor de frequência. De acordo com a Tabela as rotações foram ajustadas em 3368 RPM, 2570 RPM e 1770 RPM para fixar as vazões de ensaio em $4 \text{ m}^3/\text{h}$, $3 \text{ m}^3/\text{h}$ e $2 \text{ m}^3/\text{h}$. Os resultados mostraram que a redução de 3368 RPM para 2570 RPM provocaram quedas na vazão para $3 \text{ m}^3/\text{h}$, pressão para 1.4 bar e potência para 582W e, posteriormente, na redução para 1770 RPM, as variáveis apresentaram novas quedas para $2 \text{ m}^3/\text{h}$, 0.66 bar e 228W. O consumo de energia medido neste ensaio foi sensivelmente menor com a redução da vazão do que no ensaio com bomba de frequência fixa e estrangulamento da válvula reguladora de fluxo.

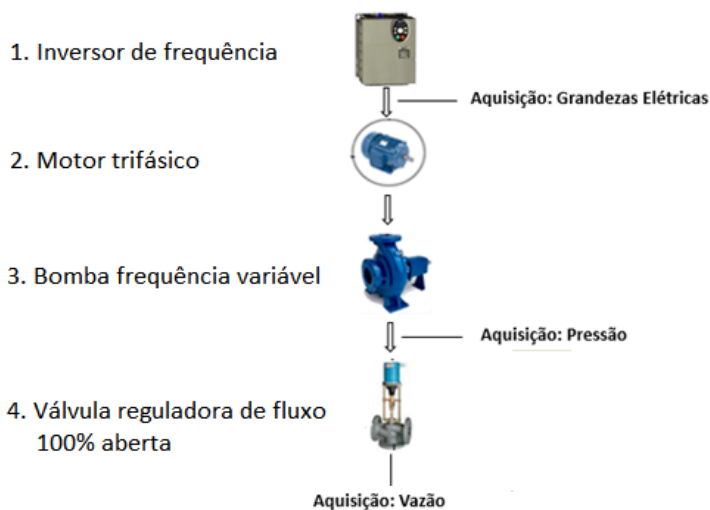


Fig. 8. Sistema de distribuição de água operando com bomba de frequência variável com controle da vazão pela variação da rotação da bomba.

Rotação [RPM]	Pressão H[bar]	Vazão Q[m ³ /h]	Tensão [V]	Corrente [A]	Potência [W]	Energia [KWh]
1770	0,66	2	212,9	1,3	228	0,075
2570	1,4	3	210,9	2,8	582	0,194
3368	2,5	4	209,5	5,3	1216	0,403

Tabela II - Variáveis elétricas e hidráulicas – bomba frequência Variável

5 I SIMULAÇÃO

5.1 Simulação da vazão

A Fig. 9 apresenta o gráfico da vazão em função do tempo da simulação do modelo da bomba de frequência fixa (estrangulamento da válvula – linha azul) e bomba de frequência variável (variação da rotação da bomba – linha amarela). Para ambos os modelos a vazão foi ajustada para iniciar em 4m³/h com objetivo de comparar o seu comportamento. A linha azul representa a variação da vazão para a bomba de frequência fixa. Nos tempos de 3s e 6.5s, ocorre um estrangulamento na válvula de controle de vazão à taxa de 1m³/h, que finaliza em 2m³/h. A linha amarela mostra a alteração da vazão para a bomba de frequência variável, em função da variação de sua rotação. Nos períodos de 3s a 4.75s e 6.5s a 8.25s, ocorre uma queda proporcional da vazão, ocasionada pela desaceleração gradativa da rotação da bomba até 1770 RPM, a vazão de 1.8m³/h.

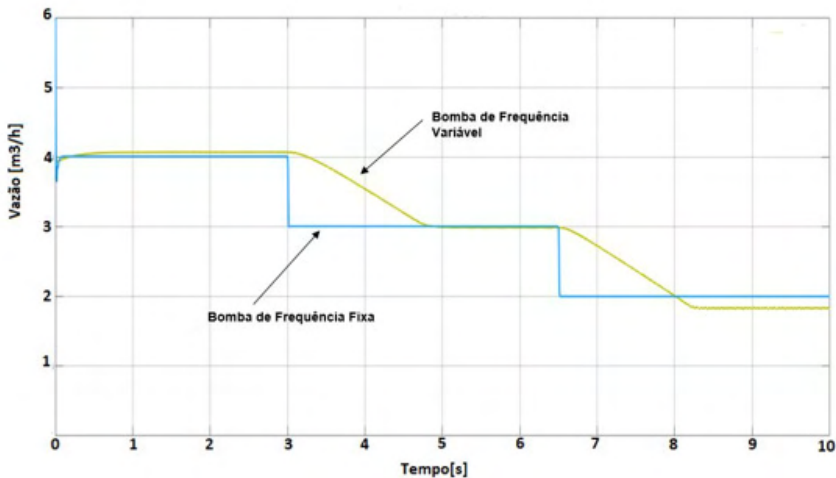


Fig. 9. Gráfico da simulação da vazão em função do tempo

5.2 Simulação da potência

A Fig. 10 apresenta o gráfico da potência em função do tempo da simulação do modelo da bomba de frequência fixa (estrangulamento da válvula – linha azul) e bomba de frequência variável (variação da rotação da bomba- linha amarela). A linha azul mostra que durante o início da simulação, o conjunto motor bomba apresenta uma potência elétrica de 1230W e quando as vazões são reduzidas, nos intervalos de 3s e 6.5s, as potências sofrem uma queda de 1130W e 1020W. Neste caso, a curva do sistema sofre um deslocamento em razão das perdas de carga provocada pelo estrangulamento da válvula. Este efeito na curva do sistema não altera a curva característica da bomba, no entanto, a intersecção de ambas as curvas desloca o ponto de operação da bomba para uma região de baixo rendimento.

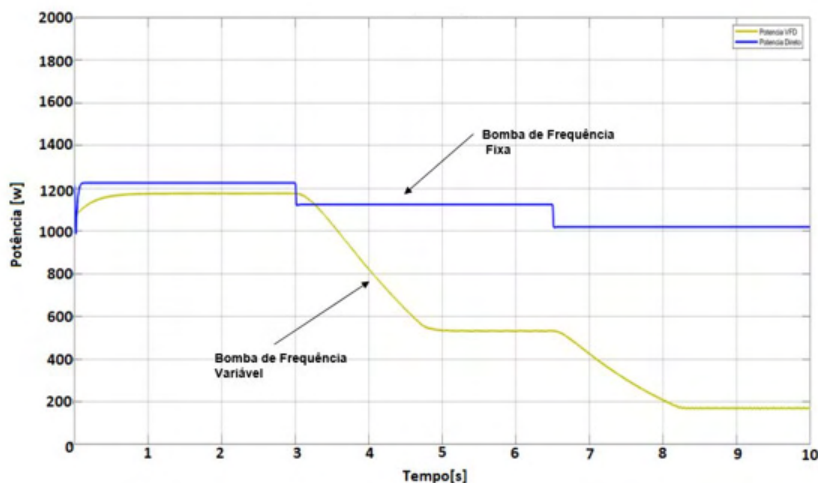


Fig. 10. Gráfico da simulação da potência em função do tempo.

A linha amarela apresenta que a potência inicial é de 1160W, período em que a rotação é ajustada para fixar a vazão em $4\text{m}^3/\text{h}$. Durante o processo de redução da rotação da bomba, ocorre uma queda gradativa da potência nos intervalos de 3s a 4.75s, atingindo a potência em 530W. Durante os intervalos de 6.5s a 8.25s ocorre outra queda de potência para 180W que é mantida até o fim da simulação

6 | DISCUSSÃO E RESULTADOS

Pode-se observar na Fig. 9, que ocorreu uma diferença entre a vazão final simulada da bomba de frequência variável ($1,8\text{m}^3/\text{h}$) e a vazão obtida (Tabela 2) na bancada de testes ($2\text{m}^3/\text{h}$), na rotação de 1770 RPM. Isto ocorreu em razão da inserção de uma curva

característica aproximada da bomba real na bancada de teste.

Enquanto a rotação e a vazão se reduzem de forma proporcional, a potência reduz-se de forma cúbica Eq. (5), obtendo ganhos consideráveis no consumo de energia. Este efeito ocorre pelo fato da queda rotacional limitar a curva característica da bomba, mantendo fixa a curva do sistema, onde ambas interseccionam o novo ponto de operação da bomba em uma região de melhor rendimento. As Tabelas III e IV apresentam dados comparativos da potência consumida pela bomba centrífuga, na parte simulada e experimental do trabalho.

Vazão Q[m ³ /h]	Potência [W]	
	Simulação	Experimental
4	1230	1201
3	1130	1125
2	1020	1080

Tabela III – Potência consumida – bomba frequência Fixa

Vazão Q[m ³ /h]	Potência [W]	
	Simulação	Experimental
4	1160	1216
3	530	582
2	180	228

Tabela IV – Potência consumida – bomba frequência Variável

71 CONCLUSÃO

Um modelamento matemático desenvolvido no programa MATLAB/ Simulink e ensaios experimentais realizados numa bancada de testes, para otimização de um sistema de distribuição de água é proposto neste artigo. O modelo desenvolvido foi validado com informações de uma configuração experimental real. Os testes experimentais realizados demonstraram que o sistema se aproxima em valores, dos vários valores obtidos nos modos de simulação, que correspondem aos processos que ocorrem em sistemas reais de abastecimento de água.

A principal vantagem do modelo está na possibilidade de poder atuar no processo, durante o controle de vazão por estrangulamento e velocidade da bomba, definindo o ponto de trabalho ideal da bomba. A novidade do modelo baseia-se na possibilidade de combinar dados obtidos a partir da bancada de testes. Além disso, o modelo pode ser uma parte do sistema de controle de um grupo de bombas centrífugas. O modelo desenvolvido pode ser usado na fase de projeto para estimativa de potência e otimização de sistemas de distribuição de água.

REFERÊNCIAS

- ENEMUOH, F.O.; OKAFOR, E. E.; ONUGBU, J.C. and AGU, V.N. **“Modelling, Simulation and Performance Analysis of a Variable Frequency Drive in Speed Control of Induction Motor”**. International Journal of Engineering Inventions, Department of Electrical Engineering Nnamdi Azikiwe University, Awka, Nigeria, p.36-41, 2013.
- GEVORKOV, L.; RASSOLKIN, A. G.; KALLASTE, A. and VAIMANN, T. **“Simulink Based Model for Flow Control of a Centrifugal Pumping System”**. 25th International Workshop on Electric Drives: Optimization in Control of Electric Drives (IWED). University of Technology. Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics, Russia. pp.1-4, 2018.
- GEVORKOV, L.; RASSOLKIN, A. G.; KALLASTE, A.; VAIMANN, T. **“Simulation Study of Mixed Pressure and Flow Control Systems for Optimal Operation of Centrifugal Pumping Plants”**. Electrical, Control and Communication Engineering, Vol. 14, no 1, pp. 89-94, 2018.
- GEORGESCU, S.; BUCUR, D.M., DUNCA, G.; GEORGESCU, A.; Nicolae, A. A. and CIUC, P. **“Hydraulic balancing of the cooling water system of a pumped storage power plant”**, 2017 *International Conference on Energy and Environment (CIEM)*, pp. 246-250, 2017.
- HUANG, T. and ZHAI, T. **“The Design and Implementation of Automatic Electronic Water Pump Test System”**, 2019 *IEEE 9th International Conference on Electronics Information and Emergency Communication (ICEIEC)*, Beijing, China, pp. 1-4, 2019.
- LI, X.; ZHAO, X. and Yang, L. **“Combined Power- Water Flow Analysis of Regional Integrated Electricity and Water Networks,”** 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), Beijing, pp. 1-6, 2018.
- MARCHI, A.; SIMPSON, A. R.; ERTUGRUL, N. **“Assessing Variable Speed Pump Efficiency in Water Distribution Systems”**. Drinking Water Engineering and Science. School of Civil, Environmental and Mining Engineering and School of Electrical and Electronic Engineering. p.15-21, 2012.
- MENKE, R.; ABRAHAM, E.; PARPAS, P. and STOIANOV, I. **“Extending the envelope of demand response provision through variable speed pumps,”** *Procedia Eng.*, vol. 186, pp. 584–591, 2017.
- OLSZEWSKI, P. **“Genetic optimization and experimental verification of complex parallel pumping station with centrifugal pumps,”** *Appl. Energy*, vol. 178, pp. 527–539, Sep. 2016.
- VAN, R. P. and PRETORIUS, J.H.C. **“Increasing Water Pump Station Throughput by Introducing VFD-Based IE4 Class Synchronous Reluctance Motors with Improved Pump Control,”** 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Palermo, pp. 1-6, 2018.
- YU, H.; ZHAO, T. and ZHANG, J. **“Development of a distributed artificial fish swarm algorithm to optimize pumps working in parallel mode,”** *Sci. Technol. Built Environ.*, vol. 24, no. 3, pp. 248–258, Mar. 2018.
- ZHANG, X.; WANG, D.; JIANG, F.; LIN, T. and XIANG, H. **“An Optimal Regulation Method for Parallel Water-Intake Pump Group of Drinking Water Treatment Process”**, *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 82797 - 82803, 2020.

ZHANG, Z.; Zeng, Y. and KUSIAK, A. “**Minimizing pump energy in a wastewater processing plant,**” Energy, vol. 47, no. 1, pp. 505–514, Nov. 2012.

ZHANG, Z.; KUSIAK, A.; ZENG, Y. and WEI, X. “**Modeling and optimization of a wastewater pumping system with data-mining methods,**” Appl. Energy, vol. 164, pp. 303–311, Feb. 2016.

ÍNDICE REMISSIVO

A

ADMI 106, 108

Alimentadores 90, 91, 92, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 104, 105

Angulação 140, 141, 142, 143, 144, 147, 150, 151

Aprendizagem baseada em projetos 115, 118

Atenuação de riscos 114, 115

B

Balanco energético 20, 90, 91, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104

Barramento magnético 184, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192

Bomba centrífuga 33, 35, 41, 46

Borracha sintética 199

C

Circuitos digitais 21

Cliente 106, 108, 110, 112, 113

Controle adaptativo 50

Conversor CA/CC 153, 158

Conversor MAB 184, 187, 188

Correntes de Foucault 153, 155, 162

D

Densidade de ligações cruzadas 198, 199, 200, 201, 202, 204, 205, 206, 209

Descargas atmosféricas 119, 127, 128, 129, 130, 133, 134, 137, 138, 139

Direcionamento 140, 141, 143, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151

E

Economic feasibility 15

Eficiência energética 33, 35, 40, 41, 140, 151

Electronic spreadsheet 15

Energia solar 20, 113, 140, 141, 143, 145, 150, 151, 152

Engenharia elétrica 49, 61, 62, 114, 115, 138, 152, 182, 184, 210

Engine knock 1, 2, 3, 13, 14

F

Filtros probabilísticos 61, 62, 63, 72

Flory-Rehner 199, 201, 202, 204, 205

Freio eletromagnético 153, 154, 156, 158, 159, 161, 165, 166, 181, 182

Fuzzy cognitive maps 50, 51, 58, 59, 60

I

Inversor de frequência 33, 34, 35, 39, 40, 43

L

Localização 61, 62, 63, 64, 68, 69, 70, 71, 72, 132, 143, 144

Logistic regression 1, 2, 3, 4, 14

M

Machine learning 1, 4

Medição de alimentadores 90

Misturador industrial 50

Model based design 1

Mooney-Rivlin 199, 202, 204, 205, 207

N

Núcleos magnéticos 184

O

Operações modulares 21

Ouvidoria 106, 108, 109, 110, 111, 112, 113

P

Perda de energia 90

Photovoltaic energy 15, 16, 20

Prazos serviços comerciais 106

Processamento digital de sinais 21

Q

Qualidade de energia 90, 91, 92, 167

R

Red de distribución eléctrica 74

Responsabilidade social 115, 116, 118

Robótica 61, 62, 63, 64, 67, 68, 72, 73, 162

S

Satisfação 106, 108, 109, 111, 112, 113

SBR 198, 199, 200, 201, 206, 207, 208

Sistema de distribuição de água 33, 34, 35, 40, 41, 42, 43, 46

Sistemas de proteções contra descargas atmosféricas 128

Smart grid 74, 75, 86, 88

T

Transformador de estado sólido 184

V

Vehículo eléctrico 74, 75, 76, 77, 79, 81, 82, 83, 84, 85, 87, 88


Videoaulas 61, 62, 72

 www.atenaeditora.com.br
 contato@atenaeditora.com.br
 @atenaeditora
 www.facebook.com/atenaeditora.com.br

Collection:

APPLIED ELECTRICAL ENGINEERING


Ano 2022

 www.atenaeditora.com.br
 contato@atenaeditora.com.br
 @atenaeditora
 www.facebook.com/atenaeditora.com.br

Collection:

APPLIED ELECTRICAL ENGINEERING


Ano 2022