



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

JOSÉ NILTON DE ABREU COSTA

**INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE ROTAÇÃO NA OTIMIZAÇÃO DO CUSTO
ENERGÉTICO DE SISTEMAS DE BOMBEAMENTO**

FORTALEZA

2019

JOSÉ NILTON DE ABREU COSTA

INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE ROTAÇÃO NA OTIMIZAÇÃO DO CUSTO
ENERGÉTICO DE SISTEMAS DE BOMBEAMENTO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Ph.D. Marco Aurélio Holanda de Castro.

Coorientador: Prof. Dr. Luís Henrique Magalhães Costa.

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- C873i Costa, José Nilton de Abreu.
Influência da variação de rotação na otimização do custo energético de sistemas de bombeamento / José Nilton de Abreu Costa. – 2019.
119 f. : il. color.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Fortaleza, 2019.
Orientação: Prof. Dr. Marco Aurélio Holanda de Castro.
Coorientação: Prof. Dr. Luís Henrique Magalhães Costa.
1. Sistemas de Abastecimento de Água. 2. Bombas de Velocidade Variável. 3. Inversor de Frequência.
4. Otimização Energética. I. Título.

CDD 627

JOSÉ NILTON DE ABREU COSTA

INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE ROTAÇÃO NA OTIMIZAÇÃO DO CUSTO
ENERGÉTICO DE SISTEMAS DE BOMBEAMENTO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Aprovada em: 05/02/2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Ph.D. Marco Aurélio Holanda de Castro (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Luís Henrique Magalhães Costa (Coorientador)
Universidade Estadual Vale do Acaraú (UVA)

Prof. Dr. John Kenedy de Araújo
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Lindemberg Lima Fernandes
Universidade Federal do Pará (UFPA)

Aos meus pais: Maria Hancila de Abreu Costa
e José Nilton da Costa (in memoriam).

AGRADECIMENTOS

Muito além de uma simples formalidade, considero uma satisfação poder registrar a minha gratidão a todos que, de alguma forma, ajudaram-me e contribuíram na realização desta conquista. Contempla-me, portanto, fazer os seguintes agradecimentos.

A Deus, o grande engenheiro criador do universo, pela minha vida e por Sua tão constante presença, abençoando-me e guiando-me em minhas decisões.

Aos meus pais, Maria Hancila e José Nilton (in memoriam), por valores como amor, respeito, companhia, confiança, dedicação, estímulo e pelo esforço em proporcionar-me uma educação de qualidade.

Aos meus filhos, Maria Eduarda e Joabe Gabriel, símbolos de amor e ternura onde posso encontrar a motivação necessária para sempre continuar a busca por meus objetivos.

À minha irmã, Áurea Júlia, pelas palavras de incentivo em diversos momentos, que são tão importantes quando vindas de alguém que também vivencia as epopéias de um estudante de doutoramento.

À Morgana Carla, pelo amor, carinho, incentivo, paciência, compreensão, auxílio e companheirismo ininterruptos.

Ao Professor Ph.D. Marco Aurélio Holanda de Castro, pela orientação segura, pelas oportunidades dadas e pelo incentivo que me impulsionou no decorrer desta jornada.

Ao Professor Dr. Luís Henrique Magalhães Costa, pela valiosa coorientação, pela amizade e pela parceria acadêmica e profissional.

Aos professores que compuseram a banca examinadora: John Kenedy de Araújo, Iran Eduardo Lima Neto e Lindemberg Lima Fernandes, pela avaliação idônea deste trabalho e pelas grandiosas contribuições a ele sugeridas.

Aos meus tios José Filizola (in memoriam) e Maria Aliete, pelo apoio despendido à minha educação desde a fase colegial. E, ainda, a todos os meus primos, de modo especial ao José Filizola Mascarenhas de Abreu, pelo exemplo de caráter e triunfos conquistados por meio de muito estudo e empenho.

Aos inúmeros amigos de pós-graduação, em especial àqueles com quem convivi por mais tempo, dividindo momentos de alegria e tensão, durante os três longos e bons anos do meu curso de doutorado: Carla, Erlandson, Taís, Liana, Jefferson, Thomas, Bruno Aragão, Daniel Cid, Ronald, Misael, João Marcelo, Carlos Hugo, Vicente, Bruno Paiva, Bernardo Coloma, Hosana, Edilmeire e, ainda, a todos os demais amigos, que ao serem elencados aqui tornariam infinda esta lista.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, por toda ajuda prestada e pelos diversos e valorosos ensinamentos que, em algum momento, agregaram conhecimentos oportunos ao desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Fernando José, pela amizade, conversas, ajuda em alguns momentos e atenção dada em diversas circunstâncias.

Aos funcionários do DEHA (Shirley, Neuza, Marlene, Erivelton, Xavier e todos os demais), pela atenção e pela convivência nos últimos anos.

A todos os meus familiares do Distrito Manoel Guedes (Rato), pelo carinho e pela simplicidade que lhes são peculiares.

Aos colegas professores, funcionários e alunos da Universidade Estadual Vale do Acaraú, de cujo corpo docente eu tenho a honra de fazer parte. Entre estes, um agradecimento especial ao amigo professor Edvalter Sena, pela grande figura humana que representa.

Aos grandes amigos de longa data, Danilo Nogueira, Adriano Gomes de Matos, Fernando Peroba, Jerônimo Castelo, Maria das Dores, Antônio Ortiz e Fernando de Souza, por provarem que a amizade verdadeira é imune à ação da distância e do tempo.

E, por fim, agradeço a todos que, mesmo não citados aqui, colaboraram em algum momento e de alguma forma para a realização deste sonho.

“Nunca tive outros livros além do Céu e da Terra, cujas páginas estão sempre abertas.”

(Paolo Frisi)

RESUMO

A operação de sistemas de abastecimento de água necessita quase sempre do funcionamento de bombas hidráulicas, que permitem a condução da água até o consumidor final. Conduzir fluidos com máximo rendimento é um requisito fundamental em indústrias, no saneamento, na irrigação, e em outras diversas áreas que utilizam bombas hidráulicas, já que diminuem os gastos com energia elétrica. Os custos energéticos vinculados ao funcionamento das bombas podem ser reduzidos através de uma alternativa que consiste no uso de bombas de rotação variável (BRV) em vez de bombas de rotação fixa. As BRV's são bombas acopladas a um motor controlado por um inversor de frequência, cuja função é alterar a fonte de alimentação para variar a velocidade de rotação da bomba de modo a fazê-la operar com o maior rendimento possível. Além disso, outros fatores devem ser considerados na operação de um sistema de abastecimento como as combinações possíveis de regras operacionais, a variação da demanda hídrica, a manutenção dos níveis dos reservatórios e das pressões nos pontos de consumo dentro de limites preestabelecidos e, ainda, a utilização eficiente da tarifa energética. Diante deste cenário, motivou-se a realização deste trabalho, que tem por objetivo fornecer condições de operacionalidade ao sistema de abastecimento de forma racional, com ênfase na otimização do custo energético, através da criação de um modelo computacional que atua de maneira acoplada ao simulador hidráulico EPANET. A ferramenta desenvolvida fundamenta-se no processo de técnica meta-heurística conhecido como PSO - Particle Swarm Optimization (Otimização por Enxame de Partículas), tendo como variável de decisão a velocidade de rotação das bombas. Este método é responsável pela busca de estratégias operacionais com custo energético reduzido, enquanto que a avaliação do desempenho hidráulico de tais estratégias é realizada no EPANET. Outra proposição inovadora da presente tese consiste no desenvolvimento de uma nova proposta de equação, que permite realizar o cálculo do rendimento final de uma BRV quando a sua velocidade é alterada. A metodologia proposta foi avaliada por meio de três estudos de caso. Através dos resultados obtidos, evidenciou-se a eficácia do PSO, tanto pelo encontro de melhores estratégias operacionais como pela redução do tempo computacional necessário para tal realização. Finalmente, considera-se que o desenvolvimento dessa metodologia possa contribuir para o uso de modelos de otimização na operação de sistemas de abastecimento de água em tempo real.

Palavras-chave: Sistemas de abastecimento de água. Bombas de velocidade variável. Inversor de frequência. Otimização energética.

ABSTRACT

The operation of water supply systems almost always requires the operation of hydraulic pumps, which allow the conveyance of water to the final consumer. Conducting fluids with maximum efficiency is a fundamental requirement in industries, sanitation, irrigation, and other diverse areas that use hydraulic pumps, as they reduce energy costs. The energy costs associated with the operation of the pumps can be reduced by an alternative that consists of the use of variable rotation pumps (VRP) instead of fixed rotation pumps. VRP's are pumps coupled to a motor controlled by a frequency inverter whose function is to change the power supply to vary the speed of rotation of the pump in order to make it operate at the highest possible efficiency. In addition, other factors should be considered in the operation of a supply system such as possible combinations of operating rules, variation in water demand, maintenance of reservoir levels and pressure at points of consumption within predetermined limits and, efficient use of energy tariffs. Given this scenario, this work was motivated, which aims to provide operational conditions to the supply system in a rational way, with emphasis on energy cost optimization, through the creation of a computational model that acts in a coupled way to the simulator hydraulic EPANET. The tool developed is based on the process of metaheuristic technique known as PSO (Particle Swarm Optimization), having as a decision variable the speed of rotation of the pumps. This method is responsible for the search for operational strategies with reduced energy costs, while the evaluation of the hydraulic performance of such strategies is performed in EPANET. Another innovative proposition of the present thesis is the development of a new equation proposal, which allows to calculate the final efficiency of a BRV when its speed is changed. The proposed methodology was evaluated through three case studies. Through the obtained results, the effectiveness of the PSO was evidenced, both by the encounter of better operational strategies and by the reduction of the computational time necessary for such accomplishment. Finally, it is considered that the development of this methodology can contribute to the use of optimization models in the operation of water supply systems in real time.

Keywords: Systems of water supply. Variable speed pumps. Frequency inverter. Energy optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Esquema de um sistema de abastecimento de água	29
Figura 2	– Estação elevatória de água tratada com poço de sucção	32
Figura 3	– Vistas de corte de uma bomba centrífuga e seus componentes	34
Figura 4	– Demanda de energia no conjunto motor-bomba	35
Figura 5	– Estação elevatória dotada de inversor de frequência	40
Figura 6	– Curva de performance e curva do sistema	43
Figura 7	– Pontos de operação a duas velocidades de rotação N_1 e N_2	44
Figura 8	– Curva de rendimento de uma bomba	44
Figura 9	– Movimento de uma partícula dentro do espaço de busca	53
Figura 10	– Fluxograma do PSO	54
Figura 11	– Pseudocódigo para o PSO	55
Figura 12	– Interface do software UFC 12	56
Figura 13	– Janela de inserção dos parâmetros do algoritmo otimizador	57
Figura 14	– Software UFC 12 em execução	58
Figura 15	– Estrutura do modelo desenvolvido	59
Figura 16	– Curvas da bomba para duas velocidades de rotação distintas N_1 e N_2 , curva do sistema e curva de afinidade	60
Figura 17	– Pontos de operação de uma das bombas utilizadas nos testes para as quatro velocidades consideradas	64
Figura 18	– Topologia da rede estudo de caso 1	67
Figura 19	– Topologia da rede estudo de caso 2	69
Figura 20	– Topologia da rede estudo de caso 3	72
Figura 21	– Tela de apresentação inicial do UFC 12	113
Figura 22	– Janela de seleção das restrições e do algoritmo otimizador	113

Figura 23 – Janela de seleção do algoritmo Branch and Bound	114
Figura 24 – Janela de execução do algoritmo Branch and Bound	115
Figura 25 – Resultado do processo de otimização pelo algoritmo Branch and Bound	115
Figura 26 – Criação do arquivo INP referente à solução ótima	116
Figura 27 – Janela de inserção dos parâmetros dos algoritmos evolutivos (AG – PSO)	117
Figura 28 – Janela de execução dos algoritmos evolutivos (AG – PSO)	117
Figura 29 – Janela de seleção do processo aleatório de busca	118
Figura 30 – Janela de execução do algoritmo de busca por todas as soluções viáveis	118
Figura 31 – Resultado do processo de busca por todas as soluções viáveis após uma interrupção	119
Figura 32 – Janela de inserção dos parâmetros do inversor de frequência	119
Figura 33 – Janela de execução do inversor de frequência	120
Figura 34 – Criação do arquivo TXT para as soluções viáveis encontradas	121
Figura 35 – Arquivo TXT gerado pelo UFC 12	121

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Consumo de energia elétrica no Brasil	25
Gráfico 2 – Custo do ciclo de vida conforme o tipo de bomba	41
Gráfico 3 – Valores observados de p nos procedimentos de análise	63
Gráfico 4 – Variação da tarifa energética para os estudos de caso 1 e 2	68
Gráfico 5 – Variação da tarifa energética para o estudo de caso 3	73
Gráfico 6 – Erros absolutos nos procedimentos do Cenário 1	77
Gráfico 7 – Erros absolutos nos procedimentos do Cenário 2	77
Gráfico 8 – Erros absolutos nos procedimentos do Cenário 3	77
Gráfico 9 – Primeira simulação para o estudo de caso 1	79
Gráfico 10 – Solução ótima e tarifa energética para o estudo de caso 1	80
Gráfico 11 – Variação dos níveis dos reservatórios do estudo de caso 1	81
Gráfico 12 – Primeira simulação para o estudo de caso 2	84
Gráfico 13 – Solução ótima e tarifa energética para o estudo de caso 2	85
Gráfico 14 – Variação dos níveis dos reservatórios do estudo de caso 2	86
Gráfico 15 – Variação das pressões nos nós críticos da Rede 2	87
Gráfico 16 – Primeira simulação para o estudo de caso 3	89
Gráfico 17 – Solução ótima e tarifa energética para o estudo de caso 3	90
Gráfico 18 – Variação dos níveis dos reservatórios do estudo de caso 3	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Oportunidades de melhoria da eficiência no bombeamento de SAAs	39
Tabela 2	– Dados dos nós da rede do estudo de caso 1	67
Tabela 3	– Dados das tubulações da rede do estudo de caso 1	68
Tabela 4	– Dados dos nós da rede do estudo de caso 2	70
Tabela 5	– Dados das tubulações da rede do estudo de caso 2	71
Tabela 6	– Dados dos nós da rede do estudo de caso 3	72
Tabela 7	– Dados das tubulações da rede do estudo de caso 3	72
Tabela 8	– Resumo dos testes na bomba B1 – velocidade nominal: 3500 rpm	75
Tabela 9	– Somatório e média dos erros absolutos das fórmulas analisadas	75
Tabela 10	– Erros absolutos médios das fórmulas por cenário	76
Tabela 11	– Soluções ótimas conforme a quantidade máxima de acionamentos	82
Tabela 12	– Simulações da Rede 1 conforme o número máximo de acionamentos	82
Tabela 13	– Custo ótimo da Rede 1 conforme a técnica de otimização	83
Tabela 14	– Simulações da Rede 2 conforme o número máximo de acionamentos	87
Tabela 15	– Custo ótimo da Rede 2 conforme a técnica de otimização	88
Tabela 16	– Simulações da Rede 3 conforme o número máximo de acionamentos	92
Tabela 17	– Custo ótimo da Rede 3 conforme a técnica de otimização	92
Tabela 18	– Dados referentes às curvas características das bombas utilizadas	104
Tabela 19	– Rendimentos e erros das fórmulas analisadas nos testes 1 a 50	105
Tabela 20	– Rendimentos e erros das fórmulas analisadas nos testes 51 a 100	106
Tabela 21	– Rendimentos e erros das fórmulas analisadas nos testes 101 a 150	107
Tabela 22	– Vazões nos pontos de funcionamento e valores de p nos testes 1 a 100	108
Tabela 23	– Vazões nos pontos de funcionamento e valores de p nos testes 101 a 150 ...	109
Tabela 24	– Variação dos níveis dos reservatórios da Rede 1	110

Tabela 25 – Variação dos níveis dos reservatórios da Rede 2	111
Tabela 26 – Variação das pressões nos nós críticos da Rede 2	111
Tabela 27 – Variação dos níveis dos reservatórios da Rede 3	112

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AG	Algoritmo Genético
BEP	Best Efficiency Point
BRF	Bomba de Rotação Fixa
BRV	Bomba de Rotação Variável
CA	Curva de Afinidade
CB	Curva da Bomba
CE	Custo Energético
CR	Curva de Rendimento
CS	Curva do Sistema
CV	Cavalo Vapor
EE	Estação Elevatória
ETA	Estação de Tratamento de Água
FO	Função Objetivo
LA	Leis de Afinidade
PF	Ponto de Funcionamento
PH	Ponto Homólogo
PSO	Particle Swarm Optimization
RNF	Reservatório de Nível Fixo
RNV	Reservatório de Nível Variável
SAA	Sistema de Abastecimento de Água
SO	Solução Ótima
SV	Solução Viável
UFC	Universidade Federal do Ceará

LISTA DE SÍMBOLOS

C_H	Coeficiente adimensional de altura manométrica
C_P	Coeficiente adimensional de pressão
C_Q	Coeficiente adimensional de vazão
C_{nt}	Custo tarifário
c_1	Coeficiente social
c_2	Coeficiente cognitivo
D	Diâmetro da tubulação
E_{nt}	Energia consumida pela bomba n na hora t
g	Aceleração da gravidade
g_{best}	Melhor posição de uma partícula até o momento
H	Altura manométrica
H_g	Altura geométrica
j	Número do reservatório
J	Número de reservatórios
\ln	Logaritmo natural
n	Número da bomba
N	Velocidade de rotação da bomba
N_B	Número de bombas
P	Potência
p_{best}	Melhor posição de uma partícula na iteração i
P_{oth}	Potência hidráulica
P_{tm}	Potência motriz
Q	Vazão
r	Velocidade relativa de rotação
r_1 e r_2	Números randômicos
R^2	Coeficiente de determinação
t	Hora do dia
v_i	Velocidade inicial da partícula
v_{i+1}	Velocidade atual da partícula
w	Parâmetro de inércia
x	Variável de decisão

x_i	Posição inicial da partícula
x_{i+1}	Posição atual da partícula
α	Função fitness
γ	Peso específico
η	Rendimento
ρ	Massa específica
Σ	Somatório
\$	Unidade monetária

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Considerações iniciais	21
1.2	Justificativa	24
1.3	Objetivos	26
1.4	Organização do trabalho	27
2	REVISÃO DE LITERATURA	29
2.1	Sistemas de abastecimento de água	29
2.1.1	<i>Aparato de bombeamento hidráulico</i>	31
2.1.2	<i>Estratégias de operação de SAAs</i>	36
2.2	Bombas de rotação variável	39
2.3	Otimização do custo energético	46
2.4	Particle Swarm Optimization	49
3	METODOLOGIA	56
3.1	Modelo computacional otimizador	56
3.2	Proposta de fórmula para a estimativa de rendimento	60
3.3	Aplicações do modelo desenvolvido	66
3.3.1	<i>Estudo de caso 1</i>	66
3.3.2	<i>Estudo de caso 2</i>	68
3.3.3	<i>Estudo de caso 3</i>	71
4	RESULTADOS	74
4.1	Acurácia da fórmula proposta	74
4.1.1	<i>Comparação entre os erros das estimativas de rendimento</i>	74
4.1.2	<i>Procedimentos vantajosos da fórmula proposta</i>	76
4.2	Repercussão das aplicações do modelo otimizador	78
4.2.1	<i>Otimização no estudo de caso 1</i>	79
4.2.2	<i>Otimização no estudo de caso 2</i>	84
4.2.3	<i>Otimização no estudo de caso 3</i>	89
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	93
5.1	Síntese do trabalho	93
5.2	Conclusões	94
5.3	Recomendações	96

REFERÊNCIAS	97
APÊNDICE A – DADOS DOS TESTES REALIZADOS NAS BOMBAS ..	104
APÊNDICE B – DADOS REFERENTES AOS RESERVATÓRIOS E	
NÓS CRÍTICOS NOS ESTUDOS DE CASO	110
APÊNDICE C – MANUAL DE OPERAÇÃO DO SOFTWARE UFC 12 ...	113

