



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS
E SANEAMENTO AMBIENTAL**

BATYSTUTA DA SILVA ROCHA

**OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO NO SISTEMA DE BOMBEAMENTO
ATRAVÉS DAS EFICIÊNCIAS ENERGÉTICA E OPERACIONAL NO
RESERVATÓRIO DE DISTRIBUIÇÃO**

PORTO ALEGRE

2019

Batystuta da Silva Rocha

Otimização multiobjetivo no sistema de bombeamento
através das eficiências energética e operacional
no reservatório de distribuição

Dissertação apresentada ao Instituto de Pesquisas
Hidráulicas – IPH / UFRGS, como parte dos requisitos
para obtenção do título de Mestre em Recursos
Hídricos e Saneamento Ambiental. *VERSÃO
REVISADA*

Área de Concentração: Saneamento Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Juan Martin Bravo

Coorientador: Prof. Dr. Antônio Domingues Benetti

**UFRGS – Porto Alegre
Setembro de 2019**

CIP - Catalogação na Publicação

Rocha, Batystuta da Silva

Otimização multiobjetivo no sistema de bombeamento através das eficiências energética e operacional no reservatório de distribuição / Batystuta da Silva Rocha. -- 2019.

196 f.

Orientador: Juan Martin Bravo.

Coorientador: Antônio Domingues Benetti.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2019.

1. Sistema elevatório. 2. Eficiência energética e operacional. 3. Otimização multiobjetivo. I. Bravo, Juan Martin, orient. II. Benetti, Antônio Domingues, coorient. III. Título.

Batystuta da Silva Rocha

Multiobjective optimization in the pumping system
through energy and operational efficiencies
in the distribution reservoir

Master dissertation submitted to the Hydraulic
Research Institute – IPH-UFRGS, in partial fulfillment
of the requirements for the degree of the Master in
Water Resources and Environmental Sanitation.
FINAL VERSION

Concentration Area: Environmental sanitation

Advisor: Prof. Dr. Juan Martin Bravo

Co-advisor: Prof. Dr. Antônio Domingues Benetti

UFRGS – Porto Alegre
September 2019

Batystuta da Silva Rocha

Otimização multiobjetivo no sistema de bombeamento através das eficiências energética e operacional no reservatório de distribuição

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de mestre.

Aprovado em: Porto Alegre, 12 de setembro de 2019.

Prof. Dr. Juan Martin Bravo – UFRGS
Orientador

Prof. Dr. Antônio Domingues Benetti – UFRGS
Coorientador

Prof. Dr. Dieter Wartchow – UFRGS
Examinador

Prof. Dr. Maurício Dai Pra – UFRGS
Examinador

Prof. Dr. Saulo de Tarso Marques Bezerra – UFPE
Examinador

*Este trabalho é dedicado às crianças adultas que,
quando pequenas, sonharam em se tornar cientistas.
Em especial, a você leitor e aos cientistas do Brasil.*

*“Tão grande é o milagre da existência que se pode, quem sabe,
dar-se o momento, no qual nós percebemos e tomamos ciência que
a causa terrena do sofrimento não é viver na ignorância,
que essa é de Deus, é causa celeste, e sim, muito mais,
nós temos negado que na ignorância nós estivéssemos.”*
(trecho da peça "Os Ignorantes", Pedro Cardoso)

RESUMO

ROCHA, B. S. **Otimização multiobjetivo no sistema de bombeamento através das eficiências energética e operacional no reservatório de distribuição**. 2019. 196 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS.

Por mais que exista diversas ações relacionadas a eficiência energética nos sistemas elevatórios de água, os investimentos no ramo, concentram-se principalmente no *upgrade* por novas tecnologias ou em projetos que procuram alternativas de melhorar a eficiência em termos pontuais. Entretanto, uma solução microeconômica pode não vir a solucionar a eficiência macroeconômica. Logo, um dos aspectos investigado na pesquisa foi relacionar a importância da operação do reservatório, como ferramenta para o planejamento e implementação da eficiência energética, assim como na minimização do custo total. Para cumprir esse objetivo foi desenvolvido uma tipologia genérica do sistema composta de dois reservatórios, inferior e superior, um conjunto motor-bomba e uma adutora, responsável pelo transporte de água entre eles. Foram avaliadas 160 possibilidades geométricas desse sistema, formadas a partir da combinação de diferentes alturas geométricas, comprimentos da adutora, volumes de consumo diário e em cima de duas metodologias do dimensionamento da capacidade volumétrica do reservatório. Registrando as informações hidro energética ao longo de 30 anos de operação e em três situações no tempo: início, meio e fim. Para as informações, hidro energética e dos indicadores de desempenho, foi desenvolvido um modelo de simulação (associado ao *Programmer Toolkit EPANET2*) para o cálculo do custo de instalação, consumo e custo energético. Inclusive, acoplado a um algoritmo de otimização multiobjetivo que foi utilizado para obter o diâmetro ótimo, as características da bomba e suas regras de operação. Verificando a relação do volume do reservatório e de suas regras de operação com a eficiência energética e com o custo total, foi definido que uma alternativa operacional (cenário de controle e chave boia) variável ao longo do tempo, apresentou melhores desempenhos hidro energética para o sistema. Outra informação diz respeito a relação da capacidade volumétrica na composição dos custos (operacional, instalação e total), que ela influencia diretamente no custo operacional. Com o aumento da capacidade volumétrica, houve melhoria no desempenho econômico energético, entretanto, resultou em custos maiores na construção do reservatório. Porém, com relação ao custo total, tal influência é atenuada no sentido orçamentário. Outro destaque está na formulação de uma metodologia de dimensionamento do sistema, no que tange ao diâmetro ótimo da adutora, características da bomba (vazão e altura manométrica nominais) e do reservatório. Assim, obtendo resultados hidro energético semelhantes à de um sistema otimizado. Com isso, tal metodologia tem potencial para ser utilizada no auxílio da tomada de decisão e gestão hidro energética desses sistemas.

Palavras-chave: Sistema elevatório, Eficiência energética, Otimização multiobjetivo.

ABSTRACT

ROCHA, B. S. **Multiobjective optimization in the pumping system through energy and operational efficiencies in the distribution reservoir**. 2019. 196 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS.

While there are a number of energy efficiency-related actions in water pumping systems, investments in the business focus primarily on upgrading new technologies or on projects that seek alternatives to improve efficiency on a timely basis. However, a microeconomic solution may not solve macroeconomic efficiency. Therefore, one of the aspects investigated in the research was to relate the importance of reservoir operation as a tool for planning and implementation of energy efficiency, as well as minimizing the total cost. To achieve this objective, a generic system typology was developed, consisting of two lower and upper reservoirs, a motor-pump assembly and a water supply, responsible for the transport of water between them. We evaluated 160 geometric possibilities of this system, formed from the combination of different geometric heights, lengths of the water mains, daily consumption volumes and on top of two methodologies of sizing the volumetric capacity of the reservoir. Recording hydro energy information over 30 years of operation and in three situations in time: beginning, middle and end. For the hydropower information and performance indicators, a simulation model (associated with the EPANET2 Programmer Toolkit) was developed to calculate the installation cost, consumption and energy cost. Even coupled with a multiobjective optimization algorithm that was used to obtain the optimal diameter, pump characteristics and its operating rules. By checking the relationship of reservoir volume and its operating rules with energy efficiency and total cost, it was defined that a variable operating alternative (control scenario and float key) over time presented better hydropower performances for the system. Other information concerns the relationship of volumetric capacity in cost composition (operating, installation and total), which directly influences operating cost. With the increase of volumetric capacity, there was an improvement in the energy economical performance, however, resulted in higher costs in the reservoir construction. However, in relation to the total cost, such influence is attenuated in the budgetary sense. Another highlight is the formulation of a system sizing methodology, regarding the optimal diameter of the water mains, pump characteristics (nominal flow and head) and reservoir. Thus obtaining hydro energy results similar to that of an optimized system. Thus, such methodology has the potential to be used to aid decision making and hydro energy management of these systems.

Keywords: Pumping System, Energy Efficiency, Multiobjective Optimization.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Unidades consumidoras de energia elétrica no SAA	32
Figura 2 – Diagrama simples do balanço de energia	32
Figura 3 – Sistema genérico utilizado no estudo de eficiência energética	41
Figura 4 – Curva de padrão de consumo, obtida junto ao DMAE/PoA	45
Figura 5 – Sistema simulado no EPANET2	46
Figura 6 – Padrão de preço de energia, EPANET2	54
Figura 7 – Cenários de controle programado, EPANET2	55
Figura 8 – Pacote python do programmer's toolkit para o EPANET2	55
Figura 9 – Sistematização das simulações no toolkit do EPANET2	56
Figura 10 – Fluxograma geral da metodologia	58
Figura 11 – Fluxograma geral do AG	59
Figura 12 – Fronteira de Pareto sobre o Espaço de Objetivos 2C-ZDTs	67
Figura 13 – Soluções não-dominadas e dominadas de uma simulação da metodologia	68
Figura 14 – Fronteira de Pareto para quatro unidades de paragem do AG	69
Figura 15 – Resultado do agrupamento utilizando k-means ++ do conjunto de soluções não-dominadas dos processos de otimização previamente executados para os diferentes sistemas	70
Figura 16 – Função densidade das características físicas versus a eficiência do motor-bomba	71
Figura 17 – Correlação não-linear da variável " Len/Hg " sobre o domínio " Hm/Len "	73
Figura 18 – Correlação linear da variável " X^{**} " sobre o domínio " CE "	74
Figura 19 – Correlação não-linear da variável " CE " sobre o domínio " Rey/Hm "	75
Figura 20 – Correlação linear da variável "consumo base" sobre o domínio do coeficiente 'A' para o ajuste da variável " Rey/Hm "	76
Figura 21 – Correlação não-linear da variável "consumo base" sobre o domínio do coeficiente 'B' para o ajuste da variável " Rey/Hm "	76
Figura 22 – Correlação não-linear das variáveis " Rey " e "consumo base" sobre o domínio "velocidade"	77
Figura 23 – Correlação não-linear da variável "consumo base" sobre o domínio do coeficiente 'A' para o ajuste da variável "velocidade"	78
Figura 24 – Correlação não-linear das variáveis " Rey " e "consumo base" sobre o domínio " $Qadutora/consumo_base$ "	79
Figura 25 – Domínio da otimização das variáveis de decisões do AG	83
Figura 26 – Esquema do procedimento NSGA-II	146
Figura 27 – Flutuação do reservatório para a condição final do experimento 1	159
Figura 28 – Funcionamento da Bomba para a condição final do experimento 1	161

Figura 29 – Flutuação do reservatório para a condição de meio tempo de projeto do experimento 1	161
Figura 30 – Funcionamento da Bomba para a condição do meio tempo de projeto do experimento 1	162
Figura 31 – Flutuação do reservatório para a condição inicial do experimento 1	162
Figura 32 – Funcionamento da Bomba para a condição inicial do experimento 1	163
Figura 33 – Flutuação do reservatório para a condição de meio tempo de projeto do experimento 1a	164
Figura 34 – Funcionamento da Bomba para a condição do meio tempo de projeto do experimento 1a	164
Figura 35 – Flutuação do reservatório para a condição inicial do experimento 1a	164
Figura 36 – Funcionamento da Bomba para a condição inicial do experimento 1a	165
Figura 37 – Flutuação do reservatório para a condição final do experimento 1, com a metodologia	167
Figura 38 – Funcionamento da Bomba para a condição final do experimento 1, com a metodologia	167
Figura 39 – Flutuação do reservatório para meio tempo de projeto do experimento 1, com a metodologia	167
Figura 40 – Funcionamento da Bomba para meio tempo de projeto do experimento 1, com a metodologia	168
Figura 41 – Flutuação do reservatório para a condição inicial do experimento 1, com a metodologia	168
Figura 42 – Funcionamento da Bomba para a condição inicial do experimento 1, com a metodologia	168
Figura 43 – Flutuação do reservatório para a condição final do experimento 2	169
Figura 44 – Funcionamento da Bomba para a condição final do experimento 2	171
Figura 45 – Flutuação do reservatório para a condição de meio tempo de horizonte do experimento 2	171
Figura 46 – Funcionamento da Bomba para a condição de meio tempo de projeto do experimento 2	171
Figura 47 – Flutuação do reservatório para a condição inicial do experimento 2	172
Figura 48 – Funcionamento da Bomba para a condição inicial do experimento 2	172
Figura 49 – Flutuação do reservatório para a condição de meio tempo de projeto do experimento 2a	173
Figura 50 – Funcionamento da Bomba para a condição do meio tempo de projeto do experimento 2a	173
Figura 51 – Flutuação do reservatório para a condição inicial do experimento 2a	174
Figura 52 – Funcionamento da Bomba para a condição inicial do experimento 2a	174

Figura 53 – Flutuação do reservatório para a condição final do experimento 2, com a metodologia	176
Figura 54 – Funcionamento da Bomba para a condição final do experimento 2, com a metodologia	176
Figura 55 – Flutuação do reservatório para meio tempo de projeto do experimento 2, com a metodologia	176
Figura 56 – Funcionamento da Bomba para meio tempo de projeto do experimento 2, com a metodologia	177
Figura 57 – Flutuação do reservatório para a condição inicial do experimento 2, com a metodologia	177
Figura 58 – Funcionamento da Bomba para a condição inicial do experimento 2, com a metodologia	177
Figura 59 – Teste do erro da correlação sobre a variável " <i>Hm/Len</i> "	180
Figura 60 – Teste do erro da correlação sobre a variável "CE"	181
Figura 61 – Correlação não-linear da variável "CE" e consumo base de 3,35 l/s sobre o domínio "Rey/Hm"	182
Figura 62 – Teste do erro da correlação sobre a variável "CE", para o ajuste do consumo base 3,35 l/s	182
Figura 63 – Correlação não-linear da variável "CE" e consumo base de 8,36 l/s sobre o domínio "Rey/Hm"	183
Figura 64 – Teste do erro da correlação sobre a variável "CE", para o ajuste do consumo base 8,36 l/s	183
Figura 65 – Correlação não-linear da variável "CE" e consumo base de 16,73 l/s sobre o domínio "Rey/Hm"	184
Figura 66 – Teste do erro da correlação sobre a variável "CE", para o ajuste do consumo base 16,73 l/s	184
Figura 67 – Correlação não-linear da variável "CE" e consumo base de 41,82 l/s sobre o domínio "Rey/Hm"	185
Figura 68 – Teste do erro da correlação sobre a variável "CE", para o ajuste do consumo base 41,82 l/s	185
Figura 69 – Teste do erro da correlação sobre o coeficiente 'A', para o ajuste da variável "Rey/Hm"	186
Figura 70 – Teste do erro da correlação sobre o coeficiente 'B', para o ajuste da variável "Rey/Hm"	187
Figura 71 – Teste do erro da correlação sobre a variável "velocidade", para o ajuste do consumo base 3,35 l/s	188
Figura 72 – Teste do erro da correlação sobre a variável "velocidade", para o ajuste do consumo base 8,36 l/s	189

Figura 73 – Teste do erro da correlação sobre a variável "velocidade", para o ajuste do consumo base 16,73 l/s	190
Figura 74 – Teste do erro da correlação sobre a variável "velocidade", para o ajuste do consumo base 41,82 l/s	191
Figura 75 – Teste do erro da correlação sobre o coeficiente 'A', para o ajuste da variável "velocidade"	192
Figura 76 – Teste do erro da correlação sobre a variável "Qadutora/consumo_base", para o ajuste do consumo base 3,35 l/s	193
Figura 77 – Teste do erro da correlação sobre a variável "Qadutora/consumo_base", para o ajuste do consumo base 8,36 l/s	194
Figura 78 – Teste do erro da correlação sobre a variável "Qadutora/consumo_base", para o ajuste do consumo base 16,73 l/s	195
Figura 79 – Teste do erro da correlação sobre a variável "Qadutora/consumo_base", para o ajuste do consumo base 41,82 l/s	196

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Características temporais do sistema simulado	45
Quadro 2 – Variação do valor dos parâmetros do sistema utilizado na pesquisa	52
Quadro 3 – Limite do espaço de busca das variáveis de decisão no AG	60
Quadro 5 – Valores dos parâmetros do AG utilizados para a otimização	66

LISTA DE CÓDIGOS-FONTE

Código-fonte 1 – Direito autoral	102
Código-fonte 2 – Importação de bibliotecas gerais	103
Código-fonte 3 – Crescimento populacional	103
Código-fonte 4 – Características da População	104
Código-fonte 5 – Base de demanda no tempo	104
Código-fonte 6 – Função inicialização do algoritmo	105
Código-fonte 7 – AGEPANET, função __init__	106
Código-fonte 8 – AGEPANET, função headloss	106
Código-fonte 9 – AGEPANET, função dimensionamento reservatório	108
Código-fonte 10 – AGEPANET, função curvas da bomba	111
Código-fonte 11 – AGEPANET, função rules	113
Código-fonte 12 – AGEPANET, função custo total	117
Código-fonte 13 – AGEPANET, função epanet2 executável	125
Código-fonte 14 – AGEPANET_GA, create individual and population	143
Código-fonte 15 – AGEPANET_GA, binary	143
Código-fonte 16 – AGEPANET_GA, pareto crowding distance	146
Código-fonte 17 – AGEPANET_GA, pareto frontier	146
Código-fonte 18 – AGEPANET_GA, fitness	147
Código-fonte 19 – AGEPANET_GA, selection	150
Código-fonte 20 – AGEPANET_GA, crossover and mutation	153
Código-fonte 21 – AGEPANET_GA, inicialização	154

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tarifas de energia elétrica grupo A4 - sem impostos	42
Tabela 2 – Características físicas do sistema simulado	53
Tabela 3 – Nome das variáveis retornada da simulação e otimização	63
Tabela 4 – Funções analíticas para testes do modulo otimização	65
Tabela 5 – Características estatísticas dos <i>clusters</i>	71
Tabela 6 – Distribuição do domínio e frequência de cada parâmetro, nos <i>clusters</i>	72
Tabela 7 – Coeficientes para a equação de "Rey/Hm"	75
Tabela 8 – Coeficientes para a equação de "velocidade"	77
Tabela 9 – Coeficientes para a equação de "Q/consumo_base"	78
Tabela 10 – Características físicas e energéticas dos sistemas da literatura e da metodologia	81
Tabela 11 – Dados estatísticos da otimização das variáveis de decisão	82
Tabela 12 – Resumo das características físicas e temporais do experimento 1	160
Tabela 13 – Resultado energético e econômico do experimento 1	163
Tabela 14 – Resultados energéticos e econômicos do experimento 1a	165
Tabela 15 – Resumo das características físicas e temporais do experimento 1, com a metodologia	166
Tabela 16 – Resultados energéticos e econômicos do experimento 1 para a metodologia .	169
Tabela 17 – Resumo das características físicas e temporais do experimento 2	170
Tabela 18 – Resultados energéticos e econômicos do experimento 2	172
Tabela 19 – Resultados energéticos e econômicos do experimento 2a	174
Tabela 20 – Resumo das características físicas e temporais do experimento 2, com a metodologia	175
Tabela 21 – Resultados energéticos e econômicos do experimento 2 para a metodologia .	178

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABES	<i>Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental</i>
AGs	<i>Algoritmos Genéticos</i>
ANEEL	<i>Anuário Estatístico de Energia Elétrica</i>
ASE	<i>Alliance to Save Energy</i>
CAGEPA	<i>Companhia de Água e Esgoto da Paraíba</i>
CEEE	<i>Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica</i>
DMAE	<i>Departamento Municipal de Água e Esgotos</i>
EPE	<i>Empresa de Pesquisa Energética</i>
EUA	<i>Estados Unidos da América</i>
IBGE	<i>Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística</i>
IWA	<i>International Water Association</i>
MCID	<i>Ministério das Cidades</i>
NSGA-II	<i>Non Dominated Sorting Genetic Algorithm 2</i>
PNE	<i>Plano Nacional de Energia</i>
PNEf	<i>Plano Nacional de Eficiência Energética</i>
PROCEL	<i>Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica</i>
SAA	<i>Sistema de Abastecimento de Água</i>
SEVEN	<i>Service de L'environnement et de L'énergie de la Suisse</i>
SNIS	<i>Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento</i>
SNSA	<i>Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental</i>
UNESCO	<i>United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

R\$ — Moeda corrente oficial da República Federativa do Brasil, em Real

$V_{\text{rnnv}_{\text{utilizado}}}$ — Volume utilizado do reservatório, em m^3

n_p — Número de período de análise, em número inteiro

$V_{\text{rnnv}_{\text{capacidade}}}$ — Capacidade volumétrica do reservatório, em m^3

$I_{\text{reservatorio}}$ — Índice de eficiência do reservatório, em percentagem

FO — Função objeto

C_{consumo} — Custo de consumo de energia, em R\$

γ — Peso específico da água, em N/m^3

Q — Vazão bombeada, em m^3/s

Hm — Altura manométrica, em metros

n — Rendimento do conjunto motor-bomba, em percentagem

Δt — Período de bombeamento, em horas

TC — Tarifa de consumo de energia, em $R\$/kWh$

N — Unidade de medida de força, em Newton

$^{\circ}\text{C}$ — Temperatura, em grau Celsius

Fa — Fator de atualização, em número real

e — Taxa de aumento anual do custo de energia, em percentagem

j — Taxa de juro anual, em percentagem

N — Período de amortização, em anos

C_{adutora} — Custo de implantação da tubulação, em R\$

D — Diâmetro da adutora, em unidade de comprimento

L — Comprimento da adutora, em metros

$C_{\text{reservatorio}}$ — Custo de implantação do reservatório, em R\$

Pot — Potência, em kW

hab — Habitante, em número inteiro.

Q_{tm} — Consumo teórico médio de água, em m^3/h

Pop — População, em habitantes

q — Consumo médio diário *per capita*, em $L/hab/dia$

K_1 — Coeficiente do dia de maior consumo, em número real

K_2 — Coeficiente da hora de maior consumo, em número real

Q_{td} — Consumo teórico médio diário de água, em m^3/h

$H_{m_{nominal}}$ — Altura manométrica nominal da curva da bomba, em metros

h_g — Altura geométrica, em metros

g — Aceleração da gravidade, em m/s^2

f — Fator de perda de carga, adimensional

ε — Rugosidade absoluta do tubo, em unidade de comprimento

Re — Número de Reynolds, adimensional

ν — Viscosidade cinemática, em m^2/s

atm — Unidade de pressão, em pressão atmosférica.

$Q_{nominal}$ — Vazão nominal da curva da bomba, em unidade de volume por tempo

Δh — Perda de carga, em metros

freq — Frequência de rotação, em percentagem

N — Nó de ligação entre tubulação ou ponto de consumo, em caractere

tw — Tubulação entre dois nó, em caractere

CE — Consumo específico de energia elétrica, em kwh/m^3

CEN — Consumo específico de energia elétrica normalizado, em $kwh/m^3/100m$

Consumo_{energia} — Consumo energético ao longo de um dia, em kwh

Volume_{bombeado/dia} — Volume bombeado ao longo de um dia, em m^3/dia

E_{min} — Energia mínima, em kwh

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	Motivações para a Realização deste Trabalho	20
1.2	Finalidade e Enquadramento do Trabalho	22
2	DIRETRIZES DA PESQUISA	24
2.1	Preceitos e Campo de Aplicação	24
2.2	Objetivo Principal	24
2.3	Objetivos Secundários	24
2.4	Delimitações	25
3	CONTEXTUALIZAÇÃO E ASPECTOS TEÓRICOS EM SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA	26
3.1	Considerações Gerais	26
3.2	Evolução do Sistema de Transporte de Água	27
3.3	Concepção do SAA com Estação Elevatória	29
3.4	Noção de Eficiência Energética	31
3.5	Modelagem Computacional Envolvendo Eficiência Energética no Sistema Elevatório	34
3.6	Ações relacionadas à Eficiência Energética no Sistema Elevatório	38
4	METODOLOGIA	40
4.1	Considerações Iniciais	40
4.2	Modelo Simulado e a Formulação do Experimento	41
4.2.1	<i>Descrição do Modelo Utilizado</i>	44
4.2.2	<i>Procedimentos para o Dimensionamento do Sistema</i>	46
4.2.3	<i>Descrição da Simulação Computacional</i>	54
4.3	Observação e Análise dos Resultados	60
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	64
5.1	Precisão do Modulo Otimização	64
5.2	Análise dos Dados Otimizados	69
5.2.1	<i>Descrição Sistemática dos Dados</i>	69
5.2.2	<i>Análise Bivariada</i>	73
5.2.3	<i>Dimensionamento Econômico do Sistema Elevatório, baseado na Eficiência Energética e Operacional da Chave Boia.</i>	79
5.2.3.1	<i>Caso Sintético 1, pelo método NBR 12217.</i>	85

5.2.3.2	<i>Caso Sintético 2, pela recomendação de Gomes (2012)</i>	88
5.3	Consideração Geral	90
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	91
REFERÊNCIAS		95
APÊNDICE A	DOCUMENTAÇÃO DO ALGORITMO SIMULADO	102
APÊNDICE B	SOLUÇÃO VIÁVEL DA OTIMIZAÇÃO	159
B.1	Experimento 1 – pelo método de GOMES, 2012	159
B.1.1	<i>Demanda de final de projeto (20-30 anos)</i>	159
B.1.2	<i>Demanda de meio de projeto (10-20 anos)</i>	161
B.1.3	<i>Demanda de início de projeto (00-10 anos)</i>	162
B.1.4	<i>Demanda de início e meio de projeto (00-10 e 10-20 anos) para uma operação fixa ao longo do tempo</i>	163
B.1.5	<i>Demanda de início, meio e fim de projeto aplicando a metodologia proposta no capítulo 5</i>	165
B.2	Experimento 2 – pela ABNT NBR 12217, 1994	169
B.2.1	<i>Demanda de início e meio de projeto (00-10 e 10-20 anos) para uma operação fixa ao longo do tempo</i>	173
B.2.2	<i>Demanda de início, meio e fim de projeto aplicando a metodologia proposta no capítulo 5</i>	175
B.3	Discussão	178
APÊNDICE C	DEDUÇÃO DA FORMULA 0,2725/CEN	179
APÊNDICE D	GRÁFICOS DA DISTRIBUIÇÃO RESIDUAL DAS FITS180	

INTRODUÇÃO

1.1 Motivações para a Realização deste Trabalho

Ao longo das décadas de 1970 e 1980, o governo federal brasileiro implementou uma política voltada à ampliação do alcance do sistema de abastecimento de água potável no meio urbano, que segundo o Censo de 1970 apenas 50,4% da população urbana era abastecida com água potável (MONTEIRO, 1993). Tal medida estava atrelada às necessidades relacionadas à saúde e ao desenvolvimento industrial que o Brasil se encontrava.

Quinze anos depois da implementação de tais políticas públicas – em 1985 – uma pesquisa feita pelo *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística* (IBGE) assinalou que 87% da população urbana nacional estava sendo abastecida com água potável (MONTEIRO, 1993). Um acréscimo de 56 milhões de pessoas, maior que o contingente populacional na Coreia do Sul de ano base 2017. Hoje tal alcance, é cerca de 98% dos moradores do centro urbano¹ nacional, estimativa base de 2017 pelo *Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento* (SNIS) [2019], no âmbito da *Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental* (SNSA) do *Ministério das Cidades* (MCID).

Vale ressaltar que mesmo com as exigências incessantes do consumidor e as questões políticas, para a ampliação de tal sistema de abastecimento nos centros urbanos, o procedimento de transporte em adutoras por gravidade, tanto em conduto forçado como em conduto livre, foram poucos utilizados por causa de suas limitações de layout, de topografia e da carga hidráulica. Por outro lado, o escoamento pressurizado, com a técnica das estações elevatórias, e a sua abrangência no setor solucionaram os mais variados problemas de transporte no sistema de abastecimento, viabilizando a utilização de diferentes modalidades de fonte d'água no sistema de abastecimento de água, tais como as fontes de águas de superfícies, subterrânea e marítimas (dessalinização da água, ainda pouco utilizada no país).

¹ Para os 5.570 municípios existentes no Brasil em 2017, a população total estimada pelo IBGE foi de 207.660.929 habitantes. A população urbana foi estimada pelo SNIS, em cada município brasileiro, adotando-se a população total do IBGE multiplicada pela taxa de urbanização verificada no Censo 2010. Segundo este critério, a população urbana do Brasil, em 2017, resultou em 175.588.503 habitantes.

O uso intensivo no sistema fez com que as prestadoras de serviços de saneamento básico elevassem o custo operacional de consumo de energia elétrica, em ordem nada sustentável conforme as políticas internacionais do final do século XX (COELHO; ANDRADE-CAMPOS, 2014). Nesse contexto, Hoffman (2004) aponta que cerca de 7% do consumo mundial de energia elétrica é direcionado para o ciclo hídrico humano – abastecimento (humano, agrícola e industrial) e no tratamento (potável e esgoto).

Esta porcentagem pode estar crescendo constantemente devido à crescente demanda por água, especialmente em áreas urbanas como resultado do crescimento populacional, pois outrora, tal consumo energético no ciclo hídrico humano – no início do século XXI – estava entre 2 e 3% do consumo energético mundial, segundo a *Alliance to Save Energy* (ASE) [2002].

Averiguando tal crescimento, o seu consumo pode aumentar ainda mais, segundo o relatório *Water for a Sustainable World* da *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization* (UNESCO) [2015], já que a demanda por água tem previsão de 55% de aumento até 2050, ou seja, um ponto que precisa ser discutido o quanto antes, já que é um fator que contribui consideravelmente para o consumo de energia na sociedade.

Nos *Estados Unidos da América* (EUA), aproximadamente, 13% de toda a energia elétrica produzida no país é utilizada nas estações elevatórias do saneamento básico, no transporte de água potável e no transporte de esgoto, (GRIFFITHS-SATTENSPIEL; WILSON, 2009). Em algumas regiões, como por exemplo o estado da Califórnia, tal consumo representa cerca de 20%, sendo devido, principalmente pela utilização intensiva da fonte marítima que tem alto consumo energético, ocasionado sobretudo, pela escassez de fonte hídrica na redondeza (NOVOTNY, 2011).

Pode-se constatar que essa estimativa pode variar significativamente num mesmo país, pois este consumo energético depende muito das condições topográficas e climáticas – como também da economia, tecnologia e cultura do local. Nesse sentido, Fumo, Mago e Luck (2010) apontam que tais fatores desempenham um papel importante, na estimativa do consumo de energia no sistema de abastecimento de água, tendo que ser analisada com cuidado para um bom planejamento na eficiência do sistema. Do mesmo modo, Palamutcu (2010) corrobora esse pensamento ao citar que as condições climáticas, e também sociais do local, impactam diretamente no fator de consumo de energia elétrica no sistema de abastecimento.

Na Suíça, o índice de consumo elétrico direcionado ao setor de distribuição de água, em relação a todos os setores públicos, é da ordem de um pouco mais de 20%, segundo o *Service de L'environnement et de L'énergie de la Suisse* (SEVEN) [2009], e que hoje, o fator energia representa 1/4 (um quarto) das variáveis nos projetos de distribuição de água no país. Pesquisas feitas pela SEVEN (2009) mostram que a otimização energética no setor de abastecimento de água pode ocasionar economia de 20 a 50% nos custos do setor. No mesmo ano, Gomes (2009) aponta que, projetos nacionais de abastecimento de água poderiam diminuir em 25% nos gastos energéticos mediante ações operacionais e administrativas.

Na Espanha, Hardy (2012) estima que o consumo energético das prestadoras de serviço de abastecimento de água e esgoto, é de aproximadamente de 5,8% do consumo total nacional. No Brasil, esse cenário de consumo energético no setor de saneamento básico não é diferente, sendo o gasto financeiro total por ano em energia elétrica no setor da ordem de 5,26 bilhões de reais (moeda corrente oficial da República Federativa do Brasil), correspondente ao consumo de energia elétrica de 12,6 TWh, de acordo com o Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos de ano base 2017, SNIS (2019). Conforme menciona Gomes (2012), esse consumo é principalmente dos conjuntos eletromecânicos dos processos de abastecimento de água e de esgotamento sanitário, que correspondem a algo em torno de 90% de todo o consumo de energia elétrica nas empresas prestadoras do serviço. Este consumo representa cerca de 26,17% do total de consumo de energia elétrica anual do setor público brasileiro, e 2,56% de toda geração de energia elétrica produzida no país, segundo os dados do *Anuário Estatístico de Energia Elétrica* (ANEEL) divulgado pela *Empresa de Pesquisa Energética* (EPE) [2018].

Pode-se observar, com isso, que a magnitude do consumo e do custo é bastante expressiva, podendo variar significativamente de acordo com as condições locais – de modo que o estudo de eficiência energética nesse sistema deve ser averiguado com cautela – e em alguns casos é necessário levantar o cenário atual dos recursos energéticos, hídricos e até financeiros em que o país se encontra e encontrará.

Nesse cenário, as empresas vêm passando por grandes desafios no nexo distribuição de água potável e consumo energético, para, dessa forma, garantir o funcionamento dos conjuntos eletromecânicos das estações elevatórias, e ao mesmo tempo, ampliar o sistema de distribuição para acompanhar o crescimento das cidades.

Explicita assim, os motivos de ordem teórica e prática que justificam a pesquisa, também desencadeado pelo processo de análise e reflexão sobre o assunto, no qual se espera proporcionar subsídios para planejamentos e decisões consistentes, os quais serão tomadas na direção da eficiência energética no abastecimento de água.

1.2 Finalidade e Enquadramento do Trabalho

Tais visões de eficiência no consumo energético, no setor de abastecimento de água não são práticas apenas de hoje. Desde a crise do setor energético na década de 1970, com o aumento do preço das fontes de energia não renováveis, centrada principalmente no petróleo, e das políticas de movimentos ecológicos, tais medidas emergenciais já vinham sendo discutidas e tomadas (Bhattacharyya, 2011 *apud* FERRO; LENTINI, 2015), pois se por um lado se desejava a queda dos custos que cada vez aumentavam, no outro, aumentava cada vez mais a demanda na rede de distribuição e as exigências da qualidade no serviço ofertado.

Somado a isso, no Brasil e a realidade de alguns outros países, ocorreu à reestruturação do setor elétrico que deixa de ser um setor exclusivamente estatal, passando a ter uma parte do

setor em economia mista e de capital aberto sob controle acionário do Governo. Com tal medida, os novos gestores administrativos no setor de energia, começaram a ter maiores controles na energia consumida de forma ineficiente (consumo excedente de energia reativa que é o consumida pelo equipamento com a finalidade de formar os campos eletromagnéticos necessários para o seu acionamento) ou pelo descumprimento dos contratos de demanda de energia elétrica para aquele consumo, com isso as empresas de saneamento não viram o custo energético diminuir.

Frente à mudança no setor energético e da consciência de que novas medidas devam ser encontradas e tomadas, as políticas atuais centram a atenção no uso racional da energia, e com essa visão, o mundo demanda de projetos que impõem restrições ao desperdício e que busquem soluções compatíveis com as exigências da sociedade contemporânea. Esta é uma das medidas colocada na Resolução 65/151 de ano 2011 da Assembleia Geral das Nações Unidas, intitulada de “Ano Internacional de Energia Sustentável para Todos”, para que até 2030 atenda uma melhora na taxa de eficiência energética. RN ONU 65/151 (2011).

O setor de saneamento não pode deixar essa exigência sustentável de lado, pois de acordo com Alliance to Save Energy (ASE, 2002), e com os dados descritos anteriormente, as estações elevatórias do sistema de abastecimento de água, são responsáveis por um expressivo consumo energético em todo o mundo.

Carvalho (2006) relata que alguns anos atrás, a prioridade das empresas prestadoras do serviço era simplesmente abastecer a população com água em quantidade e qualidade. Hoje, as exigências são bem maiores, pois além de atender a estes princípios básicos, o setor passa a se preocupar ainda com as questões ambientais dos recursos hídricos e com o elevado consumo energético, que em muitos casos, representa um custo próximo de 1/3 (um terço) do fluxo de caixa. Portanto, as empresas devem se adaptar às novas exigências, ou com o tempo, poderão sofrer dificuldades financeiras no nexo água-energia, devido à baixa eficiência de operação dos conjuntos eletromecânicos e de ações administrativas.

Nesse sentido, uma das finalidades desse estudo é a minimização do consumo e do gasto energético no sistema elevatório (estação elevatória, adutora e reservatório) do abastecimento de água potável. No qual o consumo energético, somado com o de bombeamento das estações de esgoto, correspondem em quase sua totalidade, da energia total consumida pelas empresas prestadoras do serviço.

Sendo assim, é importante ter ações operacionais, inclusive de meio administrativo, para uma diminuição do consumo e custo energético no sistema, contribuindo com as metas sustentáveis internacionais e nacionais do início do século XXI, como o caso do *Plano Nacional de Energia* (PNE) [2007] que incorpora a eficiência energética em seus estudos e planos, e do *Plano Nacional de Eficiência Energética* (PNEf) [2011].

DIRETRIZES DA PESQUISA

2.1 Preceitos e Campo de Aplicação

As atividades desta pesquisa consistem na realização de dois estágios: (i) o primeiro (capítulo 3), retratando uma prévia contextualização para ajudar no entendimento do conteúdo, e (ii) um segundo (capítulo 4), com atividades mais funcionais, que para fins práticos, são as ferramentas que concretizam o trabalho no sentido da otimização multiobjetivo do setor em estudo, através da eficiência energética e da eficiência operacional do volume armazenado no reservatório de distribuição.

Tem como o principal campo de aplicação, desse primeiro estágio, um breve entendimento da complexidade e especificidade deste conteúdo no ramo teórico, auxiliando os estudos de abastecimento que possuem estações elevatórias ou irão possuir, e que tenham que fazer uma estratégia sobre a eficiência energética no sistema de abastecimento de água. Já o segundo estágio, está diretamente ligado com o desenvolvimento e a popularização das tecnologias computacionais, quer dizer, a simulação computacional e a otimização do sistema simulado propriamente dito.

2.2 Objetivo Principal

Propor uma metodologia de dimensionamento e operação do sistema elevatório em sistemas de abastecimento de água, para o diagnóstico e a avaliação das oportunidades de economia energética, em nível de projeto, mediante a eficiência operacional da chave boia no reservatório e a regra de controle horário (liga ou desliga a bomba na ponta horária).

2.3 Objetivos Secundários

1. Simular a operação conjunta do bombeamento e reservação, quanto ao custo de implantação, ao consumo e às despesas de energia elétrica. Considerando a capacidade volumétrica de reservação para dois métodos de dimensionamento, o método recomendado na *ABNT*

NBR 12217 (1994) e o método dos volumes diferenciais da CETESB (1987), em conformidade com a proposta de Gomes (2012) e assim, comparando os resultados energéticos, operacionais e as condições hidráulicas.

2. Analisar a importância do dimensionamento da capacidade volumétrica do reservatório na rotina operacional de bombeamento da estação elevatória, considerando o custo de implantação e operação.
3. Verificar quais características operacionais fornecem uma melhor eficiência do comportamento hidro energético do sistema elevatório; e assim, definir condições de referência que possam ser utilizados para auxiliar no dimensionamento e no diagnóstico de projetos já existentes.

2.4 Delimitações

Ficam fora do âmbito desta dissertação: (i) os estudos que se prendem com a introdução de fontes / tecnologia de energias renováveis; (ii) os gastos energéticos para o aprimoramento da água na rede de distribuição; e (iii) horizontes temporais superiores que abarcam o longo prazo. Portanto, o trabalho está limitado na avaliação do consumo de energia (elétrica) direta no bombeamento / transporte de água tratada até o seu armazenamento no reservatório de distribuição.

CONTEXTUALIZAÇÃO E ASPECTOS TEÓRICOS EM SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

3.1 Considerações Gerais

Segundo Azevedo Netto (1989), poucas pessoas atribuem à tecnologia utilizada nas estações elevatórias (máquina de fluido) a importância devida ao desenvolvimento da sociedade contemporânea. Olvidando que no mundo atual essa tecnologia é utilizada em quase todos os meios da sociedade, tais como automóveis, aviões, navios, cidades (abastecimento de água e coleta de esgoto), na geração de energia elétrica, nos hospitais (coração artificial, máquina de hemodiálise, etc.), na produção das indústrias e na agricultura, nos salões de beleza como o secador de cabelos, nos ambientes de trabalho como os equipamentos de regularização da temperatura, etc., ou seja, tiramos proveitos em tudo das máquinas de fluido.

Apesar de ser bastante utilizada nas atividades da sociedade contemporânea, seu conceito tecnológico já foi utilizado e aprimorado por várias civilizações até chegar ao que conhecemos hoje. Antes de entrar em uma de suas aplicações, é interessante definir na visão atual da história, o que são máquinas de fluido. Hoje, diríamos que é uma troca de energia entre um sistema mecânico e um fluido, ou simplesmente, num mesmo tipo de sistema fluido-fluido, porém transformada, ou seja, extrai ou adiciona energia no sistema em que se encontra a máquina.

Tais máquinas para melhor estudo podem ser divididas em dois grupos: as de deslocamento positivos e as de fluxo (ou turbomáquinas, o prefixo turbo vem do latim que significa rotação ou giro). Enquanto no primeiro o fluido fica confinado em alguma região armazenando energia, no outro isto não ocorre, havendo fluxo contínuo através do sistema, sendo essa a diferença entre os dois grupos. Tanto o primeiro como o segundo grupo podem se dividir em duas classes: máquinas hidráulicas e máquinas térmicas.

Neste estudo, de todos os ramos da máquina de fluido, o foco está somente nas turbomáquinas de fluxo hidráulica e geradoras de energia, especificamente as bombas centrífugas, isso

se deve por ser a tecnologia de maior relevância encontrada nas estações elevatórias, tendo a função de escoar a água de um local para outro.

3.2 Evolução do Sistema de Transporte de Água

Desde tempos remotos, o homem tem buscado controlar ou extrair o máximo da natureza, e isso se deve à procura de recurso para a sua sobrevivência. A sua relação com a água não foi diferente, assim a primeira “estação elevatória” (nome dado ao sistema que possibilita o deslocamento da água de um nível potencial hidráulico baixo para um nível potencial elevado, que naturalmente não segue esse sentido e sim o contrário) foi o próprio homem primitivo que transportava água em baldes ou conchas (Azevedo Netto, 1989). Com o avanço do conhecimento e das necessidades para a agricultura, esse processo foi sendo mecanizado aos poucos.

Assim, o registro mais antigo que se tem e descreve um sistema de estação elevatória é a bomba Cegonha (Shadoof), de cerca de 2000 a.c. (ALVES, 2015), que foi desenvolvida pelos egípcios, tendo como objetivo de transportar a água do rio Nilo para as regiões de plantio.

Com o passar do tempo, apareceram diversos dispositivos rudimentares, ainda usados nos dias de hoje em regiões que tais dispositivos resolvem muito bem as necessidades locais, tais como picota, sarilho, nora, bomba a pistão e o parafuso de “Arquimedes” que ficou mundialmente conhecido depois que o mesmo fez melhorias no dispositivo, em vista disso, levou seu nome o qual chamamos até hoje (DALLEY; OLESON, 2003).

Outro avanço de destaque engenhoso na evolução histórica do transporte de água, veio com a expansão do Império Romano no início do século VI a.c., com sua política de adquirir e melhorar as tecnologias do local de domínio, como uma forma de ampliar o seu conhecimento, proporcionaram aos romanos introduzirem aperfeiçoamentos em diversos equipamentos, e conseqüentemente ao sistema de transporte de água (ROBINS, 1946). Isso propiciou grandes avanços na engenharia de abastecimento, tal como os aquedutos, tanto em conduto forçado como em conduto livre, sendo admirado pela sua engenhosidade até nos dias de hoje.

Tais aquedutos podiam medir de 10 a 100 km (quilômetros) de comprimento, em geral desciam de uma elevação de 300 metros acima do nível do mar (a fonte), até 100 metros quando atingiam os reservatórios próximos à cidade (GARGARIN; FANTHAM, 2010).

Com isso, a fonte abastecedora de água deixou de ser uma coisa exclusivamente próxima, podendo estar à quilômetros de distância dos centros urbanos, que segundo Gargarin e Fantham (2010) eram na ordem de 30 até 60 km (quilômetro) de distância, em média. Tal avanço proporcionou o desenvolvimento de cidades em regiões que sem esse sistema de transporte, possivelmente teriam problemas com escassez de água potável para o consumo. Isso fez com que fosse ampliado a rede de distribuição de água nos centros urbanos, favorecendo positivamente na saúde da população (ROBINS, 1946).

Na sequência do avanço humano, as necessidades do abastecimento de água nos centros urbanos foram, e ainda são, um dos elementos fundamentais para o desenvolvimento da qualidade de vida do homem. Sendo responsável pela higiene e limpeza (ligação direta com a saúde como mostram os estudos feitos no século XX [e. g. Leibowitz e Friedman (1979); Nocera e Zweifel (1998)] e em continuidade no seguinte [e. g. Teixeira *et al.* (2014)]), aplicação direta na irrigação e nas indústrias, enfim, em todos os meios já mencionados anteriormente, sendo vital para o desenvolvimento humano (TSUTIYA, 2006).

Basta observar a história e ela nos mostra que as comunidades se estabeleciam próximas de locais onde havia disponibilidade de água e que sempre estudou meios de transportá-la para os grandes centros populacionais, e isso ocorre até os dias de hoje. Os aquedutos romanos são um bom exemplo disso, pois transportavam quantidades enormes de volume de água para as necessidades humanas.

Só que apesar de ser um meio bem eficiente de transporte (aquedutos), no qual tal tecnologia ainda é aplicada nos dias de hoje, mas não em sua totalidade, esse meio de transporte tem muitas limitações, como: (i) precisa de fontes de água em grandes altitudes, para que ocorra o escoamento por gravidades; (ii) limitações das longas distâncias destas fontes ao ponto de consumo e (iii) o fator tempo, que é a sua disponibilidade ao longo do tempo. Com o crescimento dos grandes centros urbanos, que segundo Porto (2006) estão localizados em cotas bastante elevadas em relação às fontes hídricas, constitui-se mais um obstáculo à adoção do sistema de transporte de água por aquedutos.

Isso tudo fez com que o homem ainda estudasse outros meios de transporte de água. Com os avanços do conhecimento na mecânica dos fluidos e o surgimento de equipamentos eletromecânico, o homem descobriu um novo meio, ou para alguns historiadores, aperfeiçoou os conhecimentos já aplicados anteriormente, revolucionando mais uma vez a forma do abastecimento de água nos centros urbanos com as máquinas de fluxo.

Nos séculos XVII e XVIII, com os avanços nas técnicas de máquinas de fluxo, especificamente nas bombas, o sistema de transporte de água foi se mecanizando cada vez mais, aproximando-se da forma como conhecemos atualmente. Hoje, chega ao ponto que quase a totalidade das adutoras, em que se ligam as estações de tratamentos ao reservatório, passa-se por uma estação elevatória, pois se precisa transferir energia para o sistema (por meio de um equipamento eletromecânico), a fim de elevar água de uma cota mais baixa para uma mais alta.

Depois disso, diversos estudos vieram mostrando os benefícios hidráulicos na utilização de estação elevatória para o transporte, até na carga hidráulica para o abastecimento da rede de água potável nos grandes centros urbanos (TSUTIYA, 2006). Isso se deve ao avanço da mecânica de fluido e dos diversos equipamentos (eletromecânico, de segurança e das tubulações utilizadas).

No seguinte item, será abordado o conceito básico para a concepção e operação de um *Sistema de Abastecimento de Água* (SAA) potável, com a utilização de uma estação elevatória que é a tecnologia de maior relevância, quando se trata de transporte de água potável de grandes centros urbanos nos dias de hoje.

3.3 Concepção do SAA com Estação Elevatória

De um modo geral, entende-se por concepção de sistema de abastecimento de água, "o conjunto de estudos e conclusões referentes ao estabelecimento de todas as diretrizes, parâmetros e definições necessárias e suficientes para a caracterização completa do sistema a projetar" (TSUTIYA, 2006). Em outras palavras, toda a parte técnica, equipamentos e projetos, e a parte administrativa.

Manancial: é a fonte do sistema para o abastecimento, ou seja, de onde é retirada a água para alimentar o sistema. Tais fontes podem ser do tipo superficial natural ou artificial, subterrâneo freático ou confinado e o marítimo, o último é pouco utilizado no Brasil por questões da abrangência dos outros dois. Essa escolha deve ser bem planejada e estudada, porque deve fornecer vazão suficiente para alimentar o sistema no período de projeto e/ou possível ampliação, também seguindo toda a qualidade sanitária exigida pelo órgão responsável e as normas ambientais, para não prejudicar a vazão do manancial local, a jusante e a montante. A escolha do local já teve momentos onde a questão da disponibilidade falava mais alto, mas com os avanços das novas técnicas de abastecimento como as estações elevatórias, a questão orçamentária sobrepujou na escolha, como em alguns casos quando a necessidade de se buscar mais de uma fonte, do mesmo tipo ou não, para ter o melhor aspecto econômico de captação.

Captação: nessa parte do sistema já se observa certo consumo de energia, pois devido às normas e as gestões orçamentárias colocadas na escolha do manancial, o local nem sempre é favorável para uma captação por gravidade, devendo ser utilizada em conjunto com estruturas e dispositivos, como uma pequena estação elevatória construída junto ou a certa distância do manancial para a retirada da água.

Estação de Tratamento: os padrões de qualidade sanitária exigida pelo órgão responsável devem ser seguidos com rigor, pois segundo os estudos feitos no século passado e em continuidade no século XXI (estudos estes, alguns já citados anteriormente), a água potável tem um fator direto com a qualidade de vida da população, por isso essa etapa está diretamente ligada com a escolha do local e o tipo de fonte. Como foi comentado anteriormente, as três fontes são: superficial, subterrânea e marítima, apenas a subterrânea que possui padrões de qualidade próximos das normas colocadas pelo órgão de saúde, já que vem de fontes de qualidade aceitável, mas isso não é regra, ainda são exigidos

tratamentos para se encaixar em todas as normas de qualidade. Destes tipos de mananciais, pode-se dizer que apenas o marítimo exige quantidades expressivas de energia para o tratamento da água bruta, que é retirada do sal por osmose-reversa, por isso que o estado da Califórnia, nos EUA, o consumo energético no setor de abastecimento básico é expressivo, porque além do gasto energético das estações elevatórias, também se tem o gasto energético com a estação de dessalinização.

Estação elevatória: dentre todas as partes do sistema de abastecimento de água, o conceito do processo de estação elevatória, marcou um fato histórico importantíssimo na distribuição de água. Quando as primeiras cidades utilizaram esta tecnologia para vencer a barreira da carga hidráulica, descobriram que a limitação da escolha do local do manancial foi ficando de lado, em outras palavras, isso era o que precisava para ampliar o leque da escolha do manancial e até criar novos ramos, como o marítimo. Por definição, estação elevatória é o conjunto de estruturas, como tubulações, acessórios hidráulicos, bombas e motores que vão acrescentar “energia” no sistema ocasionando o escoamento da água, sendo de um ponto de cota inferior para um ponto de cota superior, ou de um ponto de cota para o ponto de mesma cota, neste caso colocando “energia” no sistema para ocasionar o escoamento inexistente, ou de um ponto de cota superior para um ponto de cota inferior, ocasionando um aumento de “energia” no sistema e favorecendo o escoamento já existente. A função principal deste processo é acrescentar “energia”, essa “energia” tem que ser gerada de alguma forma, e na maioria dos casos das estações elevatórias no Brasil, tem-se como fonte a energia elétrica disponibilizada pela concessionária de eletricidade local. Essa relação da energia elétrica com esta parte do sistema, foi exposta de forma direta, pois o foco foi analisar com maior detalhe as questões de dimensionamento, construção e operação da estação elevatória no sistema de abastecimento de água, tendo como base as exigências fixadas na *ABNT NBR 12214 (1992)*.

Adutora: constituída por tubulações e dispositivos, e onde tem-se acentuado novas tecnologias dos equipamentos e materiais, a ponto de resistir às altas pressões geradas pelas estações elevatórias e/ou desníveis naturais. Tem como principal função, conduzir água de uma etapa à outra, não existindo consumo de água ao longo do trecho (podendo existir bifurcações), isso faz com que o seu dimensionamento seja menos complicado que as tubulações da rede de distribuição. Seu dimensionamento tem ligação direta com o custo total e com as operações na etapa da estação elevatória, por isso seu estudo tem de ser bem planejado e observado sem nenhuma negligência levantada pela simplicidade dos cálculos. Essa etapa está sujeita às perdas acentuadas de energia no seu transporte, acarretando em perdas demasiadas, com isso exigindo maior trabalho das estações elevatórias. O estudo econômico da tubulação junto com o estudo da estação elevatória se faz necessário, já que são etapas que estão diretamente ligadas, admitindo inúmeras soluções de arranjos ou alternativas de projetos. Por isso, é preciso executar um estudo para a alternativa de custo

mínimo, correspondendo à solução ótima de orçamento e sem comprometer a qualidade. Destaca-se que, assim como foi dito na etapa da estação elevatória, aqui também segue as recomendações da *ABNT NBR 12215-1 (2017)*, esta etapa também foi fundamental para o escopo da pesquisa, por influenciar diretamente nos custos de implantação e operação do sistema.

Reservatório: a primeiro momento são unidades hidráulicas que tem a finalidade de acumulação e passagem de água, e situados em pontos estratégicos da rede de distribuição, de modo a atender distintos objetivos para beneficiar o sistema de abastecimento de água, como a regularização da vazão e, conseqüentemente, as pressões na rede de distribuição, como também a reserva para incêndios e dotar ao sistema uma segurança no abastecimento, em caso de paralisação das etapas anteriores. Além disso, o volume acumulado permite uma paralisação do bombeamento no horário de altos custos energéticos, logo, também foi um parâmetro fundamental para o escopo da pesquisa. Os sistemas sem reservatório ou com reservatório a jusante, devem ter seu bombeamento preferencialmente trabalhando com o ponto de funcionamento móvel (inversor de frequência), acompanhando a demanda da rede de distribuição. Caso contrário, em momentos de baixo consumo ocasionará grandes números de rompimentos na rede, aumentando as perdas de água e, conseqüentemente, energia.

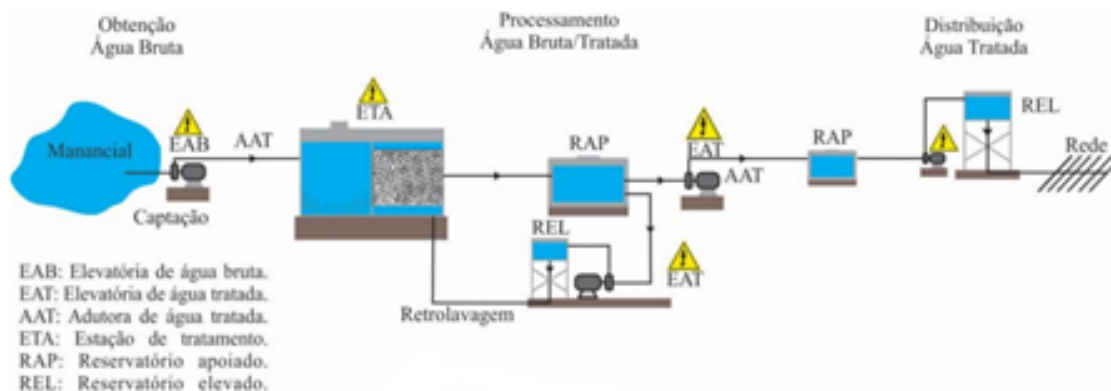
Redes de Distribuição: conjunto de elementos e acessórios hidráulicos (tubulações, conexões e válvulas) interconectados, destinados a conduzir e distribuir água ao consumidor de forma contínua, em quantidade, qualidade e pressão adequadas, seguindo as recomendações dos órgãos responsáveis. Seu dimensionamento, com as suas respectivas vazões e pressões, deve seguir o que está disposto na norma técnica brasileira *ABNT NBR 12218 (2017)*. Assim como nas outras etapas, o projeto, a construção e a operação de uma rede de distribuição de água requerem planejamento e redução de custos, caso contrário provocará um significativo aumento de custo no investimento do sistema, sendo a mais dispendiosa em relação aos custos de implantação de todo o sistema (PRINCE, 2006). Por isso, a necessidade de métodos de cálculos que propiciem uma eficiência no sistema, onde de acordo com o postulado de Khazzoom-Brookes formulado por Harry Saunders (1992), numa gestão que procura a alternativa de melhor eficiência em termos pontuais, estando economicamente justificados a nível microeconômico, pode entrar em colisão com a eficiência a nível macroeconômico, isso tendo que ser evitado.

3.4 Noção de Eficiência Energética

No sistema de abastecimento de água - SAA, o entendimento da eficiência energética está diretamente ligado ao gasto energético, ou em outras palavras, é com o balanço energético que se baseia a quantidade consumida e as perdas de energia em cada etapa do processo de

abastecimento, desde a entrada da energia no terminal da prestadora de serviço do abastecimento de água, passando por todo o conjunto dos processos que compreende desde a captação no manancial, estação de tratamento, estação elevatória, adutora, reservatório e rede de distribuição, como observa-se na Figura 1.

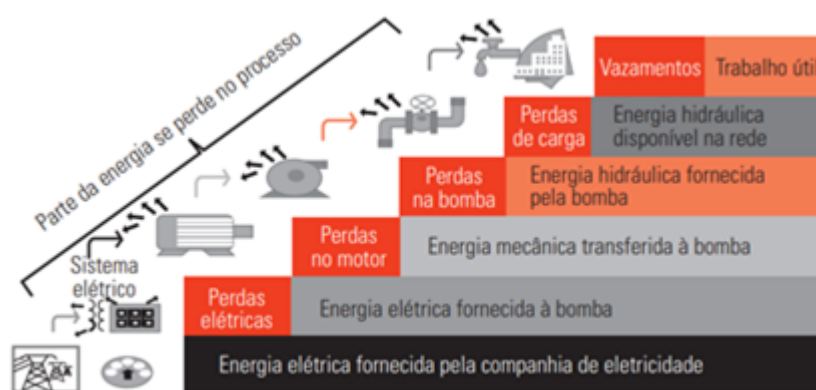
Figura 1 – Unidades consumidoras de energia elétrica no SAA



Fonte: Pereira e Condurú (2014).

Este balanço energético permite observar qual quantidade de energia, da energia fornecida no terminal, se transformou em serviço útil, que é a energia mínima para bombear a água até o consumidor final. Segue na Figura 2 um diagrama simples do balanço energético.

Figura 2 – Diagrama simples do balanço de energia



Fonte: Banco Interamericano de Desenvolvimento (2011).

A energia que não se transforma em trabalho útil representa perda, portanto, uma área de oportunidade de economia. Esta técnica (o balanço de energia) permite identificar e quantificar onde se localizam as maiores perdas, e o quanto se pode economizar sem deixar qualquer parte do sistema de fora.

Nos "[...] sistemas de abastecimento de água por bombeamento em que já há uma determinada potência instalada das estações elevatórias,

como diâmetro, traçado e material das adutoras definidos e também já está definida a capacidade do reservatório, a otimização da operação do sistema pode levar a redução do consumo de energia, sendo necessário, todavia, um estudo aprofundado de todas as variáveis envolvidas e um centro de controle operacional confiável [...]”(KURITZA, 2017, p. 26).

Essa relação do balanço energético com as regras de operação otimizadas para os SAAs, numa infraestrutura em implantação ou já implantada, trata-se de um dos objetivos dos diversos trabalhos que envolvem a eficiência energética (e. g. SIMPSON; DANDY; MURPHY, 1994; LIONG; ATIQUZZAMAN, 2004; KURITZA, 2017). Visando a minimização dos gastos energéticos do conjunto estação elevatória, adutora e reservatório por meio de um modelo otimizado no dimensionamento do sistema elevatório e ou na operação do mesmo.

Com um plano de eficiência energética no SAA, em muitos casos, tem múltiplos efeitos positivos. Por exemplo, (i) diminuição do custo energético no sistema elevatório, já que nos últimos anos no Brasil e no mundo têm se acentuado significativamente, constituindo o segundo ou terceiro item de despesas nas empresas de saneamento (GOMES, 2009); (ii) inclusão do setor de saneamento nas metas globais do uso da energia mais sustentável, e (iii) alívio do consumo na rede de energia elétrica. Assim, favorecendo a execução de projetos mais rentáveis e a confiabilidade do SAA, conseqüentemente, ocasionando o uso eficaz do recurso hídrico.

Visto que a eficiência energética, tem um enorme potencial em todos esses resultados que se permite economizar em dinheiro, energia e água, também é possível apontar benefício indireto, como por exemplo, investimentos em conservação, assim diminuindo a necessidade de ampliação na geração de energia (SOARES, 2015; FILHO, 2016). Uma vez que, segundo a *Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental* (ABES) [2015], para cada R\$ 1,00 (um real) investido em conservação de energia elétrica, é economizado R\$ 8,00 (oito reais) em programas de geração de mais energia.

Sem dúvida, a comunidade científica vem tendo um consenso maior de que a redução dos custos no setor de abastecimento de água é um planejamento necessário (e. g. UNESCO, 2014 e idem, 2015; IEA, 2016; LUNA *et al.*, 2019), assim como a busca de mudanças a favor da eficiência energética, a qual constitui como estratégia necessária para uma mudança a favor das políticas sustentáveis.

Ao percorrer a literatura atual sobre estratégias de mitigar os gastos energéticos no setor de bombeamento de água (sistema elevatório), é visível o investimento em equipamentos mais tecnológicos ou mais eficientes no consumo de energia, e em projetos de simulação destes dispositivos ao longo do tempo. Sobretudo, como foi citado anteriormente, o postulado de Khazzoom-Brookes formulado por Harry Saunders (1992), afirma que uma solução microeconômica pode não vir a solucionar a eficiência macroeconômica. Portanto, o mesmo pode ser visto quando se trata de um plano de eficiência energética pontual que ajuda de certo modo, mas não por completo ou num tempo mais prolongado, sendo importante atenta-se a isso.

3.5 Modelagem Computacional Envolvendo Eficiência Energética no Sistema Elevatório

As primeiras pesquisas de registro na melhoria operacional e de projeto no setor foram realizadas na década de 1970, por meio da programação dinâmica (LANSEY; AWUMAH, 1994), seguido por uma série de estudos utilizando esse conceito (e. g. JOLLAND; COHEN, 1980). Ainda que muitos destes algoritmos serem desenvolvidos para sistemas um tanto simples, é possível a sua implementação em sistemas para transporte e distribuição de água mais complexos.

Estes tipos de modelos replicavam a dinâmica do sistema, resolvendo um conjunto de equações hidráulicas, incluindo a conservação da massa e a conservação de energia (MACHELL; MOUNCE; BOXALL, 2010), permitindo que o usuário obtenha detalhe sobre todos os elementos de um determinado sistema, fornecendo um suporte importante para o gerenciamento e controle operacional.

Atualmente, vários programas de software para simulação hidráulica estão disponíveis em versão gratuita e a maioria deles não têm limitação na complexidade do sistema. Como exemplo, o EPANET 2.0 (ROSSMAN, 2000), um software livre e de código aberto desenvolvido pela EPA (Agência de Proteção Ambiental dos EUA), que realiza simulação estática e dinâmica do comportamento hidráulico em sistemas de abastecimento de água. É caracterizado por um modelo computacional robusto com uma grande comunidade de usuários (VIEIRA; RAMOS, 2009), oferecendo uma interface de usuário opcional e sem limitação no número de elementos no sistema.

Esse modelo computacional, embora reproduza o comportamento hidráulico do sistema, não permite a determinação das estruturas ótimas ou das condições operacionais ótimas dos sistemas (COELHO; ANDRADE-CAMPOS, 2014), essencialmente quando se baseia na resposta imediata à crescente demanda de água da população. Por esta razão, vários programas de computador comerciais existentes utilizam o EPANET como base para a modelagem hidráulica, contudo há módulos separados para a otimização do sistema (Ibidem).

"Os problemas de otimização podem ser resolvidos usando métodos convencionais de tentativa e erro ou métodos de otimização mais eficazes. No entanto, em sistemas de abastecimento de água, o processo de otimização por métodos de tentativa e erro pode apresentar dificuldades devido à complexidade do sistema, como bombas múltiplas, válvulas e reservatórios, perdas de carga, grandes variações nos valores de pressão, várias cargas de demanda, etc. Por essa razão, os algoritmos de otimização não-linear inovadores estão se tornando mais amplamente explorados nos processos de otimização dos sistemas de abastecimento de água"(COELHO; ANDRADE-CAMPOS, 2014, tradução nossa)¹.

¹ No original: Optimisation problems can be solved using conventional trial and error methods or more effective optimisation methods. However, in water supply systems, the optimisation process by trial and error methods can present difficulties due to the complexity of these systems such as multiple

Um problema geral de otimização é definido como a minimização (ou maximização) de uma função "f" sujeito a restrições de igualdade e/ou desigualdade, podendo ser expresso como na Equação 3.1 (COELLO; LAMONT; VELDHUIZEN, 2007).

$$\text{Min (ou max) } f(X)$$

$$\text{Sujeito a: } g_m(X) \leq 0, \quad m = 1, \dots, M$$

$$h_l(X) = 0, \quad l = 1, \dots, L$$

(3.1)

onde $X = (x_1, \dots, x_n)$ é um vetor das variáveis de decisão (contínuas ou discretas) com dimensão "n"; "M" e "L" são, respectivamente, o número de restrições de desigualdade e igualdade que devem ser satisfeitas durante a otimização da função objetiva "f". Essas restrições geralmente estão relacionadas aos requisitos hidráulicos do sistema, como equações de conservação de massa e energia, limites de projeto e/ou parâmetros operacionais, limites de carga de pressão nodal ou outras restrições.

Alguns pesquisadores estudam os problemas de otimização através de uma perspectiva multiobjetivo, lidando com a minimização (ou maximização) de mais de uma função ou mesmo lidando com objetivos conflitantes, no qual implica na minimização de algumas funções, ao mesmo tempo que, na maximização de outras.

Cheung *et al.* (2003) forneceram um estudo que demonstra que soluções obtidas para um sistema de abastecimento usando a abordagem multiobjetivo, foram melhores do que as obtidas através de abordagens de objetivo único.

A intenção de um problema multiobjetivo é otimizar (minimizar e/ou maximizar) um número de funções-objetivo simultaneamente (COELLO; LAMONT; VELDHUIZEN, 2007). A formulação geral de um problema multiobjetivo pode ser indicada como na Equação 3.2 (COELLO; LAMONT; VELDHUIZEN, 2007).

$$\text{Min (ou max) } F(X) = (f_1(X), \dots, f_k(X))$$

$$\text{Sujeito a: } g_m(X) \leq 0, \quad m = 1, \dots, M$$

$$h_l(X) = 0, \quad l = 1, \dots, L$$

(3.2)

onde "k" é o número de funções-objetivo.

Cheung *et al.* (2003) apontaram cinco objetivos que constituem um problema multiobjetivo complexo para um SAA: (i) capacidade hidráulica, (ii) integridade física, (iii) flexibilidade, (iv) qualidade da água e (v) economia. Entretanto, o mesmo autor cita que na literatura, a maioria dos estudos multiobjetivos aplicados à otimização do sistema elevatório é representada por dois

pumps, valves and reservoirs, head losses, large variations in pressure values, several demand loads, etc. For this reason, innovative nonlinear optimisation algorithms are becoming more widely explored in optimisation processes of the water supply systems.

objetivos gerais: minimização de custos e maximização de benefícios hidráulicos. Devido à alta carga de custos operacionais no custo total de um sistema elevatório, a otimização de controle pode surgir como um problema específico de minimização de custos.

Coelho e Andrade-Campos (2014) relatam que alguns pesquisadores verificaram na prática que as restrições não devem ser tão rigorosas, nem tratadas como penalidades que possam dificultar o processo de otimização. Em vez disso, os autores ainda citam que os mesmos afirmam que algumas restrições devem ser tratadas como critérios de otimização, levando ao conceito de otimização multiobjetivo.

Os métodos de otimização multiobjetivo têm a vantagem de fornecer um conjunto de soluções ótimas, chamadas de Pareto ótimas, em vez de uma solução ótima exclusiva (COELHO; ANDRADE-CAMPOS, 2014). Isso permite que o operador do sistema analise o conjunto de soluções de Pareto ótimas e escolha uma solução considerando critérios adicionais. Algoritmos evolucionários são geralmente os mais usados para resolver problemas multiobjetivos que incluem modelos de simulação para representar o sistema.

Ao longo dos anos, estudos como de Simpson, Dandy e Murphy (1994), Abebe e Solomatine (1998), Wu e Simpson (2001) concluíram que os Algoritmos Genéticos (AGs) demonstram ser eficazes na resolução de problemas de otimização do projeto de água, porém a busca por soluções ótimas, ou quase ótimas, se torna mais difícil com o aumento da dimensão do problema (COELHO; ANDRADE-CAMPOS, 2014).

Deve-se salientar que alguns estudos tendem a simplificar os problemas para possibilitar a aplicação de diversas técnicas de otimização multiobjetivo. No entanto, Zecchin *et al.* (2007) afirmaram que estudos encontrados na literatura, alcançaram valores mais baixos para a função de custo do sistema aplicando a otimização multiobjetivo. Mas que essas soluções se revelaram inviáveis quando analisadas pelo EPANET – de acordo com o estudo de Savic e Walters (1997) – e Wang e Liu (2012) concluíram de forma semelhante. Por isso, é muito importante focar não apenas no desempenho dos resultados otimizados, mas também, principalmente nos detalhes do projeto sem esquecer os elementos essenciais, a fim de garantir sempre a viabilidade das soluções.

Consequente disso, diversos autores como exemplo Abebe e Solomatine (1998), Wu e Simpson (2001), Cheung *et al.* (2003), Liong e Atiquzzaman (2004), Geem (2006), Simonovic (2010) lidaram com o uso de algoritmos evolucionários na otimização em sistema de água (geralmente, relacionados à distribuição), integrando o simulador hidráulico EPANET para resolver as equações hidráulicas dos sistemas em cada iteração.

Na literatura, a maioria dos trabalhos que lidam com o design de otimização do sistema elevatório consiste em encontrar as melhores estratégias para os elementos de controle, minimizando os custos totais, enquanto satisfazem a demanda dos consumidores em termos de condições de fluxo e pressão (e. g. CEMBRANO *et al.*, 2006; KURITZA, 2017; HENRIQUES, 2018).

Usualmente, o problema de otimização de controle é tratado como um problema de objetivo único, consistindo na minimização dos custos operacionais e no uso de restrições para satisfazer os requisitos do sistema elevatório. No entanto, há trabalhos também que analisam esse tipo de problema como otimização multiobjetivo, através da minimização de custos e da maximização de benefícios hidráulicos (e. g. SAVIC; WALTERS; SCHWAB, 1997; CARRIJO *et al.*, 2004; LÜCKEN; BARÁN; SOTELO, 2004), como foi mostrado anteriormente.

Vamvakeridou-Lyroudia, Savic e Walters (2007) simularam um sistema clássico da literatura e propuseram uma abordagem "mais" construtiva, na qual se deve considerar o reservatório e as suas características físicas e operacionais, como variáveis de decisão em um problema de otimização. Ao passo que, segundo Tsutiya (2006), nos projetos de sistema elevatório a capacidade de armazenamento (o dimensionamento das características físicas) é geralmente definida com base no cenário estático do consumo e com o final de horizonte de projeto.

Em vista disso, como a otimização no sistema elevatório é causada pela otimização das características físicas e operacional do sistema, deve-se levar em conta também as características físicas do reservatório, inclusive as suas regras de operação. Por conseguinte, o método de dimensionamento do volume reservado é uma variável importante para a otimização do sistema.

Vieira e Ramos (2008) complementam constatando que, projetos que busquem otimizar o nexo bomba-armazenamento garantem uma otimização no fluxo contínuo durante a operação diária, além de adaptar o sistema de abastecimento de água a esta alternativa, também reduz a dependência energética e os custos operacionais. Fang, Zhang e Gao (2010) e Moreira (2018) concluíram que, reduções significativas de custos nos sistemas elevatórios de água podem ser obtidas pela otimização da capacidade de armazenamento dos reservatórios, juntamente com o controle ótimo da bomba. Proporcionando, o uso do armazenamento de água (do reservatório) na minimização ou paralisação do bombeamento durante os períodos de pico da demanda de energia elétrica (NYSERDA, 2010). Essa abordagem constitui uma prática comum quando os preços da energia variam ao longo do tempo.

Nesse contexto, Batchabani e Fuamba (2014) apontam que apesar da importância dos reservatórios para a operação eficiente do sistema de bombeamento de água, incluindo seu impacto positivo na eficiência energética, existem poucos estudos especificamente direcionados para identificar as características físicas do reservatório na atribuição da otimização do sistema de bombeamento. Inclusive, nem tratando como variável de decisão em problemas de otimização multiobjetivo de um sistema elevatório (bomba, adutora e reservatório). Já quando se observa o campo de estudo da otimização envolvendo a rede de distribuição, existem múltiplos estudos ligados à otimização multiobjetivo a esse setor (envolvendo as características da rede de distribuição). Mesmo assim, com o estudo bibliográfico, não se encontrou estudos que englobem as características físicas do reservatório (altura, diâmetro e o comportamento da chave boia) como variável de decisão do problema otimizado.

Xu, Chen e Qi (2015) e Vilanova e Balestieri (2015) corroboraram a importância do reservatório para a eficiência do sistema elevatório, quando comentaram a necessidade de estudos que relacionem o volume de reservação com o consumo de energia elétrica nas estações elevatórias. Com isso, é perceptível a relevância de um estudo de eficiência energética no sistema elevatório, inclusive com a eficiência operacional do volume armazenado no reservatório. Além de melhorias na estrutura administrativa / infraestrutura (planta, medidores, bombas, motores, válvulas, canais, tubulações, reservatório, etc.) e da consciência dos consumidores, que em conjunto permitirão reduzir custos e consumo energético em ordens expressivas.

3.6 Ações relacionadas à Eficiência Energética no Sistema Elevatório

Existem diversas ações relacionadas a eficiência energética no setor de saneamento básico, segundo o *Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL)* [2007] as principais quando a diminuição do consumo e custo energético são: (i) a modulação da carga elétrica para fora da ponta horária; (ii) o controle da vazão bombeada em relação à demanda de distribuição ao longo do tempo; (iii) o dimensionamento adequado dos itens físicos/eletromecânicos e (iv) a operação das regras de controle no reservatório. Feldman (2009) corrobora com essas ações, e acrescenta também como medida de eficiência a redução de vazamentos na rede, através da modulação de pressão no reservatório.

Outras medidas para aumentar a eficiência energética (diminuição do consumo e custo de energia) no sistema elevatório podem ser: (i) a substituição de equipamentos ineficientes, (ii) a simples seleção de um sistema tarifário de energia adequado, ou ainda, (iii) a incorporação de fontes de energia renováveis no sistema, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis.

Além destas medidas, Tsutiya (1997) relatou algumas maneiras de minimizar os custos de energia, inclusive reduzindo a altura manométrica do sistema. Em virtude da minimização das perdas de carga por meio da: (i) escolha correta do diâmetro da adutora, assim obtendo uma velocidade econômica do escoamento (velocidades menores reduzem as perdas de carga) ou (ii) limpando e/ou revestindo o tubo, logo reduzindo a rugosidade da tubulação. O autor notou ainda que, quando o coeficiente de Hazen-Williams passa, por exemplo, de 130 para 90, aumenta em 97% os custos anuais de energia elétrica.

Thorton (2012) relata também que, normalmente, o desperdício de energia elétrica ocorrem em diversas etapas do SAA, desde a captação ao consumidor final. Ressaltando pontos como: (i) nos procedimentos operacionais, (ii) na idade dos equipamentos, (iii) nas tecnologias ineficientes utilizadas na manutenção, (iv) no dimensionamento do sistema e (v) no desperdício de água (vazamento e consciência dos consumidores).

Sabendo disso, ações como administrativas devem ser as primeiras medidas a serem tomadas, pois quase não envolvem custos para serem implantadas. Uma vez que são ações referentes a: (i) contratos existentes com as concessionárias de energia elétrica, (ii) alteração da modalidade tarifária, (iii) desativação de instalações sem utilização, (iv) regularização da leitura da conta de energia, ou ainda, (v) entendimentos com as companhias energéticas para redução de tarifas (ABES, 2015). Além disso, analisar as contas de energia nas constatações da demanda faturada, procurando inspecionar o pagamento de multas por ultrapassagem da demanda contratada, e de contratação superior ao realmente necessário (SCHUTZE, 2010).

Para uma eficiência energética da infraestrutura, é indispensável a realização de mudanças nos procedimentos dimensionados e operacionais, tais como: (i) eficiência dimensional dos equipamentos físicos e eletromecânicos; (ii) controle operacional (alteração no bombeamento e ou na chave boia); (iii) automação do sistema; (iv) capacidade de reservação de água no posto horário de ponta do sistema elétrico, entre outras medidas peculiares do sistema em estudo.

Conforme cita Menkes (2004), o montante investido em projeto de eficiência energética permite retorno de aproximadamente 20 a 25% do recurso em curto prazo, podendo possibilitar a longo prazo mais de 100% de retorno. O autor ainda reconhece que a política de eficiência energética requer a consolidação de parcerias em todas as esferas do setor, como o público, o privado e a participação social.

Apesar das enormes contribuições das medidas mencionadas anteriormente, para a melhoria da eficiência energética no sistema elevatório, a dependência desses sistemas de combustíveis fósseis ainda é notória. Conforme cita Coelho e Andrade-Campos (2014), a melhor maneira de tornar esses sistemas energeticamente sustentáveis é através da introdução de fontes de energias renováveis (como foi citado brevemente), ou até mesmo, da extração do excesso de energia disponível usando turbinas. Como consequência, em virtude de um grande número de vantagens (ambientais e econômicas), a implementação da produção local de energia renovável no sistema elevatório está se tornando muito comum, aumentando significativamente o número de estudos sobre este assunto (COELHO; ANDRADE-CAMPOS, 2014).

De todas as medidas apresentadas, algumas delas podem implicar altos custos de investimento, como reposição de equipamentos ou mesmo a incorporação de novos equipamentos. No entanto, algumas não apresentam custos de investimento significativos quando comparadas com os benefícios obtidos (COELHO; ANDRADE-CAMPOS, 2014). Além disso, algumas medidas relacionadas à gestão não precisam de nenhum investimento, o que significa que, em alguns casos, a melhoria da eficiência do sistema elevatório pode ser obtida sem muito esforço.

Em suma, ações em termos de eficiência energética pretendem orientar meios que aperfeiçoem o custo-benefício energético do sistema elevatório, reduzindo o custo efetivo e melhorando o serviço de abastecimento de água. Logo, o estudo usufruiu de uma parte dessas medidas apresentadas, mais especificamente aquelas direcionadas a operação do volume armazenado no reservatório.

METODOLOGIA

4.1 Considerações Iniciais

Os reservatórios de distribuição são projetados para atender as variações da demanda que ocorrem ao longo do dia e, sazonalmente, ao longo dos anos (crescimento da demanda). É demonstrável que o cálculo do volume necessário para um reservatório é, na verdade, uma combinação de duas variáveis: a taxa com qual é alimentado, normalmente por sistemas de estações elevatórias e adutoras, e a taxa com qual a água é demandada no setor abastecido pelo reservatório.

De acordo com ELETROBRÁS (2005), na norma brasileira ABNT NBR 12217 (1994) é estipulado certos critérios para dimensionamento de reservatórios de distribuição, que frequentemente ocasionam em volume com capacidade ociosa. A utilização desta margem de ociosidade pode propiciar uma otimização operacional do volume armazenado, que resulta na omissão total ou parcial do bombeamento no horário da ponta, inclusive em sistemas antigos.

Este tipo de projeto tem como principal objetivo reduzir o consumo de energia elétrica em instalações de bombeamento por meio da melhoria da eficiência operacional dos processos envolvidos no sistema elevatório, tais como a relação entre a bomba, os acessórios, o reservatório e a curva de demanda. Certas medidas adotadas na operação poderão eventualmente propiciar a redução do consumo e custo energético, no horário da ponta e até fora da ponta.

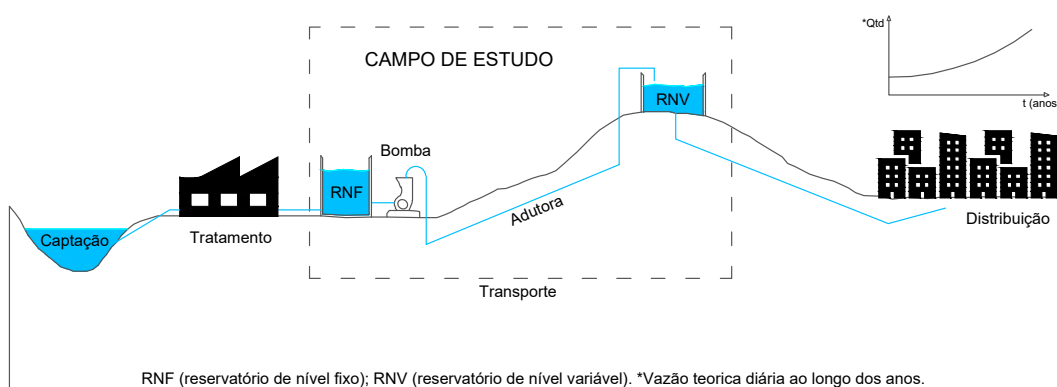
Portanto, num dado sistema que seja possível otimizar a reserva existente, deslocando o bombeamento para fora do horário de ponta, por meio da modulação da vazão, seja viável que, os ganhos com a demanda evitada na ponta justifiquem os investimentos necessários para conseguir tal deslocamento.

Com base nessas informações, a metodologia abordada neste estudo foca em planejar a operação da chave boia do reservatório em cada período (início, meio e fim de projeto), determinando os limites do estoque de água ao longo do período, de modo a atender a demanda (que varia com o tempo) com o mínimo custo de energia e com eficiência operacional do volume armazenado. Antes disso, foi preciso efetuar processos que envolvem simulação e otimização (multiobjetivo), seguido de análise estatística dos resultados (como *cluster* e correlação).

4.2 Modelo Simulado e a Formulação do Experimento

O estudo se enquadra na simulação do esquema apresentado na Figura 3, na qual Vilanova (2012) o classifica como arranjo clássico para estação de bombeamento, e de mesmo modelo proposto por Toledo *et al.* (2008) para a esquematização da otimização do transporte de água com reservatório de distribuição.

Figura 3 – Sistema genérico utilizado no estudo de eficiência energética



Fonte: Elaborada pelo autor.

Em complemento, precisa-se considerar certos dados como: (i) a vazão bombeada e demandada ao longo de um período; (ii) o custo para manter ligada a bomba; (iii) a capacidade volumétrica do reservatório; (iv) as regras de operação no reservatório (valores mínimo e máximo da chave boia); (v) a altura geométrica; (vi) o comprimento da adutora e o tipo do material (foi decidido utilizar o ferro fundido); (vii) as características da bomba e suas regras de operação (liga ou desliga na ponta horária). Um problema de otimização multiobjetivo foi formulado, considerando a minimização do custo total no presente (que representa o custo necessário para o funcionamento de um sistema elevatório de água, cujo o investimento total é dado pelo custo variável da operação mais o custo fixo da implantação do sistema, e uma penalidade caso seja um sistema inviável hidráulicamente) e a maximização do índice de eficiência do reservatório (que é a fração do volume útil médio no reservatório, $V_{rmv_{utilizado}}$ em m^3 , durante o total de " n_p ", este sendo o número de período de análise (sendo 3: início, meio e fim), e em relação a capacidade volumétrica projetada, $V_{rmv_{capacidade}}$ em m^3), conforme apresentado na Equação 4.1 e Equação 4.2.

$$Custo_{total} \approx \left[\sum_{p=1}^{n_p} C_{consumo(p)} \times Fa_{(p)} \right] + [C_{adutora} + C_{reservatorio} + C_{bomba}] = FO_{1,min} \times penalidade \quad (4.1)$$

$$I_{reservatorio} = \frac{\frac{1}{n_p} \times \sum_{p=1}^{n_p} V_{rmv_{utilizado}(p)}}{V_{rmv_{capacidade}}} = FO_{2,max} \quad (4.2)$$

Um dos termos da Equação 4.1 é o custo de consumo de energia elétrica ($C_{consumo}$), em reais (R\$), sendo obtido utilizando a Equação 4.3 em cada período de análise (início, meio e fim de projeto). Há uma outra parcela de consumo energético, a qual não foi enquadrado no estudo, que é a demanda ativa.

$$C_{consumo} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot Hm}{n} \times \Delta t \times TC \quad (4.3)$$

em que γ é o peso específico da água em N/m^3 a $25^\circ C$; Q é a vazão bombeada, em m^3/s ; Hm é a altura manométrica, em metros (m); n é o rendimento da bomba; Δt é o período em horas, fornecendo o tempo em que a bomba permaneceu ligada; e TC é a tarifa de consumo de energia aplicável no horário, em $R\$/kWh$ (reais por quilo watt-hora).

As taxas utilizadas fazem parte da modalidade horo-sazonal verde do grupo A4, com vigência deste o dia 22 de novembro de 2018, conforme a Resolução Homologatória ANEEL nº 2.484 (2018) e a *Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica* (CEEE) do Rio Grande do Sul, sendo apresentadas na Tabela 1. Coura (2007) cita que essa modalidade mostra ser vantajosa quando o consumo no horário de ponta é nulo ou muito baixo, sendo esse um dos anseios da pesquisa, o deslocamento total ou parcial do bombeamento para fora do horário de ponta, por meio da operação do volume armazenado no reservatório.

Tabela 1 – Tarifas de energia elétrica grupo A4 - sem impostos

<i>Modalidade Horária Verde</i>	<i>A4 (13,8/25kV)</i>	
Demanda	R\$/kW	16,94000
Consumo na Ponta	R\$/kWh	1,474700
Consumo Fora de Ponta	R\$/kWh	0,372090

* a escolha com imposto ou sem não iria influenciar na identificação dos padrões, optou-se por utilizar os valores de tarifas sem impostos.

Fonte: Adaptada de CEEE (2018).

Para o custo total do sistema, sendo discutido bastante em fase de projeto, devem ser somados os custos de instalação com os custos de operação. No entanto, esses custos incidem em tempos diferentes e, portanto, é preciso converter financeiramente os custos variáveis em custos fixos. Desta forma, viabiliza a comparação entre as várias alternativas construtivas e, de certo, escolher aquela que apresenta o menor custo total (GOMES, 2009).

Para calcular o valor presente do custo de operação, ao longo dos anos de alcance do projeto, Gomes (2009) indica a utilização do fator de atualização dado pela Equação 4.4. O autor explica ainda que a estimativa dos valores de taxa de juro anual, da taxa de aumento anual do custo de energia e do número de anos do alcance do projeto estão sempre sujeitos a um

determinado grau de incerteza, já que dependem de fatores econômicos, financeiros e políticos – no caso das taxas – e da vida útil dos equipamentos e das obras civis, entre outros fatores.

$$Fa = \left[\frac{(1+e)^N - (1+j)^N}{(1+e) - (1+j)} \right] \times \left[\frac{1}{(1+j)^N} \right] \quad (4.4)$$

onde: Fa é o fator de atualização; " e " é a taxa de aumento anual do custo de energia; " j " é a taxa de juro anual; e " N " é o período de amortização, em anos. Sendo utilizado os valores de 10 e 9%, sugeridos por Gomes (2009), para as taxas de aumento anual de juros e o do custo de energia, respectivamente.

Os custos de instalação dizem respeito à aquisição dos equipamentos elétricos como bombas, instalações hidráulicas, tubulações, válvulas, entre outros, juntamente aos demais gastos como obras de escavação e montagem. Para a composição dos custos de instalação desse estudo se utilizou as fórmulas propostas por Kuritza (2017) (Equação 4.5, Equação 4.6 e Equação 4.7), em que a autora realizou o levantamento junto ao *Departamento Municipal de Água e Esgotos* (DMAE) de Porto Alegre (Rio Grande do Sul), algumas publicações do plano municipal de saneamento básico de Joinville (Santa Catarina), e ainda, algumas empresas atuantes no mercado de bombas e de outros equipamentos de saneamento, como a Maquimotor – Comercial e Técnica LTDA.

O custo da tubulação, somado ao assentamento da linha adutora, é referente ao preço da tubulação em ferro fundido dúctil da classe K7 (material que foi decidido a ser utilizado), com junta JGS, sendo obtida pela Equação 4.5¹.

$$C_{adutora} = (0,0023 \cdot D^2 + 0,5306 \cdot D + 94,999) \times L \quad (4.5)$$

onde: $C_{adutora}$ é o custo de implantação da tubulação, em R\$; " D " é o diâmetro da adutora, em milímetros (mm) e " L " é o comprimento da adutora, em metros (m).

A implantação do reservatório envolve também os custos com escavações, obras civis, material estrutural, entre outros. Ressalta que, a capacidade total de reservação projetado foi para a demanda de final de projeto, acrescentado de 25% deste como reserva de emergência, estando dentro dos valores observado em alguns países segundo Tsutiya (2006), simplificando assim os procedimentos de comparação entre sistemas com capacidade volumétrica diferentes.

¹ KURITZA, J. C. **Sistemas de bombeamento de água com velocidade de rotação variável**. 2017. 161 f. Tese. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2019, página 76 capítulo 4 - na equação (24) onde se lê " L " o comprimento da adutora em metros, leia-se " D " o diâmetro da adutora em milímetros. E do resultado multiplique pelo comprimento da adutora " L " em metros, obtendo o custo da adutora em R\$.

O cálculo do custo de implantação do reservatório foi pela Equação 4.6 e para o cálculo do custo de implantação do grupo motor-bomba foi utilizada a Equação 4.7.

$$C_{reservatorio} = -0,1202 \cdot (V_{rmv_{capacidade}})^2 + 345,94 \cdot V_{rmv_{capacidade}} + 63443 \quad (4.6)$$

$$C_{bomba} = 3,1688 \cdot Pot^2 + 388,55 \cdot Pot + 9022,1 \quad (4.7)$$

onde: $C_{reservatorio}$ é o custo de implantação do reservatório, em R\$; e " $V_{rmv_{capacidade}}$ " é a capacidade volumétrica projetada, em m^3 ; C_{bomba} é o custo de implantação do conjunto motor-bomba, em R\$; e " Pot " é a potência da bomba instalada, em kw .

4.2.1 Descrição do Modelo Utilizado

O modelo simulado foi dimensionado de modo a atender as exigências de demanda de água da população abastecida ao longo de 30 anos, e sendo analisadas três períodos de demanda de água: 1 – baixa; 2 – média; 3 – alta. O período de baixa demanda corresponde ao ano inicial de operação do sistema, e é caracterizado por uma pequena população abastecida, um baixo consumo de água, bom rendimento do funcionamento da bomba e pequena rugosidade na tubulação; nos demais períodos subsequentes, apresenta-se um aumento da população abastecida, do mesmo modo, um envelhecimento da tubulação e, incessantemente, uma "boa" manutenção eletromecânica mantendo as características físicas da bomba (curva da bomba e do rendimento).

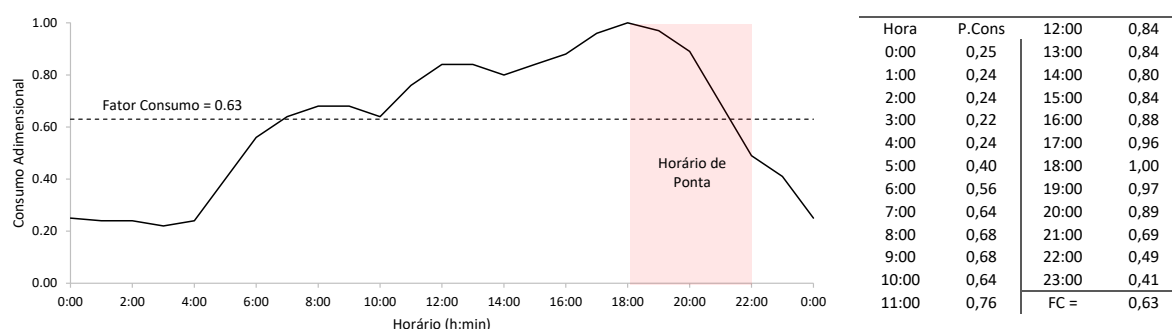
A faixa do coeficiente de rugosidade da adutora de ferro fundido, de acordo com Azevedo Netto (1998), é em torno de 130 a 105, sendo a utilizada no estudo, a variável entre a faixa de 130 a 110, igualmente proporcional ao envelhecimento da tubulação e possíveis incrustações.

O modelo de crescimento populacional utilizado para calcular a população dos demais anos, partindo de uma população inicial, foi o método geométrico deduzido por Alem Sobrinho e Tsutiya (1999), o qual se mostra mais ajustável em cidades de crescimento rápido. Na pesquisa estipulou-se o incremento da população em 5,0% ao ano, a fim de acentuar a disparidade populacional entre os diferentes períodos (início, meio e fim), o que corresponde a uma taxa usual de 1,05 no crescimento geométrico (usualmente, observado em municípios de médio porte [CENSO, 2000 e CENSO, 2010]).

No consumo per capita, que é a quantidade média de água utilizada por cada habitante em um dia, expresso em *litros/habitante/dia*, adotou-se um consumo médio variando entre 150 e 200 *l/hab/dia* (*apud Companhia de Água e Esgoto da Paraíba (CAGEPA)*, como base para as cidades com população inferior a 50 mil habitantes), considerando um aumento do consumo com o aumento da população.

Já a vazão teórica horária é estimada de acordo com o consumo médio per capita adotado, com o número de habitantes e com a curva de consumo ao longo do dia, esta apresentada na Figura 4 e sendo mantida para todo o experimento, assim como as propriedades padrão da água.

Figura 4 – Curva de padrão de consumo, obtida junto ao DMAE/PoA



Fonte: Adaptada de Kuritza (2017).

Em todos os experimentos foram atribuídos às condições de: 01 – duração da simulação de 240 horas (10 dias) para cada período (início, meio e fim), sendo desconsiderados os três primeiros dias como forma de amortecer os efeitos da inicialização da simulação computacional; 02 – intervalo de tempo de cálculo hidráulico igual a 1 hora; 03 – início da simulação às 00:00h; 04 – adotou o nível inicial do reservatório de distribuição como sendo de 1,00 m; 05 – considerou a bomba iniciando simulação ligada; e 06 – horário de ponta entre 18:00h e 22:00h. E as demais características do Quadro 1.

Quadro 1 – Características temporais do sistema simulado

	<i>Período 1</i>	<i>Período 2</i>	<i>Período 3</i>
Tempo [dentro de <i>anos</i>]	00-10	10-20	20-30
Rugosidade da tubulação [<i>C</i>]	130	120	110
Consumo <i>per capita</i> [em <i>l/hab/dia</i>]	150	175	200
Tarifa fora de ponta [em <i>R\$/KWh</i>]	0,37209	0,37209	0,37209
Tarifa na ponta [em <i>R\$/KWh</i>]	1,47470	1,47470	1,47470
Consumo base [em <i>l/s</i>]	$Q_{base,00-10}^*$	$Q_{base,10-20}^*$	$Q_{base,20-30}^*$

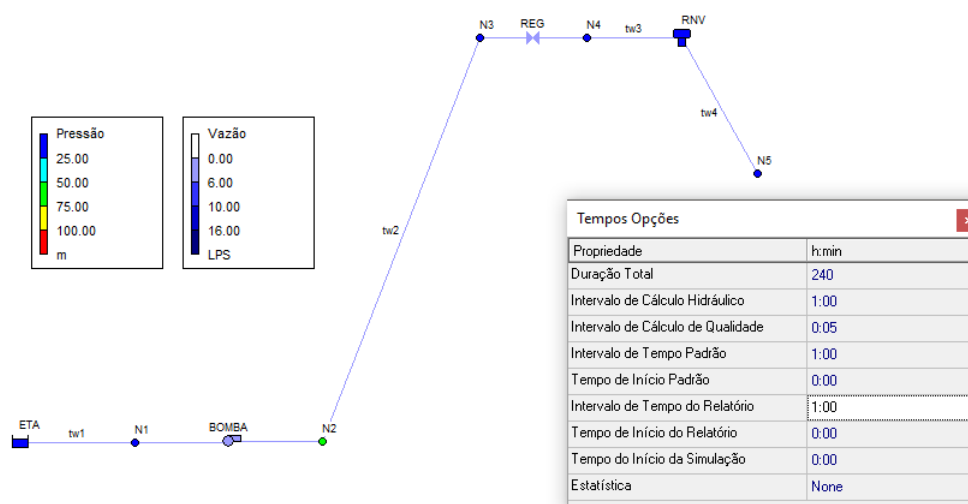
* Q_{base} é o consumo teórico médio diário de água.

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2.2 Procedimentos para o Dimensionamento do Sistema

A Figura 5 apresenta o sistema a ser dimensionado representado no EPANET, em que a estação elevatória de água 'BOMBA' (fornecida por um único conjunto motor-bomba) recalca água para o reservatório RNV e o mesmo distribui por gravidade para a sua rede de distribuição. Na sequência, descrevem-se as metodologias utilizadas para o dimensionamento do sistema.

Figura 5 – Sistema simulado no EPANET2



Fonte: Elaborada pelo autor.

Primeiramente, é efetuado o dimensionamento do reservatório elevado, determinando a capacidade volumétrica do reservatório para o final de demanda (terceiro período 20-30 anos), segundo a metodologia da *ABNT NBR 12217 (1994)* e a metodologia proposta por Gomes (2012). Ressaltando que o reservatório inferior (ETA), possui cota topográfica e nível d'água fixos, com o valor estipulado em 0,00 metro e 2,00 metros, respectivamente.

Os procedimentos e recomendações utilizados pela *ABNT NBR 12217 (1994)* para o cálculo da capacidade de reserva são os parâmetros mostrados a seguir, que também são recomendações de Tsutiya (2006). Primeiramente, é realizado o cálculo do consumo teórico médio de água, utilizando a Equação 4.8, frisando novamente que o dimensionamento da capacidade leva em conta que a população e o consumo diário são de final de projeto (terceiro período 20-30 anos).

$$Q_{tm} = \frac{Pop \cdot q}{24 \times 1000} \quad (4.8)$$

em que: Q_{tm} é o consumo teórico médio de água, em m^3/h ; Pop é a população da área abastecida; q é o consumo médio diário *per capita*, em $L/hab/dia$. Esse cálculo auxilia na

determinação da capacidade volumétrica do reservatório elevado, determinado por meio da Equação 4.9.

$$V_{rv_{capacidade}} = \left(\frac{k_2 - 1}{\pi} \right) \times (24 \times k_1 \times Q_{tm}) \times 1,2_{seguranca} \times (1 + 0,25_{emergencia}) \quad (4.9)$$

em que: $V_{rv_{capacidade}}$ é a capacidade de reservação em m^3 ; k_1 é o coeficiente do dia de maior consumo, no valor de 1,2; e k_2 é o coeficiente da hora de maior consumo, no valor de 1,5. Em seguida é aplicado a esse valor o fator de segurança de 1,2 conforme recomendações da *ABNT NBR 12217 (1994)*, e o acréscimo de 25% deste como reserva de emergência (já descrito anteriormente).

O método proposto por Gomes (2012) segue o princípio do volume diferencial do método da CETESB (1987), no entanto, com uma modificação em que se baseia na paralisação do bombeamento de água no horário de ponta do custo energético. Ou seja, a diferenciação (Equação 4.10) da vazão considerando bombeamento durante "n" horas do dia e uma distribuição de água contínua de 24 horas, determina a capacidade volumétrica do reservatório.

$$V_{rv_{capacidade}} = \sum (Volume_{bombeado} - Volume_{distribuido})_{[0,24]} \times 1,2_{seguranca} \times (1 + 0,25_{emergencia}) \quad (4.10)$$

Para desenvolver esse método é preciso conhecer o consumo teórico médio diário de água (Equação 4.11) e a curva de demanda (Figura 4, pag. 45), que com o resultado do somatório da multiplicação desses dois parâmetros será o volume distribuído dentro de 24 horas, enquanto que esse tem que ser o mesmo volume bombeado dentro de "n" horas. É sabido que a vazão de bombeamento, em "n" horas, geralmente é constante, já o caso da vazão de distribuição é variável ao longo das 24 horas do dia, é exatamente por isso que se consegue encher o reservatório em um certo período e esvaziá-lo em outro.

$$Q_{td} = \frac{Pop \cdot q}{24 \times 1000} \times k_1 \quad (4.11)$$

em que: Q_{td} é o consumo teórico médio diário de água, em m^3/h ; Pop é a população da área abastecida; q é o consumo médio diário per capita, em $L/hab/dia$; e o valor de 1,2 para k_1 .

Dessa forma, o somatório positivo da diferença entre a vazão de entrada e a vazão de saída determina a capacidade volumétrica do reservatório (para mais detalhe leia TSUTIYA, 2006²). Porém, de acordo com recomendações da *ABNT NBR 12217 (1994)* aplicou o fator de

² TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de água** In: "Reservatórios de distribuição de água". São Paulo.

1,2 ao volume de reservação determinado para considerar as incertezas dos dados utilizados, e também o acréscimo de 25% como reserva de emergência.

Vale observar que tanto a metodologia proposta na *ABNT NBR 12217 (1994)* como por Gomes (2012) não são considerados os dados de vazão de bombeamento reais na determinação da capacidade de reservação, e sim a média da vazão distribuída diária teórica – de final de projeto – e muito menos o fator detalhado do consumo de energia elétrica ao longo de todo o horizonte de projeto.

O reservatório, é do tipo cilíndrico e possui as seguintes características para o experimento simulado: 1 – o diâmetro da base depende da altura do reservatório, na qual esse é fixado um valor mínimo de 2,5 metros (valor usualmente observado em projetos), e que esta relação tem um valor variado entre 1 a 20 (valores estimados); 2 – o nível de controle mínimo também depende da altura, possuindo um valor de 5 a 25% do nível máximo para certa capacidade de reservação; 3 – o nível de controle máximo também depende da altura, possuindo um valor de 75 a 100% do nível máximo para certa capacidade de reservação. As três características do reservatório são variáveis de decisão do problema de otimização multiobjetivo previamente apresentado, sendo utilizado um modelo acoplado a um algoritmo genético para a sua resolução, atendendo as seguintes restrições da Equação 4.12³ (em que a segunda expressão é deduzida da formulação do volume de um cilíndrico e da área superficial mínima do mesmo).

$$\left\{ \begin{array}{l} 1 \leq \left(\frac{\text{diâmetro}_{\text{reservatorio}}}{\text{altura}_{\text{reservatorio}}} \right) \leq 20 \\ \text{diâmetro}_{\text{reservatorio}} = \left[\frac{\left(\frac{4}{\pi} \right) \times V_{\text{rmv}_{\text{capacidade}}}}{\left(\frac{\text{diâmetro}_{\text{reservatorio}}}{\text{altura}_{\text{reservatorio}}} \right)^2} \right]^{1/3} \end{array} \right. \quad (4.12)$$

Para conhecer as características da bomba foram necessários estimar as condições de contorno da altura manométrica nominal, da vazão nominal e do rendimento nominal da bomba. Utilizou a Equação 4.13 como condição de contorno da altura manométrica nominal da bomba (Hm_{nominal}), na qual a perda de carga é obtido pela equação de Darcy-Weisbach, para a parte da perdas contínuas, e acrescido 10% a este valor considerando como perda de carga localizada (que, na prática, são estimadas mediante a uma percentagem das perdas contínuas, e que tal valor varia, normalmente, entre 5 e 15%, conforme cita GOMES, 2009), e o termo altura geométrica (hg) sendo a diferença entre a cota da tubulação de entrada no RNV e do nível da água na ETA.

$$Hm_{\text{nominal}} = hg + \left[\frac{8}{\pi^2 g} \cdot f \cdot L \cdot \frac{Q^2}{D^5} \right] \times 1,10 \quad (4.13)$$

Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

³ O termo **altura do reservatório** refere-se a grandeza altura (dimensão) do reservatório. E quando estiver escrito elevação do reservatório é a mesma coisa de cota do reservatório, aqui fixado na base.

em que: hg é a altura geométrica, em metros; g é a aceleração da gravidade, igual a $9,81 \text{ m/s}^2$; f é o fator do perda de carga (adimensional) que pode ser obtido através da Equação 4.14 (fórmula de Colebrook-White para regime de escoamento turbulento); L e D são o comprimento e diâmetro da adutora em metros, respectivamente; Q é a vazão de bombeamento, em m^3/s .

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (4.14)$$

em que: ε é a rugosidade absoluta do tubo, em milímetro, o valor médio " ε " utilizado aqui (como condição de contorno) é do ferro fundido, tubo novo, de $0,375 \text{ mm}$ (PORTO, 2006); e Re é o número de Reynolds (adimensional), dado pela Equação 4.15, na qual ν é a viscosidade cinemática da água, igual a $1,005E-6 \text{ m}^2/\text{s}$ a 20° C e 1 atm (WHITE, 2007).

$$Re = \frac{4 \times Q}{\pi \cdot \nu \cdot D} \quad (4.15)$$

Nesta ocasião, pode-se conhecer $Hm_{nominal}$ teórica para um certo sistema onde conhece a altura geométrica, o comprimento e o diâmetro da adutora (nesse estudo o diâmetro da adutora é representado com variável de decisão no problema de otimização previamente apresentado), e com uma razoável percepção da vazão de bombeamento ao longo da vida útil do projeto. Desses parâmetros, a vazão é o mais enigmático, porque é uma grandeza que varia com o horizonte de projeto e com o tempo de bombeamento.

Mas para um conhecimento teórico da escolha da altura manométrica da bomba e dar continuidade ao experimento, nesta pesquisa a metodologia utilizada para ter um conhecimento aceitável da vazão bombeada de uma estação elevatória em sua vida de projeto, como a vazão ótima de bombeamento foi baseado nessa sequência apresentado abaixo.

1. Calcula a população nos três períodos de projeto (início, meio e fim), conforme o método geométrico, descrito por Alem Sobrinho e Tsutiya (1999), com taxa de crescimento de 5% ao ano, e obtendo a população de ano 0, 10 e 20.

$$Pop_{ano} = Pop_{ano=0} \times \exp^{(taxa \times ano)} \quad (4.16)$$

2. Em seguida, obtém o consumo teórico médio diário dos três períodos (início, meio e fim) pela Equação 4.11 (pag. 47), onde tanto a população como o consumo *per capita* varia ao longo dos três períodos, em conformidade com o resultado anterior e o Quadro 1 (pag. 45).
3. Calcula a média destes três valores de consumo teórico médio diário, na sequência a converte para unidade de $[\text{m}^3/\text{dia}]$ multiplicando pelo valor de 86,4.

4. E finaliza aplicando a Equação 4.17 descrita por Kuritza (2017)⁴, que segundo a autora é uma estimativa da vazão nominal para bombas com inversor de frequência. Aplicando aqui uma modificação na equação proposta pela autora, que é o acréscimo do termo $k_2 = 1,5$. Por motivo que a autora utiliza limite de frequência entre 70 a 120% da frequência nominal, no experimento em estudo o limite máximo é estipulado em 100%. Tal modificação mostrou-se adequada ao estudo, que a teve uma validação pela calibração com curvas do mercado.

$$Q_{nominal} = 0,0696 \times \overline{Q_{td}} \times k_2 \quad (4.17)$$

Assim, para um sistema elevatório de certo comprimento e diâmetro de adutora e uma estimativa da vazão nominal pode-se conhecer o valor da perda de carga teórica ($\Delta h = Hm - hg$) e, por conseguinte, com a altura geométrica, a sua altura manométrica nominal, também teórica. Com o resultado da perda de carga teórica calculada, é feito uma validação do valor, comparando com o limite descrito por Kuritza (2017) (Equação 4.18) – faixa otimizada da perda de carga – e se por acaso estiver fora do limite, escolhe o valor do limite ultrapassado.

$$0,002 \times \left(\frac{L}{hg}\right)^{0,9696} \leq \frac{\Delta h}{hg} \leq 0,0039 \times \left(\frac{L}{hg}\right)^{0,9696} \quad (4.18)$$

Na sequência, com a altura manométrica nominal teórica e a vazão nominal de bombeamento teórica aplicamos as equações abaixo, descritas por Kuritza *et al.* (2017), e obtém-se a curva da bomba e a curva do rendimento, a partir de um ponto ótimo ($Q_{nominal}, Hm_{nominal}, n_{nominal}$), o ponto ótimo estimado para o rendimento nominal foi de 75,5% (valor usualmente observado em bombas grandes, típico de uma estação elevatória).

$$\frac{Hm}{Hm_{nominal}} = 1,245 - 0,265 \times \left[\frac{Q}{Q_{nominal}}\right]^2 \quad (4.19)$$

$$\frac{n}{n_{nominal}} = -0,995 \times \left[\frac{Q}{Q_{nominal}}\right]^2 + 1,997 \times \left[\frac{Q}{Q_{nominal}}\right] + 0,025 \quad (4.20)$$

Com as respectivas curvas da bomba (Equação 4.19) e do rendimento da bomba (Equação 4.20), pode-se, também, conhecer as curvas do mesmo para uma variação da frequência de rotação da bomba (aplicando a Equação 4.21, equações da Lei de semelhança), quando dispõe de um inversor de frequência. Sendo que foi estipulado uma frequência otimizada de rotação em

⁴ KURITZA, J. C. **Sistemas de bombeamento de água com velocidade de rotação variável**. 2017. 161 f. Tese. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2019, página 118 capítulo 5 - na equação (39) onde se lê "V" o volume consumido, em m^3/dia , aqui a notação será " $\overline{Q_{td}}$ ", também em m^3/dia .

dois períodos (início e meio), esse valor da frequência de rotação é representado como variável de decisão no problema de otimização e previamente apresentado.

$$\begin{cases} \frac{Q_{freq2}}{Q_{freq1}} = \frac{freq2}{freq1} \\ \frac{Hm_{freq2}}{Hm_{freq1}} = \left[\frac{freq2}{freq1} \right]^2 \\ \frac{(0.94-n_{freq2})}{(0.94-n_{freq1})} \approx \left(\frac{Q_{freq1}}{Q_{freq2}} \right)^{0.32} \end{cases} \quad (4.21)$$

em que: $freq$ é a frequência de rotação em dois valores distintos, índices "1" e "2", e os índices " $freq1$ " e " $freq2$ " são os valores da grandeza (Q, Hm, n) na frequência base e na nova frequência de rotação, respectivamente.

O período de início e meio foram estipulados para ter uma variação no limite entre 70 a 100% da rotação, e fixado a rotação de 100% para o período final. As equações utilizadas para encontrar as novas curvas para a uma variação de frequência, são as mostrada na Equação 4.21.

O intuito de um sistema de bombeamento de água é transportar uma certa vazão (Q) ao longo de uma certa distância de comprimento (L), apresentando ou não uma certa diferença topográfica (Hg), visando segurança, economia, funcionalidade e sustentabilidade. Como o objetivo é melhor entender, em análise geral, a eficiência hidro energética do sistema de bombeamento e a sua relação com o volume do reservatório ($V_{rmv_{capacidade}}$) (para um certo método de dimensionamento do reservatório elevado), foi simulado diversas vezes o sistema, apresentado na Figura 5 (pag. 46), para diversas demanda de consumo (Q , tendo a população a sua principal variante), variando também algumas características físicas como a altura geométrica (Hg) e o comprimento da adutora (L), enquanto que o diâmetro ótimo é uma variável de decisão. O arranjo para essas características está apresentado no Quadro 2, totalizando em 160 combinações de sistema simulado.

Agora dispõe-se de toda a metodologia descrita para o dimensionamento da estação de recalque, faltando somente algumas descrições no ponto de consumo. Que para a simulação do reservatório e a sua operação (esvaziamento e enchimento) no EPANET, foi adicionado um nó com um padrão de consumo, estando a uma cota abaixo do reservatório e com um desnível estimado no valor igual a 3 m. Na finalidade de se criar uma variação de consumo ao longo do dia (Figura 4 pag. 45) e nos períodos (de início, meio e fim de projeto). Além do mais, considerando em hipótese alguma a falta de água neste ponto de consumo.

Quadro 2 – Variação do valor dos parâmetros do sistema utilizado na pesquisa

Reservatório Elevado	
01	$V_{rmv_{capacidade}}$, por meio da NBR 12217 (1994)
02	$V_{rmv_{capacidade}}$, de acordo com Gomes (2012)

() Dimensionamento do volume

	Valores adotados
Altura geométrica [m]	25 / 50 / 100 / 200
Comprimento da adutora [km]	1 / 5 / 10 / 20 / 30
População final de projeto [hab]	2 mil / 5 mil / 10 mil / 25 mil

() Variações das variáveis do modelo utilizado no experimento.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para a simulação hidro energética do sistema é preciso acrescentar três informações bases: a primeira é informar o valor do preço da energia; a segunda é associar um padrão de preço de energia à bomba (Figura 6 pag. 54), já que o custo da tarifa varia no horário de ponta, tendo sido considerada, aproximadamente, 4 vezes mais elevada entre as 18 e 22 horas; e a terceira é introduzir regras de controle que realizem a parada do funcionamento da bomba durante esse horário de ponta e ou ligue-a / desliga-a para certo nível de água no reservatório.

Estas regras não podem estar em desacordo com o grau da eficiência do reservatório na função básica, que é de flutuar o seu nível (objetivo da Equação 4.2 pag. 41). Sendo estipulado que a flutuação do nível do reservatório deve funcionar variando acima de 50% para ter uma "boa eficiência" de sua função base, correspondendo a uma das funções-objetivo do problema de otimização, e que é apresentado no subitem seguinte.

O sistema está descrito em cima de 3 cenários de regra de operação (Figura 7 pag. 55) – também representando como variável de decisão no problema de otimização previamente apresentado – em que se pode optar por um único cenário em todo o projeto ou alterna-lo ao longo dos três períodos (início, meio e fim), buscando o melhor domínio de solução para o problema proposto.

Outras observações do sistema são as tubulações de ligações ($tw1$, $tw2$ e $tw3$), elas apresentam características físicas e temporais, estas e as demais são apresentadas na Tabela 2. Assim, concluem-se todos os procedimentos para o dimensionamento do sistema, no subitem seguinte é comentado o esboço da simulação computacional.

Tabela 2 – Características físicas do sistema simulado

id	Elevation [m]	Demand [l/s]	Pattern [num]
N1	0.00	0.00	-
N2	0.00	0.00	-
N3 / N4	hg^* (entrada)	0.00	-
N5	$hg^* - 3$ (entrada)	q^* (entrada)	#1

(a) Característica dos nós no modelo.

id	Elevation [m]	Init_Level [m]	Min_Level [m]	Max_Level [m]	Diameter [m]
ETA	0.00	2.00	2.00	2.00	-
RNV	hg^* (entrada)	1.00	min^{**} (otimizado)	max^{**} (otimizado)	DN_Tank^{**} (otimizado)

(b) Característica dos reservatório no modelo.

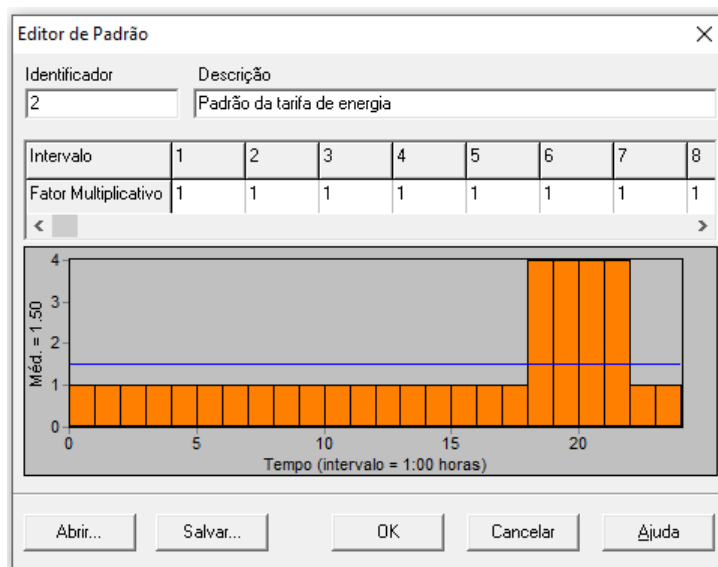
id	Node1 [str]	Node2 [str]	Length [m]	Diameter [mm]	Roughness [num]
$tw1$	ETA	N1	1.00	$D_{adutora}^{**}$ (otimizado)	C^{***} (período)
$tw2$	N2	N3	L^* (entrada)	$D_{adutora}^{**}$ (otimizado)	C^{***} (período)
$tw3$	N4	RNV	1.00	$D_{adutora}^{**}$ (otimizado)	C^{***} (período)
$tw4$	RNV	N5	1.00	300	C^{***} (período)

(c) Característica das tubulações no modelo.

*** característica que depende do período (início, meio e fim), ** variável de decisão no problema otimizado,
* característica física de entrada no sistema.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 6 – Padrão de preço de energia, EPANET2



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2.3 Descrição da Simulação Computacional

Na prática, a modelação de uma estação elevatória se reduz ao estudo de um esquema simplificado da mesma (Figura 3 pag. 41), cuja bomba, adutora, reservatório e um ponto de consumo se associam os parâmetros adequados para reproduzir, o mais fielmente possível, seu comportamento efetivo.

Esta simulação operacional e energética do estoque de água no reservatório foi representada no pacote Programmer's Toolkit do EPANET2, que é uma biblioteca de link dinâmico (DLL) com funções que permitem aos desenvolvedores personalizar o EPANET2 para suas próprias necessidades. Funções que podem ser incorporadas em aplicativos Windows de 32 bits gravados em C / C ++, Visual Basic, Python ou qualquer outra linguagem que possa chamar funções dentro de uma DLL do Windows, na Figura 8 vemos para o caso da linguagem Python.

O kit de ferramenta é útil para o desenvolvimento de aplicativos especializados, como otimização ou modelos de calibração automatizados que exigem a execução de muitas análises, e permite obter valores de variações operacionais, como vazões, pressões, nível da água nos reservatórios, simulação das bombas hidráulicas e custos com despesa de energia elétrica. A estas aplicações é necessário sistematizar as informações de acordo com a Figura 9, onde descreve as etapas relevantes nas simulações feitas pelo toolkit do EPANET2.

Esta simulação tem como objetivo identificar a relação hidro energética do sistema com o reservatório, para diferentes demandas de consumo ao longo do horizonte de projeto. Para isso, precisa-se lembrar que o sistema apresenta certas características que são determinantes em seu custo, entre elas as principais são: a altura geométrica (Hg), o comprimento (L) e o diâmetro

Figura 7 – Cenários de controle programado, EPANET2

Cenário 01 → Restrição nível;

RULE 1 IF TANK RNV LEVEL <= VALORMINIMO THEN PUMP BOMBA STATUS IS OPEN	RULE 2 IF TANK RNV LEVEL >= VALORMAXIMO THEN PUMP BOMBA STATUS IS CLOSED
--	--

Cenário 02 → Restrição ponta horária;

RULE 1 IF SYSTEM CLOCKTIME >= H PM AND SYSTEM CLOCKTIME <= H + Dh PM THEN PUMP BOMBA STATUS IS CLOSED PRIORITY 1	RULE 2 IF SYSTEM CLOCKTIME >= H + Dh PM THEN PUMP BOMBA STATUS IS OPEN
--	--

Cenário 03 → Restrição ponta horária (Prioridade 01) e nível;

RULE 1 IF TANK RNV LEVEL <= VALORMINIMO THEN PUMP BOMBA STATUS IS OPEN	RULE 3 IF SYSTEM CLOCKTIME >= H PM AND SYSTEM CLOCKTIME <= H + Dh PM THEN PUMP BOMBA STATUS IS CLOSED PRIORITY 1
RULE 2 IF TANK RNV LEVEL >= VALORMAXIMO THEN PUMP BOMBA STATUS IS CLOSED	

* *H*, *Dh*, *VALORMINIMO* e *VALORMAXIMO* são variáveis de decisão no problema de otimização previamente apresentado

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 8 – Pacote python do programmer's toolkit para o EPANET2

```

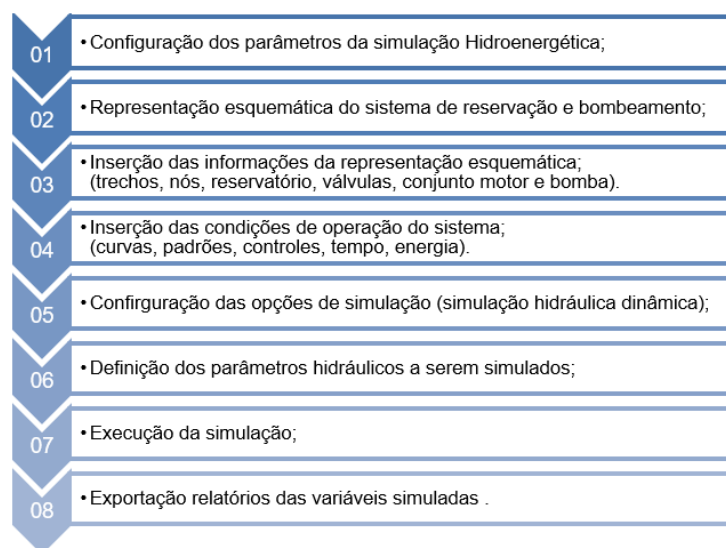
Terminal
C:\GitHub_Projects\IPH_AGEPANET>pip search epanet
+ EPANET (0.4.0.1dev) - EPANET 2.0 calls from python
x epanet-python (0.1.0.dev0) - Low-level Wrapper for EPANET
EPANET2 (0.4.0.1dev) - EPANET 2.0 calls from python
EPANETTOOLS (0.9.2) - Epanet 2.0 Python calling interface
epynet (1.0) - Vitens EPANET 2.0 wrapper and utilities
C:\GitHub_Projects\IPH_AGEPANET
  
```

Fonte: Elaborada pelo autor.

(D) da adutora, a bomba (aqui se referindo mais as suas curvas), o volume do reservatório ($V_{rnv_{capacidade}}$), as regras de controle e o consumo. O estudo buscou entender qual a relação do volume do reservatório e as suas regras de controle com a eficiência energética e hidráulica, de modo que as outras características, em conjunto a essas duas, estejam otimizadas no sentido da Equação 4.1 e Equação 4.2 (pag. 41).

Sendo exatamente na simulação computacional que se utiliza o seu potencial numérico, por meio da implementação de um algoritmo escrito na linguagem *Python 3.6* com o pacote Programmer's Toolkit do EPANET2, onde diversas funções simulam o sistema (Figura 3, pag. 41) e, paralelamente, o otimiza de acordo com as delimitações do algoritmo genético. Este apoiado

Figura 9 – Sistematização das simulações no toolkit do EPANET2



Fonte: Adaptada de Moreira (2018).

na otimização multiobjetivo da formulação proposta (Equação 4.1 e Equação 4.2, pag. 41), no espaço definido pelas possíveis soluções do sistema e na mecânica da seleção natural. Isso é possível por meio de estratégias como *reprodução*, *mutação* e *seleção*, procurando aumentar a *aptidão* dos *seres* de uma *população* de dentro do espaço definido, *seres* estes que representam soluções candidatas do sistema (Figura 5, pag. 46).

Para que esta otimização seja alcançada, algumas restrições devem ser satisfeitas sendo elas, as leis da física, pelas quais o funcionamento da instalação elevatória se rege, o consumo de água que é necessário satisfazer, que varia ao longo do dia e o período referente, as condições iniciais e finais do nível de água no reservatório servido no dia, determinando que se inicia e termina com o mesmo nível, melhor dizendo, tendo periodicidade no nível.

Caso alguma restrição seja violada, o algoritmo atribui uma penalidade que é o acréscimo num valor de 20% à função custo total (Equação 4.1, pag. 41) desta solução por quantas vezes violou as restrições no horizonte de período (início, meio e fim). Deste modo, atua na violação, mas não torna esta solução inviável frente às demais soluções do modelo simulado.

Dessa forma, o algoritmo foi programado para obter os valores otimizados de 19 variáveis de decisão (sendo apresentadas na Figura 10 pag. 56 e discretizadas no Quadro 3 pag. 60), suficientes para descrever a operação nas 24 horas do dia em três períodos diferente (início, meio e fim) do sistema (Figura 5, pag. 46), no horizonte de 30 anos de operação. Assim, obtendo um conjunto de soluções a partir da otimização multiobjetivo, onde buscou-se maximizar o uso do reservatório (Equação 4.2, pag. 41) e minimizar o custo total (Equação 4.1, pag. 41). Conseqüentemente, minimizando o custo de operação que está ligado ao consumo de energia, tendo em conta a existência da variação da tarifa elétrica e do consumo de água ao longo do dia.

A obtenção de uma solução ótima deverá estar sempre em concordância com as restrições impostas tanto operacionais do sistema como hidráulicas e físicas. Visto isto, questões como, qual a combinação ideal do funcionamento da bomba nos diversos períodos, quais os níveis e horário de início e fim de operação do sistema elevatório, quais os níveis de altura de água ideais nos diversos período que satisfazem as necessidades do consumo, conseqüentemente, as dimensões do reservatório, e qual o diâmetro ótimo da adutora são questões com o qual a otimização, pelo algoritmo genético desenvolvido, buscou encontrar um conjunto de soluções ótimas de Pareto. O Quadro 3 (pag. 60) apresenta o espaço de busca de cada uma das 19 variáveis de decisão. Considerando uma precisão de duas casas decimais nos valores possíveis destas variáveis, foram estimadas 44 quatrilhões de combinações para um único sistema simulado (sendo que foram 160 sistemas).

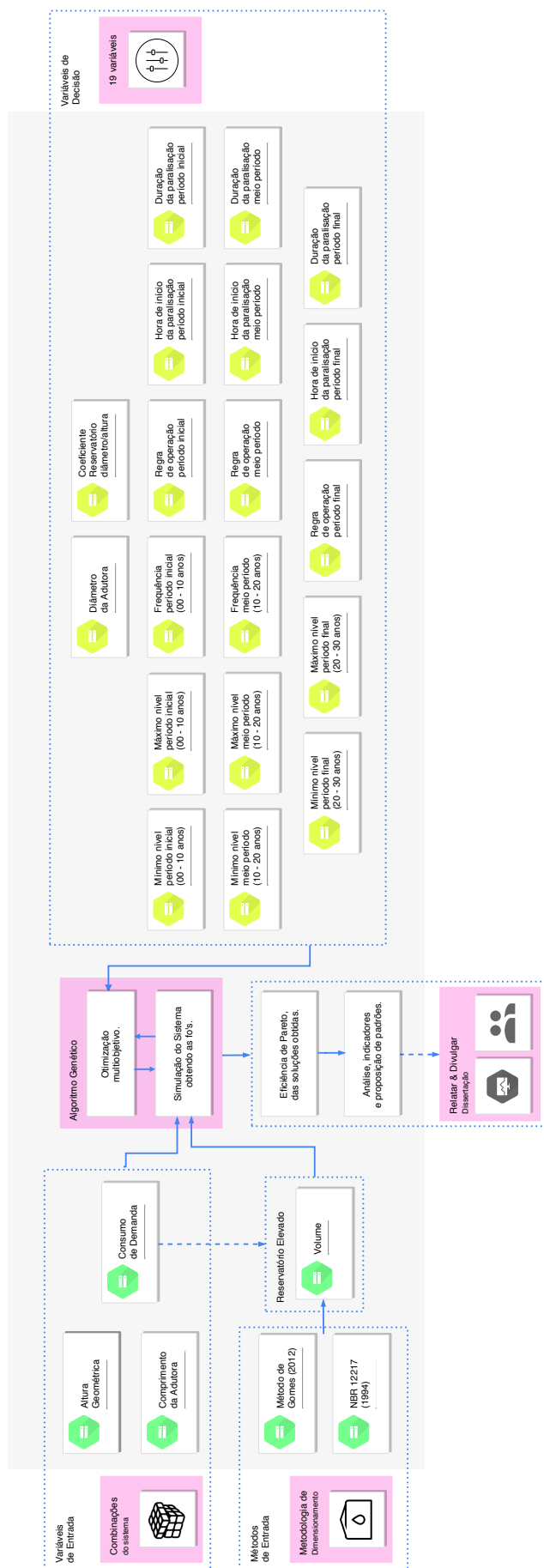
O algoritmo é sucintamente apresentado na Figura 11 (pag. 57), inclusive melhor descrito no Apêndice A. Recomenda-se a leitura para um entendimento mais aprofundado do experimento.

No geral, o esquema da simulação computacional está descrito na Figura 10 (pag. 56). Inicialmente é delimitado o sistema sendo definidos os valores de comprimento da adutora, altura geométrica, consumo de demanda ao longo de 30 anos e a metodologia de dimensionamento do reservatório. Na sequencia são obtidos os valores otimizados das 19 variáveis de decisão através da resolução do processo de otimização utilizando algoritmo genético, considerando como critério de parada o número de 1000 gerações. Resultando também em informações operacionais (hidráulicas e energéticas), em concordância com o objetivo da Equação 4.1 e Equação 4.2 (as duas na pag. 41) para o sistema simulado (Figura 3, pag. 41) com essas variáveis de entrada.

Como o intuito do estudo é entender a relação do volume do reservatório com suas regras de controle na eficiência energética e hidráulica, foram simulados diversos sistemas (160 sistemas). Estes com valores de acordo com o Quadro 2 (pag. 52) para cada uma das características de entrada, como: altura geométrica, comprimento da adutora, consumo ao longo dos 30 anos (obtido pela variação da população) e as duas metodologia de dimensionamento do reservatório, ou seja, a combinação dessas características (L, Hg, Pop, Mtd). Inclusive a Tabela 2 (pag. 53) demonstra quais características físicas são de entrada, quais são otimizadas pelo GA e quais depende do período.

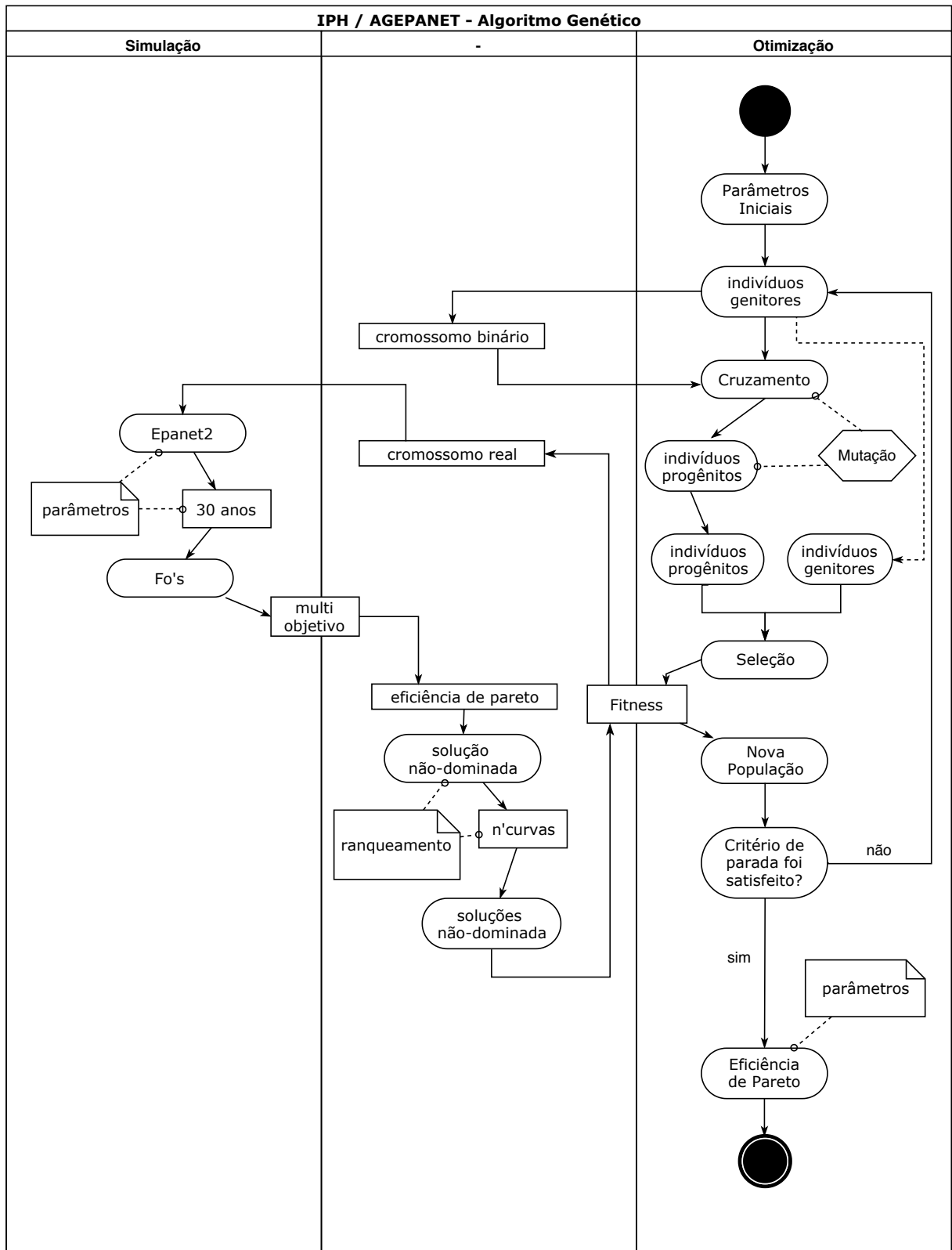
A partir do arranjo dessas variáveis de entrada, com 160 combinações do sistema em estudo (Figura 3, pag. 41), que pela necessidade da delimitação do estudo, essa quantidade de experimento foi considerada atendível para responder aos objetivos propostos. No item seguinte são comentados os procedimentos de uma prévia análise quantitativa e qualitativa.

Figura 10 – Fluxograma geral da metodologia



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 11 – Fluxograma geral do AG



Fonte: Elaborada pelo autor.

Quadro 3 – Limite do espaço de busca das variáveis de decisão no AG

	Espaço de busca
Coefficiente reservatório diâmetro/altura [adm]	[1;20]*
Coefficiente mínimo nível período inicial [%]	[5;25]*
Coefficiente máximo nível período inicial [%]	[75;99]*
Coefficiente mínimo nível período intermédio [%]	[5;25]*
Coefficiente máximo nível período intermédio [%]	[75;99]*
Coefficiente mínimo nível período final [%]	[5;25]*
Coefficiente máximo nível período final [%]	[75;99]*
Frequência de rotação período inicial [%]	[70;100]*
Frequência de rotação período intermédio [%]	[70;100]*
Regra de operação período inicial [num]	1 / 2 / 3
Hora de paralisação período inicial [hora]	17 / 18 / 19
Duração da paralisação período inicial [hora]	3 / 4 / 5
Regra de operação período intermédio [num]	1 / 2 / 3
Hora de paralisação período intermédio [hora]	17 / 18 / 19
Duração da paralisação período intermédio [hora]	3 / 4 / 5
Regra de operação período final [num]	1 / 2 / 3
Hora de paralisação período final [hora]	17 / 18 / 19
Duração da paralisação período final [hora]	3 / 4 / 5
Diâmetro da adutora [mm]	100 / 150 / 200 / 250 / 300 / 350 / 400 / 500 / 600 / 700 / 800 / 900 / 1000

* intervalo de valores inteiros que satisfaz ao limite de busca da variável.

Obs.: os coeficientes mínimos e máximos são percentagem da altura do reservatório, que representam os valores de operação da chave boia ao longo do período de projeto. E o espaço de busca da frequência de rotação, refere-se a percentagem da frequência nominal.

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3 Observação e Análise dos Resultados

Essa observação e análise foram realizadas em duas circunstâncias. Inicialmente, é efetuada a simulação hidro energética para certa capacidade de reservação, variando o fator tempo no consumo médio diário Q_{td} (para início, meio e fim de projeto) e as regras de operação (nível máximo/mínimo e ou desligamento na ponta horário) para essa capacidade de reservação. Assim, através da aplicação do algoritmo de otimização (Apêndice A), o auxilia na identificação dos

critérios operacionais que as satisfazem a uma solução ótima do problema proposto. Pretendendo-se assim, apurar os padrões operacionais para o reservatório elevado (suas regras de controle e os limites mínimo e máximo da chave boia) em diferentes momentos do seu horizonte de projeto.

Em seguida, a segunda circunstância é comparar os resultados hidro energético entre sistemas com capacidade volumétrica do reservatório diferentes, na qual uma foi dimensionada por parâmetros da ABNT NBR 12217 (1994) e uma outra pelo método dos volumes diferenciais, conforme a proposta de Gomes (2012), dessa forma, analisando a importância do volume do reservatório na rotina de operação ao longo dos três períodos. Aqui sendo analisada a eficiência operacional do reservatório, bem como a sua função base (amplitude da variação do nível no horizonte de tempo do projeto). Já para a eficiência energética foram aplicados alguns indicadores de desempenho, que para Alegre *et al.* (2004) simplificam na avaliação do desempenho em si, que de outra forma seria mais complexa e subjetiva.

Geralmente, esses indicadores estão associados em grupos e incorporados em seis, são eles: de recursos hídricos, de recursos humanos, infraestruturas, operacionais, de qualidade de serviço e econômico-financeiros, de acordo com *International Water Association (IWA)* [2004].

Foram utilizados 2 indicadores, estando associado ao grupo econômico-financeiro, operacional e infraestrutura; correspondendo ao consumo específico de energia elétrica (CE) em kwh/m^3 por meio da Equação 4.22, e ao consumo de energia normalizado (CEN), Ph5, em $kwh/m^3/100m$ que representa a energia consumida pelo sistema para elevar $1 m^3$ de água a 100 metros de altura manométrica (Hm), que é obtida pela Equação 4.23 (ALEGRE *et al.*, 2004).

$$CE = \frac{\text{Consumo}_{energia}}{\text{Volume}_{bombedo/dia}} \quad (4.22)$$

$$CEN = \frac{\text{Consumo}_{energia}}{\text{Volume}_{bombedo/dia} \times \left(\frac{Hm}{100}\right)} \quad (4.23)$$

em que $\text{Consumo}_{energia}$ é o consumo energético ao longo de um dia, em kwh ; $\text{Volume}_{bombedo/dia}$ é o volume bombeado ao longo de um dia, em m^3 ; e Hm é a altura manométrica, em m .

Posteriormente à obtenção dos dados pela simulação e otimização, a análise ocorreu ao longo de vários passos, que por vezes se sobrepõem. A primeira dessas foi o reconhecimento das informações retornadas: nome das variáveis (Tabela 3, pag. 63), tipo de dado (categórica ou numérica), classificação das variáveis (quantitativa ou qualitativa) e as escalas de medida das variáveis.

Uma vez feito o levantamento e a organização, examinou-se várias vezes, com auxílio de gráficos e tabelas, a presença de informações inverídica que dificultasse uma compreensão global da narrativa em construção. Foram necessárias diversas vezes esse passo para clarificar as informações (já sendo uma forma para notar padrões) e sintetizar diferentes agrupamento de dados, e analogamente, medicando para não restringir a uma amostra utópica.

À medida que se clarificava e sintetizava certas informações, estas puderam ser analisadas e agrupadas, dando assim origem a novas informações e categorias. Findo este processo de análise e elaboração de categorias, codificou-se a análise de agrupamento de dados (*clustering*), que é um conjunto de técnicas não-supervisionado, segundo a certo grau de semelhança. Logo, a forma como se relacionam entre si, a afasta-se ou aproxima-se de algum *cluster* (grupo).

O *clustering* permite reunir semelhanças que se relacionam numa mesma categoria ou diferentes, dando-se a possibilidade de (i) compreender como essa semelhança é compreendido na sua generalidade, (ii) procurar nuances na sua concepção ou significado e (iii) analisar padrões e diferenças sistemáticas entre os grupos codificados.

Considerando a explicação anteriormente, aplicou-se uma análise do agrupamento de dados, utilizando o algoritmo *K-means++* (MACQUEEN, 1967), sendo um dos mais conhecido na literatura, e incidindo sobre as variáveis '*eficiencia_motorbomba*' e '*0,2725/CEN*'.

Alguns cuidados na análise e interpretação das variáveis escolhidas, para a aplicação da ferramenta *clusters*, devem ser observados. Quer isto dizer que, a riqueza dos resultados que podem ser obtidos através deste método exige do investigador procedimentos que assegurem a objetividade na relação das variáveis que tenham sido facultadas para direcionar o agrupamento.

Por isso, a escolha dessas duas variáveis, já que a resposta de destino é conhecida. O '*CEN*' quando reagrupado analiticamente, é conhecido o valor indiretamente da eficiência do conjunto motor-bomba. A dedução da formulação '*0,2725/CEN*' está no Apêndice C.

Posteriormente à análise do agrupamento de dados (em cima de um dos grupos gerados com as duas variáveis brevemente apresentadas), foi abordado uma análise de correlação dos valores de certas variáveis (dentro do grupo de interesse), utilizando o coeficiente de correlação de Spearman, e igualmente testes do residual.

Diante disso, foi desenvolvido uma metodologia que dimensiona o sistema elevatório de água, tendo a eficiência energética e operacional como princípio. Logo, obtendo indiretamente os termos como o diâmetro ótimo da adutora, as características da bomba (curva da bomba e do rendimento) e as características operacionais do reservatório elevado.

Em suma, a metodologia está pautada na ideia de Batchabani e Fuamba (2014), Xu, Chen e Qi (2015) e Vilanova e Balestieri (2015), quando comentam a necessidade de relacionar as características operacionais do volume de reservação com o consumo de energia elétrica nas estações elevatórias. Em termos práticos, propiciando a redução do consumo e ou custo energético no sistema elevatório.

Tabela 3 – Nome das variáveis retornada da simulação e otimização

1	population_end_value	23	coef_max_level_end	45	kwh/m^3_middle	67	consum_base_end
2	length	24	function1	46	kw/h_middle	68	fator_utilização_pump
3	hg	25	function2	47	CEN_middle	69	efic_pump
4	method	26	function1_adm	48	custo_day_middle	70	altura_manometrica
5	Diameter_Adutora	27	function2_adm	49	custo_energia_fa_middle	71	kwh/m^3
6	coef_Tank_diameter	28	rank	50	vazao_adutora_middle	72	potencia/h
7	rule_start	29	fator_utilização_pump_start	51	perda_carga_middle	73	potencia/day
8	start_rule_start	30	efic_pump_start	52	velocidade_middle	74	CEN
9	duration_rule_start	31	altura_manometrica_start	53	efic_RNV_middle	75	vazao_adutora
10	coef_freq_start	32	kwh/m^3_start	54	consum_base_middle	76	velocidade_min
11	coef_min_level_start	33	kw/h_start	55	fator_utilização_pump_end	77	velocidade_med
12	coef_max_level_start	34	CEN_start	56	efic_pump_end	78	velocidade_max
13	rule_middle	35	custo_day_start	57	altura_manometrica_end	79	perda_carga
14	start_rule_middle	36	custo_energia_fa_start	58	kwh/m^3_end	80	Reynolds
15	duration_rule_middle	37	vazao_adutora_start	59	kw/h_end	81	volume_RNV
16	coef_freq_middle	38	perda_carga_start	60	CEN_end	82	efic_RNV
17	coef_min_level_middle	39	velocidade_start	61	custo_day_end	83	consum_base
18	coef_max_level_middle	40	efic_RNV_start	62	custo_energia_fa_end	84	custo_motorbomba
19	rule_end	41	consum_base_start	63	vazao_adutora_end	85	custo_adutora
20	start_rule_end	42	fator_utilização_pump_middle	64	perda_carga_end	86	custo_RNV
21	duration_rule_end	43	efic_pump_middle	65	velocidade_end	87	custo_energia_fa
22	coef_min_level_end	44	altura_manometrica_middle	66	efic_RNV_end	88	custo_total

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Levando em consideração a metodologia descrita no Capítulo 4 (um modelo computacional associado ao *Programmer Toolkit* EPANET), no qual simula o comportamento hidráulico do sistema de bombeamento e, paralelamente, processa uma otimização multiobjetivo do sistema (minimização dos custos e maximização da eficiência do reservatório) com base nos dados obtidos da simulação, inclusive, abrangendo o tipo de método do dimensionamento no reservatório elevado. Deste modo, é plausível a comparação, tanto energética como operacional, dos dois métodos, ABNT NBR 12217 (1994) e Gomes (2012), com a pretensão de observar a relação da operação do reservatório na minimização do consumo e custo energético.

Nesse intuito, apresenta-se neste capítulo, os dados obtidos mediante a aplicação da metodologia, envolvendo a simulação computacional, a otimização e os indicadores - estes que são bastante utilizados nos estudos que envolvem esta linha de pesquisa. Além de apresentar discussões dessas informações com uma análise de dados.

5.1 Precisão do Modulo Otimização

O modelo de otimização desenvolvido descrito na metodologia (e melhor detalhando no Apêndice A) é um algoritmo genético multiobjetivo. Para verificar seu desempenho foi submetido a testes com funções analíticas sendo analisado sua acurácia, precisão, flexibilidade e robustez na obtenção de soluções ótimas de Pareto e na correspondente representação da Frente de Pareto. Estes testes também serviram para validar os parâmetros estipulados na metodologia (as características computacionais atribuídas ao algoritmo genético).

Existem na literatura diversos conjuntos de funções testes, utilizadas para legitimar as técnicas de um algoritmo de otimização multiobjetivo, no qual permite avaliar a sua convergência e a sua diversidade. Na Tabela 4 são listadas as funções analíticas adotadas para o teste sintético.

A Figura 12 (pag. 67) mostra a fronteira de Pareto encontrada para as funções-objetivo da Tabela 4, a partir dos parâmetros adotados na utilização do algoritmo genético conforme apresentado no Quadro 5 e detalhado no Apêndice A. Estas soluções em destaque dominam

Tabela 4 – Funções analíticas para testes do modulo otimização

	Função Multiobjetivo	Comentário
$\min (f_1)$	$f_1(x_1) = x_1; x_i \in [0, 1]$ $g(x_2, x_3, \dots, x_n) \mapsto \mathbb{R}; x_i \in [0, 1]; n = 19^*$ $\text{onde, } g(x_2, x_3, \dots, x_n) = 1 + \frac{9}{(n-1)} \cdot \sum_{i=2}^n x_i$	Usada em conjunto com outras funções, inclusive para o caso multiobjetivo.
$\min (f_1 \times f_2)$	$f_2(f_1(x_1), g(x_2, x_3, \dots, x_n)) = g(x_2, x_3, \dots, x_n) \cdot \left[1 - \sqrt{\frac{f_1(x_1)}{g(x_2, x_3, \dots, x_n)}} \right]$	Função 2C-ZDT1, Convex (ZITZLER; DEB; THIELE, 2000).
$\min (f_1 \times f_3)$	$f_3(f_1(x_1), g(x_2, x_3, \dots, x_n)) = g(x_2, x_3, \dots, x_n) \cdot \left[1 - \left(\frac{x_1}{g(x_2, x_3, \dots, x_n)} \right)^2 \right]$	Função 2C-ZDT2, Non-convex (ZITZLER; DEB; THIELE, 2000).
$\min (f_1 \times f_4)$	$f_4(f_1(x_1), g(x_2, x_3, \dots, x_n)) = g(x_2, x_3, \dots, x_n) \cdot \left[1 - \sqrt{\frac{f_1(x_1)}{g(x_2, x_3, \dots, x_n)}} - \left(\frac{f_1(x_1)}{g(x_2, x_3, \dots, x_n)} \right) \cdot \sin(10\pi f_1) \right]$	Função 2C-ZDT3, Discrete (ZITZLER; DEB; THIELE, 2000).
$\min (f_1' \times f_5)$	$f_1'(x_1) = 1 - \exp(-4x_1) \cdot \sin^6(6\pi x_1)$ $g'(x_2, x_3, \dots, x_n) = 1 + 9 \cdot \left(\frac{\sum_{i=2}^n x_i}{(n-1)} \right)^{0,25}$ $f_5(f_1'(x_1), g'(x_2, x_3, \dots, x_n)) = g'(x_2, x_3, \dots, x_n) \cdot \left[1 - \left(\frac{f_1'(x_1)}{g'(x_2, x_3, \dots, x_n)} \right)^2 \right]$	Função 2C-ZDT6, Non-uniform (ZITZLER; DEB; THIELE, 2000).

* quantidade de variáveis igual a quantidade de variáveis de decisões do problema otimizado na metodologia, 19 parâmetros.

Fonte: Elaborada pelo autor.

todas as outras, sendo, portanto, a melhor solução para o problema de minimização bi-objetivo ao considerar-se as funções-objetivo citadas.

Quadro 5 – Valores dos parâmetros do AG utilizados para a otimização

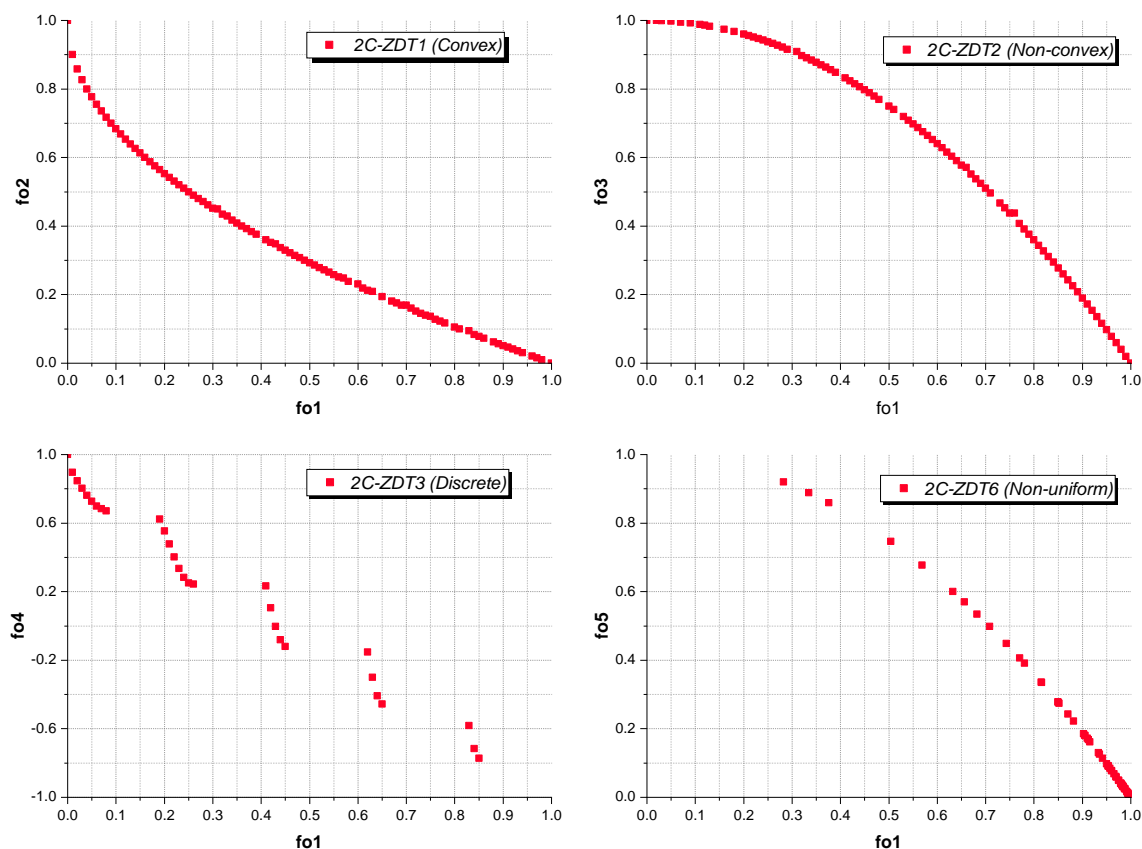
Tamanho da População	100
Numero de Gerações	1000
Operador de Seleção	Binário, sem reposição
Operador de Mutação	<i>Flip</i>
Probabilidade de Mutação	0,05 para o gene
Operador de <i>Crossover</i>	<i>Crossover</i> de Dois Pontos
Probabilidade de <i>Crossover</i>	100% da amostra

Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme é discutido por DEB e PRATAP (2002), uma boa métrica para validar o algoritmo multiobjetivo é a medida hiper-volume que calcula a diversidade das soluções obtidas pelo algoritmo. O hiper-volume médio das funções testadas, foram aproximadamente iguais aos dos algoritmos clássicos, o que mostra que o algoritmo desenvolvido tem uma boa cobertura na representação da Frente de Pareto. Deste modo, analisando os resultados obtidos pelos testes, infere-se que o modulo otimização tem uma boa predição do comportamento da frente de Pareto. Com apenas uma pequena diferença no erro de predição na função mais complexa (2C-ZDT3, discreta).

Depois de testado o modulo otimização e validado os parâmetros atribuídos do Quadro 5, o algoritmo foi submetido a mais uma bateria de teste, a qual observou a sua convergência e distribuição para as 100, 300, 700 e 1000 gerações, para o problema já em estudo (minimização do custo e maximização da eficiência do reservatório). Os gráficos da Figura 13 (pag. 68) mostram os resultados dos testes desenvolvidos para as seguintes características: um sistema elevatório para abastecer uma população, localizada a 100 metros acima e 20 km de distância da fonte, que ao longo dos 30 anos de projeto, contará da seguinte forma, início de projeto com 9 mil habitantes, meio de projeto com 15 mil, e no horizonte de projeto com 25 mil habitantes, e em consonância com a metodologia do Capítulo 4 e o método proposto por Gomes (2012) para o dimensionamento do reservatório. Nos gráficos, o eixo das abscissas representa o custo total gasto (em unidade de mil reais) para a implantação do sistema nos 30 anos de projeto, e no eixo das ordenadas representa a eficiência média (em unidade de percentagem da capacidade volumétrica) do reservatório. É apresentado a verdadeira Frente de Pareto estimada, e considerando a existência de soluções dominadas na população final, outros conjuntos que poderiam ser representados para diferentes graus de dominância.

Figura 12 – Fronteira de Pareto sobre o Espaço de Objetivos 2C-ZDTs



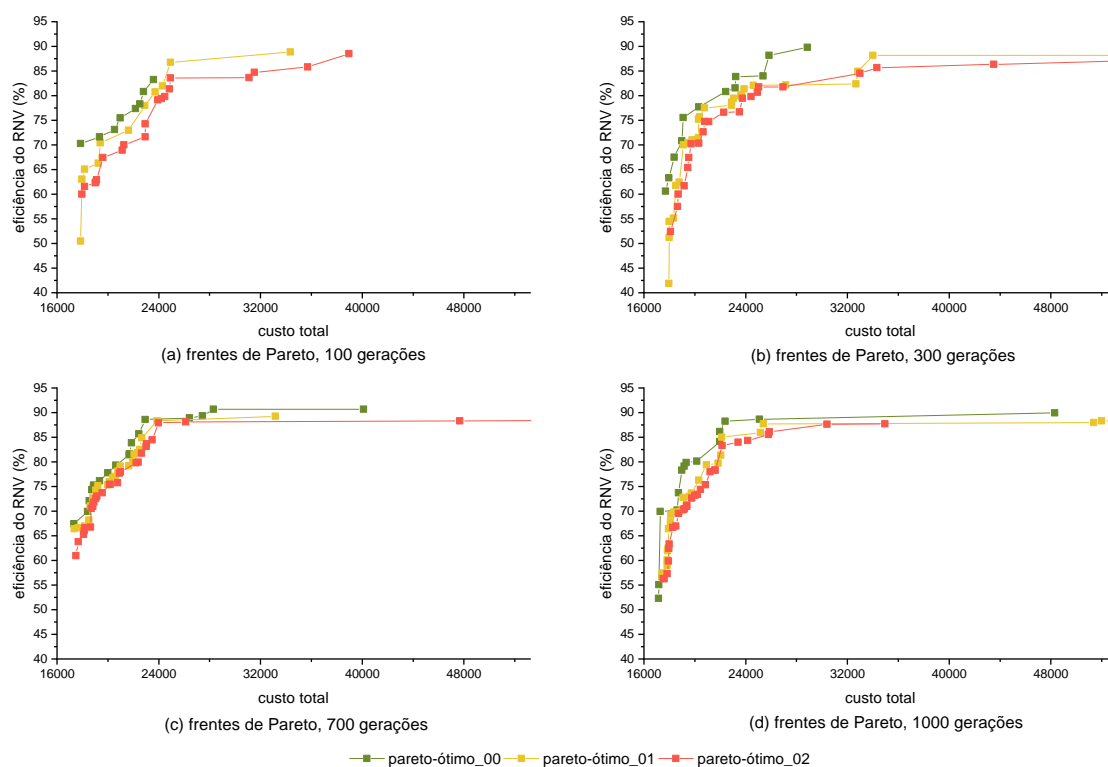
Fonte: Elaborada pelo autor.

Inicialmente pensou-se em impor uma alta restrição hidráulica desde o início do ciclo do AG, o que diminuiria o número de soluções não-dominadas, ou seja, só seria utilizado as soluções que atenderam as restrições para a construção da fronteira de Pareto. Posteriormente, optou-se por incluir todas soluções, atendendo ou não restrição hidráulica, fazendo diferentes testes no valor da função penalidade, desse modo, evitando o inconveniente anterior. Para a verificação das restrições hidráulicas é chamada a função *Toolkit* do EPANET, que possibilita ao usuário configurar o sistema e executar a simulação, retornando as informações de interesse. As informações são avaliadas em cada ponto que tem restrição, e as soluções que não atenderem à condição estabelecidas (sendo elas, a periodicidade no nível do reservatório elevado e em hipótese alguma a falta de água no ponto de consumo) foram penalizadas de acordo com o descrito na Subseção 4.2.3, mas não descartadas.

Nos gráficos a seguir (Figura 13 e Figura 14), nota-se que, para o problema teste considerando 100 gerações, obteve como resultado uma região próxima da predição da frente de Pareto com 1000 gerações. No entanto, as soluções da unidade de maior geração obtiveram uma modesta superioridade em relação as soluções de gerações menores. Numa comparação, a melhor solução da função custo, com 1000 gerações, foi 4% (em valor absoluto é 706 mil

reais) menor do que com 100 gerações, e o mesmo se observa para uma otimização com 700 gerações, só que com uma diferença bem menor, uma diminuição de 1% (em valor absoluto é 194 mil reais). Essas semelhanças indicam que o método proposto de não rejeitar as soluções penalizadas, possibilitou uma agilidade na convergência do processo de otimização. Contudo, é devido ao elevado número de gerações, que se observa uma melhoria na representação da Frente de Pareto em toda sua extensão, sem perda das soluções não-dominadas nos extremos, além de um número maior de soluções na própria Frente. Portanto, o módulo otimização desenvolvido, seguindo os parâmetros do Quadro 5 (pag. 66), está em conformidade com os fundamentos da otimização multiobjetivo.

Figura 13 – Soluções não-dominadas e dominadas de uma simulação da metodologia

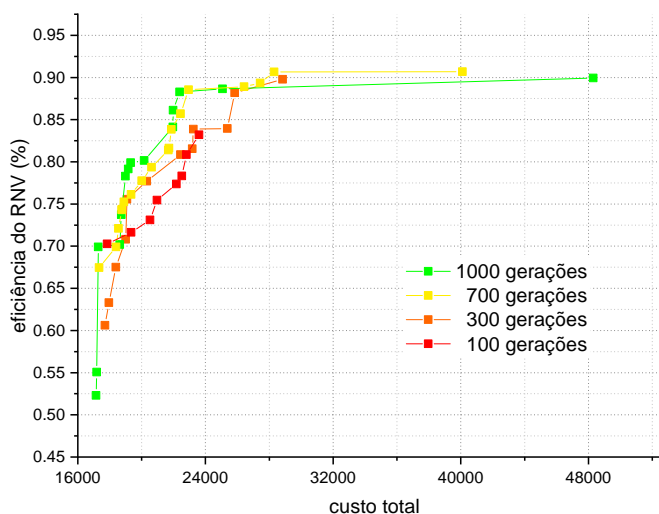


Eixo das abscissas representa o custo total (em unidade de mil reais) para a implantação do sistema nos 30 anos, eixo das ordenadas a eficiência média (em unidade de porcentagem da capacidade volumétrica) do reservatório.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Analisando os resultados obtidos pelo algoritmo, infere-se que, a escolha do parâmetro de ter 1000 gerações demonstrou ser uma escolha viável para descrever a diversidade da frente de Pareto no problema em estudo. Precipuamente, porque para melhorar o desempenho obtido, seria necessário aumentar o tamanho da população e o número máximo de gerações, o que implicaria em tempos maiores de execução. No exemplo em destaque, o AG com 1000 gerações levou em torno de 12 horas para encontrar as soluções destacadas, enquanto que para todos os 160 sistemas simulados, levou um total de, aproximadamente, 1440 horas.

Figura 14 – Fronteira de Pareto para quatro unidades de paragem do AG



Eixo das abscissas representa o custo total (em unidade de mil reais) para a implantação do sistema nos 30 anos, eixo das ordenadas a eficiência média (em unidade de porcentagem da capacidade volumétrica) do reservatório.

Fonte: Elaborada pelo autor.

O requisito de uma boa representação da frente de Pareto, é relevante para a análise a ser descrita no tópico seguinte, quando o quesito é a análise de padrões. E neste caso, somente as soluções viáveis hidráulicamente da Frente de Pareto, estão sendo repassadas para o tópico seguinte. Lembrando que uma descrição completa de cada um destes parâmetros pode ser encontrada no Apêndice A. No Apêndice B é descrito dois resultados otimizados dos 160 sistemas simulados, um pelo método da ABNT NBR 12217 (1994) e o outro por Gomes (2012).

5.2 Análise dos Dados Otimizados

A análise dos dados foi organizada segundo duas etapas. Na primeira etapa, fez-se a descrição sistemática dos dados obtidos, recorrendo a gráficos, tabelas e outros tipos de visualização. Além de, descrever as amostras e apresentar a distribuição estatística dos resultados das variáveis pertinentes. Esta etapa foi suporte para as análises subsequentes. Na segunda etapa se procedeu aos procedimentos inferenciais, e estimativa de correlações entre as variáveis pertinentes.

5.2.1 Descrição Sistemática dos Dados

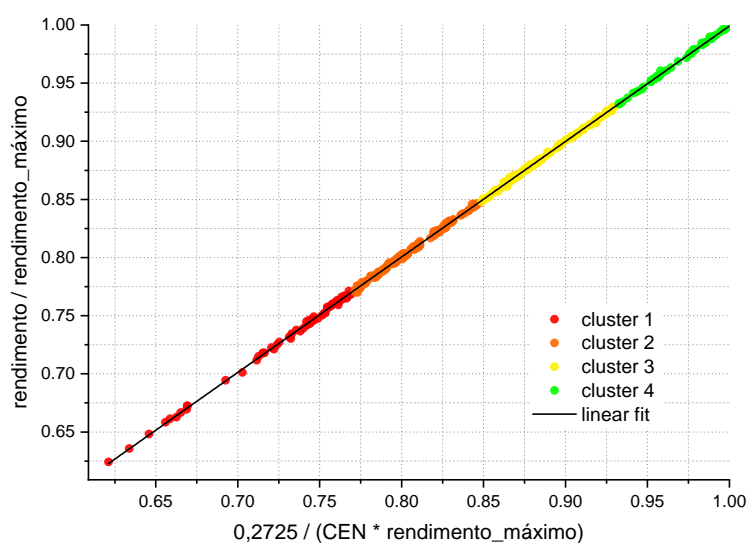
Posteriormente à obtenção dos dados que correspondem ao resultados obtidos através do processo de otimização utilizando AG, a análise ocorreu ao longo de vários passos, que por vezes se sobrepõem. A primeira dessas etapas foi o reconhecimento das informações retornadas que à medida que se clarificava e sintetizava certas informações, estes puderam ser reunidos,

dando assim origem a novas informações e categorias. Findo este processo de clarificação e elaboração de categorias, codificou-se a análise de agrupamento de dados (*clustering*).

O resultado do algoritmo de agrupamento em cima das variáveis '*eficiencia_motorbomba*' e ' $0,2725/CEN$ ' é representado na Figura 15, na qual ilustra um conjunto de dados com valores de saídas rotulados, destacando-se os *clusters* obtidos desses dados, *clusters* estes que foram determinados para retornarem 4 *clusters*.

Diante disso, os *clusters* referem-se à descrição da qualidade das soluções ótimas de Pareto pelos quais representam o custo total (Equação 4.1, pag. 41), ao passo que a minimização dos custos exige soluções com eficiência do conjunto motor-bomba melhores. A preocupação com a confirmabilidade de custos mínimos necessitou da rotulação qualitativa para os *clusters*, onde a classificação escolhida foi (i) excelente, (ii) ótimo, (iii) bom e (iv) ruim, como na Tabela 5. Com o intuito de analisar padrões somente dos dados nomeado como de *cluster* excelente.

Figura 15 – Resultado do agrupamento utilizando k-means ++ do conjunto de soluções não-dominadas dos processos de otimização previamente executados para os diferentes sistemas



* o máximo rendimento descrito no gráfico está atrelado ao rendimento nominal do conjunto motor-bomba. No qual no modelo simulado (Capítulo 4 e Apêndice A) foi estipulado como rendimento nominal igual a 75,5%.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A caracterização da amostra (distribuição dos dados da Tabela 3 (pag. 63) quanto a eficiência do motor-bomba, Figura 16) revelou que as variáveis físicas dos sistemas apresentadas nos gráficos 16 (a), 16 (c) e 16 (d) tiveram uma boa distribuição. Apresentando um valor médio em torno de 85%, independentemente da característica física e da variação da mesma. A única característica que apontou diferença do valor médio da eficiência do conjunto motor-bomba, diz respeito ao comprimento da adutora, a qual é notória a diminuição da eficiência do motor-bomba com o aumento do comprimento da adutora. Provavelmente isso ocorre porque, a

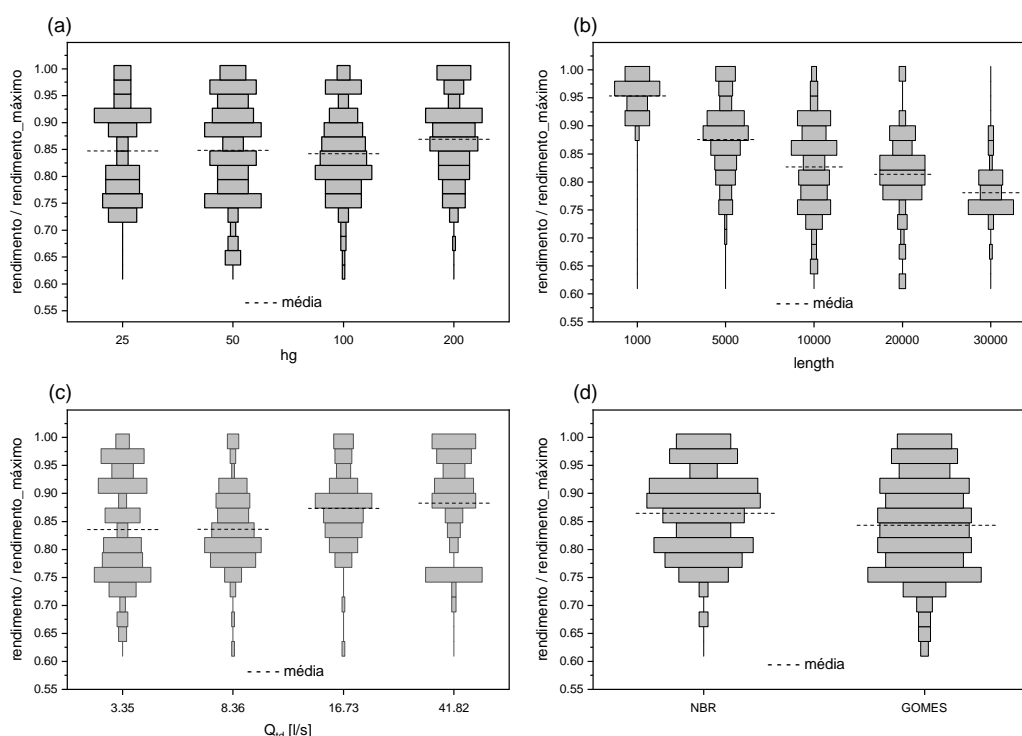
Tabela 5 – Características estatísticas dos *clusters*

Cluster	Média	Mediana	Q1	Q3	99% AIQ
C1_(Ruim)	0.745	0.7338	0.721	0.760	(+0.67 até +0.77)
C2_(Bom)	0.807	0.807	0.792	0.823	(+0.77 até +0.85)
C3_(Ótimo)	0.884	0.889	0.869	0.914	(+0.85 até +0.93)
C4_(Excelente)	0.975	0.970	0.956	0.988	(+0.93 até +0.99)

* é representado as centrais de distribuição: 1º quartil (Q1), 2º quartil e 3º quartil (Q3). Os valores mínimos e máximos, e o ponto azul central é a mediana (2º quartil). Não sendo registrado nenhum valor atípico.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 16 – Função densidade das características físicas versus a eficiência do motor-bomba



Fonte: Elaborada pelo autor.

variável comprimento é uma das principais características que influencia na variação da altura manométrica. O fato do predomínio do valor médio de 85%, pode ser considerado como um indicador auxiliar, no qual para comprimentos de adutora de até 10 mil metros, conjuntos de motor-bomba que estiverem trabalhando abaixo de 85% da eficiência nominal, o sistema pode ser considerado como de baixa eficiência, e sendo exatamente o valor do ponto constatado na Figura 15 (85%) que, para pontos abaixo desse valor, deixam de ter uma ótima eficiência, e se distanciando da eficiência excelente. No gráfico 16 (d), aponta-se uma leve melhoria do valor médio para NBR, em relação a GOMES, corroborando no atrativo em optar pelo tal método, para o dimensionamento do reservatório elevado. No entanto, a métrica média nem sempre se apresenta como sendo uma informação altamente transparente, ela atenua muitas informações,

Tabela 6 – Distribuição do domínio e frequência de cada parâmetro, nos *clusters*

Cluster	Variável	Deferimento	Qnt. da amostra
Pareto_rank_00			
C1 (Ruim)	-	-	70
Hg	[25, 50, 100, 200]	✓	-
Len	[1 mil, 5 mil, 10 mil, 20 mil, 30 mil]	*	-
Pop	[2 mil, 5 mil, 10 mil, 25 mil]	✓	-
Mtd	[GOMES, NBR]	✓	-
C2 (Bom)	-	-	116
Hg	[25, 50, 100, 200]	✓	-
Len	[1 mil, 5 mil, 10 mil, 20 mil, 30 mil]	*	-
Pop	[2 mil, 5 mil, 10 mil, 25 mil]	✓	-
Mtd	[GOMES, NBR]	✓	-
C3 (Ótimo)	-	-	140
Hg	[25, 50, 100, 200]	✓	-
Len	[1 mil, 5 mil, 10 mil, 20 mil, 30 mil]	✓	-
Pop	[2 mil, 5 mil, 10 mil, 25 mil]	✓	-
Mtd	[GOMES, NBR]	✓	-
C4 (Excelente)	-	-	70
Hg	[25, 50, 100, 200]	✓	-
Len	[1 mil, 5 mil, 10 mil, 20 mil, 30 mil]	**	-
Pop	[2 mil, 5 mil, 10 mil, 25 mil]	✓	-
Mtd	[GOMES, NBR]	✓	-

* ausência do comprimento de mil metros.

** ausência do comprimento de 30 mil metros.

Fonte: Elaborada pelo autor.

as vezes até distanciando da mediana. Para que tais informações sejam afirmadas com mais confiabilidade, é fundamental conhecer a influência do efeito de cada característica entre si, e isso é possível por intermédio de correlação estatística.

Outra informação que se pode tirar a respeito dos dados acima (Figura 15, Figura 16 e Tabela 5), e em complemento com os da Tabela 6, é que o *cluster* excelente não tem uma distribuição de todos os experimentos (ficou de fora o domínio de 30 km de comprimento da adutora), contudo, não encontrou indícios de violações severas de amostra do *cluster* excelente, como viés para a busca de padrões. Assim, os dados encontrados no *cluster* excelente foram considerados aceitáveis, denotando em 70 quantidade de dados. Realizou-se também diversos testes de confiança paramétrica para as análises dos padrões deste grupo para minimizar a tendência do erro, testes estes que apresentaram robustez face a violações à padrões inviáveis das variáveis em estudo. Sendo que desde a primeira etapa até nos passos do item seguinte, foi analisada a presença de *outliers* através da representação gráfica das variáveis (Diagrama de Extremos e Quartis-Box Plot) e testes estatísticos para a tomada a decisões de manter ou retirar algumas observações extremas observadas. Quando a constatação de sua permanência ou retirada, estava atrelada a não alteração das análises estatísticas após a alteração em cima deste dado, demonstrando, deste modo, uma confiabilidade na variabilidade das variáveis que foram selecionadas. Assim, assumiu-se a escolha dos mesmos (dados com eficiência acima de 93% de seu rendimento nominal) como forma de representar observações de eficiência excelente possíveis da população, dessa forma permitindo uma generalização destes resultados.

Posteriormente, os dados que compõem a região de interesse foram codificados matematicamente, tentando extrair significado como conceitos e padrões, das correlações em torno dos dados de interesse.

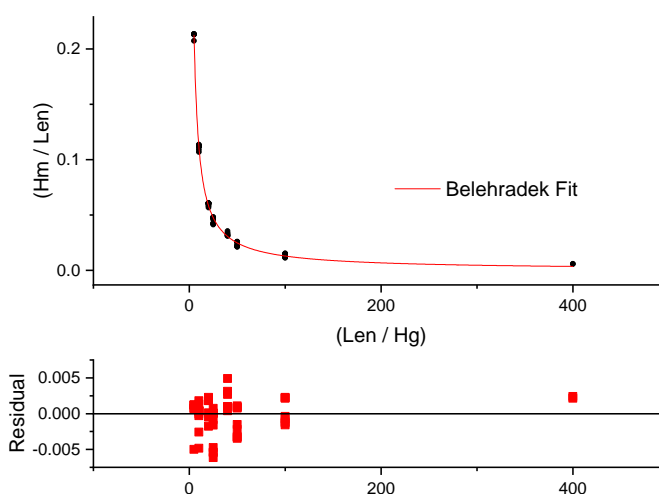
5.2.2 Análise Bivariada

É abordado, no presente item, a análise de correlação de certas variáveis, utilizando o coeficiente de correlação de Spearman, e igualmente testes do residual, estes disponibilizados no Apêndice D.

Na análise de correlação entre as variáveis referentes a Tabela 3 (pag. 63), observou-se correlação com significância estatística, de no mínimo, moderada entre os seguintes itens: "comprimento_da_adutora/altura_geométrica" com "altura_manométrica/comprimento_da_adutora" (0,988), " $CE = kwh/m^3$ " com "Reynolds/altura_manométrica" (-0,634), "Reynolds e consumo_base" com "velocidade" (0,988), "Reynolds e consumo_base" com "vazão_da_adutora/consumo_base" (0,988), "custo_total/custo_energia" com "custo_total/custo_implantacao" (-1,00), as demais relações das variáveis e combinações entre elas são previamente apresentadas no Apêndice D. As variáveis utilizadas foram "comprimento_da_adutora", "altura_geométrica", "altura_manométrica", " $CE = kwh/m^3$ ", "Reynolds", "velocidade", "consumo_base", "vazão_da_adutora" e divisões entre elas. Algumas destas constituindo forte correlação entre si, mas sem embasamento físico.

O gráfico apresentado na Figura 17 refere-se a uma correlação não-linear da combinação " Len/Hg " com " Hm/Len ". Observa-se que a relação altura manométrica com o comprimento da adutora decai com o aumento da relação " Len/Hg ".

Figura 17 – Correlação não-linear da variável " Len/Hg " sobre o domínio " Hm/Len "



Fonte: Elaborada pelo autor.

Atendendo ao resultado da Figura 17, tem-se, com o ajuste de Belehraddek, o resultado da Equação 5.1, cujo coeficiente R^2 foi igual a 0,998. No qual é conhecido o valor da altura manométrica, por meio dos valores da altura geométrica e comprimento da adutora.

$$\left(\frac{Hm}{Len}\right) = 0,98838 \cdot \left[\left(\frac{Len}{Hg}\right) + 0,11913\right]^{(-0,94181)} \quad (5.1)$$

Na Equação 5.2 é apresentado o indicador de eficiência CE, que tem uma dependência com relação aos termos X^{**} (Equação 5.3), volume bombeado e $0,2725/CEN$. Uma análise de correlação feita com o primeiro termo, teve como resposta o ajuste da Figura 18 e a Equação 5.4 (que para este grau de precisão, a equação continua sendo valida; já com arredondamento ao valor de 1 nos coeficientes, tal afirmação não foi plausível), com o coeficiente R^2 igual a 0,999.

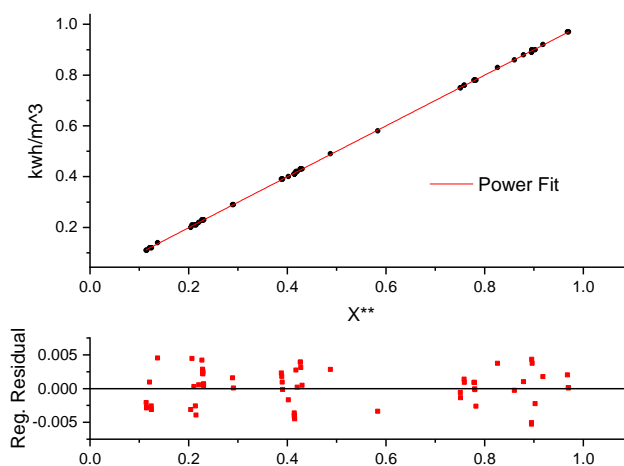
$$CE [kwh/m^3] = f\left(X^{**}, Volume_{bombeado}, \frac{0,2725}{CEN}\right) \quad (5.2)$$

$$X^{**} = \frac{g \cdot d \cdot Hm}{(98\% \cdot rendimento_{maximo} \cdot 3600)} \quad (5.3)$$

onde g é a aceleração da gravidade, igual a $9,81 \text{ m/s}^2$; d é a densidade do fluido, com relação a água a 20°C ; e $rendimento_{maximo}$ é o rendimento máximo projetado para o motor-bomba.

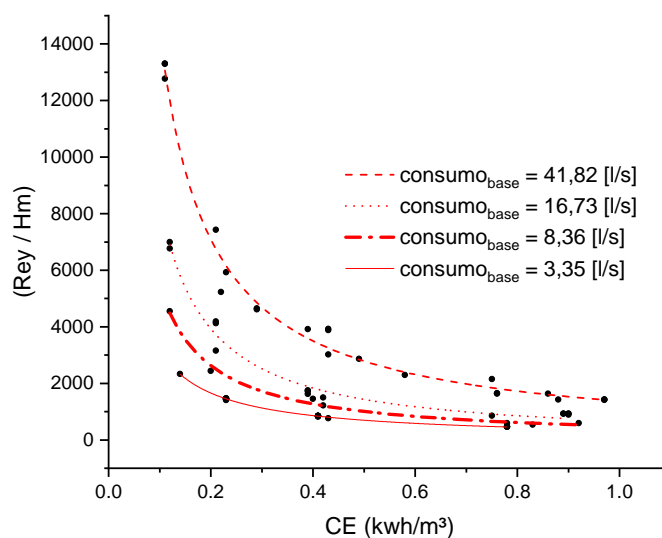
$$CE [kwh/m^3] = 1,00049 \cdot (X^{**})^{1,00312} \quad (5.4)$$

Figura 18 – Correlação linear da variável "X**" sobre o domínio "CE"



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 19 – Correlação não-linear da variável "CE" sobre o domínio "Rey/Hm"



Fonte: Elaborada pelo autor.

Quando plotado as variáveis "CE" com "Rey/Hm", como ilustrado na Figura 19, observa-se que há uma correlação. Inclusive que o consumo base (consumo teórico médio diário, Q_{td}) influencia na relação entre estes dados. Para tanto, foi feita uma análise correlativa destes dados levando em conta a seleção com base no valor da vazão de consumo. Deste modo, a Tabela 7, ilustra os resultados dos coeficientes do método ajustado pela equação Allometric (Equação 5.5).

Tabela 7 – Coeficientes para a equação de "Rey/Hm"

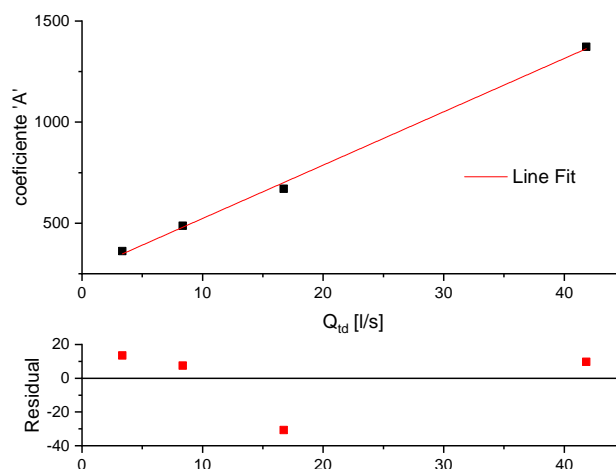
Consumo base [L/s]	Coeficiente	
	'A'	'B'
3,35	361,5555	-0,94643
8,36	487,6701	-1,04662
16,73	670,3175	-1,09908
41,82	1372,731	-1,02072

Fonte: Elaborada pelo autor.

$$\left(\frac{Rey}{Hm}\right) = coeficiente_A \cdot (CE)^{coeficiente_B} \tag{5.5}$$

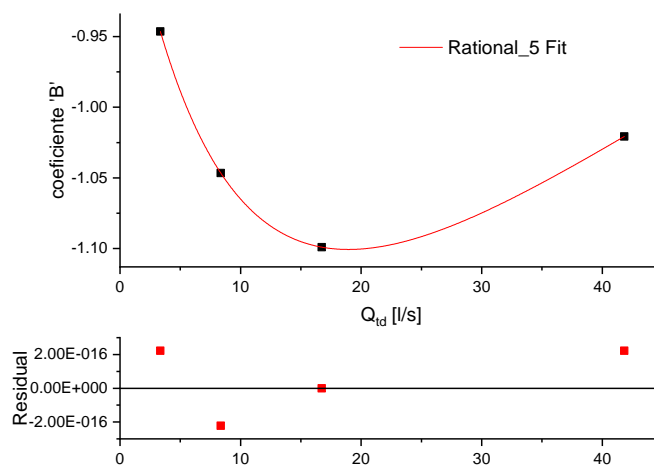
Similar ao que foi feito com as variáveis "CE" e "Rey/Hm", os coeficientes da Tabela 7 tiveram uma análise de correlação, sendo apresentada nas Figura 20 e Figura 21. Esses ajustes retornaram Equação 5.6 e Equação 5.7.

Figura 20 – Correlação linear da variável "consumo base" sobre o domínio do coeficiente 'A' para o ajuste da variável "Rey/Hm"



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 21 – Correlação não-linear da variável "consumo base" sobre o domínio do coeficiente 'B' para o ajuste da variável "Rey/Hm"



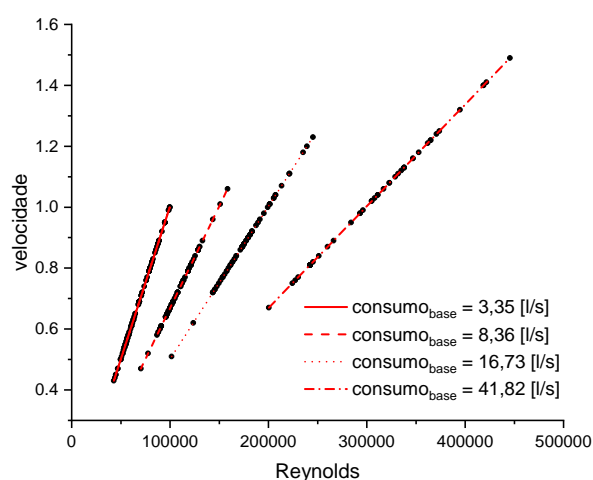
Fonte: Elaborada pelo autor.

$$coeficiente_A_{\left\{ \begin{matrix} Rey \\ Hm \end{matrix} \right\}} = 259,62884 + 26,38426 \cdot (Q_{td} [l/s]) \tag{5.6}$$

$$coeficiente_B_{\left\{ \begin{matrix} Rey \\ Hm \end{matrix} \right\}} = \frac{-0,81832 - 0,1061 \cdot (Q_{td} [l/s])}{1 + 0,06931 \cdot (Q_{td} [l/s]) + 7,14971E - 4 \cdot (Q_{td} [l/s])^2} \tag{5.7}$$

Continuando com as análises de correlação, agora entre as variáveis "Rey" e "velocidade". Primordialmente, fez uma plotagem de dispersão (Figura 22) entre as duas variáveis e, na sequência, uma análise de conteúdo, onde identificou-se regiões em comum, no qual foi possível separa-las para uma melhor compreensão. O critério de separação foi o valor do consumo base. É ilustrado na Figura 22 esse comportamento e os seus tramas, o ajuste para cada trama da Figura 22 está apresentado no Apêndice D. Na Tabela 8, observa-se os coeficientes do ajuste para a velocidade obtidas a partir da Equação 5.8.

Figura 22 – Correlação não-linear das variáveis "Rey" e "consumo base" sobre o domínio "velocidade"



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 8 – Coeficientes para a equação de "velocidade"

Consumo base [L/s]	Coeficiente	
	'A'	'B'
3,35	1,00300E-05	1,00E00
8,36	6,68667E-06	1,00E00
16,73	5,01500E-06	1,00E00
41,82	3,34333E-06	1,00E00

Fonte: Elaborada pelo autor.

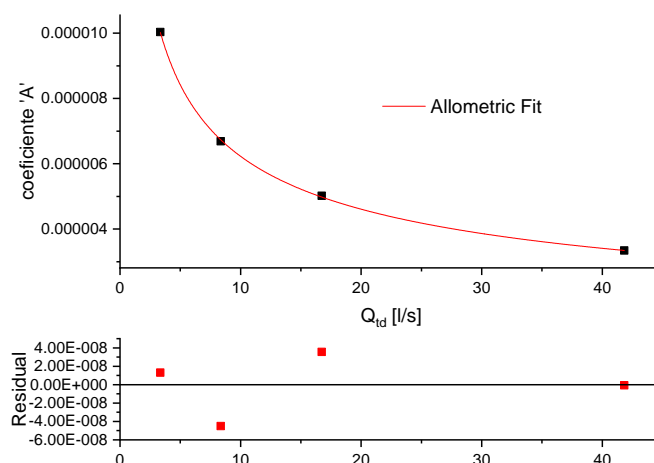
$$velocidade = coeficiente_A \cdot (Rey)^{coeficiente_B} \tag{5.8}$$

Pode-se observar que, o coeficiente 'b' não varia com a alteração do valor do consumo base, logo, considerou o coeficiente 'b' como uma constante. Na sequência, fez-se uma análise

de correlação do coeficiente 'a' (Tabela 8), ilustrando na Figura 23. Na conclusão, foi gerado a Equação 5.9, no qual se pode obter o valor do coeficiente 'a' em função do consumo base.

$$coeficiente_A_{\{velocidade\}} = 1,69404E - 5 \cdot (Q_{td} [l/s])^{(-0,4346)} \quad (5.9)$$

Figura 23 – Correlação não-linear da variável "consumo base" sobre o domínio do coeficiente 'A' para o ajuste da variável "velocidade"



Fonte: Elaborada pelo autor.

Essa codificação de agrupar os dados por valor de consumo base e correlacioná-las separadamente, foi observado também quando se plotava as variáveis "Rey" com "Q_{adutora}/q", observada na Figura 24. Replicando tal estratégia, a Figura 24 ilustra o agrupamento e as curvas de ajustes para cada trama (estes detalhado no Apêndice D). A Tabela 9 mostra os coeficientes de cada trama para o modelo de regressão utilizado.

Tabela 9 – Coeficientes para a equação de "Q/consumo_base"

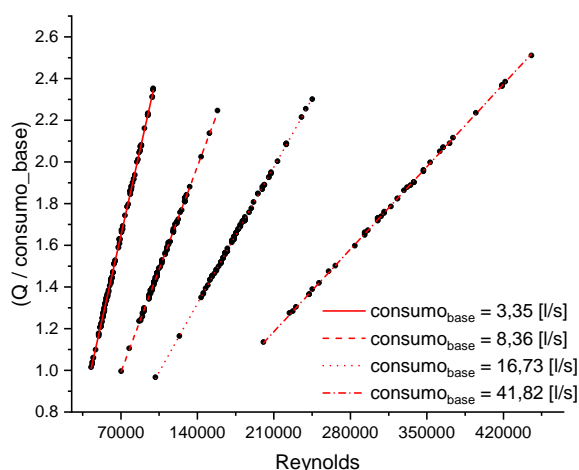
Consumo base [L/s]	Coeficiente	
	'A'	'B'
3,35	2,423E-5	0,99735
8,36	1,44728E-5	0,99796
16,73	1,00813E-5	0,99438
41,82	5,54797E-6	1,00141

Fonte: Elaborada pelo autor.

Pode-se observar que o coeficiente 'b' varia na casa de centena. Não sendo uma violação matematicamente escalar, considerar este coeficiente igual uma constante 1. O desfecho disso

tudo são as Equação 5.10 e Equação 5.11, tornando conhecível o valor da vazão na adutora por meio dos valores do *Reynolds* e consumo base.

Figura 24 – Correlação não-linear das variáveis "Rey" e "consumo base" sobre o domínio "Qadutora/consumo_base"



Fonte: Elaborada pelo autor.

$$(Q/Q_{td}) = coeficiente_A \cdot (Rey)^{coeficiente_B \approx 1} \tag{5.10}$$

$$coeficiente_A_{(Q/q)} = 6,19866E - 5 \cdot (1 + Q_{td} [l/s])^{(-0,64118)} \tag{5.11}$$

Diante disso, o objetivo para o desenvolvimento dessas correlações é que possam ser utilizados para auxiliar no dimensionamento de projetos de sistemas de bombeamento de água que tenham a eficiência energética como princípio. Uma vez que tais funções foram equacionadas em cima de dados classificados como de eficiência excelente.

Logo, para os 5 termos equacionados, foi desenvolvido uma metodologia para conhecer indiretamente os termos como diâmetro ótimo da adutora, características da bomba e do reservatório elevado, além dos indicadores de eficiência apresentados.

5.2.3 Dimensionamento Econômico do Sistema Elevatório, baseado na Eficiência Energética e Operacional da Chave Boia.

Em um sistema elevatório, no qual se conhece a altura geométrica, o comprimento da adutora, a média do volume de consumo diário (no caso de “n” anos de projetos, considere a média de no mínimo 3 períodos – início, meio e fim de projeto) e o rendimento máximo do

motor-bomba. É justificável a utilização das equações apresentadas na Subseção 5.2.2 como ferramenta para o dimensionamento do sistema elevatório, de forma a alcançar a eficiência energética e operacional do mesmo.

Primeiramente, com base no valor adimensional de Len/Hg , calcula-se a altura manométrica nominal do sistema (idem da bomba) pela Equação 5.1 (havendo uma única observação, esta equação tem validade para esta condição $5 \leq len/hg \leq 400$, para o caso fora do limite não foi testada; uma opção seria utilizar a Equação 5.12¹ no caso fora do limite). O termo CE pode ser calculado pela Equação 5.2 utilizando no termo X^{**} , a densidade do fluido, a altura manométrica (obtida pelo passo anterior) e o rendimento máximo esperava para o conjunto motor-bomba. A partir do valor conhecido de CE , da altura manométrica e da vazão teórica diária média (Q_{td} em $[l/s]$), obtém-se o coeficiente de *Reynolds* para a adutora do sistema, pela Equação 5.5. A velocidade e a vazão da adutora podem ser estimadas pela Equação 5.8 e Equação 5.10 utilizando o coeficiente de *Reynolds* (brevemente conhecido) e a vazão teórica diária média (Q_{td} em $[l/s]$).

$$Hm = Hg \times \left[1 + 0,00295 \cdot \left(\frac{Len}{Hg} \right)^{0,9696} \right] \approx Hg + 0,003 \cdot Len \quad (5.12)$$

Conhecida a velocidade e a vazão da adutora (idem a vazão nominal da bomba), calculasse o diâmetro interno ótimo teórico. No caso dos diâmetros comerciais, deve ser priorizado o diâmetro interno igual ou imediatamente superior ao diâmetro teórico. O tempo de bombeamento é obtido pela razão entre o consumo diário médio (Q_{td} em $[m^3/dia]$) e a vazão da adutora (em $[m^3/h]$). Assim, todos os termos necessários para conseguir calcular a energia mínima (E_{min} em $[kwh]$), estimada para o sistema em dimensionamento, é conhecido. A energia mínima é calculada pela Equação 5.13.

$$E_{min} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot Hm}{\eta_{\text{motor-bomba}}} \times \Delta t \quad (5.13)$$

Para legitimar a aplicação dessas equações (Equação 5.1, Equação 5.4, Equação 5.5, Equação 5.8 e Equação 5.10), exemplos sintéticos foram utilizados, no qual uns foram otimizados pelo Método das Tentativas e um pela ferramenta da otimização genética. Estando interessado em dimensionar esses sistemas para endereça-los a uma região de características físicas, permitindo o consumo mínimo de energia. A Tabela 10 ilustra as características físicas e energéticas dos sistemas, bem como o resultado aplicando a metodologia descrita.

Ao comparar os indicadores de energia mínima apresentados na Tabela 10, observa-se que, com a aplicação da metodologia, os valores obtidos de CE e CEN foram próximos da literatura, inclusive, com consumo de energia menores. Ou seja, a metodologia apresentada

¹ Média das equação de KURITZA, J. C. **Sistemas de bombeamento de água com velocidade de rotação variável**. 2017. 161 f. Tese. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2019, página 126 capítulo 5 - equações (42) e (43)

Tabela 10 – Características físicas e energéticas dos sistemas da literatura e da metodologia

Sistema	Hg	Len	Cons./dia	Rend. máx.	Hm	CE	CEN	Quominal	Dadutora	Nb	E_min/mes
Fonte Bibliográfica											
-GOMES ¹ , exemplo 2.3 pvc/defofo	30	2000	2304	75	42,94	0,1560	0,3634	40,00	204 [DN=200]	16,00	10935
-Metodologia	-	-	-	-	37,80	0,1370	0,3625	62,09	248 [DN=250]	10,31	9469
-GOMES ¹ , exemplo 2.4 ferro dúctil	82	24190	20412	85	117,17	0,3756	0,3205	315,00	619 [DN=600]	18,00	233219
-Metodologia	-	-	-	-	112,80	0,3616	0,3206	509,43	595 [DN=600]	11,13	221442
-GOMES ¹ , exemplo 2.5 pvc/defofo	67,2	1096	176,4	60	78,62	0,3571	0,4543	3,5	73 [DN=75]	14,00	1916
-Metodologia	-	-	-	-	77,60	0,3524	0,4542	3,87	80 [DN=100]	12,65	1865
Kuritza ² , exemplo ferro dúctil	12,6	1750	1775	73	16,40	0,0620	0,3800	34,44	252 [DN=250]	14,37	3302
-Metodologia	-	-	-	-	16,58	0,0615	0,3712	50,75	222 [DN=250]	9,80	3278

Sistemas referenciado em: ¹Gomes(2012);² Kuritza(2017).

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 11 – Dados estatísticos da otimização das variáveis de decisão

Parâmetros	GOMES				NBR 12217			
	Média	Q1	Mediana	Q3	Média	Q1	Mediana	Q3
coef_min_level_start	0.107	0.05	0.085	0.14	0.208	0.18	0.19	0.25
coef_max_level_start	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
coef_min_level_middle	0.238	0.22	0.25	0.25	0.102	0.06	0.1	0.11
coef_max_level_middle	0.774	0.75	0.75	0.75	0.937	0.99	0.99	0.99
coef_min_level_end	0.136	0.09	0.125	0.19	0.198	0.17	0.25	0.25
coef_max_level_end	0.79	0.75	0.75	0.75	0.766	0.75	0.75	0.75
coef_freq_start	0.995	0.99	1	1	0.998	1	1	1
coef_freq_middle	0.994	0.99	1	1	0.991	0.98	1	1
coef_Tank_diameter	15.4	12	15.5	19	13.2	8	16	18
rule_start	1.6	1	1	3	1.67	1	1	3
start_rule_start	17.2	17	17	17	17.2	17	17	17
duration_rule_start	3.2	3	3	3	3.44	3	3	3
rule_middle	1.6	1	1*	3	2.33	1	3	3
start_rule_middle	17.2	17	17	17	17.22	17	17	17
duration_rule_middle	3.2	3	3	3	3	3	3	3
rule_end	1.7	1	1*	3	2.44	2	3	3
start_rule_end	17.2	17	17	17	17	17	17	17
duration_rule_end	3	3	3	3	3.22	3	3	3

* recomenda-se a utilização do cenário 3, em vez do registrado pela mediana, o cenário 1.

** Q1 e Q3 são, respectivamente, o primeiro quartil e o terceiro quartil estatístico.

Fonte: Elaborada pelo autor.

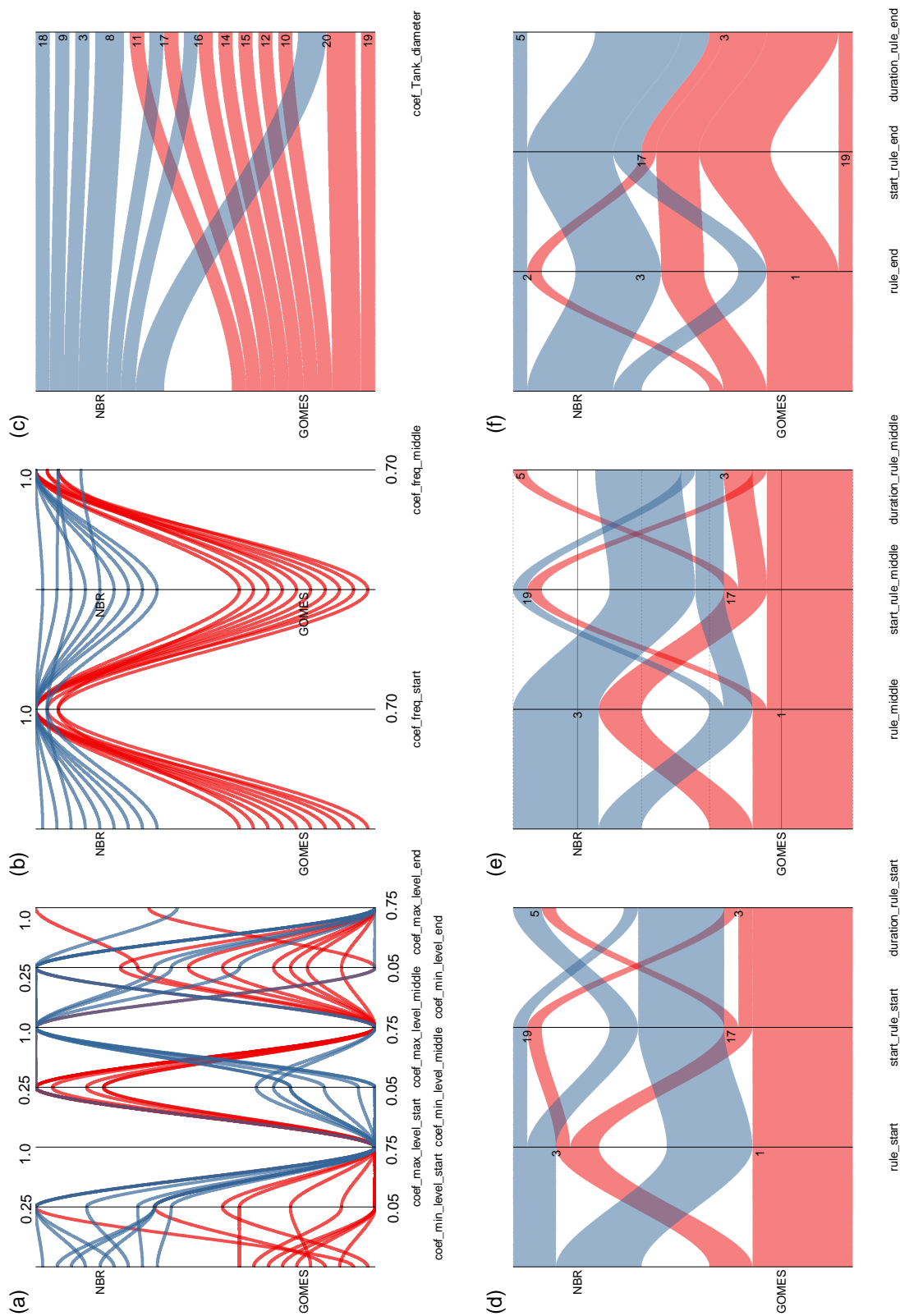
mostra-se como uma ferramenta de gestão, no segmento eficiência energética, que pode auxiliar na tomada de decisão na fase de dimensionamento do sistema elevatório, até mesmo, como diagnóstico em sistemas já implantados. Essas informações podem ser úteis durante os estudos de concepção, onde são estudados diferentes arranjos, sob o ponto de vista de mínimo consumo energético no sistema de bombeamento.

Outra vantagem que mostra o destaque da metodologia proposta é que, em complemento com as informações descrita a seguir, torna-se conhecido todas as características operacionais necessárias para tirar proveito dessa energia mínima, com o intuito de abranger o menor custo de projeto.

Para a compreensão das características operacionais, que possibilita o proveito da energia mínima para alcançar o menor custo de operação, buscou-se conhecer quais foram os valores dos parâmetros otimizado das soluções ditas como de eficiência excelente, da frente de Pareto que representava os menores custo, ilustrando na Figura 25 o domínio dessas soluções.

Analisando os resultados constatado na Figura 25 e a Tabela 11, conclui-se que existem semelhanças entre os valores de parâmetros do grupo GOMES e o do grupo NBR, quando comparado a mediana como métrica, com algumas divergências nos termos "coef_min_level_start", "coef_min_level_middle" "coef_min_level_end" e o "coef_max_level_middle". Embora esses coeficientes de nível, tenham uma divergência para os dois métodos, os demais parâmetros seguem um valor predominante. Outra constatação, é que as características de nível seguem um comportamento, quando uma diminui de valor a outra acompanha ou altera outra característica, que no geral, persiste na eficiência operacional do reservatório (Equação 4.2, variação do

Figura 25 – Domínio da otimização das variáveis de decisões do AG



Fonte: Elaborada pelo autor.

volume armazenado ao longo do dia), isso foi observado tanto quanto para um sistema (Hg, Len, Pop, Método) mudava de método (GOMES/NBR), como quanto o método permanecia mas alterava os outros parâmetros (Hg, Len, Pop) do sistema, inclusive, quanto o parâmetro era o tempo. Em outras palavras, por meio da operação, foram mantidas as características favoráveis a energia mínima. Atendendo a essas observações, não há evidências que contradizem a hipótese de que "tais valores em torno da mediana observado na Tabela 11, corresponde como uma razoável representação das características operacionais do sistema elevatório, tendo a intenção da eficiência operacional do mesmo". Logo, em conjunto com o dimensionamento da energia mínima, resultam no menor custo total do sistema dentro do horizonte de projeto.

Outra observação retirada dessas informações, é com relação ao comportamento da bomba. Apesar de ter sido introduzido uma bomba com inversor de frequência no modelo simulado, observou-se que igualmente para o início de projeto como para o meio de projeto, a rotação ficou praticamente em torno de 100% de sua rotação nominal. Provavelmente isso ocorreu em função de que, com uma variação da rotação, ela ocasionaria uma migração da "região" ótima da bomba (dimensionada energeticamente para estar nesta região), para fora dessa região. Mesmo que, na prática, a vazão e a altura manométrica nessa outra região fossem menores.

A existência da operação dos níveis no reservatório elevado é outro fator que, em conjunto com as características da bomba, contribuem na regulação do volume armazenado no reservatório, para usar a bomba de forma eficiente energeticamente e o operacional da chave boia (que não falte água), consequentemente, alcançando o menor custo.

Mais uma outra observação pertinente é que, mesmo variando a geometria do reservatório na relação entre diâmetro da base e altura útil do reservatório, permanecendo o mesmo volume, os controles de nível ainda os direcionaram para a utilização da região ótima, ou seja, mantendo a eficiência operacional do mesmo para assegurar a eficiência energética do sistema, consequentemente, permanecendo com a minimização do custo total. Na prática, isso possibilita a construção de reservatórios mais achatados, já que foi observado uma larga faixa da relação entre diâmetro da base e altura útil do reservatório, proporcionando aos projetos de Geotecnia um aumento no leque de possibilidade de arranjo da estrutura, assim, optando por aquela que melhor distribui a carga ao longo do solo.

Além disso tudo, chama atenção quando se observa as regras de controles, pois das 3 possibilidades esperada (controle exclusivamente por nível, cenário 1; exclusivamente por hora, cenário 2, ou tanto por nível e hora, cenário 3), o cenário 1, fortemente, prevaleceu em relação a todos os outros cenários. Inclusive, quando estabelece o cenário 3 (nível + horário), observa-se que o controle horário fica como segunda prioridade, tendo o nível como primeira, tais resultados (Figura 25 e Tabela 11) ocasionaram a seguinte hipótese: "o custo tarifário da ponta horaria é capaz de propiciar o desligamento da bomba nesta faixa, mas é o comportamento da curva de demanda que dita o acionamento da bomba". Isso é verídico quando se observa o comportamento

da regra horaria nos dados estatísticos da otimização das variáveis de decisão do AG (Tabela 11), uma vez que em cenários vinculados a um controle horário, tem as seguintes características: (i) a bomba é desligada às 17hs; (ii) retornando o seu acionamento depois de 3hs ininterruptas desligada (ou seja, às 20hs), ocasionado pela restrição do nível mínimo (não faltar água), mesmo que ainda esteja na ponta horária (18hs até 22hs, a faixa estipulada no estudo). O mesmo foi reforçado quando executado testes sintéticos para estudar essa especificidade. A conclusão disso é que para manter o custo total mínimo (eficiência energética e operacional) e ao mesmo tempo atender as restrições hidráulicas (não faltar água na ponta de consumo e periodicidade no reservatório), a seguinte hipótese foi formulada: “recompensa-se o déficit do acionamento da bomba no horário de maior custo com o desligamento, de no mínimo, proporcional à recompensa do déficit, em momentos do dia no qual o sistema não está em sobrecarga de demanda”. Conduta como estas, são diretrizes da eficiência operacional no reservatório para usufruir da energia mínima apontada pela eficiência energética (pelo dimensionamento).

Nesse sentido, para compreender melhor tal metodologia (dimensionamento baseado na eficiência energética e eficiência operacional da chave boia), os casos sintéticos 1 e 2, dimensionados pela Tabela 10, foram simulados de acordo com os parâmetros operacionais do método escolhido (GOMES ou NBR 12217) pela Tabela 11 (com algumas observações) e em conformidade com a recomendação da nota de texto da tabela para o método GOMES. As conclusões são apresentadas a seguir.

5.2.3.1 Caso Sintético 1, pelo método NBR 12217.

Utilizando o sistema levantado por Kuritza (2017): dimensionar um sistema de bombeamento com um reservatório elevado localizado a 1,75 km de distância e 12,6 m acima da casa de bomba, tubulação ferro dúctil. Havendo no início de projeto um consumo diário de $1350 \text{ m}^3/\text{dia}$ e final de projeto $2200 \text{ m}^3/\text{dia}$. O rendimento esperado do conjunto motor-bomba é de 73%. O preço do kwh é de 0,33274 R\$/kwh fora da ponta e na ponta (18hs até 21hs) é 3 vezes mais caro. Tendo como período de projeto 30 anos, com uma taxa de juro anual de 10% e de aumento da energia de 9%. As perdas de carga contínuas sendo majoradas em 10%, para fazer frente às localizadas na adutora.

Como anteriormente feito o dimensionamento para esse sistema (Tabela 10), tais observações sobre essa parte já foi discutido. Ficando aqui, uma discussão mais voltada a eficiência das características operacionais no sistema, ou seja, qual a relação dessas operações na eficiência energética e na minimização do custo total.

A seguir tem-se o relatório que o arquivo EPANET retorna com as informações sobre a simulação, foi feito uma alteração no código fonte para retornar todas as informações ao longo do tempo de projeto, as características físicas e orçamentárias de cada parte do sistema.

```
*****
*                               *
*           EPANET 2.0 Brasil     *
*           Hidráulica e Qualidade da Água *
*           Simulação da Rede     *
*           Versão 2.00.11       *
*****
```

Arquivo de Rede: NBR_pop9167_len1750_hg12.6

Parâmetros:

- * Diâmetro: 250 [mm]
- * Coef Tank (diâmetro/altura): 16.0 [m/m]
- * Freq da bomba (00-10 anos): 100 [% da rotação nominal]
- * Freq da bomba (10-20 anos): 100 [% da rotação nominal]
- * Freq da bomba (20-30 anos): 100 [% da rotação nominal]
- * Regra de operação (00-10 anos): nível
 - Mínimo level: 19 [% da altura útil]
 - Máximo level: 75 [% da altura útil]
- * Regra de operação (10-20 anos): nível e horário
 - Mínimo level: 25 [% da altura útil]
 - Máximo level: 99 [% da altura útil]
 - Hora da paralisação: 17:00 [h:min]
 - Duração da paralisação: 03 [horas]
- * Regra de operação (20-30 anos): nível e horário
 - Mínimo level: 25 [% da altura útil]
 - Máximo level: 75 [% da altura útil]
 - Hora da paralisação: 18:00 [h:min]
 - Duração da paralisação: 02 [horas]

OBSERVAÇÃO: alteração na operação horária no período final (20-30 anos):
de paralisação da bomba entre 17:00 e 20:00, para paralisação entre as 18:00 e 20:00.

UFRGS/IPH

Utilização de Energia: [start] [2019-2029]

Bomba	Fator Utiliz.	Efic. Med.	kWh /m3	kW/h Méd.	kW Máx.	Custo /dia
Q86.23_Hm21.01	34.32	71.95	0.07	10.35	10.52	38.1 R\$

Tempo de Projeto: start/10anos
Custo Total, com fa: 121.38 mil R\$
Consumo base: 24.80 l/s
Reservatório: 53.53% esvaziado
Situação: OKAY!

Utilização de Energia: [middle] [2029-2039]

Bomba	Fator Utiliz.	Efic. Med.	kWh /m3	kW/h Méd.	kW Máx.	Custo /dia
Q86.23_Hm21.01	46.15	70.99	0.07	10.16	10.38	37.46 R\$

Tempo de Projeto: middle/10anos
Custo Total, com fa: 108.92 mil R\$
Consumo base: 32.61 l/s
Reservatório: 94.38% esvaziado
Situação: OKAY!

Utilização de Energia: [end] [2039-2049]

Bomba	Fator Utiliz.	Efic. Med.	kWh /m3	kW/h Méd.	kW Máx.	Custo /dia
Q86.23_Hm21.01	58.58	69.99	0.07	10.0	10.11	46.76 R\$

Tempo de Projeto: end/10anos
Custo Total, com fa: 124.1 mil R\$
Consumo base: 40.42 l/s
Reservatório: 63.55% esvaziado
Situação: OKAY!

 UFRGS/IPH
 Método da Avaliação Real dos Custos

 Número de Bombeamento médio: 11.12 [horas]
 Rendimento médio: 70.98 [%]
 Altura Manométrica média: 17.85 [m.c.a]
 Energia média: 113.15 [kwh por dia]

 Vazão média: 41.25 [l/s]

 Diâmetro da Adutora: 250 [mm]
 Comprimento da Adutora: 1750 [m]

 Velocidade Mínima: 0.8 [m/s]
 Velocidade Máxima: 0.88 [m/s]

 Perda de Carga média na Adutora: 3.19 [m.c.a]

 Cota topográfica do Reservatório: 12.6 [m, na base do RNV]
 Volume Útil do Reservatório: 976.43 [m³]
 Diâmetro do Reservatório: 22.3 [m]
 Altura do Reservatório: 2.5 [m]

 Nível Mínimo mínimo: 0.06 [m]
 Nível Mínimo médio: 0.27 [m]
 Nível Mínimo máximo: 0.46 [m]

 Nível Máximo mínimo: 1.89 [m]
 Nível Máximo médio: 2.08 [m]
 Nível Máximo máximo: 2.43 [m]

 Custo de Implantação do Motorbomba: 13.97 [mil R\$]
 Custo de Implantação da Adutora: 649.95 [mil R\$]
 Custo de Implantação do Reservatório: 286.63 [mil R\$]
 Custo de Operação de Energia da Bomba: 354.4 [mil R\$]

 Custo de Investimento Total: 1304.95 [mil R\$]

 Eficiência Média do Reservatório: 70.48 [%] esvaziado

Para o presente caso sintético, é observável que os termos de desempenho energético como eficiência do motor-bomba, a potência média, o coeficiente consumo de energia ($CE = kwh/m^3$) apresentados se mostraram com pouca variação no valor, quando comparados em tempos diferentes (início, meio e fim de projeto). Esse comportamento de pouca variabilidade desses termos, está associada à permanência do ponto de trabalho na região ótima (chama-se de região ótima como sendo, a flutuação do ponto ótimo de trabalho da bomba), significando que a região de consumo mínimo não tem uma alteração significativa com o tempo. Nota-se que, utilizando o indicador médio de eficiência (estipulado que deve estar acima de 85% da nominal, a nominal estimado neste caso foi igual a 73%), observa-se que em todos os períodos a eficiência do conjunto motor-bomba ficou acima de 62%, sinalizando que o sistema está na região ótima. Obtendo o CEN (sendo igual a $0,2725/\eta$) igual a 0,3787 em início de período, 0,3838 no meio de período e 0,3893 para o final de período, estando dentro dos valores encontrado na literatura. Como por exemplo, no México, valores inferiores a 0,4258 o sistema recebe o selo de eficiência verde, já para valores entre 0,4258 até 0,5240, o selo de cor amarelo, e acima 0,5240, o de cor vermelha (CEEPA, 2014).

Uma das características físicas que se alteram ao longo do tempo é, exatamente, a regra operacional, que resultará em cada período um comportamento informando o momento do acionamento e desligamento da bomba. Quando ao tempo de bombeamento, ver-se um crescimento do fator de utilização, mas é focando a atenção para o tempo de final de projeto, no

qual se ver o fator de utilização da bomba estar em torno de 59%. O que não era esperado, já que o costume dos projetos é dimensioná-lo para que no final de projeto, a bomba esteja funcionando integralmente o tempo de fora de ponta (aqui sendo estimado como 21 horas) ou parcialmente um pouco dentro da ponta, na casa dos 88% para o fator de utilização, mas esse comportamento não foi observado. Em termos práticos, isso quer dizer que, esse sistema está possibilitado a ser usado além do tempo do horizonte de projeto, mas não se pode afirmar que irá permanecer como um sistema eficiente energeticamente.

5.2.3.2 Caso Sintético 2, pela recomendação de Gomes (2012)

Com os dados de Caso Sintético 1, foi simulado mais uma vez, considerando que o método de dimensionamento do reservatório elevado agora é pela recomendação de Gomes (2012). Esta escolha de método costuma ocorrer quando existe a preocupação com a tarifa de energia no horário de ponta, observando que os projetos, no geral, desligam a bomba nessa faixa.

De acordo com o relatório abaixo, todas as informações sobre o desempenho energético do Caso 1 foram observados aqui também: sistema apresentado como eficiente ao longo do tempo, permanecendo na região ótima, rendimentos bem próximos do nominal. Ficando visível todas as informações da metodologia de dimensionamento econômico baseado na eficiência energética. Existindo algumas, flutuações nos valores, mas estando aproximadamente próximo.

O destaque está na comparação da influência do método de dimensionamento do reservatório. De acordo com a aplicação dos Casos 1 e 2, observa-se que o método de dimensionamento do reservatório não interferiu na otimização do custo mínimo. Para os dois métodos, o valor alcançado de custo mínimo foi próximo. Já o custo energético teve maiores diferenças. O custo total de energia foi menor para o método NBR 12217, em contrapartida o custo do reservatório com tal método (NBR 12217) foi maior.

Vale ressaltar que no método NBR 12217 (1994) não existia indicações para a economia do consumo de energia, mas mesmo assim ele alcançou custo energético menores do que em relação ao método proposto por GOMES, que utiliza do conceito de paralisação na ponta horária. Testes feitos em outros casos mostraram o mesmo comportamento, que o custo energético foi menor para o método NBR 12217 em relação ao proposto por GOMES, o que leva concluir que o método de dimensionamento do reservatório influencia na otimização do custo energético. No entanto com uma otimização operacional do sistema, incluído as características do reservatório, essa influência é atenuada no custo total, ao ponto de dizer que, a escolha do método não influencia na otimização envolvendo a otimização macro do sistema. Porém com uma ressalva: contanto que as características de operação do reservatório sejam integradas na otimização, como variável de decisão. O mesmo não se pode ser afirmado quando a otimização não leva em conta essas características como variável de decisão.

```
*****
*                               *
*           EPANET 2.0 Brasil     *
*           Hidráulica e Qualidade da Água *
*           Simulação da Rede     *
*           Versão 2.00.11        *
*****
```

Arquivo de Rede: GOMES_pop9167_len1750_hg12.6

Parâmetros:

- * Diâmetro: 250 [mm]
- * Coef Tank (diâmetro/altura): 15.5 [m/m]
- * Freq da bomba (00-10 anos): 100 [% da rotação nominal]
- * Freq da bomba (10-20 anos): 100 [% da rotação nominal]
- * Freq da bomba (20-30 anos): 100 [% da rotação nominal]
- * Regra de operação (00-10 anos): nível
 - Mínimo level: 08 [% da altura útil]
 - Máximo level: 75 [% da altura útil]
- * Regra de operação (10-20 anos): nível e horário
 - Mínimo level: 25 [% da altura útil]
 - Máximo level: 75 [% da altura útil]
 - Hora da paralisação: 17:00 [h:min]
 - Duração da paralisação: 03 [horas]
- * Regra de operação (20-30 anos): nível e horário
 - Mínimo level: 12 [% da altura útil]
 - Máximo level: 75 [% da altura útil]
 - Hora da paralisação: 17:00 [h:min]
 - Duração da paralisação: 02 [horas]

OBSERVAÇÃO: alteração na operação horária no período final (20-30 anos):
de paralisação da bomba entre 17:00 e 20:00, para paralisação entre as 17:00 e 19:00.

UFRGS/IPH

Utilização de Energia: [start] [2019-2029]

Bomba	Fator Utiliz.	Efic. Med.	kWh /m3	kW/h Méd.	kW Máx.	Custo /dia
Q86.23_Hm21.01	37.28	72.1	0.07	10.39	10.57	40.72 R\$

Tempo de Projeto: start/10anos
Custo Total, com fa: 129.71 mil R\$
Consumo base: 24.80 l/s
Reservatório: 64.1% esvaziado
Situação: OKAY!

Utilização de Energia: [middle] [2029-2039]

Bomba	Fator Utiliz.	Efic. Med.	kWh /m3	kW/h Méd.	kW Máx.	Custo /dia
Q86.23_Hm21.01	47.34	71.04	0.07	10.16	10.38	38.4 R\$

Tempo de Projeto: middle/10anos
Custo Total, com fa: 111.65 mil R\$
Consumo base: 32.61 l/s
Reservatório: 68.02% esvaziado
Situação: OKAY!

Utilização de Energia: [end] [2039-2049]

Bomba	Fator Utiliz.	Efic. Med.	kWh /m3	kW/h Méd.	kW Máx.	Custo /dia
Q86.23_Hm21.01	56.8	70.17	0.07	10.02	10.16	52.13 R\$

Tempo de Projeto: end/10anos
Custo Total, com fa: 138.36 mil R\$
Consumo base: 40.42 l/s
Reservatório: 73.1% esvaziado
Situação: OKAY!

UFRGS/IPH
Método da Avaliação Real dos Custos

Número de Bombeamento médio: 11.31 [horas]
Rendimento médio: 71.1 [%]
Altura Manométrica média: 17.83 [m.c.a]
Energia média: 115.26 [kwh por dia]

Vazão média: 41.45 [l/s]

Diamêtro da Adutora: 250 [mm]
Comprimento da Adutora: 1750 [m]

Velocidade Mínima: 0.81 [m/s]
Velocidade Máxima: 0.89 [m/s]

Perda de Carga média na Adutora: 3.26 [m.c.a]

Cota topográfica do Reservatório: 12.6 [m, na base do RNV]
Volume Útil do Reservatório: 716.3 [m³]
Diamêtro do Reservatório: 19.1 [m]
Altura do Reservatório: 2.5 [m]

Nível Mínimo mínimo: 0.01 [m]
Nível Mínimo médio: 0.09 [m]
Nível Mínimo máximo: 0.2 [m]

Nível Máximo mínimo: 1.88 [m]
Nível Máximo médio: 1.89 [m]
Nível Máximo máximo: 1.9 [m]

Custo de Implantação do Motorbomba: 14.0 [mil R\$]
Custo de Implantação da Adutora: 649.95 [mil R\$]
Custo de Implantação do Reservatório: 249.57 [mil R\$]
Custo de Operação de Energia da Bomba: 379.72 [mil R\$]

Custo de Investimento Total: 1293.24 [mil R\$]

Eficiência Média do Reservatório: 68.41 [%] esvaziado

5.3 Consideração Geral

Vale destacar que as equações e termos utilizados para o dimensionamento e operação do sistema foram obtidos junto a uma simulação computacional, podendo conter equívocos numéricos ou de estimativa das características físicas. Os resultados foram apresentados para exemplificar a importância da utilização da operação (chave boia e da regra de controle) variável no reservatório no propósito de melhorar o desempenho hidro energético do sistema. O que está de acordo com um dos objetivos da pesquisa que é o desenvolvimento de uma metodologia para o dimensionamento do sistema elevatório e a operação no reservatório, em direção a uma eficiência energética macro do sistema.

Sobre a utilização das informações aqui relatadas, devem ser realizados de forma sensata para cada situação, em razão da importância do desempenho tanto hidro energético quanto financeiro para as entidades prestadoras deste tipo de serviço.

Salientando que este trabalho não esgota as discussões e considerações sobre eficiência operacional (chave boia e regra de controle) e energética em sistemas de bombeamento e reservação de água. Pelo contrário, muito das informações e discussões relatadas, desdobrou novas reflexões e questionamento sobre o assunto.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Sabendo-se que a eficiência energética é um processo indispensável à tomada de decisão mais efetiva em sistemas de abastecimentos de água, neste estudo os aspectos investigados ao longo da pesquisa foi relacionado a importância da eficiência operacional do reservatório, como ferramenta para o planejamento e implementação do consumo mínimo de energia, assim como a minimização do custo total do sistema. A avaliação deste aspecto no consumo e custo energético está direcionado ao estudo de diferentes características hidráulicas e geométrica do sistema, assim podendo conhecer quais condições hidráulicas de operação fornecem melhor eficiência energética.

Para cumprir esse objetivo foi desenvolvido um modelo de simulação (associado ao *Programmer Toolkit* EPANET2) para o cálculo do custo de instalação, consumo e custo energético de um sistema elevatório, acoplado a um algoritmo de otimização multiobjetivo (elaborado pelo autor) que foi utilizado para obter o diâmetro ótimo, as características da bomba (vazão e altura manométrica nominais) e suas regras de operação (cenário de controle e os limites mínimo e máximo da chave boia) otimizadas para o sistema. Foram variadas algumas características geométricas do sistema como: altura geométrica, comprimento, volume de consumo diário (população final de projeto) e metodologia do dimensionamento da capacidade volumétrica do reservatório. Registrando as informações hidro energética em três situações no tempo: início, meio e fim de projeto. Para cada sistema simulado (de um total de 160 sistemas) foram obtidas informações hidro energética e dos indicadores de desempenho para avaliar a eficiência energética e operacional do mesmo. Assim, os resultados foram avaliados e discutidos, sendo estabelecidos critérios e equações que podem ser utilizados para a análise geral da eficiência energética e operacional de sistemas de bombeamento de água.

Em relação a otimização multiobjetivo do problema em estudo, o algoritmo desenvolvido foi capaz de otimizar as variáveis de decisão (total de 19 variáveis) em todos os sistemas avaliados. O critério de parada adotado em 1000 gerações (ou ciclos) foi suficiente já que, em geral, as funções-objetivo atingiam uma região próxima da predição da frente de Pareto já com 700 gerações. O método proposto de não rejeitar (durante o processo evolutivo) as soluções penalizadas, possibilitou uma agilidade na convergência do processo de otimização. Contudo, é

devido ao elevado número de gerações, que se observa uma melhoria na representação da Frente de Pareto em toda sua extensão, sem perda das soluções não-dominadas nos extremos, além de um número maior de soluções na própria Frente.

Considerando o resultado da otimização das variáveis de decisão, chama atenção quando se observa a variável regra de controle, pois das 3 possibilidades esperada (controle exclusivamente por nível, cenário 1; exclusivamente por hora, cenário 2, ou tanto por nível e hora, cenário 3), o cenário 1, fortemente, prevaleceu em relação a todos os outros cenários. Inclusive, quando estabelece o cenário 3 (nível + horário), observa-se que o controle horário fica como segunda prioridade, tendo o nível como primeira. Ocasionalmente a seguinte hipótese: "o custo tarifário da ponta horaria é capaz de propiciar o desligamento da bomba nesta faixa, mas é o comportamento da curva de demanda que dita o acionamento da bomba". Isso é verídico quando se observa o comportamento da regra horaria nos dados estatísticos da otimização das variáveis de decisão, uma vez que em cenários vinculados a um controle horário, tem as seguintes características: (i) a bomba é desligada às 17hs; (ii) retornando o seu acionamento depois de 3hs ininterruptas desligada (ou seja, às 20hs), ocasionado pela restrição do nível mínimo (não faltar água), mesmo que ainda esteja na ponta horária (18hs até 22hs, a faixa estipulada no estudo). O mesmo foi reforçado quando executado testes sintéticos para estudar essa especificidade. A conclusão disso é que para manter o custo total mínimo (eficiência energética e operacional) e ao mesmo tempo atender as restrições hidráulicas (não faltar água na ponta de consumo e periodicidade no reservatório), a seguinte hipótese foi formulada: "recompensa-se o déficit do acionamento da bomba no horário de maior custo com o desligamento, de no mínimo, proporcional à recompensa do déficit, em momentos do dia no qual o sistema não está em sobrecarga de demanda". Conduta como estas, são diretrizes da eficiência operacional no reservatório para usufruir do custo total mínimo.

Em suma, os sistemas otimizados pelo algoritmo indicaram um bombeamento no período de ponta, quando a tarifa energética é mais onerosa. Entretanto, mesmo nos casos cuja regra de operação otimizada determinou bombeamento no período de ponta, o bombeamento durante este período foi parcial, em média de 2 horas. A regra de operação do sistema de bombeamento foi obtida a partir das variáveis de decisão entre horário de desligamento e os limites da chave boia no reservatório superior. A partir desses resultados, foi definido que uma alternativa operacional (cenário de controle e chave boia) variável, ao longo do tempo, apresentou melhores desempenhos hidro energética do sistema. Isso ressalta que, em projetos de sistemas elevatórios, a capacidade do reservatório precisa ser definida não só a partir do consumo, mas também, da distribuição desse ao longo do dia e do horizonte de projeto.

Outro objetivo da pesquisa dizia respeito a relação da capacidade volumétrica no reservatório na composição dos custos (operacional, instalação e total). Nesse sentido, as informações mostraram que a capacidade volumétrica influencia diretamente no custo operacional, com o aumento da capacidade volumétrica, houve melhoria no desempenho econômico da utilização da

energia mínima, entretanto, resultou em custos maiores na construção do reservatório. Desse modo, destacando o seguinte: “a relação custo implantação do reservatório e custo operação energética, é semelhante à relação custo implantação adutora com custo operação energética”. No entanto, com relação ao custo total, tal influência é atenuada no sentido orçamentário, quando há adequação das características físicas do volume com as regras de controle de níveis e horário, assim mantendo o custo total mínimo.

Nesse sentido, é indispensável à decisão de incluir as características do reservatório na formulação da otimização do custo do sistema. Inclusive, inserindo a operação das regras de controle no reservatório, ao longo do tempo, ou seja, é inevitável um estudo de minimização de custos, em nível de projeto, que passa pela otimização não seja multiobjetivo.

Vale ressaltar que no método NBR 12217 (1994) não existia indicações para a economia do consumo de energia, mas mesmo assim ele alcançou custo energético menores do que em relação ao método proposto por GOMES, que utiliza do conceito de paralisação na ponta horária. Testes feitos em diversos casos mostraram o mesmo comportamento, que o custo energético foi menor para o método NBR 12217 em relação ao proposto por GOMES, o que leva concluir que o método de dimensionamento do reservatório influencia na otimização do custo energético. Porém com uma ressalva: contanto que as características de operação do reservatório (regra de controle e chave boia) sejam integradas na otimização, como variável de decisão. O mesmo não se pode ser afirmado quando a otimização não leva em conta essas características como variável de decisão.

Outra grandeza importante para o custo mínimo total de sistemas elevatórios é a energia mínima (eficiência energética) que representa, na prática, a parcela de energia mínima necessária para o escoamento. A partir dos resultados da otimização, em cima de dados com eficiência excelente, foi formulado uma metodologia de dimensionamento do sistema elevatório, no que tange ao diâmetro ótimo e as características da bomba (vazão e altura manométrica nominais).

Considerando os exemplos constatados no estudo, há semelhanças significativas entre os valores hidro energético pela otimização e a metodologia proposta. Mostrando-se como uma ferramenta de gestão, no segmento eficiência energética, que auxilia na tomada de decisão na fase de dimensionamento do sistema elevatório, até mesmo como diagnóstico em sistemas já implantados.

O destaque da metodologia proposta é que, em complemento com as informações descrita na operação da capacidade volumétrica do reservatório (regra de controle e a chave boia), torna-se conhecida todas as características operacionais necessárias para tirar proveito do conceito de energia mínima, com o intuito de abranger o custo total mínimo.

Ressaltando que esta metodologia (dimensionamento e diretrizes de operação) amplia às informações sobre eficiência operacional e energética, em sistemas de bombeamento e reservação de água. Entretanto, ela não pode ser usada isoladamente (avulso), mas sim integrado

aos inúmeros conhecimentos técnico, físico e empírico do local em que se encontra o sistema elevatório.

Nesse sentido, o objetivo principal da pesquisa foi cumprido ao serem propostas diretrizes de operação para possibilitar o custo total mínimo do sistema por meio do consumo mínimo de energia. Desse modo, contribuindo com as citações de Batchabani e Fuamba (2014), Xu, Chen e Qi (2015) e Vilanova e Balestieri (2015), da necessidade de estudos que relacionem o volume de reservação, com o consumo de energia elétrica nas estações elevatórias.

Já para um diagnóstico energético e temporal do conjunto motor-bomba, foi estabelecido um indicador auxiliar para o critério de eficiência energética. O valor médio de 85% da eficiência nominal pode ser utilizado como um indicador auxiliar, para a eficiência energética, no qual em adutoras com comprimento de até 10 mil metros, o conjunto de motor-bomba que estiver trabalhando abaixo de 85% da eficiência nominal pode ser considerado como de baixa eficiência. No entanto, a métrica média nem sempre se apresenta como sendo uma informação altamente transparente, ela atenua muitas informações, logo, a experiência dos profissionais projetistas da área acaba sendo indispensável para maiores detalhes desse diagnóstico.

Algumas recomendações podem ser sugeridas como validação e ampliação nesta área de estudo: (i) desenvolver o procedimento metodológico, com as diretrizes recomendadas, num sistema de bombeamento em nível de projeto, testando a veracidade das informações; (ii) proceder a metodologia para outra tipologia de sistema, por exemplo, PVC defofo, como forma de testar as equações apresentadas na Subseção 5.2.2 quando a sua generalidade; (iii) avaliar a influência da posição do consumo de pico da curva de consumo para as diretrizes de operação recomendadas, já que a curva utilizada (Figura 4) apresenta um pico no início da ponta horária; e (iv) ampliar os intervalos das equações apresentadas na Subseção 5.2.2, além dos analisados nessa pesquisa.

REFERÊNCIAS

65/151. *Resolução aprovada pela Assembleia Geral 65/151. Ano Internacional da Energia Sustentável para Todos*. [S.l.], 2011. Citado na página 23.

ABEBE, A. J.; SOLOMATINE, D. P. Application of global optimization to the design of pipe networks. **Proceedings of 3rd International Conference on Hydroinformatics**, Copenhagen, 1998. Citado na página 36.

ALEGRE, H.; HIRNER, W.; BAPTISTA, J. M.; PARENA, R. **Indicadores de desempenho para serviços de abastecimento de água: versão portuguesa de Performance indicators for water supply services**. Londres, 2004. Citado na página 61.

Alem Sobrinho, P.; TSUTIYA, M. T. **Coleta e transporte de esgoto sanitário**. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1999. Citado nas páginas 44, 49 e 104.

ALLIANCE TO SAVE ENERGY. **Watergy: Taking advantage of untapped energy and water efficiency opportunities in municipal water systems**. Washington, 2002. 142 p. Citado nas páginas 21 e 23.

ALVES, F. M. **A importância das bombas nas instalações navais**. Dissertação (Mestrado) — Centro de Instrução Almirante Graça Aranha, Marinha do Brasil, Rio de Janeiro, 2015. Citado na página 27.

ARROYO, J. E. C. **Heurísticas e metaheurísticas para otimização combinatória multiobjetivo**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Campinas, Unicamp, Campinas, 2002. Citado na página 144.

ASOCIACIÓN NACIONAL DE EMPRESAS DE AGUA Y SANEAMIENTO DE MÉXICO A.C. **Informe de la iniciativa CEEPA 2014: Resultados de conjunto-benchmarking perspectivas de mejora continua**. México, 2014. 44 p. Citado na página 87.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12214: Projeto de sistema de bombeamento de água para abastecimento público - procedimento**. Rio de Janeiro, 1992. 15 p. Citado na página 30.

_____. **ABNT NBR 12217: Projeto de reservatório de distribuição de água para abastecimento público**. Rio de Janeiro, 1994. 26 p. Citado nas páginas 19, 25, 40, 46, 47, 48, 61, 64, 69, 159, 169 e 172.

_____. **ABNT NBR 12215-1: Projeto de adutora de água. parte 1: Conduto forçado**. Rio de Janeiro, 2017. 26 p. Citado na página 31.

_____. **ABNT NBR 12218: Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público — procedimento**. Rio de Janeiro, 2017. 26 p. Citado na página 31.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. **Controle e redução de perdas nos sistemas públicos de abastecimento de água**. Porto Alegre, 2015. Citado nas páginas 33 e 39.

Azevedo Netto. Pequena história das bombas hidráulicas. **DAE - Departamento de Água e Esgoto**, 1989. Citado nas páginas 26 e 27.

_____. **Manual de Hidráulica, 8ª edição, publisher = Blücher LTDA, address = São Paulo.** [S.l.: s.n.], 1998. Citado na página 44.

Banco Interamericano de Desenvolvimento. **Avaliação de Sistemas de Bombeamento de Água:** manual de eficiência energética. Washington, 2011. Citado na página 32.

BATCHABANI, E.; FUAMBA, M. Optimal tank design in water distribution networks: Review of literature and perspectives. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 140, 2014. Citado nas páginas 37, 62 e 94.

CARRIJO, I. B.; REIS, L. F. R.; WALTERS, G. A.; SAVIC, D. Operational optimization of wds based on multiobjective genetic algorithms and operational extraction rules using data mining. **Water and Environmental Resources Management**, 2004. Citado na página 37.

CARVALHO, P. S. O. Plano de gestão operacional do sistema de abastecimento de Água do campus i da universidade federal da paraíba, com ênfase na eficiência energética e hidráulica. **VI SEREA – Seminário Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água**, 2006. Citado na página 23.

CEMBRANO, G.; BRDYŚ, M.; QUEVEDO, J.; COULBECK, B.; ORR, C. H. Optimization of a multi-reservoir water network using a conjugate gradient technique. a case study. **Analysis and Optimization of Systems**, 2006. Citado na página 36.

CHEUNG, P. B.; REIS, L. F. R.; FORMIGA, K. T. M.; CHAUDHRY, F. H.; TICONA, W. G. C. Multiobjective evolutionary algorithms applied to the rehabilitation of a water distribution system: A comparative study. **Evolutionary Multi-Criterion Optimization**, Berlin/Heidelberg, 2003. Citado nas páginas 35 e 36.

COELHO, B.; ANDRADE-CAMPOS, A. Efficiency achievement in water supply systems - a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 30, p. 59–84, 2014. Citado nas páginas 21, 34, 36 e 39.

COELLO, C.; LAMONT, G.; VELDHUIZEN, D. **Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems**. New York: Springer, 2007. Citado na página 35.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Técnicas de abastecimento e tratamento de águas In: “Reservatório de distribuição de água”**. [S.l.], 1987. 332 p. Citado nas páginas 25 e 47.

COMPANHIA ESTADUAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Tarifas de Energia Elétrica aplicáveis ao Grupo A - Em R\$ sem impostos**. [S.l.], 2018. 1 p. Citado na página 42.

COURA, S. de P. A conta de energia elétrica no saneamento. **Guias Práticos: Técnicas de Operação em Sistemas de Abastecimento de Água**, v. 5, 2007. Citado na página 42.

DALLEY, S.; OLESON, J. P. Sennacherib, archimedes, and the water screw: The context of invention in the ancient world. **The Johns Hopkins University Press and the Society for the History of Technology**, 2003. Citado na página 27.

DEB, K.; PRATAP, A. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: Nsga-ii. **IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION**, v. 6, 2002. Citado na página 66.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2018, ano base 2017**. [S.l.], 2018. 232 p. Citado na página 22.

FANG, H. en; ZHANG, J.; GAO, J. liang. Optimal operation of multi-storage tank multi-source system based on storage policy. **Journal of Zhejiang University-SCIENCE A**, 2010. Citado na página 37.

FELDMAN, M. Aspects of energy efficiency in water supply systems. **Proceedings of the 5th IWA Water Loss Reduction Specialist Conference**, 2009. Citado na página 38.

FERRO, G.; LENTINI, E. J. **Recursos Naturales e Infraestructura: Eficiencia energética y regulación económica en los servicios de agua potable y alcantarillado**. Santiago, 2015. 70 p. Citado na página 22.

FILHO, J. T. Aspectos relevantes do controle de perdas em sistemas públicos de abastecimento de água. **DAE**, 2016. Citado na página 33.

FUMO, N.; MAGO, P.; LUCK, R. Methodology to estimate building energy consumption using energyplus benchmark models. **Energy and Buildings**, v. 42, p. 2331–2337, 2010. Citado na página 21.

GARGARIN, M.; FANTHAM, E. **The Oxford Encyclopedia of Ancient Greece and Rome**. Londres: Oxford University Press, 2010. Citado na página 27.

GEEM, Z. W. Optimal cost design of water distribution networks using harmony search. **Engineering Optimization**, 2006. Citado na página 36.

GOMES, H. P. **Sistemas de Abastecimento de Água: Dimensionamento Econômico e Operação de Redes Elevatórias**. João Pessoa: Ed.Universitária UFPB, 2009. Citado nas páginas 21, 33, 42, 43 e 48.

_____. **Sistemas de Bombeamento: eficiência energética**. João Pessoa: Ed. Universitária UFPB, 2012. Citado nas páginas 19, 22, 25, 46, 47, 48, 61, 64, 66, 69, 81, 88, 159 e 172.

GRIFFITHS-SATTENSPIEL, B.; WILSON, W. **The Carbon Footprint of Water**. Portland: River Network, 2009. Citado na página 21.

HARDY, L. Evaluation of spain's water - energy nexus. **International Journal of Water Resources Development**, v. 28, p. 151–170, 2012. Citado na página 22.

Harry Saunders. The khazzoom-brookes postulate and neoclassical growth. **The Energy Journal**, v. 13, p. 131–148, 1992. Citado nas páginas 31 e 33.

HENRIQUES, K. R. da S. **Diagnóstico hidroenergético e otimização operacional pela aplicação de algoritmos genéticos, de uma estação elevatória de água**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018. Citado na página 36.

HOFFMAN, A. R. **The Connection: Water and Energy Security**. 2004. Disponível em: <<http://www.iags.org/n0813043.htm>>. Acesso em: 23/08/2018. Citado na página 21.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Tendências Demográficas**. Rio de Janeiro, 2000. 63 p. Citado na página 44.

_____. **Tendências Demográficas**. Rio de Janeiro, 2010. Citado na página 44.

- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook**. [S.l.], 2016. 684 p. Citado na página 33.
- JOLLAND, G.; COHEN, G. Optimal control of water distribution network by two multilevel methods. **Water Resources Research**, 1980. Citado na página 34.
- KURITZA, J. C. **Metodologia para Avaliação da Eficiência Energética de Sistemas de Bombeamento de Água com velocidade de rotação variável**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017. Citado nas páginas 33, 36, 43, 45, 50, 81 e 85.
- KURITZA, J. C.; CAMPONOGARA, G.; MARQUES, M. G.; SANAGIOTTO, D. G.; BATTISTON, C. Dimensionless curves of centrifugal pumps for water supply systems: development and case study. **Brazilian Journal of Water Resources**, v. 22, 2017. Citado na página 50.
- LANSEY, K. E.; AWUMAH, K. Optimal pump operations considering pump switches. **Journal of Water Resources Planning and management, ASCE**, 1994. Citado na página 34.
- LEIBOWITZ, A.; FRIEDMAN, B. Family bequests and the derived demand for health inputs. **Economic Inquiry**, 1979. Citado na página 28.
- LIONG, S.-Y.; ATIQUZZAMAN, M. Optimal design of water distribution networks using shuffled complex evolution. **Journal of the Institution of Engineers**, 2004. Citado nas páginas 33 e 36.
- LUNA, T.; RIBAU, J.; FIGUEIREDO, D.; ALVES, R. Improving energy efficiency in water supply systems with pump scheduling optimization. **Journal of Cleaner Production**, v. 213, 2019. Citado na página 33.
- LÜCKEN, C. V.; BARÁN, B.; SOTELO, A. Pump scheduling optimization using asynchronous parallel evolutionary algorithms. **CLEI Electronic Journal**, 2004. Citado na página 37.
- MACHELL, J.; MOUNCE, S.; BOXALL, J. Online modelling of water distribution systems: a uk case study. **Drinking Water Engineering and Science**, 2010. Citado na página 34.
- MACQUEEN, J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. **In proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematics, Statistics and Probability**, Chicago, 1967. Citado na página 62.
- MENKES, M. **Eficiência energética, políticas públicas e sustentabilidade**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, Brasília, 2004. Citado na página 39.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Plano Nacional de Energia PNE2030**. [S.l.], 2007. 372 p. Citado na página 23.
- _____. **Plano Nacional de Eficiência Energética**. [S.l.], 2011. 156 p. Citado na página 23.
- MONTEIRO, J. R. **Plano Nacional de Saneamento (PLANASA) - Análise de Desempenho**. <http://www.bvsde.paho.org/bvsacg/e/fulltext/planasa/planasa.pdf>, 1993. Citado na página 20.
- MOREIRA, F. N. da C. **Dimensionamento do volume útil de reservação de água considerando o consumo de energia elétrica no horário de ponta do setor elétrico**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Pará, Belém, 2018. Citado nas páginas 37 e 56.

- NEW YORK STATE ENERGY RESEARCH DEVELOPMENT AUTHORITY. **Water Wastewater Energy Management: Best Practices Handbook**. New York, 2010. Citado na página 37.
- NOCERA, S.; ZWEIFEL, P. **Demand for health: an empirical test of the Grossman model using panel data**. Boston: Kluwer Academic, 1998. Citado na página 28.
- NOVOTNY, V. Water and energy link in the cities of the future – achieving net zero carbon and pollution emissions footprint. **Water Science and Technology**, v. 63, p. 184–190, 2011. Citado na página 21.
- PALAMUTCU, S. Electric energy consumption in the cotton textile processing stages. **Energy**, v. 35, p. 2945–2952, 2010. Citado na página 21.
- PARETO, V. **Cours D’Economie Politique**. [S.l.]: F. Rouge, 1896. v. 1. Citado na página 144.
- PEREIRA, J. A. R.; CONDURÚ, M. T. **Abastecimento de água: informação para eficiência hidroenergética**. João Pessoa, 2014. Citado na página 32.
- PEREIRA, J. P. G. **Heurísticas computacionais aplicadas à otimização estrutural de treliças bidimensionais**. Dissertação (Mestrado) — Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007. Citado na página 141.
- PORTO, R. de M. **Hidráulica Básica, 4ª edição**. São Carlos: ESSC USP, 2006. Citado nas páginas 28 e 49.
- PRINCE, A. de A. **Rede de distribuição** In HELLER, L. e PÁDUA, V.L. **Abastecimento de água para consumo humano**. Belo Horizonte: Ed. Universitária UFMG, 2006. Citado na página 31.
- PROCEL, PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento**. [S.l.], 2005. Citado na página 40.
- PROGRAMA Nacional de Conservação de Energia Elétrica. Brasília, 2007. Citado na página 38.
- Resolução Homologatória ANEEL nº 2.484. **Resolução Homologatória**. [S.l.], 2018. Citado na página 42.
- ROBINS, F. W. **The Story of Water Supply**. Londres: Oxford University Press, 1946. Citado na página 27.
- ROSSMAN, L. **EPANET 2—users manual**. Cincinnati, 2000. Citado na página 34.
- SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks. **Journal of Water Resources Water Planning and Management**, 1997. Citado na página 36.
- SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A.; SCHWAB, M. Multiobjective genetic algorithms for pump scheduling. **Lecture Notes in Computer Science**, 1997. Citado na página 37.
- SCHUTZE, A. **Efeitos da Regulação no Custo de Aquisição de Energia Elétrica no Brasil**. Dissertação (Mestrado) — Fundação Getúlio Vargas, Rio de Janeiro, 2010. Citado na página 39.

SERVICE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE L'ÉNERGIE DA SUÍÇA. **OPTIMISATION DE L'EFFICACITÉ DU RÉSEAU DE DISTRIBUTION D'EAU**. [S.l.], 2009. 230 p. Citado na página 21.

SIMONOVIC, A. V. and S. P. Optimization of water distribution network design using differential evolution. **Journal of Water Resources Planning and Management**, 2010. Citado na página 36.

SIMPSON, A. R.; DANDY, G. C.; MURPHY, L. J. Genetic algorithms compared to other techniques for pipe optimization. **Journal of Water Resources Planning and Management**, 1994. Citado nas páginas 33 e 36.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÃO SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos, ano base 2017**. [S.l.], 2019. Citado nas páginas 20 e 22.

SOARES, D. Desafios na redução de perdas de água frente à crise hídrica na região central de São Paulo. **Saneas**, 2015. Citado na página 33.

TEIXEIRA, J. C.; OLIVEIRA, G. S. de; VIALI, A. de M.; MUNIZ, S. S. Estudo do impacto das deficiências de saneamento básico sobre a saúde pública no Brasil no período de 2001 a 2009. **Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 2014. Citado na página 28.

THORTON, J. Contratos de performance. **Grupo de Economia do Saneamento, Energia Soluções Ambientais**, 2012. Citado na página 38.

TOLEDO, F. M. B.; SANTOS, M. O. dos; ARENALES, M. N.; JÚNIOR, P. S. Logística de distribuição de água em redes urbanas – racionalização energética. **Pesquisa Operacional**, v. 28, 2008. Citado na página 41.

TSUTIYA, M. T. Reducing the cost of electricity in pumping stations of water and sewage. **Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental - ABES**, 1997. Citado na página 38.

_____. **Abastecimento de água**. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006. Citado nas páginas 28, 29, 37, 43, 46 e 47.

UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION. **The United Nations World Water Development Report 2014: Water and energy**. Paris, 2014. 230 p. Citado na página 33.

_____. **The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a sustainable world**. Paris, 2015. 139 p. Citado nas páginas 21 e 33.

VAMVAKERIDOU-LYROUDIA, L. S.; SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. Tank simulation for the optimization of water distribution networks. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2007. Citado na página 37.

VIEIRA, F.; RAMOS, H. M. Hybrid solution and pump-storage optimization in water supply system efficiency: a case study. **Energy Policy**, v. 36, p. 4141–4148, 2008. Citado na página 37.

_____. Optimization of operational planning for wind/hydro hybrid water supply systems. **Renewable Energy**, v. 34, p. 928–936, 2009. Citado na página 34.

- VILANOVA, M. R. N. **Desenvolvimento e avaliação de indicadores de eficiência hidráulica e energética para sistemas de abastecimento de água como ferramenta de suporte à tomada de decisões**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012. Citado na página 41.
- VILANOVA, M. R. N.; BALESTIERI, J. A. P. Exploring the water-energy nexus in brazil: The electricity use for water supply. **Energy**, 2015. Citado nas páginas 38, 62 e 94.
- WANG, J.; LIU, S. Quarter-hourly operation of hydropower reservoirs with pumped storage plants. **Journal of Water Resources Planning and Management**, 2012. Citado na página 36.
- WHITE, F. M. **Fluid mechanics**. New York: The McGrawHill Companies, 2007. Citado na página 49.
- WU, Z. Y.; SIMPSON, A. R. Competent genetic-evolutionary optimization of water distribution systems. **Journal of Computing in Civil Engineering**, 2001. Citado na página 36.
- XU, Q.; CHEN, Q.; QI, D. C. S. Improving water and energy metabolism efficiency in urban water supply system through pressure stabilization by optimal operation on water tanks. **Ecological Informatics**, 2015. Citado nas páginas 38, 62 e 94.
- ZECCHIN, A. C.; MAIER, H. R.; SIMPSON, A. R.; LEONARD, M.; NIXON, J. B. Ant colony optimization applied to water distribution system design: Comparative study of five algorithms. **Journal of Water Resources Planning and Management**, 2007. Citado na página 36.
- ZITZLER, E.; DEB, K.; THIELE, L. Comparison of multiobjective evolutionary algorithms: Empirical results. **Evolutionary Computation**, 2000. Citado na página 65.

DOCUMENTAÇÃO DO ALGORITMO SIMULADO

No site GitHub/Batystuta encontra-se o *script* completo, disponibilizado de forma *Open-Source*. Veja o funcionamento das funções e como elas se comportam no contexto, o que cada passo e comentário quer dizer, que assim conseguirá utilizar o *script* desenvolvido ou melhorá-lo.

O algoritmo por completo, tem como ideia central simular o funcionamento de uma estação elevatória, com um reservatório a montante de um ponto de consumo (Figura 5, pag. 46), visando quantificar o aspecto operacional e econômico no horizonte de projeto.

Em termo da necessidade de um sistema elevatório, pode-se dizer, no geral, que este se caracteriza pela solicitação de, no mínimo, uma ponta de consumo de água, no qual este se encontra a uma certa distância e numa elevação topográfica, ou não, da fonte do sistema (manancial). O consumo caracteriza-se por duas variáveis, tanto a população como o consumo *per capita*, em que os dois podem ter incertezas, uma vez que não é constante em relação ao tempo. Diante disso, a suas estimativas são atribuídas a partir de um crescimento populacional e de um acréscimo linear de seu consumo, ou não para o último caso. Com os Código-fonte 3, Código-fonte 4 e Código-fonte 5, o algoritmo consegue estimar o valor do consumo de água, na ponta, ao longo do tempo início, meio e fim de projeto.

Código-fonte 1 – Direito autoral

```

1: __copyright__ = """
2:     Copyright (c) 2018-2019, IPH/UFRGS. Batystuta Rocha.
3:     Permission to use, copy, modify, and distribute this
4:     software and its documentation for any purpose and without
5:     fee or royalty is hereby granted, provided that the above
6:     copyright notice appear in all copies and that both that
7:     copyright notice and this permission notice appear in
8:     supporting documentation or portions thereof, including
9:     modifications, that you make. """

```

Código-fonte 2 – Importação de bibliotecas gerais

```
13: import numpy as np
14: import pandas as pd
15: from os.path import abspath
```

Código-fonte 3 – Crescimento populacional

```
16: def fun_crescimento(populacao, taxa, anos_estudo, city):
17:     """
18:
19:     Função que calcula o crescimento da população pelo método
20:     da progressão geométrica.
21:
22:     Parameters
23:     -----
24:     populacao: array de número inteiro
25:     taxa: número real
26:     anos_estudo: array de número inteiro
27:     city: list string
28:
29:     Returns
30:     -----
31:     Um DataFrame com os valores da população em cada ano.
32:
33:     """
34:
35:     ano_populacao = {'20 anos': populacao}
36:     df_crescimento_populacional = \
37:         pd.DataFrame(data=ano_populacao, index=city)
38:     for i in list(anos_estudo):
39:         column = str(20 - i).zfill(2) + ' years'
40:         value = populacao * np.exp(-taxa*i)
41:         df_aux = pd.DataFrame(data={column: value.astype(int)},
42:                               index=city)
43:         df_crescimento_populacional = \
44:             df_aux.join(df_crescimento_populacional)
45:
46:     return df_crescimento_populacional
```

Código-fonte 4 – Características da População

```

47: def fun_populacao(population_end):
48:     """
49:
50:     Função que tem as características da população em estudo,
51:     taxa de crescimento.
52:     E tipo de crescimento (obs.: cuidado com o método).
53:
54:     Parameters
55:     -----
56:     populacao: array de número inteiro
57:
58:     Returns
59:     -----
60:     Um DataFrame com os valores da população em cada ano.
61:
62:     """
63:
64:     taxa_cresc, anos_estudo = 0.05, [10, 20]
65:
66:     return fun_crescimento(np.array([population_end]),
67:                            taxa_cresc, anos_estudo)

```

Código-fonte 5 – Base de demanda no tempo

```

68: def fun_base_demanda(df):
69:     # consumo l/hab/dia >>> (início, meio e fim)
70:     q = [150, 175, 200]
71:     # Q = q * k1 * pop / 86400 [L/s] >>> vazão de consumo
72:     aux = np.around(df.values.ravel() * q * 1.2 / 86400,
73:                    decimals=2)
74:     return {'start': aux[0], 'middle': aux[1], 'end': aux[2]}

```

Com essas partes do algoritmo, pode-se a partir de uma população final realizar a análise demográfica para os outros dois períodos (início e meio), através do método estatístico deduzido por Alem Sobrinho e Tsutiya (1999), e por consequente a variação temporal da vazão média diária teórica. Em conjunto com a variável altura geométrica, o comprimento da adutora e o método de dimensionamento do volume de reservação, inicializam o modelo e, consecutivamente, a sua simulação e otimização do sistema, sob a conformidade dessas variáveis de entrada.

Inclusive, sempre que se desenvolve um algoritmo, deve-se estabelecer um padrão de comportamento (uma sequência finita de ações) que deverá ser seguido para alcançar a solução de um problema, e constituído de pelo menos em três partes, sendo elas: a entrada, o processamento e a saída.

Na parte de entrada, são fornecidas as informações necessárias para que o algoritmo possa ser executado, sendo o elemento central responsável pela chamada das demais rotinas e pelos valores das variáveis (que podem ser preestabelecidos ou fornecidos ao início de cada simulação). Logo, como já foi mencionado, a decisão de inserir 4 variáveis de entrada está ligado na simplificação do modelo, contemplando apenas com as principais características do sistema a ser retratado. No Código-fonte 6 avista-se a inicialização do algoritmo, além disso, evidencia a definição do valor das variáveis e a chamada das demais rotinas.

Código-fonte 6 – Função inicialização do algoritmo

```
2012: def main():
2013:
2014:     method = '*' # escolher um método ['GOMES', 'NBR']
2015:     length, hg = '*', '*' # valores em metro
2016:     population_end_value = '*' # número final de habitantes
2017:
2018:     # função que calcula o consumo base ao longo do tempo
2019:     base_demand = \
2020:         fun_base_demanda(fun_populacao(population_end_value))
2021:
2022:     # atribui os valores ao modelo
2023:     a = agepanet(length, hg, base_demand, method)
2024:
2025:     .
2026:     .
2027:     .
2028:
2029:     return
2030:
2031: if __name__ == '__main__':
2032:
2033:     main()
```

Na linha 2023 do Código-fonte 6, atribui-se os valores das variáveis ao modelo 'class agepanet', propriamente dito, em que se observa no Código-fonte 7 a função '__init__' que recebe essas variáveis, tendo em vista que essas podem ser obtidas ou alteradas de dentro de qualquer rotina e sub rotina da 'class agepanet'. Finaliza-se a função '__init__', com a leitura do arquivo

'*bancada.inp*', no qual se encontra o sistema (Figura 5, pag. 46) que será simulado no EPANET2. Também, observa-se a importação de duas bibliotecas, uma que será para mexer nos dados em formato '*datetime*' e a outra, da ferramenta toolkit do EPANET2 (*epynet*), com funções que permitem ao algoritmo desenvolvido executar diversas simulações hidráulicas.

Código-fonte 7 – AGEPANET, função `__init__`

```
75: class agepanet():
76:
77:     from datetime import datetime
78:     from epynet import Network, epanet2
79:
80:     def __init__(self, length, elevation, base_demand, method):
81:
82:         self.diameter = ''
83:         self.method = method
84:         self.base_demand = base_demand
85:         self.length, self.elevation = length, elevation
86:
87:         with open('bancada.inp', 'r') as f:
88:             self.text = f.readlines()
89:             f.close()
```

Na sequência, destaca-se as rotinas que o modelo necessita para calcular uma certa ação no andamento da simulação, como a obtenção da perda de carga hidráulica (Código-fonte 8), o dimensionamento do reservatório de distribuição (Código-fonte 9), a obtenção das curvas da bomba (*vazao* × *altura_manometrica* e *vazao* × *rendimento*) em sua frequência nominal e em outras frequências (Código-fonte 10), o cenário da regra de operação no sistema (Código-fonte 11), o cálculo do custo total e do índice operacional do reservatório (Fo1 Equação 4.1, pag. 41 e Fo2 Equação 4.2, pag. 41), bem como diversas sub rotinas auxiliares para essas rotinas.

Código-fonte 8 – AGEPANET, função `headloss`

```
89: class agepanet():
90:
91:     def reynold_function(self, flow):
92:
93:         # Função para calcular o Reynold.
94:         # np.pi = 3.1415926 (constante)
95:         # diameter = [100, 150 ... 1000] [mm]
96:         # flow = vazão de bombeamento [m3/s]
97:
```

```

98:         # (constante viscosidade)
99:         const_viscosity = 1.005e-06 # [m2/s]
100:
101:         # Reynold
102:         return float(4 * flow /
103:             (np.pi * const_viscosity * (self.diameter / 1000)))
104:
105:     def darcy_weisbach_function(self, flow, roughness):
106:
107:         # A variável  $f(Re;E/D)$  é por Colebrook-White.
108:         # Para calcular o  $f$ , utilizou um iteração numérico.
109:         # Inicia com o valor inicial de Swamme e Jain (1976).
110:         # Rugosidade Ferro Dúctil, Classe K7 = 0,000375 [m]
111:
112:         aux = 100.00 # auxilia na condição do while
113:
114:         # Valor inicial de Swamme e Jain (1976).
115:         f = float(
116:             0.25 / (np.log10(roughness / (3.7 * self.diameter) +
117:                 5.74 / (self.reynold_function(flow) ** (0.9)))) ** 2))
118:
119:         # Utilizando uma iteração numérico.
120:         while ((f - aux) > 0.001):
121:             aux = f
122:             f = float((-1 / (2 * np.log10(
123:                 (roughness / self.diameter) / 3.7 + 2.51 /
124:                 (self.reynold_function(flow) * np.sqrt(f))))) ** 2)
125:         return f
126:
127:     def beta_function(self, flow, roughness,
128:         summation_k, linear_accretion):
129:
130:         # Função  $q$  calcula a variável de perdas, Beta.
131:         # Que é a soma das perdas de carga localizada com
132:         # a distribuída e podendo assumir a seguinte expressão:
133:         #  $B = (8/(\pi^2 * g)) * (f + K * D/L)$ 
134:         # Observação: o valor padrão de  $z = k/L$  vai ser
135:         # atribuído de 0.10, mas geralmente é entre 0.5 e 0.15
136:         # Nessa subrotine, as variáveis dependentes são
137:         # o Diâmetro e o Comprimento.
138:         # E as demais,  $\pi =$  constante,  $g =$  constante e
139:         #  $f =$  função( $Re;E/D$ )

```

```

140:         # const_pi = 3.1415926 (constante)
141:
142:         const_gravitational = 9.81 # (constante)
143:         # soma_k = 10% de comprimento (5% < k < 15%)
144:         z = float(summation_k / self.length)
145:
146:         # Beta
147:         return float((8. / (np.pi ** 2 * const_gravitational))
148:                      * (self.darcy_weisbach_function(flow, roughness)
149:                      * linear_accretion + z * (self.diameter / 1000)))
150:
151:     def headloss_function(self, flow, roughness,
152:                          summation_k=0, linear_accretion=1.1):
153:         # Headloss
154:         return self.beta_function(flow, roughness, summation_k,
155:                                   linear_accretion) * self.length
156:         * (flow) ** 2 / (self.diameter / 1000) ** 5

```

Código-fonte 9 – AGEPANET, função dimensionamento reservatório

```

157: class agepanet():
158:
159:     def fun_volume(self, metodo, number_pumping,
160:                   start_time, end_time, coefficient_tank_diameter):
161:
162:         curva_demanda = [0.25, 0.24, 0.24, 0.22,
163:                          0.24, 0.40, 0.56, 0.64,
164:                          0.68, 0.68, 0.64, 0.76,
165:                          0.84, 0.84, 0.80, 0.84,
166:                          0.88, 0.96, 1.00, 0.97,
167:                          0.89, 0.69, 0.49, 0.41]
168:
169:         k1, k2 = 1.2, np.max(curva_demanda)
170:                 / np.mean(curva_demanda)
171:
172:         # volume_util = 0
173:         volume_diferencial = []
174:
175:         if metodo == 'GOMES':
176:
177:             # Método de determinação do volume útil baseado
178:             # nos volumes diferenciais CETESB.

```



```

221:
222:     else:
223:
224:         # método NBR 12217
225:         # primeiramente é realizado o cálculo
226:         # do consumo teórico médio de água, eq. 9
227:         #  $Q_{tm} = pop * q / (24 * 1000) [m^3/s]$ 
228:         #  $Q_{tm} = pop * q * (k1 * 1000[L])$ 
229:         #  $/ (86400[s] * 1000 * (k1)) = Q_{td} / k1$ 
230:
231:         #  $[l/s] * 3.6 \gg \gg [m^3/h]$ 
232:         Qtm = self.base_demand['end'] / k1 * 3.6
233:
234:         # fator de segurança de 1,2
235:         # recomendações da NBR 12217 (1994)
236:         volume_util = ((k2 - 1) / np.pi)
237:                     * (24 * k1 * Qtm) * 1.2
238:
239:         # 25% da reserva de emergência
240:         volume_total = volume_util + 0.25 * volume_util
241:
242:         max_level_tank = np.around((
243:             volume_total * 4 /
244:             (np.pi * coefficient_tank_diameter ** 2)) ** (1 / 3),
245:                                     decimals=1)
246:         max_level_tank = max_level_tank
247:             if max_level_tank > 2.5 else 2.5
248:
249:     '''
250:         Tabela fonte:
251:         https://www.youtube.com/watch?v=Z3XanRAQAXs
252:         Volume (m3)          altura da lâmina d'água (m)
253:         até 3.500             2.5 a 3.5 [3]
254:         3.500 a 15.000       3.5 a 5.0 [4.5]
255:         acima de 15.000     5.0 a 7.0 [6]
256:     '''
257:
258:     #  $(V * 4 / (pi * h)) ** (1/2)$ 
259:     diameter_tank = np.around((volume_total * 4
260:                               / (np.pi * max_level_tank)) ** (1 / 2),
261:                               decimals=1)
262:

```



```

263:
264:     # [l/s] * 3.6 >>> [m3/h]
265:     consumo_base = np.mean([value for key, value in
266:                             self.base_demand.items()]) * 3.6
267:
268:     # 0.0696 * Vol [m3/dia] * k2 >>> Qbomb
269:     # [m3/h] * 24 >>> [m3/dia]
270:     Qbomb = 0.0696 * np.array(consumo_base) * k2 * 24
271:
272:     return [np.around(Qbomb / 3.6, decimals=2),
273:            max_level_tank, diameter_tank]

```

Código-fonte 10 – AGEPANET, função curvas da bomba

```

272: class agepanet():
273:
274:     def pump_curves(self, Q_otimo, H_otimo, n_otimo):
275:
276:         # Subrotina q gera as curvas da bomba.
277:
278:         # vazão >>> dimensão de Q_otimo
279:         Q = np.arange(0.2 * Q_otimo,
280:                       2 * Q_otimo, 0.1 * Q_otimo)
281:
282:         # [metro] >>> dimensão de H_otimo
283:         H = (1.245 - 0.265 * (Q / Q_otimo)**2) * H_otimo
284:
285:         # [percentual] >>> dimensão de n_otimo
286:         n = (-0.995 * (Q / Q_otimo)**2
287:             + 1.977 * (Q / Q_otimo) + 0.025) * n_otimo
288:
289:         # Curva (Q x H)
290:         lists = (Q, H)
291:         list_ = [lists[i % 2][int(i / 2)]
292:                 for i in range(len(Q) * 2)]
293:         curve_H = np.array(list_).reshape(len(Q), 2)
294:
295:         # Curva (Q x n)
296:         lists = (Q, n)
297:         list_ = [lists[i % 2][int(i / 2)]
298:                 for i in range(len(Q) * 2)]
299:         curve_n = np.array(list_).reshape(len(Q), 2)

```

```
300:
301:     # Pump curves
302:     return curve_H, curve_n
303:
304:     def pump_curves_by_frequency(self, Q1, H1, n1,
305:                                 freq_1, freq_2):
306:
307:         # Subrotina q gera as curvas da bomba
308:         # de inversor de frequência
309:
310:         Q2 = np.divide(freq_2, freq_1) * np.asarray(Q1)
311:
312:         # [metro]
313:         H2 = (np.divide(freq_2, freq_1)**2)
314:              * np.asarray(H1)
315:
316:         # [percentual]
317:         n2 = (0.94 - ((0.94 - np.asarray(n1) / 100)
318:                    * ((np.asarray(Q1) / Q2) ** 0.32))) * 100
319:         n2 = np.asarray([value
320:                          if value > 0
321:                          else 0 for value in n2])
322:
323:         # Curva (Q x H)
324:         lists = (Q2, H2)
325:         list_ = [lists[i % 2][int(i / 2)]
326:                 for i in range(len(Q2) * 2)]
327:         curve_H2 = np.array(list_).reshape(len(Q2), 2)
328:
329:         # Curva (Q x n)
330:         lists = (Q2, n2)
331:         list_ = [lists[i % 2][int(i / 2)]
332:                 for i in range(len(Q2) * 2)]
333:         curve_n2 = np.array(list_).reshape(len(Q2), 2)
334:
335:         # New pump curves
336:         return curve_H2, curve_n2
```

Código-fonte 11 – AGEPANET, função rules

```

337: class agepanet():
338:
339:     def rule_function(self, coeff_rule, max_level,
340:                       coeff_minimum_level, coeff_maximum_level,
341:                       start_time, end_time):
342:
343:         rules_dicts = {
344:             1: [''], # NENHUM CONTROLE
345:
346:             2: [('RULE 1\n'),
347:                # Altura mínima eh de 20%
348:                ('IF TANK RNV LEVEL <= {}\n'
349:                 .format(np.multiply(max_level,
350:                                     coeff_minimum_level))),
351:                ('THEN PUMP BOMBA STATUS IS OPEN\n'),
352:                ('\n'),
353:                ('RULE 2\n'),
354:                # Altura máxima eh de 20%
355:                ('IF TANK RNV LEVEL >= {}\n'
356:                 .format(np.multiply(max_level,
357:                                     coeff_maximum_level))),
358:                ('THEN PUMP BOMBA STATUS IS CLOSED\n')],
359:             3: [(
360:                 ('RULE 1\n'),
361:                 # Início do controle PUMP-TIME
362:                 ('IF SYSTEM CLOCKTIME >= {}\n'
363:                  .format('12 AM'
364:                           if np.isclose(start_time, 0,
365:                                         atol=0.1)
366:                           else (str(start_time) + ' AM'
367:                                  if start_time < 12
368:                                  else ('12 PM'
369:                                         if np.isclose(start_time,
370:                                                         12, atol=0.1)
371:                                         else str(start_time - 12)
372:                                                + ' PM')))),
373:                 # Fim do controle PUMP-TIME
374:                 (
375:                     ('AND SYSTEM CLOCKTIME {}\n'
376:                      .format('>= 12 AM'

```

```

377:         if np.isclose(end_time,
378:                        0, atol=0.1)
379:         else ('<= ' + str(end_time)
380:              + ' AM'
381:              if end_time < 12
382:              else ('<= 12 PM'
383:                   if np.isclose(
384:                       end_time,
385:                       12, atol=0.1)
386:                   else '<= '
387:                       + str(end_time - 12)
388:                       + ' PM'))))
389:         if start_time < end_time
390:         or np.isclose(end_time, 0, atol=0.1)
391:         else
392:             ('OR SYSTEM CLOCKTIME {} \n'
393:              .format('<= ' + str(end_time)
394:                     + ' AM'
395:                     if end_time < 12
396:                     else ('<= 12 PM'
397:                          if np.isclose(end_time,
398:                                          12, atol=0.1)
399:                          else '<= '
400:                              + str(end_time - 12)
401:                              + ' PM'))))
402:         ),
403:         ('THEN PUMP BOMBA STATUS IS CLOSED \n'),
404:         ('PRIORITY 1 \n'),
405:         ('\n'),
406:         ('RULE 2 \n'),
407:         ('IF SYSTEM CLOCKTIME > {} \n'
408:          .format('12 AM'
409:                 if np.isclose(end_time, 0,
410:                               atol=0.01)
411:                 else (str(end_time) + ' AM'
412:                      if end_time < 12
413:                      else ('12 PM'
414:                           if np.isclose(start_time,
415:                                           12, atol=0.01)
416:                           else str(end_time - 12)
417:                               + ' PM')))),
418:         # Fim do controle PUMP-TIME

```

```

419:         ('THEN PUMP BOMBA STATUS IS OPEN \n')
420:     ) if start_time != end_time else ''],
421: 4: [('RULE 1\n'),
422:     # Altura mínima eh de 20%
423:     ('IF TANK RNV LEVEL <= {}\n'
424:      .format(np.multiply(max_level,
425:                          coeff_minimum_level))),
426:     ('THEN PUMP BOMBA STATUS IS OPEN\n'),
427:     ('\n'),
428:     ('RULE 2\n'),
429:     # Altura máxima eh de 20%
430:     ('IF TANK RNV LEVEL >= {}\n'
431:      .format(np.multiply(max_level,
432:                          coeff_maximum_level))),
433:     ('THEN PUMP BOMBA STATUS IS CLOSED\n'),
434:     ('\n'),
435:     (
436:         ('RULE 1\n'),
437:         # Início do controle PUMP-TIME
438:         ('IF SYSTEM CLOCKTIME >= {}\n'
439:          .format('12 AM'
440:                 if np.isclose(start_time, 0,
441:                               atol=0.1)
442:                 else (str(start_time) + ' AM'
443:                       if start_time < 12
444:                       else ('12 PM'
445:                             if np.isclose(start_time,
446:                                           12, atol=0.1)
447:                             else str(start_time - 12)
448:                                     + ' PM')))),
449:         # Fim do controle PUMP-TIME
450:         (
451:             ('AND SYSTEM CLOCKTIME {}\n'
452:              .format('>= 12 AM'
453:                     if np.isclose(end_time,
454:                                   0, atol=0.1)
455:                     else ('<= ' + str(end_time)
456:                             + ' AM'
457:                             if end_time < 12
458:                             else ('<= 12 PM'
459:                                   if np.isclose(
460:                                       end_time,

```

```

461:                                     12, atol=0.1)
462:                                     else '<= '
463:                                     + str(end_time - 12)
464:                                     + ' PM'))))
465:     if start_time < end_time
466:     or np.isclose(end_time, 0, atol=0.1)
467:     else
468:         ('OR SYSTEM CLOCKTIME {} \n'
469:          .format('<= ' + str(end_time)
470:                 + ' AM'
471:                 if end_time < 12
472:                 else ('<= 12 PM'
473:                      if np.isclose(end_time,
474:                                     12, atol=0.1)
475:                      else '<= '
476:                      + str(end_time - 12)
477:                      + ' PM'))))
478:     ),
479:     ('THEN PUMP BOMBA STATUS IS CLOSED \n'),
480:     ('PRIORITY 1 \n'),
481:     ('\n'),
482:     ('RULE 2 \n'),
483:     ('IF SYSTEM CLOCKTIME > {} \n'
484:      .format('12 AM'
485:             if np.isclose(end_time, 0,
486:                             atol=0.01)
487:             else (str(end_time) + ' AM'
488:                  if end_time < 12
489:                  else ('12 PM'
490:                       if np.isclose(start_time,
491:                                     12, atol=0.01)
492:                       else str(end_time - 12)
493:                       + ' PM')))),
494:     # Fim do controle PUMP-TIME
495:     ('THEN PUMP BOMBA STATUS IS OPEN \n')
496:     ) if start_time != end_time else ''
497: }
498:
499: text_rule = rules_dicts.get(coeff_rule,
500:                             ';Invalid Rule \n')
501:
502: with open('bancada_rules.inp', 'w') as f:

```

```

503:         for index, line in enumerate(self.text):
504:             if self.text[index - 1] == '[RULES]\n':
505:                 for j in range(len(text_rule)):
506:                     f.writelines(text_rule[j])
507:                     # break
508:             f.writelines(line)
509:         f.close()
510:     return

```

Código-fonte 12 – AGEPANET, função custo total

```

509: class agepanet():
510:
511:     def energy_cost_function(self, df, energy_price=0.37209):
512:
513:         df = df.loc[df.index.strftime("%M") == '00']
514:
515:         # Eliminando a duplicidade dos dados.
516:         df = df.reset_index()
517:             .drop_duplicates(subset=['DateTime'],
518:                 keep='first').set_index('DateTime')
519:         df.index = pd.to_datetime(df.index)
520:
521:         # Fator utilização, em percentual.
522:         pump_use_percentage = np.mean(
523:             pd.to_numeric(df['pump_status'],
524:                 errors='coerce').values, dtype=np.float64) * 100
525:
526:         # Fator esvaziamento do reservatório
527:         # Diferença entre o
528:         # {3 quartil da Amostra acima da média}
529:         # e o {1 quartil da Amostra abaixo da média},
530:         # e dividido por 'max_level'
531:         empty_tank = (df.rnv_pressure
532:             .loc[df.rnv_pressure >
533:                 np.mean(df.rnv_pressure.values)
534:                     ].quantile(0.95)
535:             - df.rnv_pressure
536:             .loc[df.rnv_pressure
537:                 < np.mean(
538:                     df.rnv_pressure.values)
539:                     ].quantile(0.05)) \

```

```
540:         / (df['rnv_maxlevel'][0]) * 100 # em percentual
541:
542:     # Vazão
543:     flow = df['pump_flow'].values.copy()
544:     # aqui foi preciso fazer a substituição
545:     # dos valores zeros por NaN
546:     flow[flow == 0] = np.nan
547:     # Vazão Média
548:     mean_flow = np.nanmean(flow, dtype=np.float64)
549:
550:     # Perda de Carga Média
551:     headloss = df['pump_headloss'].values.copy()
552:     # aqui foi preciso fazer a substituição
553:     # dos valores zeros por NaN
554:     headloss[headloss == 0] = np.nan
555:     mean_headloss = abs(np.nanmean(headloss,
556:                                     dtype=np.float64))
557:
558:     # Potência Média de uso
559:     power = df['pump_energy'].values.copy()
560:     # aqui foi preciso fazer a substituição
561:     # dos valores zeros por NaN
562:     power[power == 0] = np.nan
563:     mean_power = np.nanmean(power, dtype=np.float64)
564:
565:     # Rendimento Médio de uso, em percentual
566:     mean_efficiency = 9.81 * mean_flow
567:     * mean_headloss / (mean_power * 1000) * 100
568:
569:     # kwh/m médio de consumo
570:     # lembrando que a vazão está em 'l/s',
571:     # por isso do 3.6
572:     mean_kilowatt_hours_per_cubic_meter =
573:         mean_power / (mean_flow * 3.6)
574:
575:     # Custo Médio Energético por dia
576:     # 24 horas e o preço em [R$/kwh]
577:     cost_per_day = np.mean(df.pump_energy.values *
578:                             df.price_curve.values) * 24 * energy_price
579:     # 365 dias do ano em 10 anos e em milhar.
580:     cost_per_period = cost_per_day * 365 * 10 / 1000
581:     if empty_tank > 5
```



```
582:         else 10 ** 9
583:
584:     # Nível final de cada simulação
585:     simulation_level_24 = [level
586:         for idx, level in enumerate(df['rnv_pressure']
587:             .loc[df.index.strftime("%H:%M") == '00:00'])]
588:     simulation_level = [np.isclose(
589:         simulation_level_24[idx],
590:         simulation_level_24[idx + 1], atol=0.1)
591:         for idx in range(len(simulation_level_24) - 1)]
592:
593:     return {'percentage_use': pump_use_percentage,
594:           'empty_tank': empty_tank,
595:           'flow': flow,
596:           'simulation_level': simulation_level,
597:           'pump_id': df['pump_id'][0],
598:           'rnv_pressure': df['rnv_pressure'],
599:           'rnv_maxlevel': df['rnv_maxlevel'][0],
600:           'mean_efficiency': mean_efficiency,
601:           'mean_flow': mean_flow,
602:           'mean_headloss': mean_headloss,
603:           'mean_power': mean_power,
604:           'max_power': np.max(df['pump_energy']),
605:           'mean_kilowatt_hours_per_cubic_meter':
606:               mean_kilowatt_hours_per_cubic_meter,
607:           'cost_per_day': cost_per_day,
608:           'cost_per_period': cost_per_period}
609:
610: def motorpump_cost_function(self, maximum_power):
611:
612:     # IMPLANTACAO do MOTOR-BOMBA = f(Potencia)
613:     # f é o custo de implantação do motor-bomba e variavel
614:     # com a Potencia [kw].
615:
616:     '''
617:     O motor deve ter uma potência elétrica superior
618:     à absorvida pela bomba,
619:     cujo o acréscimo, em relação à potência da bomba,
620:     depende do tipo e tamanho desta.
621:
622:     Aqui o acréscimo foi feito de acordo com a referência
623:     do Livro Hidráulica Básica, Porto, pág. 153
```

```

624:         Potência da Bomba           Acréscimo
625:         até 2 hp                     50%
626:         2 a 5 hp                     30%
627:         5 a 10 hp                    20%
628:         10 a 20 hp                   15%
629:         maior que 20 hp              10%
630:
631:         kw para hp >>>> kw * 1.34102 = hp
632:         '''
633:
634:         power_hp = maximum_power * 1.34102
635:         maximum_power = maximum_power * (1.10
636:             if power_hp > 20
637:             else (1.15
638:                 if 10 < power_hp <= 20
639:                 else (1.20
640:                     if 5 < power_hp <= 10
641:                     else (1.30
642:                         if 2 < power_hp <= 5
643:                         else 1.50))))))
644:
645:         # Equação obtida da tabela de preço
646:         # FONTE: Maquimotor (2016) apud Joice (2017).
647:         motorpump_cost = float(3.1688 * maximum_power**2
648:             + 388.55 * maximum_power + 9022.1) # [R$].
649:         return motorpump_cost
650:
651:     def adductor_cost_function(self):
652:
653:         # IMPLANTACAO da ADUTORA = f(Diametro)
654:         # f é o custo de implantação da tubulação
655:         # e variável com o diâmetro [mm] para reais
656:         # por metro de comprimento.
657:
658:         # Equação obtida da tabela de preço
659:         # para ferro dúctil K7 e junta JGS.
660:         # FONTE: Maquimotor (2016) e DMAE (2016)
661:         # apud Joice (2017).
662:         # com a grandeza [mm]
663:         # R$/m [reais/compr.]
664:         adductor_cost = float(0.0023 * (self.diameter)**2
665:             + 0.5306 * (self.diameter) + 94.999)

```

```
666:         return adductor_cost
667:
668:     def tank_cost_function(self, volume):
669:
670:         # IMPLANTACAO do RESERVATORIO = f(Volume)
671:         # f é o custo de implantação do reservatório
672:         # e variável como o Volume [m**3].
673:
674:         # Equação obtida da tabela de preço.
675:         # FONTE: Gomes (2016) apud Joice (2017).
676:
677:         tank_cost = float(-0.1202 * volume**2
678:             + 345.94 * volume + 63443) # [R$].
679:         return tank_cost
680:
681:     def fa_function(self, ano, i=0.10, e=0.09):
682:
683:         # Subrotina q calcula o Fator de Atualização
684:         # do investimento variavel para fixo
685:         # O Fa vai ser aplicado no custo de Operação,
686:         # para se conhecer o valor fixo atual
687:         # Nessa subrotine, com o aumento do imposto e
688:         # da energia e o horizonte de projeto tem o Fa
689:
690:         # Valores padrões de crescimento:
691:         # i = 10%/ano; e = 9%/ano
692:
693:         return float((((1+e)**ano-(1+i)**ano)
694:             /((1+e)-(1+i)))*(1/((1+i)**ano)))
695:
696:     def total_cost_function(self, df, volume,
697:         file_name, report):
698:
699:         # Subrotina q calcula
700:         # o Custo de Implanatação + Operação.
701:         # Custo Total = Custo da Adutora
702:         # + Custo do Reservatorio + Custo Motobr-omba
703:         # + Custo Operação Energia * Fa
704:
705:         columns = ['pump_id', 'price_curve',
706:             'pump_status', 'pump_flow', 'pump_headloss',
707:             'pump_energy', 'rnv_pressure', 'rnv_maxlevel']
```

```
708:
709:     # 3 DIAS dps do inicio da simulação
710:     # '2019-01-04 00:00'
711:
712:     df_start_project = df[0]
713:     df_start_project = df_start_project[columns]
714:         .loc[df_start_project.index.strftime('%d') >= '04']
715:
716:     df_middle_project = df[1]
717:     df_middle_project = df_middle_project[columns]
718:         .loc[df_middle_project.index.strftime('%d') >= '04']
719:
720:     df_end_project = df[2]
721:     df_end_project = df_end_project[columns]
722:         .loc[df_end_project.index.strftime('%d') >= '04']
723:
724:     energy_start_cost = self.energy_cost_function(
725:         df_start_project)
726:     energy_middle_cost = self.energy_cost_function(
727:         df_middle_project)
728:     energy_end_cost = self.energy_cost_function(
729:         df_end_project)
730:
731:     deployment_cost = {'motorpump_cost':
732:         self.motorpump_cost_function(
733:             np.max(df_end_project['pump_energy'])),
734:         'adductor_cost':
735:         self.adductor_cost_function() * self.length,
736:         'tank_cost':
737:         self.tank_cost_function(volume)}
738:
739:     pressure_situation = ['False'
740:         if np.min(df_start_project['rnv_pressure']
741:             .values) <= 0.01
742:         else 'True',
743:         'False'
744:         if np.min(df_middle_project['rnv_pressure']
745:             .values) <= 0.01
746:         else 'True',
747:         'False'
748:         if np.min(df_end_project['rnv_pressure']
749:             .values) <= 0.01
```

```
750:         else 'True']
751:
752:     minimum_speed = np.around((
753:         np.nanmin([energy_start_cost['flow'],
754:                 energy_middle_cost['flow'],
755:                 energy_end_cost['flow']])
756:         / 1000)
757:         * (4 / (np.pi * (self.diameter / 1000) ** 2)),
758:         decimals=2)
759:
760:     maximum_speed = np.around((
761:         np.nanmax([energy_start_cost['flow'],
762:                 energy_middle_cost['flow'],
763:                 energy_end_cost['flow']])
764:         / 1000)
765:         * (4 / (np.pi * (self.diameter / 1000) ** 2)),
766:         decimals=2)
767:
768:     # cuidado aqui q tem q ver de todos cenários
769:     simulation_level =
770:         [energy_start_cost['simulation_level'],
771:         energy_middle_cost['simulation_level'],
772:         energy_end_cost['simulation_level']]
773:     simulation_level = ['False'
774:         if False in scenario
775:         else 'True' for scenario in simulation_level]
776:
777:     general_situation = [minimum_speed, maximum_speed,
778:         simulation_level, pressure_situation]
779:
780:     cost_total_F01 = np.around(
781:         deployment_cost['motorpump_cost'] / 1000
782:         # não está em milhar, por isso do '/1000'
783:         + deployment_cost['adductor_cost'] / 1000
784:         # não está em milhar, por isso do '/1000'
785:         + deployment_cost['tank_cost'] / 1000
786:         # não está em milhar, por isso do '/1000'
787:         + energy_start_cost['cost_per_period']
788:         * self.fa_function(10) # 00-10 anos
789:         + energy_middle_cost['cost_per_period']
790:         * (self.fa_function(20) -
791:           self.fa_function(10)) # 10-20 anos
```

```
792:         + energy_end_cost['cost_per_period']
793:         * (self.fa_function(30) -
794:           self.fa_function(20)) # 20-30 anos
795:           , decimals=2)
796:
797:     # Fator esvaziamento do reservatório
798:     efficiency_F02 = np.around((
799:         energy_start_cost['empty_tank']
800:         + energy_middle_cost['empty_tank']
801:         + energy_end_cost['empty_tank']),
802:                                decimals=2)
803:
804:     pump_use_F03 = np.around(
805:         np.quantile([energy_start_cost['percentage_use'],
806:                    energy_middle_cost['percentage_use'],
807:                    energy_end_cost['percentage_use']], 0.5),
808:                    decimals=2)
809:
810:     if report:
811:         self.cost_report(file_name,
812:                        energy_start_cost, energy_middle_cost,
813:                        energy_end_cost, deployment_cost)
814:
815:     return [general_situation, cost_total_F01,
816:           efficiency_F02, pump_use_F03]
```

Com as rotinas anteriormente descritas, já é possível executar uma simulação dinâmica do sistema, modulando os objetos físicos que a constitui, assim como os parâmetros operacionais. Os detalhes sobre o modo como este tipo de informação são inseridos no modelo são apresentados em comentário no Código-fonte 13. Também, é efetuado uma síntese dos métodos computacionais que o Toolkit do EPANET2 utiliza para a modelagem do comportamento hidráulico.

Existem dezenove parâmetros que a rotina *'epanet_exe'* recebe da característica de um indivíduo, este da população do algoritmo genético o qual será melhor descrito à posterior, e que são postos em seus respectivos parâmetros físicos e operacionais. Em seguida, depois de determinada cada propriedade física e operacional do sistema (Figura 5, pag. 46), pode-se simular o seu comportamento hidráulico nos três períodos diferentes (início, meio e fim), resultando em informações operacionais hidráulicas e energéticas para as características do indivíduo simulado.

Código-fonte 13 – AGEPANET, função epanet2 executável

```
798: class agepanet():
799:
800:     def epanet_exe(self, parameters, report=False):
801:
802:         coeff_freq_start, coeff_freq_middle, \
803:         coeficiente_minimum_level_rule_start, \
804:         coeficiente_maximum_level_rule_start, \
805:         coeficiente_minimum_level_rule_middle, \
806:         coeficiente_maximum_level_rule_middle, \
807:         coeficiente_minimum_level_rule_end, \
808:         coeficiente_maximum_level_rule_end, \
809:         coefficient_tank_diameter, \
810:         rule_start, start_time_rule_start, \
811:         number_pumping_off_start, \
812:         rule_middle, start_time_rule_middle, \
813:         number_pumping_off_middle, \
814:         rule_end, start_time_rule_end, \
815:         number_pumping_off_end, \
816:         coeficiente_diameter = \
817:             [parameter_value for parameter_value in parameters]
818:
819:         coeficiente_minimum_level_rule =
820:             {'start': coeficiente_minimum_level_rule_start,
821:              'middle': coeficiente_minimum_level_rule_middle,
822:              'end': coeficiente_minimum_level_rule_end}
823:
824:         coeficiente_maximum_level_rule =
825:             {'start': coeficiente_maximum_level_rule_start,
826:              'middle': coeficiente_maximum_level_rule_middle,
827:              'end': coeficiente_maximum_level_rule_end}
828:
829:         rule_value = {'start': rule_start,
830:                       'middle': rule_middle,
831:                       'end': rule_end}
832:
833:         start_time_rule = {'start': start_time_rule_start,
834:                             'middle': start_time_rule_middle,
835:                             'end': start_time_rule_end}
836:
837:         end_time_rule =
```

```
838:         {'start': (start_time_rule_start
839:                   + number_pumping_off_start
840:                   if (start_time_rule_start
841:                       + number_pumping_off_start) <= 23
842:                   else (0
843:                         if np.isclose(start_time_rule_start
844:                                       + number_pumping_off_start - 24,
845:                                       0, atol=0.1)
846:                         else start_time_rule_start
847:                               + number_pumping_off_start - 24)),
848:         'middle': (start_time_rule_middle
849:                   + number_pumping_off_middle
850:                   if (start_time_rule_middle
851:                       + number_pumping_off_middle) <= 23
852:                   else (0
853:                         if np.isclose(start_time_rule_middle
854:                                       + number_pumping_off_middle - 24,
855:                                       0, atol=0.1)
856:                         else start_time_rule_middle
857:                               + number_pumping_off_middle - 24)),
858:         'end': (start_time_rule_end
859:                + number_pumping_off_end
860:                if (start_time_rule_end
861:                    + number_pumping_off_end) <= 23
862:                else (0
863:                      if np.isclose(start_time_rule_end
864:                                    + number_pumping_off_end - 24,
865:                                    0, atol=0.1)
866:                      else start_time_rule_end
867:                            + number_pumping_off_end - 24))})
868:
869:     number_pumping =
870:         {'start': 24 - number_pumping_off_start,
871:         'middle': 24 - number_pumping_off_middle,
872:         'end': 24 - number_pumping_off_end}
873:
874:     diameter_values =
875:         [100, 150, 200, 250, 300, 350, 400,
876:         500, 600, 700, 800, 900, 1000]
877:
878:     self.diameter =
879:         diameter_values[int(coefficiente_diameter)]
```



```
880:
881:     flow_nominal, tank_max_level, tank_diameter = \
882:         self.fun_volume(
883:             metodo=self.method,
884:             number_pumping=number_pumping['end'],
885:             start_time=start_time_rule['end'],
886:             end_time=end_time_rule['end'],
887:             coefficient_tank_diameter=
888:                 coefficient_tank_diameter)
889:
890:     volume = np.pi * tank_diameter**2 * tank_max_level / 4
891:
892:     roughness = {'start': 130, 'middle': 120, 'end': 110}
893:
894:     # Equação 41 e 42 da tese da Joice
895:     diff_headloss_min =
896:         0.0020 * np.divide(self.length,
897:                             self.elevation
898:                             + tank_max_level)**0.9696 \
899:         * (self.elevation + tank_max_level)
900:     diff_headloss_max =
901:         0.0039 * np.divide(self.length,
902:                             self.elevation
903:                             + tank_max_level)**0.9696 \
904:         * (self.elevation + tank_max_level)
905:
906:     # fun_Hm(vazao[m /s], comprimento[m], diâmetro[m])
907:     # Rugosidade absoluta do tubo (e) em mm
908:     # utilizando a média da refer. Porto
909:     # np.meam( (0.25 + 0.5)/ 2 ) = 0.375 [mm]
910:
911:     # flow de [l/s] para [m^3/s] e rugosidade em [mm]
912:     diff_headloss =
913:         self.headloss_function(flow_nominal / 1000,
914:                                0.375)
915:     diff_headloss = diff_headloss
916:         if (diff_headloss_min
917:             <= diff_headloss <=
918:             diff_headloss_max) \
919:         else (diff_headloss_min
920:              if diff_headloss
921:                < diff_headloss_min
```

```
922:         else diff_headloss_max)
923:
924:     head_height_nominal = diff_headloss
925:         + self.elevation + tank_max_level
926:
927:     curve_H, curve_n =
928:         self.pump_curves(flow_nominal,
929:             head_height_nominal,
930:             75) # Rendiment max const %
931:
932:     freq_nominal = 3500
933:     freq_start = coeff_freq_start * freq_nominal
934:     freq_middle = coeff_freq_middle * freq_nominal
935:     freq_end = 1 * freq_nominal
936:
937:     curve_H_start, curve_n_start =
938:         self.pump_curves_by_frequency(
939:             list(zip(*curve_H))[0],
940:             list(zip(*curve_H))[1],
941:             list(zip(*curve_n))[1],
942:             freq_nominal, freq_start)
943:
944:     curve_H_middle, curve_n_middle =
945:         self.pump_curves_by_frequency(
946:             list(zip(*curve_H))[0],
947:             list(zip(*curve_H))[1],
948:             list(zip(*curve_n))[1],
949:             freq_nominal, freq_middle)
950:
951:     curve_H_end, curve_n_end =
952:         self.pump_curves_by_frequency(
953:             list(zip(*curve_H))[0],
954:             list(zip(*curve_H))[1],
955:             list(zip(*curve_n))[1],
956:             freq_nominal, freq_end)
957:
958:     curve_H = {'start': curve_H_start,
959:               'middle': curve_H_middle,
960:               'end': curve_H_end}
961:     curve_n = {'start': curve_n_start,
962:               'middle': curve_n_middle,
963:               'end': curve_n_end}
```



```
1006:         '''
1007:         Inicialização das variáveis de interesse:
1008:         '''
1009:         index_BOMBA = network.ep.ENgetlinkindex('BOMBA')
1010:         index_ADUTORA = network.ep.ENgetlinkindex('tw2')
1011:         index_REG = network.ep.ENgetlinkindex('REG')
1012:         index_RNV = network.ep.ENgetnodeindex('RNV')
1013:         index_consumo = network.ep.ENgetnodeindex('N5')
1014:
1015:         network.ep.ENsetlinkvalue(
1016:             network.ep.ENgetlinkindex('tw1'),
1017:             self.epanet2.EN_DIAMETER, self.diameter)
1018:         network.ep.ENsetlinkvalue(
1019:             network.ep.ENgetlinkindex('tw1'),
1020:             self.epanet2.EN_ROUGHNESS,
1021:             roughness[key_base_demand])
1022:
1023:         # network.ep.ENsetnodevalue(
1024:         #     network.ep.ENgetnodeindex('N1'),
1025:         #     epanet2.EN_ELEVATION, _elevation)
1026:
1027:         network.ep.ENsetcurve(1,
1028:                               curve_H[key_base_demand])
1029:         network.ep.ENsetcurve(2,
1030:                               curve_n[key_base_demand])
1031:
1032:         # network.ep.ENsetnodevalue(
1033:         #     network.ep.ENgetnodeindex('N2'),
1034:         #     epanet2.EN_ELEVATION, _elevation)
1035:
1036:         network.ep.ENsetlinkvalue(index_ADUTORA,
1037:                                   self.epanet2.EN_LENGTH, self.length)
1038:         network.ep.ENsetlinkvalue(index_ADUTORA,
1039:                                   self.epanet2.EN_DIAMETER, self.diameter)
1040:         network.ep.ENsetlinkvalue(index_ADUTORA,
1041:                                   self.epanet2.EN_ROUGHNESS,
1042:                                   roughness[key_base_demand])
1043:
1044:         network.ep.ENsetnodevalue(
1045:             network.ep.ENgetnodeindex('N3'),
1046:             self.epanet2.EN_ELEVATION,
1047:             self.elevation)
```

```
1048:
1049:         network.ep.ENsetlinkvalue(index_REG ,
1050:                                   self.epanet2.EN_INITSETTING ,
1051:                                   tank_max_level)
1052:         network.ep.ENsetlinkvalue(index_REG ,
1053:                                   self.epanet2.EN_DIAMETER ,
1054:                                   self.diameter)
1055:
1056:         network.ep.ENsetnodevalue(
1057:             network.ep.ENgetnodeindex('N4'),
1058:             self.epanet2.EN_ELEVATION ,
1059:             self.elevation)
1060:
1061:         network.ep.ENsetlinkvalue(
1062:             network.ep.ENgetlinkindex('tw3'),
1063:             self.epanet2.EN_DIAMETER ,
1064:             self.diameter)
1065:         network.ep.ENsetlinkvalue(
1066:             network.ep.ENgetlinkindex('tw3'),
1067:             self.epanet2.EN_ROUGHNESS ,
1068:             roughness[key_base_demand])
1069:
1070:         # initial_level =
1071:         #             np.multiply(tank_max_level,
1072:         #             coefficient_tank_initial_level)
1073:
1074:         network.ep.ENsetnodevalue(index_RNV ,
1075:                                   self.epanet2.EN_ELEVATION ,
1076:                                   np.around(self.elevation, 2))
1077:         network.ep.ENsetnodevalue(index_RNV ,
1078:                                   self.epanet2.EN_TANKLEVEL , 1)
1079:         network.ep.ENsetnodevalue(index_RNV ,
1080:                                   self.epanet2.EN_MAXLEVEL ,
1081:                                   tank_max_level)
1082:         network.ep.ENsetnodevalue(index_RNV ,
1083:                                   self.epanet2.EN_TANKDIAM ,
1084:                                   tank_diameter)
1085:
1086:         network.ep.ENsetlinkvalue(
1087:             network.ep.ENgetlinkindex('tw4'),
1088:             self.epanet2.EN_DIAMETER ,
1089:             self.diameter)
```

```

1090:         network.ep.ENsetlinkvalue(
1091:             network.ep.ENgetlinkindex('tw4'),
1092:             self.epanet2.EN_ROUGHNESS,
1093:             roughness[key_base_demand])
1094:
1095:         network.ep.ENsetnodevalue(index_consumo,
1096:             self.epanet2.EN_ELEVATION,
1097:             np.subtract(self.elevation,
1098:                 tank_max_level))
1099:         network.ep.ENsetnodevalue(index_consumo,
1100:             self.epanet2.EN_BASEDEMAND,
1101:             base_demand_value)
1102:
1103:         '''
1104:         Para a execução de uma simulação dinâmica,
1105:         deve criar-se um Padrão Temporal,
1106:         para representar a variação periódica
1107:         ao longo do tempo.
1108:
1109:         Parâmetros
1110:         -----
1111:         ENsettimeparam:
1112:         função de 2 dígitos
1113:             (int paramcode, long timevalue)
1114:         Arguments:
1115:             paramcode: time parameter code (see below)
1116:             timevalue: value of time parameter
1117:                         in seconds
1118:         Notes: Time parameter codes consist
1119:                 of the following constants:
1120:             EN_DURATION (0) Simulation duration
1121:             EN_HYDSTEP (1) Hydraulic time step
1122:             EN_QUALSTEP (2) Water quality time step
1123:             EN_PATTERNSTEP (3) Time pattern time step
1124:             EN_PATTERNSTART (4) Time pattern start time
1125:             EN_REPORTSTEP (5) Reporting time step
1126:             EN_REPORTSTART (6) Report starting time
1127:             EN_RULESTEP (7) Time step
1128:                 for evaluating rule-based controls
1129:             EN_STATISTIC (8) Type of time series
1130:                 post-processing to use:
1131:             EN_NONE (0) = none

```

```
1132:         EN_AVERAGE (1) = averaged
1133:         EN_MINIMUM (2) = minimums
1134:         EN_MAXIMUM (3) = maximums
1135:         EN_RANGE (4) = ranges
1136:     '''
1137:
1138:     # Duração da simulação (10 dias) em segundo.
1139:     simulation_duration = int(10 * 24 * 3600)
1140:
1141:     # Intervalo de cálculo da simulação
1142:     # (1h) em segundo.
1143:     hydraulic_time_step = int(60 * 60)
1144:
1145:     # Intervalo de tempo dos PADRÕES
1146:     # (1h) em segundo.
1147:     # time_pattern_time_step =
1148:     #         int(demand_pattern[1] * 3600)
1149:
1150:     # Início da hora dos PADRÕES (00:00).
1151:     time_pattern_start_time = int(0)
1152:
1153:     # Intervalo de verificação da regra
1154:     # (1h) em segundo.
1155:     # time_rule_step = int(60 * 60)
1156:
1157:     # Intervalo de tempo no relatório
1158:     # (1h) em segundo.
1159:     reporting_time_step = int(3600)
1160:
1161:     # Início horário da simulação
1162:     # no relatório (00:00).
1163:     report_starting_time = int(0)
1164:
1165:     network.ep.ENsettimeparam(
1166:         self.epanet2.EN_DURATION,
1167:         simulation_duration)
1168:     network.ep.ENsettimeparam(
1169:         self.epanet2.EN_HYDSTEP,
1170:         hydraulic_time_step)
1171:     # epa.ENsettimeparam(
1172:     #         epanet2.EN_PATTERNSTEP,
1173:     #         time_pattern_time_step)
```

```
1174:         network.ep.ENsettimeparam(
1175:             self.epanet2.EN_PATTERNSTART,
1176:             time_pattern_start_time)
1177:         network.ep.ENsettimeparam(
1178:             self.epanet2.EN_REPORTSTEP,
1179:             reporting_time_step)
1180:         network.ep.ENsettimeparam(
1181:             self.epanet2.EN_REPORTSTART,
1182:             report_starting_time)
1183:
1184:         network.ep.ENresetreport()
1185:         network.ep.ENsetstatusreport(2)
1186:         network.ep.ENsetreport('ENERGY YES')
1187:
1188:         network.ep.ENsettimeparam(
1189:             self.epanet2.EN_STATISTIC,
1190:             self.epanet2.EN_NONE)
1191:
1192:         volume_txt = str(int(self.base_demand['end']
1193:                             * 24 * 60 * 60 / 1000)).zfill(5)
1194:         LHg = str(int(self.length
1195:                      / self.elevation)).zfill(4)
1196:         diameter_txt = str(int(self.diameter)).zfill(4)
1197:         demand_txt = str(int(base_demand_value
1198:                             * 100)).zfill(6)
1199:         rls = str(int(rule_value[key_base_demand]))
1200:                .zfill(2)
1201:
1202:         file_name = str(
1203:             'Vd' + volume_txt + 'LHg' + LHg + 'D'
1204:             + diameter_txt + 'Cb' + demand_txt + 'Rls'
1205:             + rls + '.inp')
1206:
1207:         # file_name = file_name.replace('.db', '.inp')
1208:         network.save_inputfile(file_name)
1209:         network.ep.ENclose()
1210:
1211:         path_Inp = abspath(file_name)
1212:         network = self.Network(inputfile=path_Inp,
1213:                               units=self.epanet2.EN_LPS)
1214:
1215:         network.ep.ENopenH()
```



```
1216:
1217:         result = []
1218:
1219:         '''
1220:         Call ENinitH prior to running
1221:         a hydraulic analysis using ENrunH
1222:         and ENnextH.ENopenH must have
1223:         been called prior to calling ENinitH.
1224:         Do not call ENinitH if a complete
1225:         hydraulic analysis is being
1226:         made with a call to ENSolveH.
1227:         Values of flag have the following meanings:
1228:         00 do not re-initialize flows,
1229:             do not save results to file
1230:         01 do not re-initialize flows,
1231:             save results to file
1232:         10 re-initialize flows,
1233:             do not save results to file
1234:         11 re-initialize flows,
1235:             save results to file
1236:         '''
1237:         network.ep.ENinitH(10)
1238:         '''
1239:         Executa o while para simula
1240:         os cálculos ao longo do tempo
1241:         (t >>> t+1 >>> t+2 >>> ...)
1242:         '''
1243:         while True:
1244:
1245:             '''
1246:             ENrunH():
1247:             Resolve hidráulica para
1248:             condições no tempo t
1249:             Esta função é usada em
1250:             um loop com ENnextH () para executar
1251:             uma simulação hidráulica de longo período.
1252:             Retorna: Tempo atual (segundos)
1253:             '''
1254:
1255:             network.ep.ENrunH()
1256:
1257:             result_tstep = []
```

```
1258:
1259:     '''
1260:     Bomba >>> vazão, perda de carga
1261:     Reservatorio >>> nivel, balanço de vazão
1262:     nó de consumo >>> pressão
1263:     '''
1264:
1265:     # Bomba
1266:     index_BOMBA_status =
1267:         network.ep.ENgetlinkvalue(
1268:             index_BOMBA,
1269:             self.epanet2.EN_STATUS)
1270:     index_BOMBA_flow =
1271:         network.ep.ENgetlinkvalue(
1272:             index_BOMBA,
1273:             self.epanet2.EN_FLOW)
1274:     # index_BOMBA_headcurve =
1275:     #     network.ep.ENgetheadcurveindex(
1276:     #         index_BOMBA)
1277:     index_BOMBA_headloss =
1278:         network.ep.ENgetlinkvalue(
1279:             index_BOMBA,
1280:             self.epanet2.EN_HEADLOSS)
1281:     index_BOMBA_setting =
1282:         network.ep.ENgetlinkvalue(
1283:             index_BOMBA,
1284:             self.epanet2.EN_SETTING)
1285:     index_BOMBA_energy =
1286:         network.ep.ENgetlinkvalue(
1287:             index_BOMBA,
1288:             self.epanet2.EN_ENERGY)
1289:     # velocity = epa.ENgetlinkvalue(
1290:     #     bomba, epanet2.EN_VELOCITY)
1291:
1292:     # Adutora
1293:     index_ADUTORA_status =
1294:         network.ep.ENgetlinkvalue(
1295:             index_ADUTORA,
1296:             self.epanet2.EN_STATUS)
1297:     index_ADUTORA_diameter =
1298:         network.ep.ENgetlinkvalue(
1299:             index_ADUTORA,
```

```
1300:             self.epanet2.EN_DIAMETER)
1301: index_ADUTORA_length =
1302:             network.ep.ENgetlinkvalue(
1303:                 index_ADUTORA ,
1304:                 self.epanet2.EN_LENGTH)
1305: index_ADUTORA_roughness =
1306:             network.ep.ENgetlinkvalue(
1307:                 index_ADUTORA ,
1308:                 self.epanet2.EN_ROUGHNESS)
1309: # index_ADUTORA_minorloss =
1310: #     network.ep.ENgetlinkvalue(index_ADUTORA)
1311: index_ADUTORA_flow =
1312:             network.ep.ENgetlinkvalue(
1313:                 index_ADUTORA ,
1314:                 self.epanet2.EN_FLOW)
1315: index_ADUTORA_velocity =
1316:             network.ep.ENgetlinkvalue(
1317:                 index_ADUTORA ,
1318:                 self.epanet2.EN_VELOCITY)
1319: index_ADUTORA_headloss =
1320:             network.ep.ENgetlinkvalue(
1321:                 index_ADUTORA ,
1322:                 self.epanet2.EN_HEADLOSS)
1323: index_ADUTORA_energy =
1324:             network.ep.ENgetlinkvalue(
1325:                 index_ADUTORA ,
1326:                 self.epanet2.EN_ENERGY)
1327:
1328: # Reservatório de Nível Variado
1329: index_RNV_elevation =
1330:             network.ep.ENgetnodevalue(
1331:                 index_RNV ,
1332:                 self.epanet2.EN_ELEVATION)
1333: index_RNV_volume =
1334:             network.ep.ENgetnodevalue(
1335:                 index_RNV ,
1336:                 self.epanet2.EN_INITVOLUME)
1337: index_RNV_tankdiam =
1338:             network.ep.ENgetnodevalue(
1339:                 index_RNV ,
1340:                 self.epanet2.EN_TANKDIAM)
1341: index_RNV_minlevel =
```

```
1342:         network.ep.ENgetnodevalue(
1343:             index_RNV,
1344:             self.epanet2.EN_MINLEVEL)
1345:     index_RNV_maxlevel =
1346:         network.ep.ENgetnodevalue(
1347:             index_RNV,
1348:             self.epanet2.EN_MAXLEVEL)
1349:
1350:     index_RNV_tanklevel =
1351:         network.ep.ENgetnodevalue(
1352:             index_RNV,
1353:             self.epanet2.EN_TANKLEVEL)
1354:     index_RNV_pressure =
1355:         network.ep.ENgetnodevalue(
1356:             index_RNV,
1357:             self.epanet2.EN_PRESSURE)
1358:     index_RNV_head =
1359:         network.ep.ENgetnodevalue(
1360:             index_RNV,
1361:             self.epanet2.EN_HEAD)
1362:     index_RNV_balance =
1363:         network.ep.ENgetnodevalue(
1364:             index_RNV,
1365:             self.epanet2.EN_DEMAND)
1366:
1367:     date_time = network.ep.ENsimtime()
1368:
1369:     # date_time = '2019-01-30 02:00'
1370:
1371:     date_time =
1372:         date_time.days * 86400 + date_time.seconds
1373:
1374:     # now = datetime.now().date()
1375:     now = self.datetime(2019, 1, 1, 0, 0, 0)
1376:     years = now.year
1377:     month = now.month
1378:     days = now.day
1379:
1380:     quotient, remainder =
1381:         np.divmod(date_time, 86400)
1382:     # Return (x // y, x % y)
1383:     days = days + quotient
```

```
1384:
1385:         quotient, remainder =
1386:             np.divmod(remainder, 3600)
1387:         # Return (x // y, x % y)
1388:         hours = quotient
1389:
1390:         quotient, remainder =
1391:             np.divmod(remainder, 60)
1392:         # Return (x // y, x % y)
1393:         minutes = quotient
1394:
1395:         date_time = ('{}-{:02d}-{:02d} {:02d}:{:02d}'
1396:                     .format(years, month, days,
1397:                               hours, minutes))
1398:
1399:         # 4 horas de ponta horária
1400:         price_curve = 1
1401:         if ('18:00' <=
1402:             self.datetime.strptime(date_time,
1403:                                     '%Y-%m-%d %H:%M')
1404:             .strftime('%H:%M') < '22:00'):
1405:             price_curve = 3.9632884517
1406:
1407:         partial_result = \
1408:             [self.datetime.strptime(date_time,
1409:                                     '%Y-%m-%d %H:%M'),
1410:              pump_id, '1', price_curve,
1411:              index_BOMBA_status,
1412:              index_BOMBA_flow,
1413:              index_BOMBA_headloss,
1414:              index_BOMBA_energy,
1415:              adductor_id,
1416:              index_ADUTORA_diameter,
1417:              index_ADUTORA_length,
1418:              index_ADUTORA_roughness,
1419:              index_ADUTORA_status,
1420:              index_ADUTORA_flow,
1421:              index_ADUTORA_velocity,
1422:              index_ADUTORA_headloss,
1423:              index_ADUTORA_energy,
1424:              rnv_id,
1425:              index_RNV_elevation,
```

```
1426:         index_RNV_volume ,
1427:         index_RNV_tankdiam ,
1428:         index_RNV_minlevel ,
1429:         index_RNV_maxlevel ,
1430:         index_RNV_tanklevel ,
1431:         index_RNV_pressure ,
1432:         index_RNV_head ,
1433:         index_RNV_balance]
1434:
1435:     result_tstep.extend(partial_result)
1436:     result.append(result_tstep)
1437:
1438:
1439:     """ ENnextH():
1440:     Determina o tempo até o próximo
1441:     evento hidráulico
1442:     Esta função é usada em
1443:     um loop com ENrunH () para executar
1444:     uma simulação hidráulica de longo período.
1445:     Veja ENSolveH () para um exemplo.
1446:     Retorna
1447:     -----
1448:     Tempo (segundos) até o próximo
1449:     evento hidráulico (0 marcas no final
1450:     do período de simulação)
1451:     """
1452:
1453:     tstep = network.ep.ENnextH()
1454:
1455:     if (tstep <= 0):
1456:         break
1457:
1458:     # continuidade do for scenario
1459:     network.ep.ENcloseH()
1460:
1461:     columns = [
1462:         'DateTime',
1463:         # Cabeçalho das informações da Bomba
1464:         'pump_id', 'pump_curve', 'price_curve',
1465:         'pump_status', 'pump_flow', 'pump_headloss',
1466:         'pump_energy',
1467:         #
```

```

1468:         # Cabeçalho das informações da Adutora
1469:         'adductor_id', 'adductor_diameter',
1470:         'adductor_length', 'adductor_roughness',
1471:         'adductor_status',
1472:         'adductor_flow', 'adductor_velocity',
1473:         'adductor_headloss', 'adductor_energy',
1474:         #
1475:         # Cabeçalho das informações do Reservatório
1476:         'rnv_id', 'rnv_elevation', 'rnv_volume',
1477:         'rnv_diameter', 'rnv_minlevel', 'rnv_maxlevel',
1478:         'rnv_tanklevel',
1479:         'rnv_pressure', 'rnv_head', 'rnv_balance']
1480:
1481:     df_scenario.append(
1482:         pd.DataFrame.from_records(result,
1483:                                 columns=columns, index='DateTime'))
1484:     # i += 1
1485:     # fim do for scenario
1486:     '''
1487:     Fim da simulação.
1488:     É recomendado fechar todos os comandos aberto.
1489:     '''
1490:     network.ep.ENclose()
1491:     # fim do for scenario
1492:     # j += 1
1493:     # cost_function_parameter = df_scenario
1494:     cost_function_parameter =
1495:         self.total_cost_function(df_scenario,
1496:                                 volume, file_name, report)
1497:     df_rules.append(cost_function_parameter)
1498:     return df_rules

```

A rotina que otimiza aqueles dezenove parâmetros e a formulação matemática proposta (Equação 4.1, pag. 41 e Equação 4.2, pag. 41) está incorporada, também, no algoritmo desenvolvido (codificado em python 3.6) e descrito a seguir. Na qual é circunscrito nos conceitos de seleção natural e sobrevivência do indivíduo mais apto, *Algoritmos Genéticos* (AGs). Bem como foi dito, também se utiliza de uma sequência de rotinas computacionais, elaboradas com o intuito de simular o comportamento da evolução natural (PEREIRA, 2007).

Diferente de outros métodos de otimização matemático que partem de um ponto do espaço de busca para encontrar a solução ótima, o método AGs operam em um conjunto de soluções, aplicando o princípio da sobrevivência dos indivíduos mais aptos para conduzir a uma

solução cada vez melhor. Deste modo, geração após geração, um novo conjunto de indivíduos é criado pelo processo de cruzamento e da seleção dos indivíduos mais aptos a solucionar o problema, elevando a evolução do conjunto de soluções do problema, tal como a evolução natural.

Os AGs são inicializados com a geração da população inicial, num conjunto de 'N' indivíduos gerados aleatoriamente, Código-fonte 14. E sendo de uso comum na área de AGs utilizar o termo *cromossomo* como um sinônimo para indivíduo, representando uma solução completa a um problema. A qual um *cromossomo* se resume ao conjunto de *genes*, em que cada um possui seu *genótipo* (característica independente dos demais), e na sua forma original utiliza a representação binária que é uma cadeia de bits de 0 e 1 (*alelo*).

A codificação binária certamente confere generalidade aos AGs. Uma vez convertidos para o domínio binário, o problema do caixeiro viajante e um problema de otimização paramétrica são virtualmente idênticos. Essa conversão para a base binária é representada no Código-fonte 15, na qual os *genes* do conjunto de solução são modificados para binário, e discretizados a partir de um número inteiro e não real.

Nos AGs, a procriação é feita entre dois indivíduos através do cruzamento de operadores extraídos do *cromossomo* (*genes*) - Código-fonte 20 - *gene* este que é a codificação de um dos dezenove parâmetros na forma binária. Esta procriação prossegue até satisfazer um critério de parada, retornando um conjunto de soluções (indivíduos). O critério para a parada pode ser vários, desde o número de gerações já criadas até o grau de convergência entre gerações.

Vale ressaltar que nem todo novo indivíduo é considerado uma solução viável para o problema. Isto ocorre porque com a codificação binária, durante o processo de cruzamento e ou mutação, podem ser criados indivíduos espúrios, ou seja, que estão fora da discretização do espaço de busca. Para contornar este problema, é feita uma validação do valor, comparando com o limite discretizado do espaço de busca, e se por acaso estiver fora do limite, escolhe o valor do limite ultrapassado.

Após alguns testes, o parâmetro relacionado à maneira como ocorre a seleção (Código-fonte 19) foi adaptado, no seguinte modo, para cada geração a rotina seleciona todos os indivíduos da população para o cruzamento, de maneira que ninguém fique de fora.

No estágio de selecionar os 'N' indivíduos que se adaptam melhor ao problema para posterior cruzamento, buscou-se melhorar ainda mais essa seleção, por meio do aumento do tamanho da amostra. Ou seja, ao invés de os indivíduos filhos substituírem os indivíduos pais, eles se acrescentam, sendo assim a amostra aumentará de 'N' indivíduos para '2·N' indivíduos. Com isso, ao combinar essas duas amostras, vai de encontro com a política do elitismo, mantendo a melhor solução encontrada no conjunto da solução posterior, além disso, aumentou consideravelmente a eficiência do algoritmo na evolução.

Vale lembrar que as modificações e adaptações realizadas estão especificamente relacionadas com o tipo de problema tratado neste trabalho, podendo ou não atingir os mesmos

resultados em outros tipos de problema.

Recorda-se também, que a aplicação de AGs não garante uma solução ótima, mas, na maioria das vezes, a vizinhança do ótimo global que satisfaz os critérios de parada do método.

No geral, os parâmetros relacionados ao AG foram desenvolvidos do seguinte modo: (i) um total de 100 indivíduos na população; (ii) o cruzamento por dois pontos sorteados aleatoriamente; (iii) probabilidade de recombinação em 100%, com método de seleção aleatório e sem reposição; (iv) os indivíduos resultantes do cruzamento têm uma probabilidade pré-determinada de 5%, efetuando uma alteração aleatória num *alelo* em cada *gene* de seu *cromossomo*; (v) a avaliação é em cima da otimização multiobjetivo que seja capaz de responder ao problema proposto; (vi) a seleção para a perpetuação de boas características é por meio do ranqueamento da Frente de Pareto (Código-fonte 17 e Código-fonte 16), *Non Dominated Sorting Genetic Algorithm 2* (NSGA-II), sendo efetuada em cima dos dois conjuntos de soluções (pais e filhos); e (vii) tendo como critério de parada o número de 1000 gerações.

Código-fonte 14 – AGEPANET_GA, create individual and population

```
1499: class agepanet():
1500:
1501:     def genetic_algorithm(self, pop_size, max_gen):
1502:
1503:         def create_individual(min, max):
1504:             return [np.random.randint(min, max)
1505:                     for i in range(pop_size)]
1506:
1507:         def create_population():
1508:             population =
1509:                 [create_individual(my_dict[key][0],
1510:                                   my_dict[key][1] + 1)
1511:                 for key in sorted(my_dict.keys())]
1512:             return np.transpose(np.array(population))
```

Código-fonte 15 – AGEPANET_GA, binary

```
1513: class agepanet():
1514:
1515:     def genetic_algorithm(self, pop_size, max_gen):
1516:
1517:         def binary(population):
1518:             # número de casa decimal
1519:             precision = 0
1520:             binary_variable_individual = \
```

```

1521:         [[np.binary_repr(variable, width=int(
1522:             np.ceil(np.log2((
1523:                 my_dict[str(idx + 10)])[1]
1524:                 - my_dict[str(idx + 10)])[0])
1525:                 * 10 ** precision + 1)))]
1526:         # número de Bits + 1
1527:         for idx, variable in enumerate(row_idx)]
1528:         for row_idx in population]
1529:     return binary_variable_individual

```

Nos Código-fonte 16, Código-fonte 17 e Código-fonte 18 são apresentadas a formulação da otimização multiobjetivo e a definição de soluções dominadas e não-dominadas.

Segundo Arroyo (2002), problemas dessa natureza são chamados de problemas de otimização multiobjetivo por envolverem minimização e ou maximização simultânea de um conjunto de objetivos. Assim, buscando um conjunto de soluções eficientes. O conjunto de soluções eficientes também é conhecido como soluções Pareto-ótimas. Segundo Pareto (1896), o conceito de Pareto-ótimo constitui a origem da busca na otimização multiobjetivo.

Por definição, um conjunto de soluções S é dito Pareto-ótimo (Frente de Pareto) se não existe nenhum outro conjunto de soluções viáveis S^* que possa melhorar algum objetivo do problema, sem causar simultaneamente uma piora em pelo menos um outro objetivo. Em outras palavras, uma solução S_1 pertence ao conjunto de soluções Pareto-ótimo se não existe solução S^*_1 que domine S_1 .

O problema em estudo se enquadra na otimização multiobjetivo por envolver a minimização da Equação 4.1 (pag. 41) e a maximização da Equação 4.2 (pag. 41) simultânea, e estando dentro da discretização do limite de busca (Quadro 2, pag. 52).

O passo seguinte foi implementar algumas operações nas funções-objetiva, de maneira que fossem operados num formato já desejado para a sua visualização e apresentação no Capítulo 5. Uma das operações mais comum de mexer nos valores é a normalização, uma ferramenta utilizada para reduzir a complexidade do estudo e aumentar a generalidade dos resultados, assim, aumentando a confiabilidade do modelo simulado.

Para usar essa ferramenta, faz uso do princípio da homogeneidade adimensional, no qual a equação que descreve o fenômeno físico deve ser válida independentemente do sistema de unidades das medidas, observando se as dimensões de todos os termos que se somam estão adimensionais. A normalização é descrita nas linhas 1641 a 1645 do Código-fonte 18.

Agora tendo a configuração que deve ser buscada, inicializa a rotina (Código-fonte 18), onde as soluções candidatas (indivíduos) são avaliadas e hierarquizadas pelos critérios de dominância e não-dominância de Pareto (1896). Relembrando que na rotina seleção houve a combinação das duas amostras e essa combinação ($2 \cdot N$ indivíduos) também entra no cálculo

para encontrar as diversas fronteiras de não-dominâncias.

O Código-fonte 17, ordena um conjunto de solução S ($2 \cdot N$ indivíduos) segundo o conceito de fronteira de Pareto, que divide em diferentes níveis ou fronteiras de não-dominância o conjunto de solução S , e organizada da seguinte forma: a fronteira de Pareto do primeiro nível Fp_1 contém todas as soluções não-dominadas de S o nível Fp_2 contém todas as soluções não dominadas de $\{S - \{Fp_1\}\}$; Fp_3 contém as não dominadas de $\{S - \{Fp_1 \cup Fp_2\}\}$ e assim sucessivamente até a última das soluções. E a aptidão de cada indivíduo será igual ao valor da frente na qual ele está localizado.

Na aptidão é empregado também, um critério denominado de distância de aglomeração ou multidão, a metodologia NSGA-II, fazendo o uso dessa medida para priorizar soluções que estejam mais espalhadas ao longo da fronteira. A distância de aglomeração (da_i) de uma solução reflete a densidade de alternativas localizadas à sua volta, e será igual ao perímetro do cubóide, no espaço das funções objetivo, que envolve uma solução i . Este cubóide tem em seus vértices as soluções mais próximas de sua vizinhança. Os elementos que se situarem nos extremos do nível, ou seja, aqueles que tiverem os maiores e menores valores para alguma função objetivo, terão sua distância de aglomeração igual a infinito.

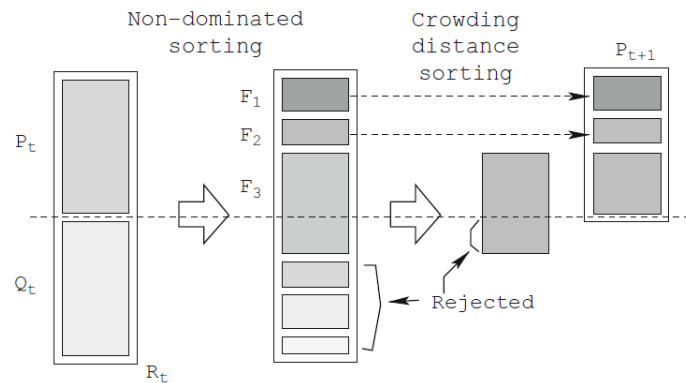
Tendo o conjunto de solução ($2 \cdot N$ indivíduos) sido avaliado, procede-se para a seleção de N indivíduos. A seleção, segundo esta metodologia, é efetuada através da seleção por ranqueamento de multidão. Esse ranqueamento é realizado considerando que cada solução (indivíduo) possui dois atributos:

- (a) ranking de não-dominância r_i , e
- (b) distância de aglomeração da_i .

Baseado nessas duas características é realizado a seleção de N indivíduos em uma amostra de $2 \cdot N$ indivíduos, preenchendo primeiramente de acordo com o ranking da fronteira de não-dominância. Se uma frente é selecionada parcialmente como Fp_3 da Figura 26, executa Crowding-sort (Código-fonte 16) que usa a distância de aglomeração relacionada à densidade de soluções em torno de cada solução, e o candidato i vence um candidato j se a solução i tem um valor de da_i maior do que da solução j .

A etapa da evolução ocorre em aproximar esse conjunto de soluções da frente de Pareto desejada. A cada nova geração evoluída, indivíduos novos são gerados que substituem as piores soluções anteriores, assim, buscando manter a estabilidade da população. Dessa forma, o processo se repete, até que, o número máximo de gerações é superado. A finalização não envolve o uso de nenhum operador genético, ela simplesmente dá fim ao processo de evolução. Nessa circunstância, a otimização pelo algoritmo genético, normalmente, encontra uma boa aproximação da frente de Pareto para o problema em estudo.

Figura 26 – Esquema do procedimento NSGA-II



Fonte: analytics lab @ OU, 2017

Código-fonte 16 – AGEANET_GA, pareto crowding distance

```

1530: class agepanet():
1531:
1532:     def genetic_algorithm(self, pop_size, max_gen):
1533:
1534:         # Function to calculate crowding distance
1535:         def crowding_distance(values1, values2, front):
1536:
1537:             distance = [0 for i in range(0, len(front))]
1538:             distance[0] = np.inf
1539:             sorted1 = list(zip(*front))[0]
1540:             sorted2 = list(zip(*front))[1]
1541:             distance[len(front) - 1] = np.inf
1542:
1543:             s = 2 # distância euclidiana '2'
1544:             for k in range(1, len(front) - 1):
1545:                 distance[k] = distance[k] + (
1546:                     ((sorted1[k + 1] - sorted1[k - 1]) ** s)
1547:                     / (np.max(list(zip(*front))[0]) -
1548:                       np.min(list(zip(*front))[0]))) ** (1 / s)
1549:             for k in range(1, len(front) - 1):
1550:                 distance[k] = distance[k] + (
1551:                     ((sorted2[k + 1] - sorted2[k - 1]) ** s)
1552:                     / (np.max(list(zip(*front))[1]) -
1553:                       np.min(list(zip(*front))[1]))) ** (1 / s)
1554:             return distance

```

Código-fonte 17 – AGEPANET_GA, pareto frontier

```

1555: class agepanet():
1556:
1557:     def genetic_algorithm(self, pop_size, max_gen):
1558:
1559:         def pareto_frontier(df, maxFo1=True, maxFo2=True):
1560:
1561:             index, function1_adm_values,
1562:             function2_adm_values = df.index.values,
1563:             df.function1_adm.values, df.function2_adm.values
1564:
1565:             '''Pareto frontier selection process'''
1566:             sorted_list = sorted([[function1_adm_values[i],
1567:                                   function2_adm_values[i], index[i]]
1568:                                   for i in range(len(function1_adm_values))],
1569:                                   reverse=maxFo1)
1570:             pareto_front = [sorted_list[0]]
1571:             for idx, pair in enumerate(sorted_list[1:]):
1572:                 if maxFo2:
1573:                     if pair[1] >= pareto_front[-1][1]:
1574:                         pareto_front.append(pair)
1575:                 else:
1576:                     if pair[1] <= pareto_front[-1][1]:
1577:                         pareto_front.append(pair)
1578:
1579:             pf_idx_value = np.array([pair[2]
1580:                                     for pair in pareto_front], dtype=int)
1581:
1582:             return df.drop(pf_idx_value), pareto_front

```

Código-fonte 18 – AGEPANET_GA, fitness

```

1583: class agepanet():
1584:
1585:     def genetic_algorithm(self, pop_size, max_gen):
1586:
1587:         def fitness(population,
1588:                     fitness=pd.DataFrame(
1589:                         np.matrix([np.full(int(pop_size), np.inf),
1590:                                    np.full(int(pop_size), 0)]))
1591:                     .transpose(),

```

```
1592:         columns=['function1', 'function2']))):
1593:
1594:     # todos os números devem ser inteiro
1595:     # número inteiro = real * 100
1596:
1597:     population = np.array(population).astype('float64')
1598:     # eliminando os que já são inteiro
1599:     population[:, :-11] =
1600:         np.divide(population[:, :-11], precision_float)
1601:
1602:     children_population = [individual
1603:         for individual in population[int(pop_size):]]
1604:
1605:     # chama a função epanete e retorna a F01 e F02
1606:     foS_population = [epanet(individual)
1607:         for individual in children_population]
1608:     foS_population = [individual[0]
1609:         for individual in foS_population]
1610:
1611:     # selecionando os dados geral status
1612:     # de cada individuo
1613:     general_status = [individual[0]
1614:         for individual in foS_population]
1615:     # minimum_speed = [element[0]
1616:     #     for element in general_status]
1617:     # maximum_speed = [element[1]
1618:     #     for element in general_status]
1619:     simulation_level = [element[2]
1620:         for element in general_status]
1621:     pressure_status = [element[3]
1622:         for element in general_status]
1623:
1624:     fo1 = np.array([individual[1]
1625:         for individual in foS_population])
1626:     fo2 = np.array([np.nan_to_num(individual[2])
1627:         for individual in foS_population])
1628:
1629:     # penalidade se general_status tiver alguma 'FALHA'
1630:     fo1 = [fo1[idx] * (1.2 ** status.count('False'))
1631:         for idx, status in enumerate(pressure_status)]
1632:     fo1 = [fo1[idx] * (1.2 ** status.count('False'))
1633:         for idx, status in enumerate(simulation_level)]
```

```
1634:
1635:         fo1 = np.append(fitness['function1'].values, fo1)
1636:         fo2 = np.append(fitness['function2'].values, fo2)
1637:
1638:         fo1_min = np.nanmin(np.asarray(fo1)
1639:                             .astype(np.float64))
1640:
1641:         s = 2 # distância euclidiana '2'
1642:         function1_adimensional =
1643:             (((fo1_min - fo1) / (fo1_min)) ** s) ** (1 / s)
1644:         function2_adimensional =
1645:             (((300 - fo2) / (300)) ** s) ** (1 / s)
1646:
1647:         function1_values, function2_values =
1648:             function1_adimensional, function2_adimensional
1649:
1650:         non_dominated_sorted_solution = []
1651:
1652:         function = pd.DataFrame(np.matrix(
1653:             [function1_values, function2_values])
1654:                                 .transpose(),
1655:                                 columns=['function1_adm', 'function2_adm'])
1656:         function_values = function.copy()
1657:
1658:         while len(function_values.index) > 0:
1659:             function_values, pareto_front = \
1660:                 pareto_frontier(function_values,
1661:                                 maxFo1=maxFo1, maxFo2=maxFo2)
1662:             non_dominated_sorted_solution
1663:                 .append(pareto_front)
1664:
1665:         result = pd.DataFrame(np.empty(shape=(0, 5)),
1666:                               columns=['_rank', 'fitness',
1667:                                         'function1_adm', 'function2_adm', '_idx'])
1668:         nsga_ii_crowding_distance = []
1669:
1670:         for i in range(0,
1671:                       len(non_dominated_sorted_solution)):
1672:             nsga_ii_crowding_distance
1673:                 .append(crowding_distance(
1674:                     function.function1_adm.values,
1675:                     function.function2_adm.values,
```

```

1676:         np.array([solution[:-1]
1677:                 for solution in
1678:                 non_dominated_sorted_solution[i]]))
1679: df = pd.DataFrame(np.matrix([np.repeat(i,
1680:                               len(nsga_ii_crowding_distance[i]),
1681:                               np.array(nsga_ii_crowding_distance[i]),
1682:                               np.asarray(list(zip(
1683: *non_dominated_sorted_solution[i]))[0]),
1684:                               np.asarray(list(zip(
1685: *non_dominated_sorted_solution[i]))[1]),
1686:                               np.asarray(list(zip(
1687: *non_dominated_sorted_solution[i]))[2]))]
1688:                 .transpose(),
1689:                 columns=['_rank', 'fitness',
1690:                          'function1_adm',
1691:                          'function2_adm', '_idx'])
1692: result = result.append(df, ignore_index=True)
1693:
1694: result = result.sort_values(by=['_idx'],
1695:                             ascending=[True])
1696:
1697: result = result.set_index(result['_idx'])
1698:     .join(pd.DataFrame(np.matrix([fo1, fo2])
1699:                             .transpose(),
1700:                             columns=['function1', 'function2']))
1701:
1702: fitness = result[['_rank', 'fitness',
1703:                  'function1', 'function2']]
1704:
1705: return fitness, [fo1, fo2,
1706:                 pressure_status, simulation_level]

```

Código-fonte 19 – AGEPANET_GA, selection

```

1707: class agepanet():
1708:
1709:     def genetic_algorithm(self, pop_size, max_gen):
1710:
1711:         def selection(population, fitness_population):
1712:             binary_population = binary(population)
1713:             parents = [[idx, [variable_binary
1714:                               for variable_binary

```



```
1715:         in binary_population[idx]]
1716:         for idx, individual
1717:             in enumerate(population)]
1718: population = list(zip(*parents))[1]
1719:
1720: # coluna índice, usar zip (*list)
1721: # para transpor a lista, [0] valores idx
1722: idx_parents_selected = list(zip(*parents))[0]
1723:
1724: # torneio dos pais
1725: current_member = 1
1726: peer_idx_parents_selected = []
1727: percentage_selection = 1.00
1728: out_div, out_mod = np.divmod(len(parents)
1729:                               * percentage_selection, 2)
1730: pair_individual_selection = out_div
1731: individual_selection =
1732:     pair_individual_selection * 2
1733: # o menor inteiro maior ou igual a ceil(x)
1734: while (current_member
1735:        <= pair_individual_selection):
1736:     combination = 'FALSE'
1737:     while combination == 'FALSE':
1738:         # lista aleatoriamente baseada
1739:         # em uma lista existente e sem peso
1740:         idx_parents_selected_1 =
1741:             np.min(np.random.choice(
1742:                 list(idx_parents_selected), 2))
1743:         idx_parents_selected_2 =
1744:             np.min(np.random.choice(
1745:                 list(idx_parents_selected), 2))
1746:         combination = 'TRUE'
1747:         if idx_parents_selected_1
1748:            != idx_parents_selected_2
1749:            else 'FALSE'
1750:     if ([idx_parents_selected_1,
1751:         idx_parents_selected_2] not in
1752:         peer_idx_parents_selected) and \
1753:        ([idx_parents_selected_2,
1754:         idx_parents_selected_1] not in
1755:         peer_idx_parents_selected):
1756:         current_member += 1
```

```
1757:         peer_idx_parents_selected
1758:             .append([idx_parents_selected_1,
1759:                     idx_parents_selected_2])
1760:
1761:         # population = list(zip(*scored))[1]
1762:         parents_population = [[int(variable_binary, 2)
1763:                                for variable_binary in row]
1764:                                for row in population]
1765:         children_population = copy.deepcopy(
1766:             parents_population
1767:             [0:int(individual_selection)])
1768:
1769:         # coluna índice, usar zip (*list)
1770:         # para transpor a lista, [1] valores individuais
1771:         idx_parents_selected = population
1772:
1773:         for idx, (pair1, pair2) in
1774:             enumerate(peer_idx_parents_selected):
1775:             for variable_idx in range(len(my_dict)):
1776:                 # inicializa com índice '0',
1777:                 # por isso q diminuo por 0
1778:                 chromosome1 = idx_parents_selected
1779:                     [pair1][variable_idx]
1780:                 chromosome2 = idx_parents_selected
1781:                     [pair2][variable_idx]
1782:                 children_population
1783:                     [idx * 2][variable_idx],
1784:                 children_population
1785:                     [idx * 2 + 1][variable_idx] = \
1786:                     crossover_and_mutation
1787:                     (chromosome1, chromosome2)
1788:                 # aqui já vem em valor decimal
1789:
1790:         # verificação do limite máximo de cada variável
1791:         for idx_individual, individual in
1792:             enumerate(children_population):
1793:             for idx_variable, variable in
1794:                 enumerate(individual):
1795:                 children_population
1796:                     [idx_individual][idx_variable] = \
1797:                     variable
1798:                 if (my_dict[str(idx_variable + 10)])[0]
```

```

1799:         <= variable <=
1800:         my_dict[str(idx_variable + 10)][1]) \
1801:         else (my_dict
1802:             [str(idx_variable + 10)][0]
1803:             if (variable
1804:                 < my_dict
1805:                     [str(idx_variable + 10)][0])
1806:             else
1807:                 my_dict
1808:                     [str(idx_variable + 10)][1])
1809:
1810:     new_population = copy.deepcopy(parents_population)
1811:     new_population.extend(children_population)
1812:
1813:     fitness_population = fitness(
1814:         np.array(new_population),
1815:         fitness_population).__getitem__(0)
1816:     fitness_population = fitness_population
1817:         .join(pd.DataFrame
1818:             .from_records(new_population))
1819:
1820:     # seleciona os melhores entre os pais e filhos
1821:     fitness_population = fitness_population
1822:         .sort_values(by=['_rank', 'fitness'],
1823:             ascending=[True, False])
1824:     new_population = fitness_population
1825:         .drop(['_rank', 'fitness',
1826:             'function1', 'function2'], axis=1)
1827:         .iloc[0:len(parents_population)].values
1828:     fitness_population = fitness_population
1829:         [['function1', 'function2']]
1830:         .iloc[0:len(parents_population)]
1831:
1832:     return new_population, fitness_population

```

Código-fonte 20 – AGEPANET_GA, crossover and mutation

```

1833: class agepanet():
1834:
1835:     def genetic_algorithm(self, pop_size, max_gen):
1836:
1837:         def crossover_and_mutation(chromosome1, chromosome2):

```

```

1838:         # len(chromosome1) == len(chromosome2)
1839:         chromosome_size = len(chromosome1)
1840:         position = np.random.randint(0,
1841:                                     chromosome_size - 1)
1842:
1843:         # Dois pontos de cruzamento cruzado
1844:         chromosome1, chromosome2 =
1845:             chromosome2[position:] +
1846:             chromosome1[int(position / 2):position] +
1847:             chromosome2[:int(position / 2)], \
1848:             chromosome1[position:] +
1849:             chromosome2[int(position / 2):position] +
1850:             chromosome1[:int(position / 2)]
1851:
1852:         new_chromosome = [chromosome1, chromosome2]
1853:         mutation_probability = 0.05 # 5%
1854:         if np.random.random() <= mutation_probability:
1855:             # ultimo gene não altera
1856:             point = np.random.randint(0,
1857:                                     chromosome_size - 1)
1858:             idx = np.random.randint(0, 1)
1859:             chromosome = new_chromosome[idx]
1860:             new_chromosome[idx] = chromosome[0:point]
1861:                 + '{}'.format(0
1862:                               if chromosome[point] == '1' else 1)
1863:                 + chromosome[point + 1:]
1864:         return int(new_chromosome[0], 2),
1865:                int(new_chromosome[1], 2)

```

Dentro do Código-fonte 21 é apresentado a configuração inicial dos passos que serão executados, como a quantidade de indivíduos, o número limite de gerações, os limites discretizados do espaço de busca dos 19 parâmetros e a inicialização do método da otimização.

Código-fonte 21 – AGEPANET_GA, inicialização

```

1866: class agepanet():
1867:
1868:     def genetic_algorithm(self, pop_size, max_gen):
1869:
1870:         #
1871:         # O algoritmo genetico começa aqui
1872:         #

```

```
1873:
1874:     import copy
1875:     from collections import OrderedDict
1876:
1877:     epanet = self.epanet_exe
1878:
1879:     precision_float = 100
1880:
1881:     my_dict = OrderedDict()
1882:
1883:     ''' Parâmetro em float:'''
1884:     # _coeff_freq_start
1885:     my_dict['10'] = np.array(
1886:         np.multiply([0.7, 1.00], precision_float),
1887:         dtype=int).tolist()
1888:
1889:     # _coeff_freq_middle
1890:     my_dict['11'] = np.array(
1891:         np.multiply([0.7, 1.00], precision_float),
1892:         dtype=int).tolist()
1893:
1894:     # _coeficiente_minimum_level_rule_start
1895:     my_dict['12'] = np.array(
1896:         np.multiply([0.05, 0.25], precision_float),
1897:         dtype=int).tolist()
1898:
1899:     # _coeficiente_maximum_level_rule_start
1900:     my_dict['13'] = np.array(
1901:         np.multiply([0.75, 0.99], precision_float),
1902:         dtype=int).tolist()
1903:
1904:     # _coeficiente_minimum_level_rule_middle
1905:     my_dict['14'] = np.array(
1906:         np.multiply([0.05, 0.25], precision_float),
1907:         dtype=int).tolist()
1908:
1909:     # _coeficiente_maximum_level_rule_middle
1910:     my_dict['15'] = np.array(
1911:         np.multiply([0.75, 0.99], precision_float),
1912:         dtype=int).tolist()
1913:
1914:     # _coeficiente_minimum_level_rule_end
```

```
1915:         my_dict['16'] = np.array(
1916:             np.multiply([0.05, 0.25], precision_float),
1917:             dtype=int).tolist()
1918:
1919:         # _coeficiente_maximum_level_rule_end
1920:         my_dict['17'] = np.array(
1921:             np.multiply([0.75, 0.99], precision_float),
1922:             dtype=int).tolist()
1923:
1924:         ''' Parâmetro em integer:'''
1925:         # _coeficient_tank_diameter
1926:         my_dict['18'] = np.array(
1927:             np.multiply([1, 20], 1), dtype=int).tolist()
1928:
1929:         # _coeficiente_rule_start
1930:         my_dict['19'] = np.array(
1931:             np.multiply([1, 3], 1), dtype=int).tolist()
1932:
1933:         # _start_time_rule_start [hours]
1934:         my_dict['20'] = np.array(
1935:             np.multiply([17, 19], 1), # [14, 18]
1936:             dtype=int).tolist()
1937:
1938:         # number_pumping_off_start [hours]
1939:         my_dict['21'] = np.array(
1940:             np.multiply([3, 5], 1), dtype=int).tolist()
1941:
1942:         # _coeficiente_rule_middle
1943:         my_dict['22'] = np.array(
1944:             np.multiply([1, 3], 1), dtype=int).tolist()
1945:
1946:         # _start_time_rule_middle [hours]
1947:         my_dict['23'] = np.array(
1948:             np.multiply([17, 19], 1), dtype=int).tolist()
1949:
1950:         # number_pumping_off_middle [hours]
1951:         my_dict['24'] = np.array(
1952:             np.multiply([3, 5], 1), dtype=int).tolist()
1953:
1954:         # _coeficiente_rule_end
1955:         my_dict['25'] = np.array(
1956:             np.multiply([1, 3], 1), dtype=int).tolist()
```

```
1957:
1958:     # _start_time_rule_end [hours]
1959:     my_dict['26'] = np.array(
1960:         np.multiply([17, 19], 1), dtype=int).tolist()
1961:
1962:     # number_pumping_off_end [hours]
1963:     my_dict['27'] = np.array(
1964:         np.multiply([3, 5], 1), dtype=int).tolist()
1965:
1966:     # diameter =
1967:     # [100, 150, 200, 250, 300, 350, 400,
1968:     # 500, 600, 700, 800, 900, 1000]
1969:     my_dict['28'] = np.array(
1970:         np.multiply([0, 12], 1), dtype=int).tolist()
1971:
1972:     # Inicialização
1973:     gen_no = 0
1974:     population = create_population()
1975:
1976:     fitness_population =
1977:         pd.DataFrame(np.matrix(
1978:             [np.full(int(pop_size), np.inf),
1979:              np.full(int(pop_size), np.inf)])
1980:             .transpose(),
1981:             columns=['function1', 'function2'])
1982:
1983:     while (gen_no < max_gen):
1984:         population, fitness_population =
1985:             selection(population, fitness_population)
1986:         population = np.array(population, dtype=np.int16)
1987:         gen_no += 1
1988:
1989:     # isso eh para entrar no fitness
1990:     # e fazer a ultima analise da population
1991:     pop_size = 0
1992:     fitness_max_gen = fitness(population)
1993:     fitness_population = fitness_max_gen.__getitem__(0)
1994:     fo1, fo2, pressure_status, simulation_level =
1995:         fitness_max_gen.__getitem__(1)
1996:
1997:     # corrigindo a ultima analise da função fitness
1998:     fo1, fo2 = fo1[len(population):], fo2[len(population):]
```

```
1999:         fitness_population =
2000:             fitness_population.iloc[len(population):]
2001:             .reset_index(drop=True)
2002:
2003:         # todos os números devem ser inteiro
2004:         # número inteiro = real * 100
2005:         population = population.astype('float64')
2006:         # eliminando os que já são inteiro
2007:         population[:, :-11] = np.divide(
2008:             population[:, :-11], precision_float)
2009:
2010:         return population, fitness_population,
2011:             fo1, fo2, pressure_status, simulation_level
```

SOLUÇÃO VIÁVEL DA OTIMIZAÇÃO

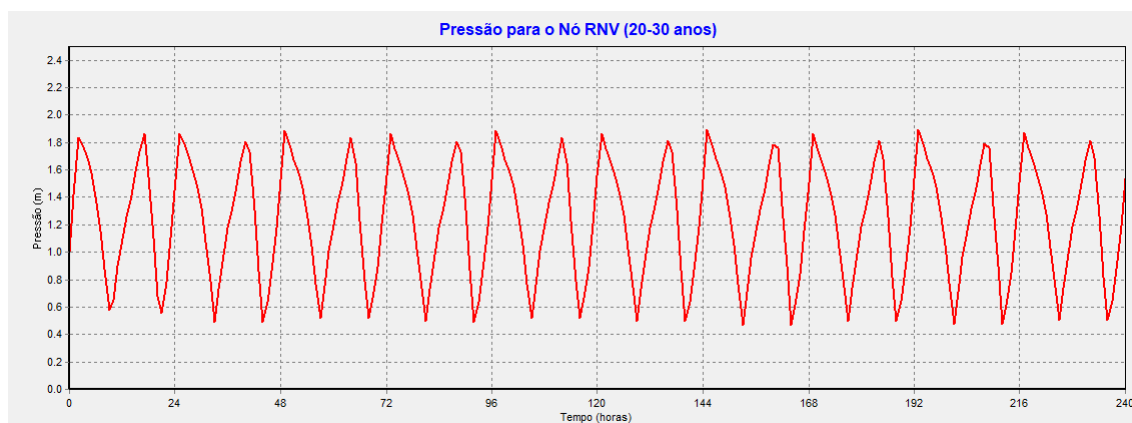
É apresentado o resultado de uma solução viável hidráulicamente, pertencente a frente de Pareto (fronteira não-dominada), de dois experimentos da metodologia (de um total de 160 simulações). Aplicando os dois métodos de dimensionamento (ABNT NBR 12217, 1994 e GOMES, 2012), resultando em informações para cada período (início, meio e fim) do projeto.

B.1 Experimento 1 – pelo método de GOMES, 2012

Utilizando os seguintes dados: população da área abastecida 2000 habitantes, no final de projeto; comprimento da adutora de 1 km; e altura geométrica de 50 metros. Os demais dados são detalhados no Capítulo 4, na Tabela 12 e Apêndice A. Com os resultados abaixo, foi obtido uma análise para cada período, como o grau hidro energético alcançado pela otimização das variáveis de decisão do sistema (Quadro 3).

B.1.1 Demanda de final de projeto (20-30 anos)

Figura 27 – Flutuação do reservatório para a condição final do experimento 1



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 27 é apresentado o comportamento horário da altura da lâmina líquida do reservatório. Sistema operou sem nenhum problema de falta d'água no nó abastecido.

Tabela 12 – Resumo das características físicas e temporais do experimento 1

<i>Método segundo GOMES (2012)</i>			
	<i>Período 1</i>	<i>Período 2</i>	<i>Período 3</i>
Tempo [anos]	00-10	10-20	20-30
Consumo [L/hab/dia]	150	175	200
Altura geométrica [m]	50	50	50
Comprimento da adutora [m]	1000	1000	1000
Rugosidade da tubulação [C]	130	120	110
Diâmetro da adutora [mm]	100	100	100
Altura manométrica nominal [m.c.a.]	54,94	54,94	54,94
Vazão nominal [L/s]	8,85	8,85	8,85
Rendimento nominal [%]	75,5	75,5	75,5
Frequência de rotação da bomba [%]	100	100	100
Regra de operação [cenário]	3 ¹	3 ²	1 ³
Volume do reservatório [m ³]	113,41	113,41	113,41
Máxima altura do RNV [m]	2,5	2,5	2,5
Consumo base [l/s]	1,53	2,95	5,56
<i>Previsão de vazão requerida ao longo do dia [l/s]</i>			
0:00	0.383	0.738	1.390
1:00	0.367	0.708	1.334
2:00	0.367	0.708	1.334
3:00	0.337	0.649	1.223
4:00	0.367	0.708	1.334
5:00	0.612	1.180	2.224
6:00	0.857	1.652	3.114
7:00	0.979	1.888	3.558
8:00	1.040	2.006	3.781
9:00	1.224	2.360	4.448
10:00	0.979	1.888	3.558
11:00	1.163	2.242	4.226
12:00	1.285	2.478	4.670
13:00	1.285	2.478	4.670
14:00	1.224	2.360	4.448
15:00	1.285	2.478	4.670
16:00	1.346	2.596	4.893
17:00	1.469	2.832	5.338
18:00	1.530	2.950	5.560
19:00	1.484	2.862	5.393
20:00	1.362	2.626	4.948
21:00	1.056	2.036	3.836
22:00	0.750	1.446	2.724
23:00	0.627	1.210	2.280

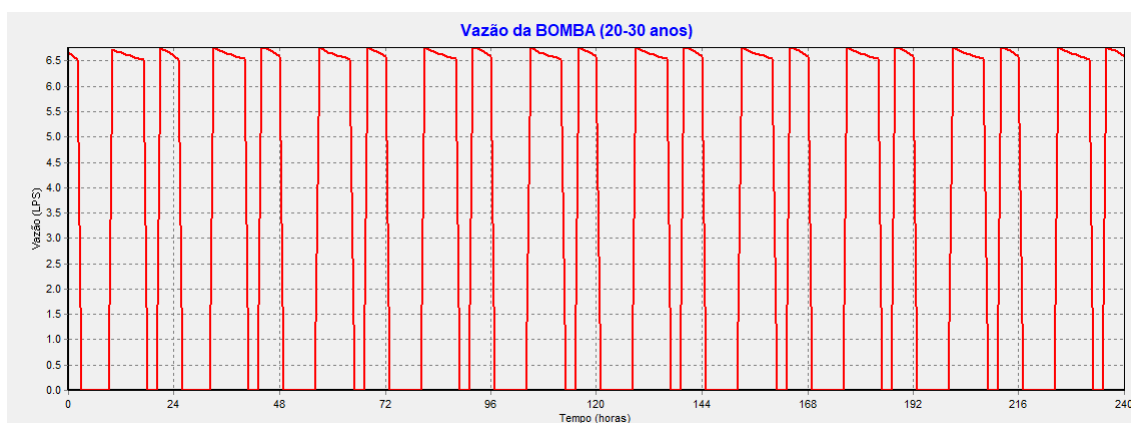
¹ tem como operação, mínimo nível 18% e máximo 75% da altura e paralisação da bomba entre as 19:00 e 22:00;

² mínimo nível 22% e máximo 75% da altura e paralisação da bomba entre as 17:00 e 22:00;

³ tem como operação, mínimo nível 20% e máximo 75% da altura.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 28 – Funcionamento da Bomba para a condição final do experimento 1

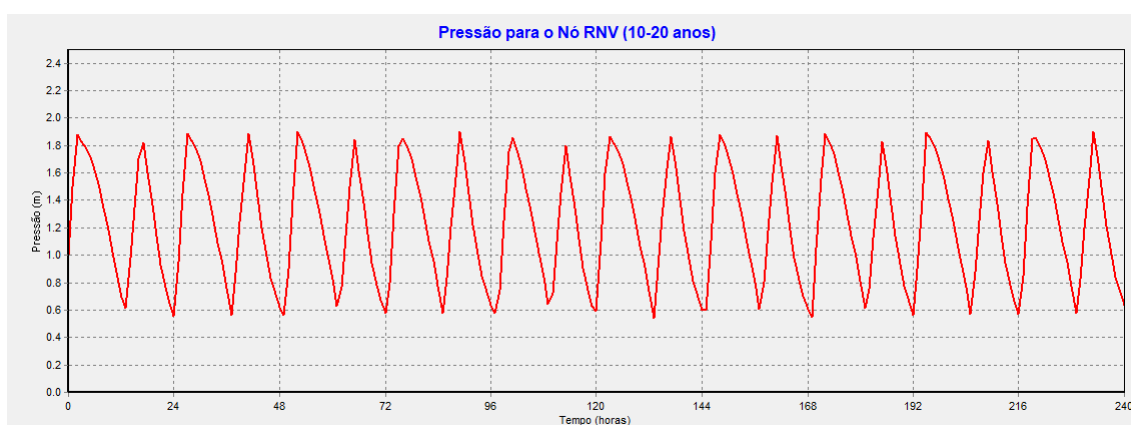


Fonte: Elaborada pelo autor.

B.1.2 Demanda de meio de projeto (10-20 anos)

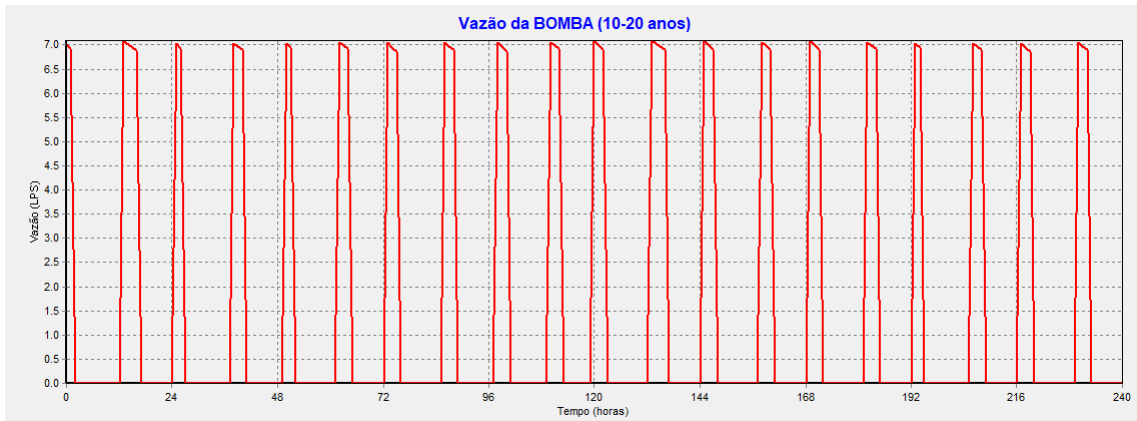
No que tange ao comportamento do reservatório para outra demanda, e menor do que do item “B.1.1”, foi verificado que o reservatório apresentou algumas características peculiares. Apresentando níveis mínimo e máximo iguais do item “B.1.1”, conforme mostrado na Figura 29. Na Figura 30, pode-se observar que o tempo de bombeamento diminuiu e a quantidade de acionamento diário da bomba também. Para esta condição, de meio período de projeto, tem-se a seguinte informação hidro energética mostrada na Tabela 13.

Figura 29 – Flutuação do reservatório para a condição de meio tempo de projeto do experimento 1



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 30 – Funcionamento da Bomba para a condição do meio tempo de projeto do experimento 1



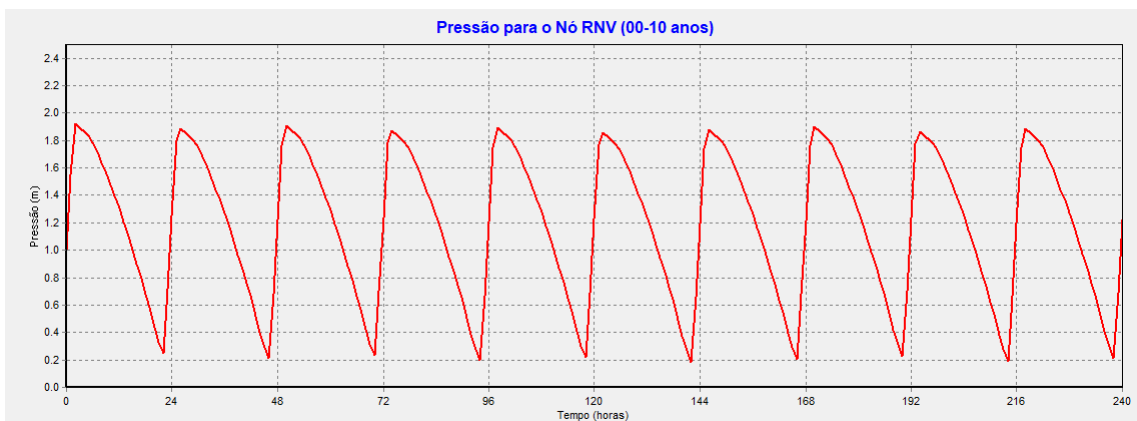
Fonte: Elaborada pelo autor.

B.1.3 Demanda de início de projeto (00-10 anos)

O mesmo se observou nesse período, diminuição do tempo de bombeamento, inclusive de acionamento da bomba, conforme mostrado na Figura 31 e Figura 30. Na Tabela 13, é apresentado as informações hidro energética.

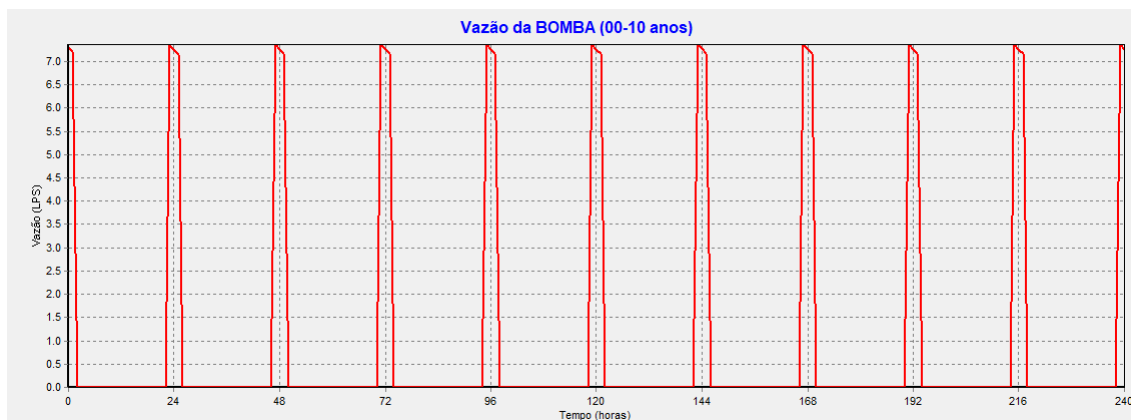
Neste contexto, observando os gráficos e as tabelas (gerados após a implementação da otimização das variáveis de decisão do sistema), constata-se que a realização de uma alternativa operacional no âmbito variável, ao longo do tempo, retornou um melhor desempenho hidro energética do sistema. Na Tabela 13 é apresentado um resumo hidro energético ao longo do tempo (os 3 períodos analisados).

Figura 31 – Flutuação do reservatório para a condição inicial do experimento 1



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 32 – Funcionamento da Bomba para a condição inicial do experimento 1



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 13 – Resultado energético e econômico do experimento 1

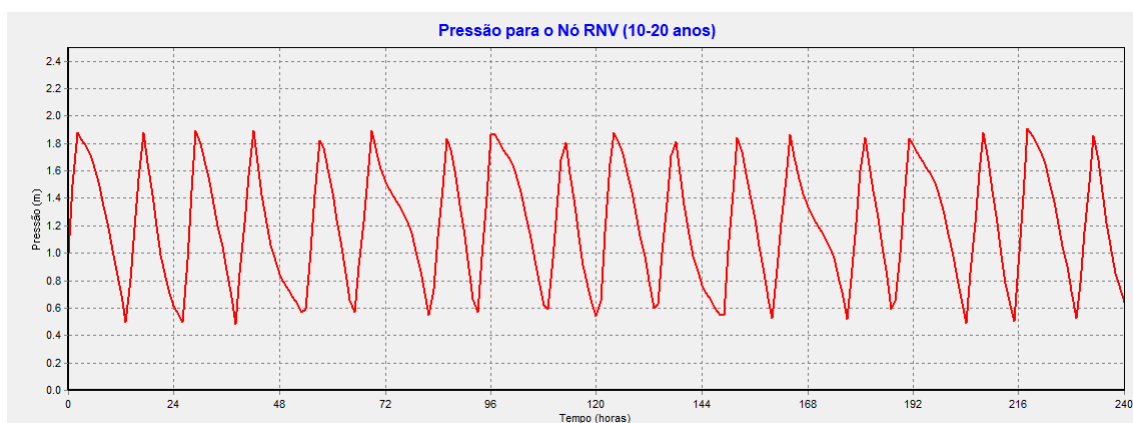
Relatório de Energia								
Bomba	Porcentagem da Bomba ligada	Rendim. médio da bomba	kWh /m3	kW Médio	kW Máximo	Custo /dia	%utilização reservatório	Situação
B1 - 00 anos	13%	73,24	0,22	5,81	5,85	6,76	66,28%	OK!
B1 - 10 anos	25%	72,38	0,23	5,73	5,76	12,71	52,27%	OK!
B1 - 20 anos	54%	71,06	0,24	5,64	5,67	39,83	54,98%	OK!

Fonte: Elaborada pelo autor.

B.1.4 Demanda de início e meio de projeto (00-10 e 10-20 anos) para uma operação fixa ao longo do tempo

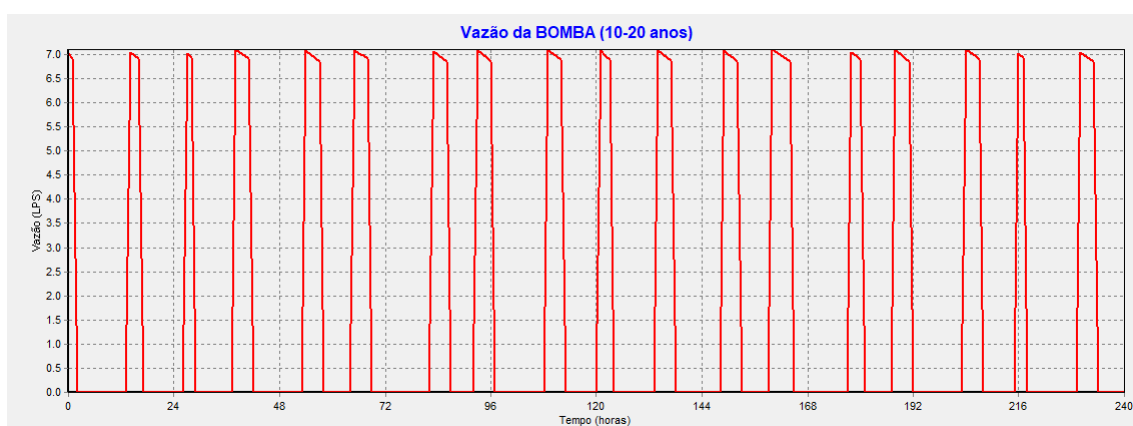
Em cima das características operacional do item “B.1.1” otimizadas para a demanda de final de projeto (regra de controle, características da chave bóia, horário de bombeamento e frequência de rotação da bomba), foi replicada nos outros períodos, início e meio de projeto, para se conhecer as informações hidro energéticas desse sistema com uma alternativa operacional fixa ao longo do horizonte de projeto (Figura 33, Figura 34, Figura 35, Figura 35 e Tabela 14).

Figura 33 – Flutuação do reservatório para a condição de meio tempo de projeto do experimento 1a



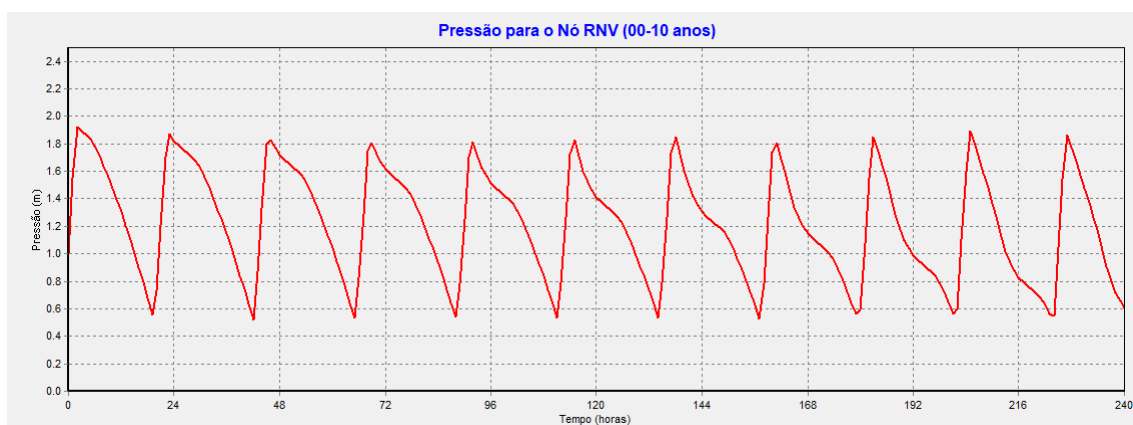
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 34 – Funcionamento da Bomba para a condição do meio tempo de projeto do experimento 1a



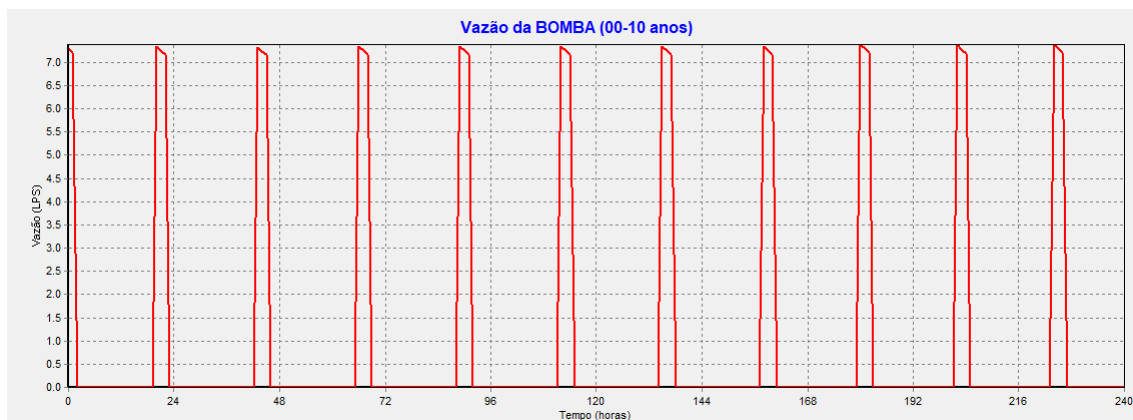
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 35 – Flutuação do reservatório para a condição inicial do experimento 1a



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 36 – Funcionamento da Bomba para a condição inicial do experimento 1a



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 14 – Resultados energéticos e econômicos do experimento 1a

Relatório de Energia								
Bomba	Porcentagem. da Bomba ligada	Rendim. médio da bomba	kWh /m3	kW Médio	kW Máximo	Custo /dia	%utilização reservatório	Situação
B1 - 00 anos	12%	73,25	0,22	5,81	5,85	9,18	66,28%	OK!
B1 - 10 anos	27%	72,36	0,23	5,73	5,76	19,00	53,29%	OK!
B1 - 20 anos	54%	71,06	0,24	5,64	5,67	39,83	54,98%	OK!

Fonte: Elaborada pelo autor.

B.1.5 Demanda de início, meio e fim de projeto aplicando a metodologia proposta no capítulo 5

Foi aplicado a metodologia descrita no Capítulo 5 (dimensionamento baseado na eficiência energética e operacional), para avaliar tal metodologia com os itens "B.1.1", "B.1.2" e "B.1.3" (resultado da otimização do experimento 1). Estando de acordo com os parâmetros operacionais do método escolhido (GOMES ou NBR 12217). As conclusões são apresentadas a seguir (Figura 37, Figura 38, Figura 39, Figura 40, Figura 41, Figura 41 e Tabela 16).

Tabela 15 – Resumo das características físicas e temporais do experimento 1, com a metodologia

<i>Método segundo GOMES (2012)</i>			
	<i>Período 1</i>	<i>Período 2</i>	<i>Período 3</i>
Tempo [anos]	00-10	10-20	20-30
Consumo [L/hab/dia]	150	175	200
Altura geométrica [m]	50	50	50
Comprimento da adutora [m]	1000	1000	1000
Rugosidade da tubulação [C]	130	120	110
Diâmetro da adutora [mm]	100	100	100
Altura manométrica nominal [m.c.a.]	58,5	58,5	58,5
Vazão nominal [L/s]	5,00	5,00	5,00
Rendimento nominal [%]	75,5	75,5	75,5
Frequência de rotação da bomba [%]	100	100	100
Regra de operação [cenário]	1 ¹	3 ²	1 ³
Volume do reservatório [m ³]	113,41	113,41	113,41
Máxima altura do RNV [m]	2,5	2,5	2,5
Consumo base [l/s]	1,53	2,95	5,56
<i>Previsão de vazão requerida ao longo do dia [l/s]</i>			
0:00	0.383	0.738	1.390
1:00	0.367	0.708	1.334
2:00	0.367	0.708	1.334
3:00	0.337	0.649	1.223
4:00	0.367	0.708	1.334
5:00	0.612	1.180	2.224
6:00	0.857	1.652	3.114
7:00	0.979	1.888	3.558
8:00	1.040	2.006	3.781
9:00	1.224	2.360	4.448
10:00	0.979	1.888	3.558
11:00	1.163	2.242	4.226
12:00	1.285	2.478	4.670
13:00	1.285	2.478	4.670
14:00	1.224	2.360	4.448
15:00	1.285	2.478	4.670
16:00	1.346	2.596	4.893
17:00	1.469	2.832	5.338
18:00	1.530	2.950	5.560
19:00	1.484	2.862	5.393
20:00	1.362	2.626	4.948
21:00	1.056	2.036	3.836
22:00	0.750	1.446	2.724
23:00	0.627	1.210	2.280

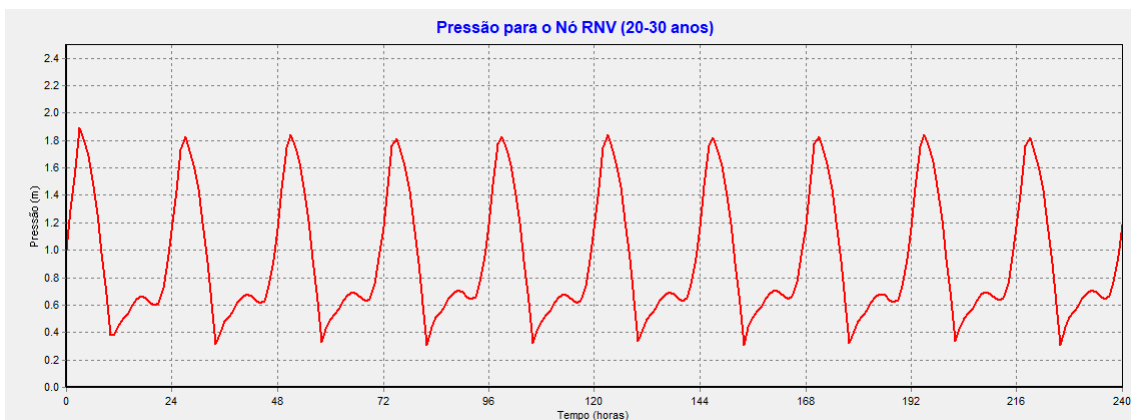
¹ tem como operação, mínimo nível 8% e máximo 75% da altura;

² mínimo nível 25% e máximo 75% da altura e paralisação da bomba entre as 17:00 e 20:00;

³ alteração na operação do cenário 3 (horário e nível) para 1 (somente nível), com mínimo nível 12% e máximo 75% da altura.

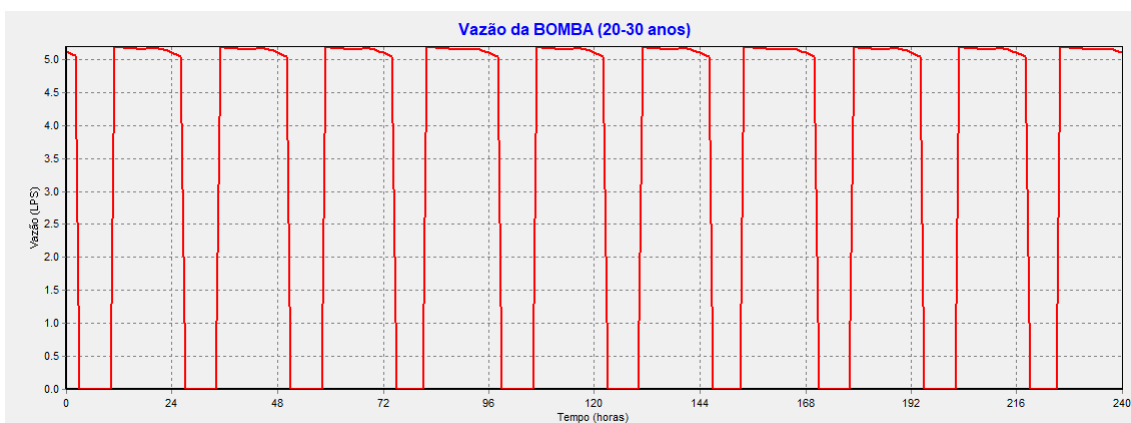
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 37 – Flutuação do reservatório para a condição final do experimento 1, com a metodologia



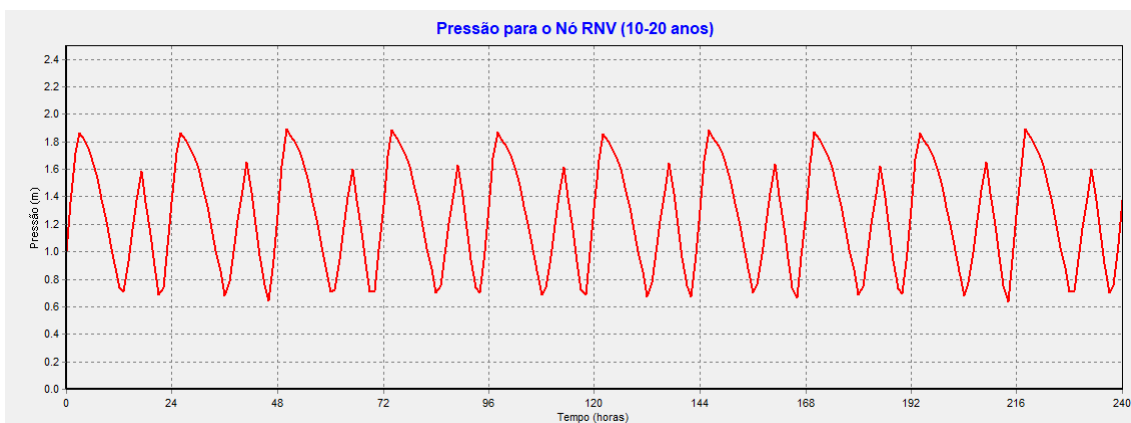
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 38 – Funcionamento da Bomba para a condição final do experimento 1, com a metodologia



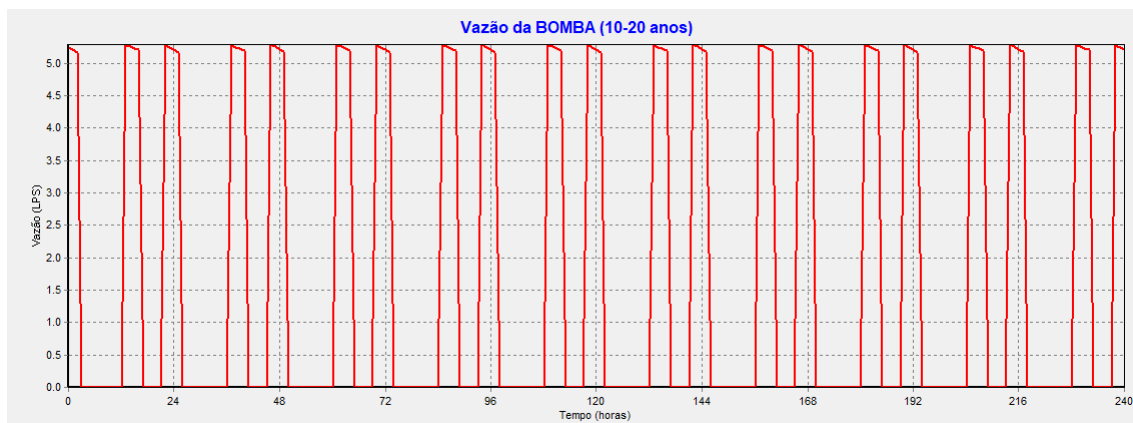
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 39 – Flutuação do reservatório para meio tempo de projeto do experimento 1, com a metodologia



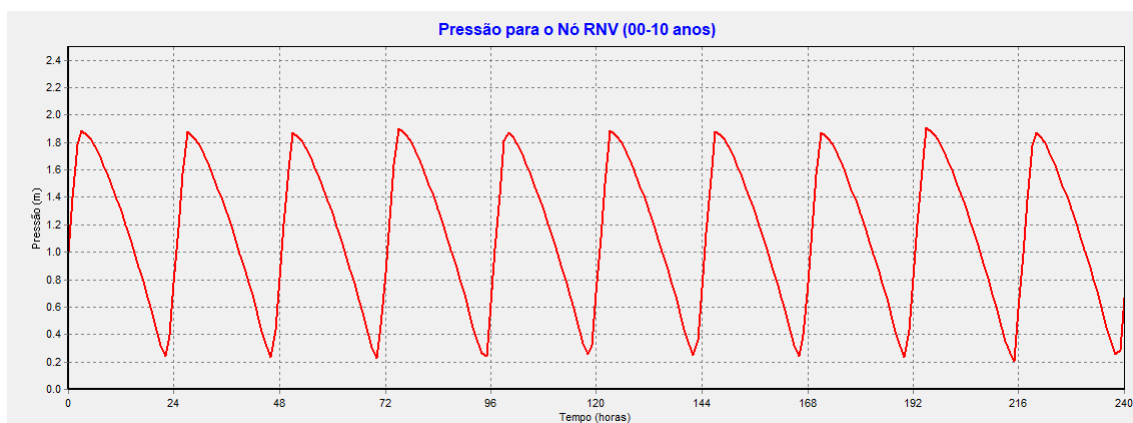
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 40 – Funcionamento da Bomba para meio tempo de projeto do experimento 1, com a metodologia



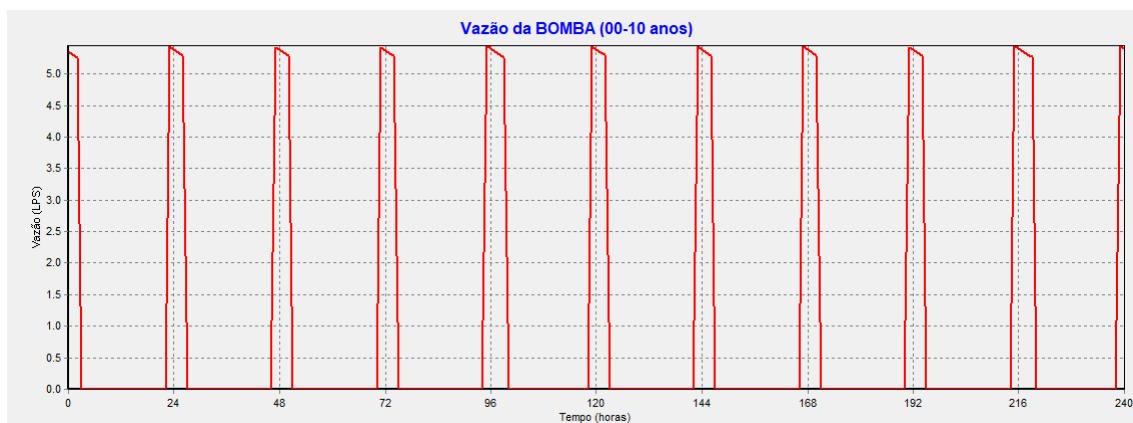
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 41 – Flutuação do reservatório para a condição inicial do experimento 1, com a metodologia



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 42 – Funcionamento da Bomba para a condição inicial do experimento 1, com a metodologia



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 16 – Resultados energéticos e econômicos do experimento 1 para a metodologia

Relatório de Energia								
Bomba	Porcentagem. da Bomba ligada	Rendim. médio da bomba	kWh /m3	kW Médio	kW Máximo	Custo /dia	%utilização reservatório	Situação
B1 - 00 anos	18%	75,48	0,20	3,83	3,86	6,27	65,35%	OK!
B1 - 10 anos	33%	75,69	0,20	3,79	3,81	11,40	47,59%	OK!
B1 - 20 anos	69%	75,84	0,20	3,75	3,77	39,48	59,70%	OK!

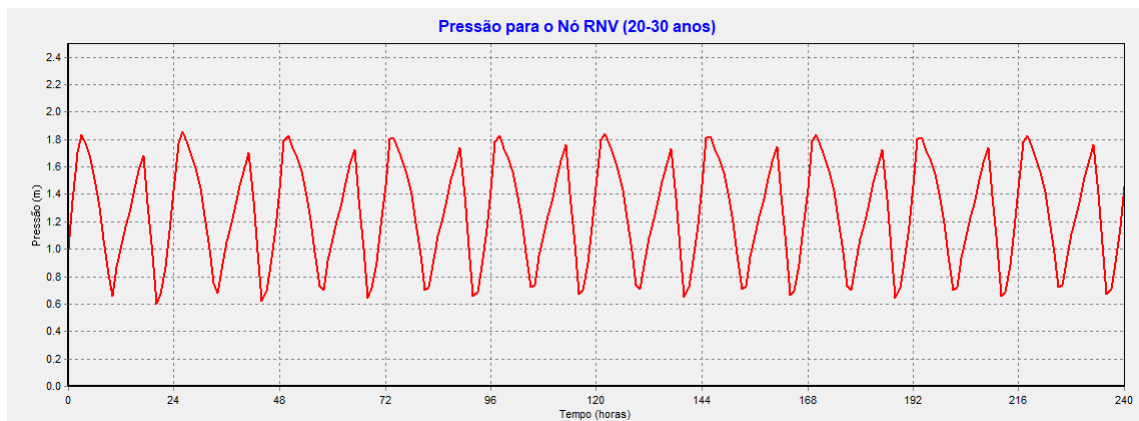
Fonte: Elaborada pelo autor.

Analisando os resultados constatado, conclui-se que existem semelhanças significativas entre os valores hidro energético pela otimização (com o algoritmo genético) e aplicando a metodologia descrita no Capítulo 5.

B.2 Experimento 2 – pela ABNT NBR 12217, 1994

Foram os mesmos procedimentos do experimento 1, alterando apenas a metodologia do dimensionamento do reservatório, sendo aqui utilizada a metodologia da ABNT NBR 12217 (1994). Nas figuras abaixo (Figura 43, Figura 44, Figura 45, Figura 46, Figura 47 e Figura 48) e na Tabela 18 têm-se as informações do sistema.

Figura 43 – Flutuação do reservatório para a condição final do experimento 2



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 17 – Resumo das características físicas e temporais do experimento 2

<i>Método segundo NBR 12217 (1994)</i>			
	<i>Período 1</i>	<i>Período 2</i>	<i>Período 3</i>
Tempo [anos]	00-10	10-20	20-30
Consumo [L/hab/dia]	150	175	200
Altura geométrica [m]	50	50	50
Comprimento da adutora [m]	1000	1000	1000
Rugosidade da tubulação [C]	130	120	110
Diâmetro da adutora [mm]	100	100	100
Altura manométrica nominal [m.c.a.]	54,94	54,94	54,94
Vazão nominal [L/s]	8,85	8,85	8,85
Rendimento nominal [%]	75,5	75,5	75,5
Frequência de rotação da bomba [%]	100	100	100
Regra de operação [cenário]	3 ¹	3 ²	3 ³
Volume do reservatório [m ³]	135,27	135,27	135,27
Máxima altura do RNV [m]	2,5	2,5	2,5
Consumo base [l/s]	1,53	2,95	5,56
<i>Previsão de vazão requerida ao longo do dia [l/s]</i>			
0:00	0.383	0.738	1.390
1:00	0.367	0.708	1.334
2:00	0.367	0.708	1.334
3:00	0.337	0.649	1.223
4:00	0.367	0.708	1.334
5:00	0.612	1.180	2.224
6:00	0.857	1.652	3.114
7:00	0.979	1.888	3.558
8:00	1.040	2.006	3.781
9:00	1.224	2.360	4.448
10:00	0.979	1.888	3.558
11:00	1.163	2.242	4.226
12:00	1.285	2.478	4.670
13:00	1.285	2.478	4.670
14:00	1.224	2.360	4.448
15:00	1.285	2.478	4.670
16:00	1.346	2.596	4.893
17:00	1.469	2.832	5.338
18:00	1.530	2.950	5.560
19:00	1.484	2.862	5.393
20:00	1.362	2.626	4.948
21:00	1.056	2.036	3.836
22:00	0.750	1.446	2.724
23:00	0.627	1.210	2.280

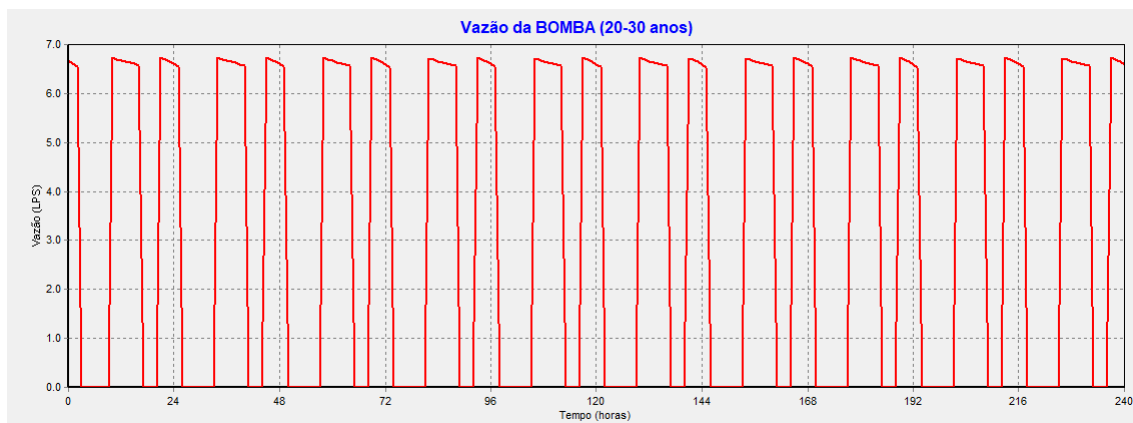
¹ mínimo nível 25% e máximo 75% da altura e paralisação da bomba entre as 17:00 e 22:00;

² mínimo nível 11% e máximo 75% da altura e paralisação da bomba entre as 17:00 e 20:00;

³ mínimo nível 25% e máximo 75% da altura e paralisação da bomba entre as 17:00 e 20:00.

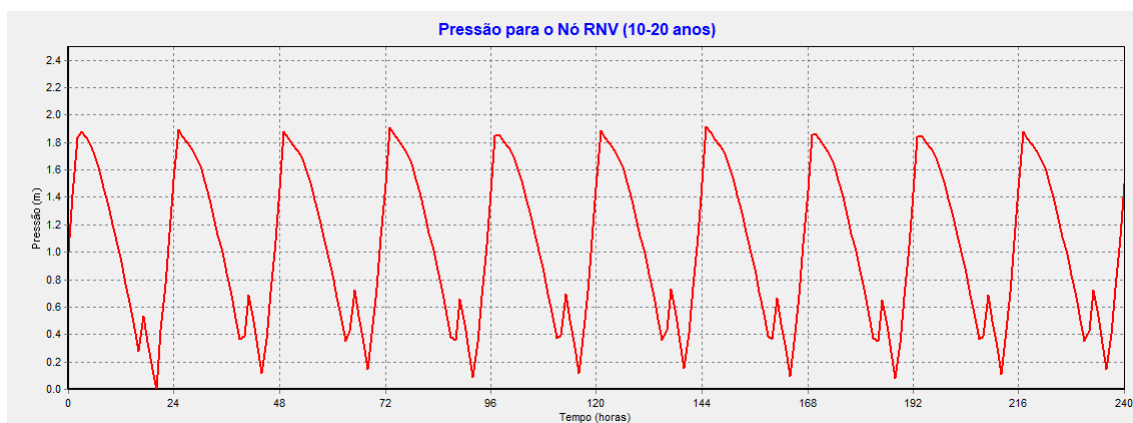
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 44 – Funcionamento da Bomba para a condição final do experimento 2



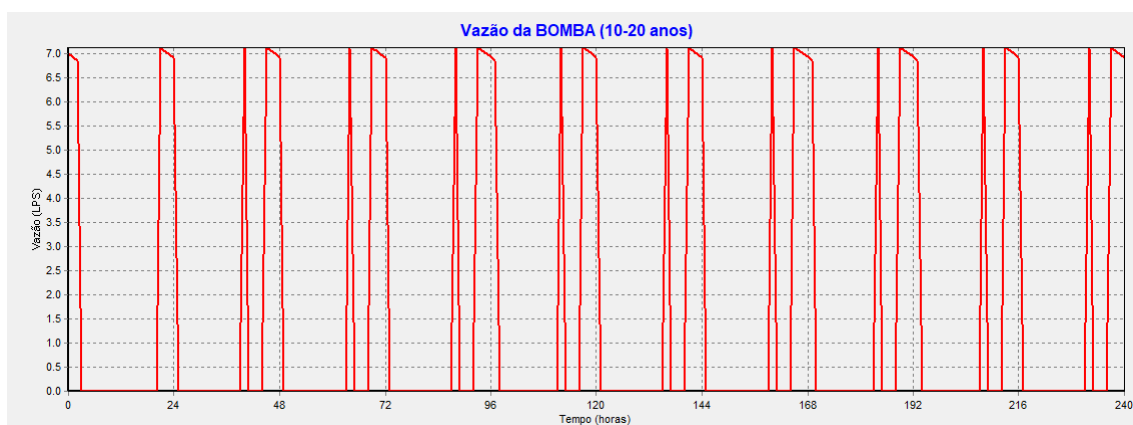
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 45 – Flutuação do reservatório para a condição de meio tempo de horizonte do experimento 2



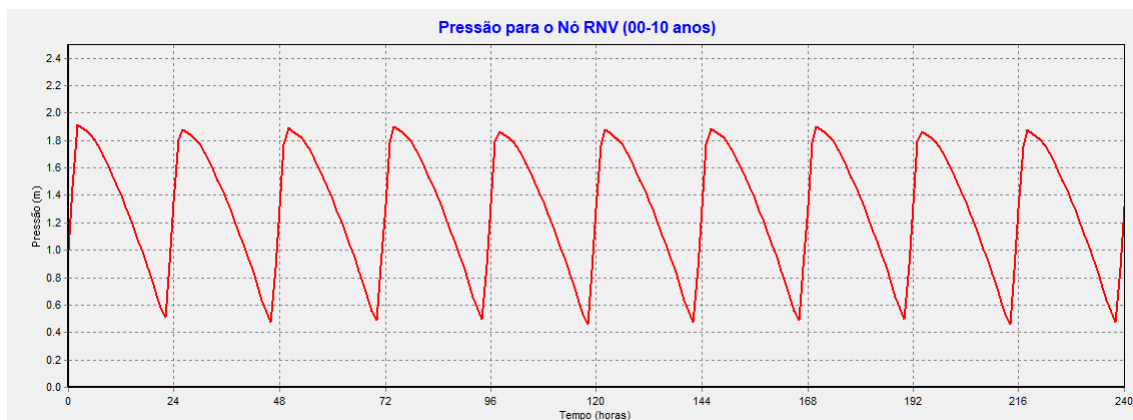
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 46 – Funcionamento da Bomba para a condição de meio tempo de projeto do experimento 2



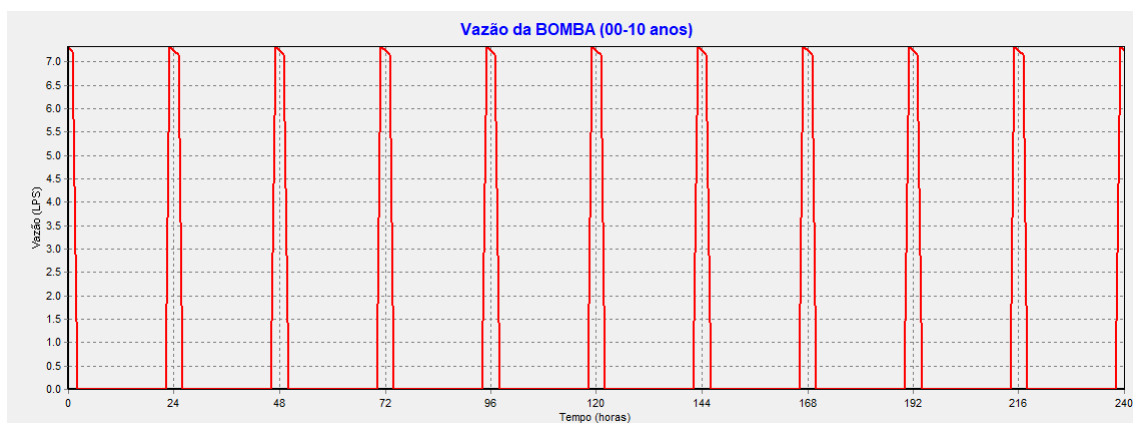
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 47 – Flutuação do reservatório para a condição inicial do experimento 2



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 48 – Funcionamento da Bomba para a condição inicial do experimento 2



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 18 – Resultados energéticos e econômicos do experimento 2

Relatório de Energia								
Bomba	Porcentagem. da Bomba ligada	Rendim. médio da bomba	kWh /m3	kW Médio	kW Máximo	Custo /dia	%utilização reservatório	Situação
B1 - 00 anos	13%	73,19	0,22	5,81	5,84	6,75	55,69%	OK!
B1 - 10 anos	23%	72,56	0,23	5,74	5,77	18,15	69,70%	OK!
B1 - 20 anos	50%	70,99	0,24	5,63	5,66	31,51	45,93%	OK!

Fonte: Elaborada pelo autor.

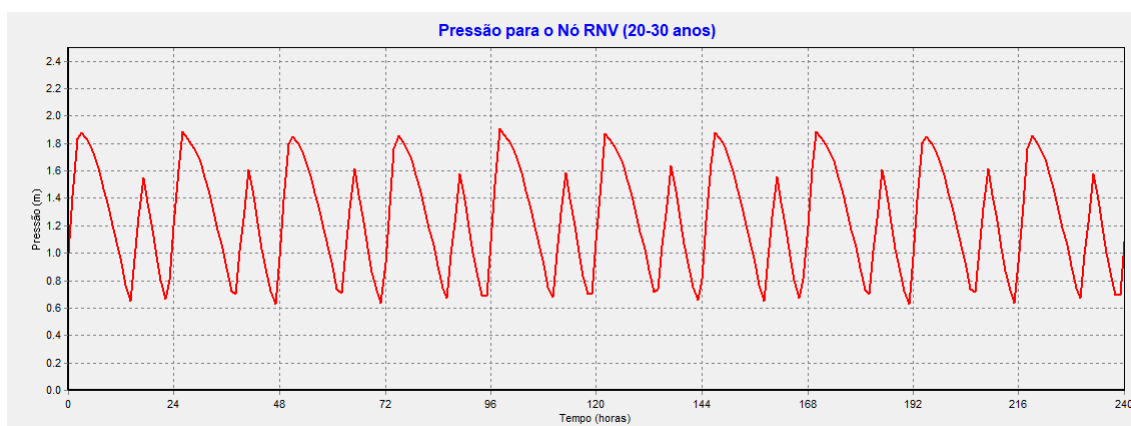
Neste contexto, observando os gráficos e as tabelas gerados após a modificação da metodologia de Gomes (2012) para ABNT NBR 12217 (1994) (método de dimensionamento do

reservatório), constatou-se que a realização de uma alternativa operacional (chave boi) variável ao longo do horizonte de projeto, compete para melhorar o desempenho do sistema.

B.2.1 Demanda de início e meio de projeto (00-10 e 10-20 anos) para uma operação fixa ao longo do tempo

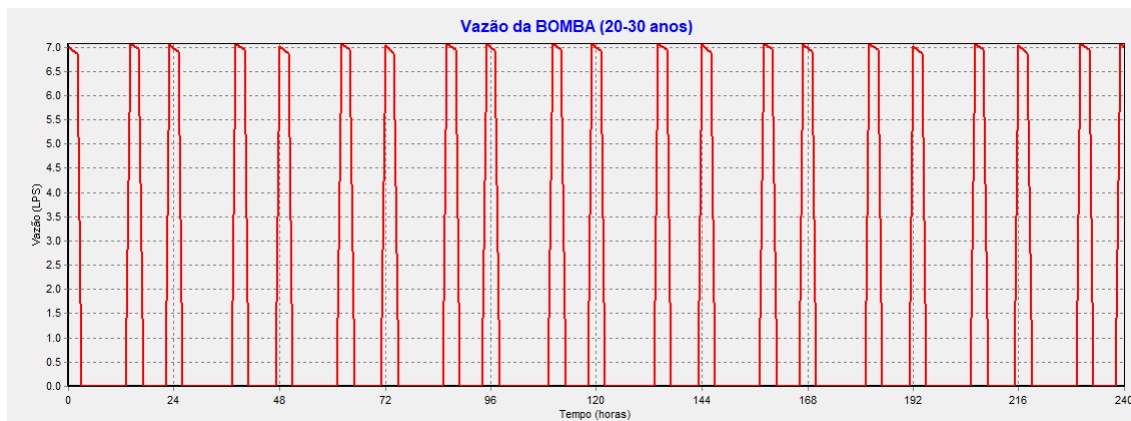
Em cima disso, replicou a operação (regra de controle, características da chave bóia, horário de bombeamento e frequência de rotação da bomba) otimizada de final de projeto nos outros períodos, início e meio de projeto, para conhecer as informações hidroenergéticas desse sistema com uma alternativa operacional fixa ao longo do horizonte de projeto (Figura 49, Figura 50, Figura 51, Figura 52 e Tabela 19).

Figura 49 – Flutuação do reservatório para a condição de meio tempo de projeto do experimento 2a



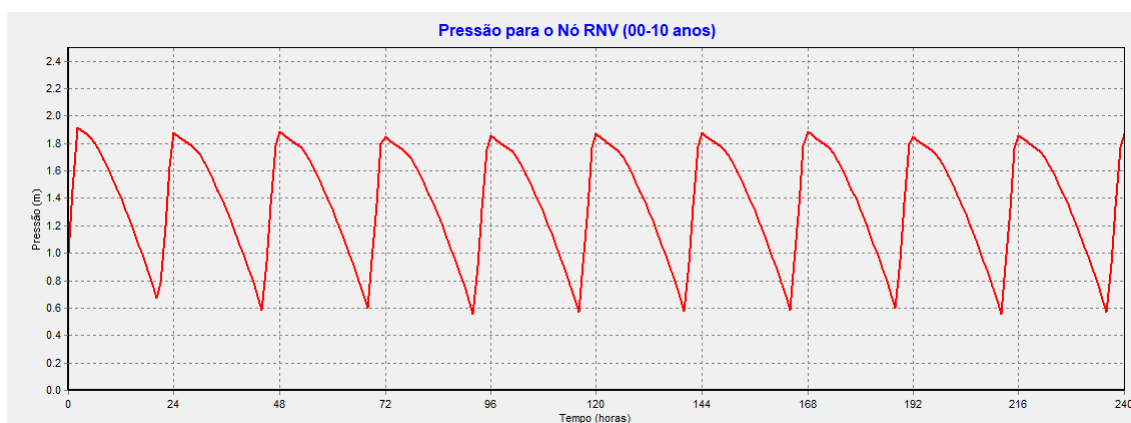
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 50 – Funcionamento da Bomba para a condição do meio tempo de projeto do experimento 2a



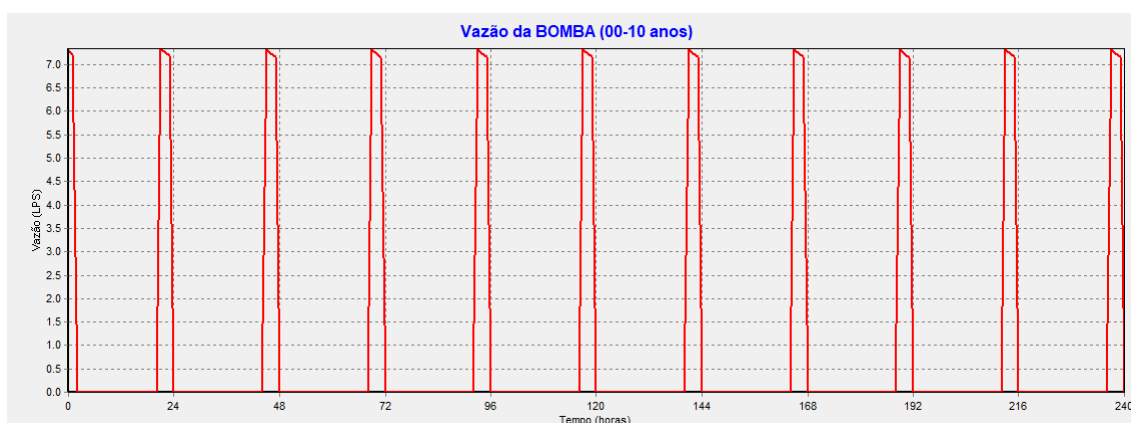
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 51 – Flutuação do reservatório para a condição inicial do experimento 2a



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 52 – Funcionamento da Bomba para a condição inicial do experimento 2a



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 19 – Resultados energéticos e econômicos do experimento 2a

Relatório de Energia								
Bomba	Porcentagem. da Bomba ligada	Rendim. médio da bomba	kWh /m3	kW Médio	kW Máximo	Custo /dia	%utilização reservatório	Situação
B1 - 00 anos	12%	73,18	0,22	5,81	5,83	12,84	51,38%	OK!
B1 - 10 anos	26%	72,42	0,23	5,73	5,75	13,32	47,64%	OK!
B1 - 20 anos	50%	70,99	0,24	5,63	5,66	31,51	45,93%	OK!

Fonte: Elaborada pelo autor.

B.2.2 Demanda de início, meio e fim de projeto aplicando a metodologia proposta no capítulo 5

Tabela 20 – Resumo das características físicas e temporais do experimento 2, com a metodologia

<i>Método segundo NBR 12217 (1994)</i>			
	<i>Período 1</i>	<i>Período 2</i>	<i>Período 3</i>
Tempo [anos]	00-10	10-20	20-30
Consumo [L/hab/dia]	150	175	200
Altura geométrica [m]	50	50	50
Comprimento da adutora [m]	1000	1000	1000
Rugosidade da tubulação [C]	130	120	110
Diâmetro da adutora [mm]	100	100	100
Altura manométrica nominal [m.c.a.]	58,5	58,5	58,5
Vazão nominal [L/s]	5,00	5,00	5,00
Rendimento nominal [%]	75,5	75,5	75,5
Frequência de rotação da bomba [%]	100	100	100
Regra de operação [cenário]	1 ¹	3 ²	3 ³
Volume do reservatório [m ³]	135,27	135,27	135,27
Máxima altura do RNV [m]	2,5	2,5	2,5
Consumo base [l/s]	1,53	2,95	5,56

<i>Previsão de vazão requerida ao longo do dia [l/s]</i>			
0:00	0.383	0.738	1.390
1:00	0.367	0.708	1.334
2:00	0.367	0.708	1.334
3:00	0.337	0.649	1.223
4:00	0.367	0.708	1.334
5:00	0.612	1.180	2.224
6:00	0.857	1.652	3.114
7:00	0.979	1.888	3.558
8:00	1.040	2.006	3.781
9:00	1.224	2.360	4.448
10:00	0.979	1.888	3.558
11:00	1.163	2.242	4.226
12:00	1.285	2.478	4.670
13:00	1.285	2.478	4.670
14:00	1.224	2.360	4.448
15:00	1.285	2.478	4.670
16:00	1.346	2.596	4.893
17:00	1.469	2.832	5.338
18:00	1.530	2.950	5.560
19:00	1.484	2.862	5.393
20:00	1.362	2.626	4.948
21:00	1.056	2.036	3.836
22:00	0.750	1.446	2.724
23:00	0.627	1.210	2.280

¹ tem como operação, mínimo nível 19% e máximo 75% da altura;

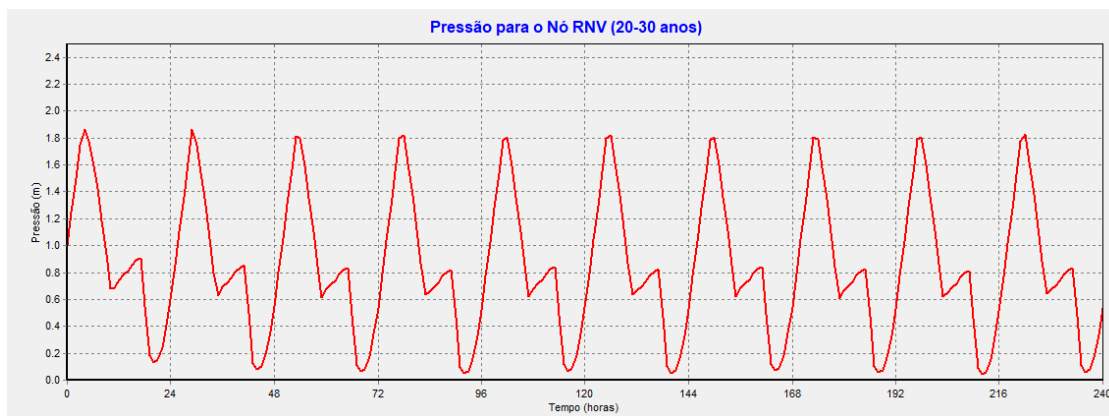
² mínimo nível 10% e máximo 99% da altura e paralisação da bomba entre as 17:00 e 20:00;

³ mínimo nível 25% e máximo 75% da altura e paralisação da bomba entre as 17:00 e 19:00*.

* alteração na operação horária para esse período, de 3hs de paralisação para somente 2hs.

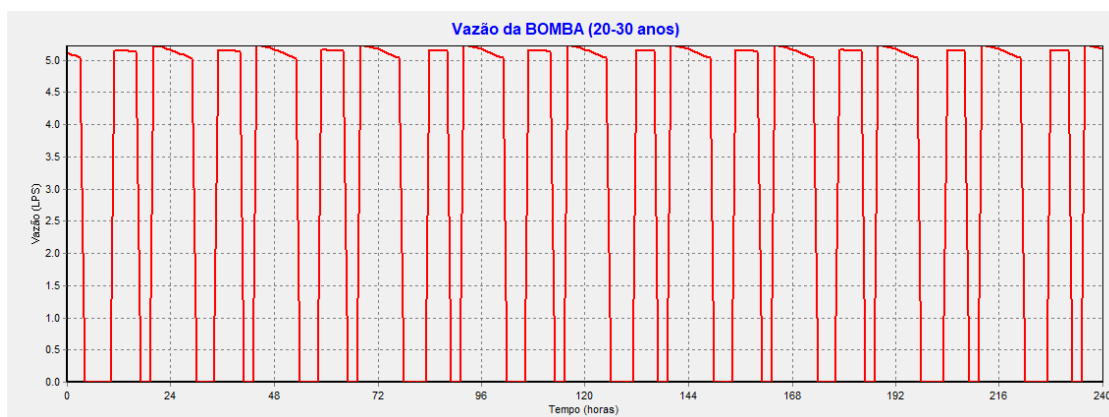
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 53 – Flutuação do reservatório para a condição final do experimento 2, com a metodologia



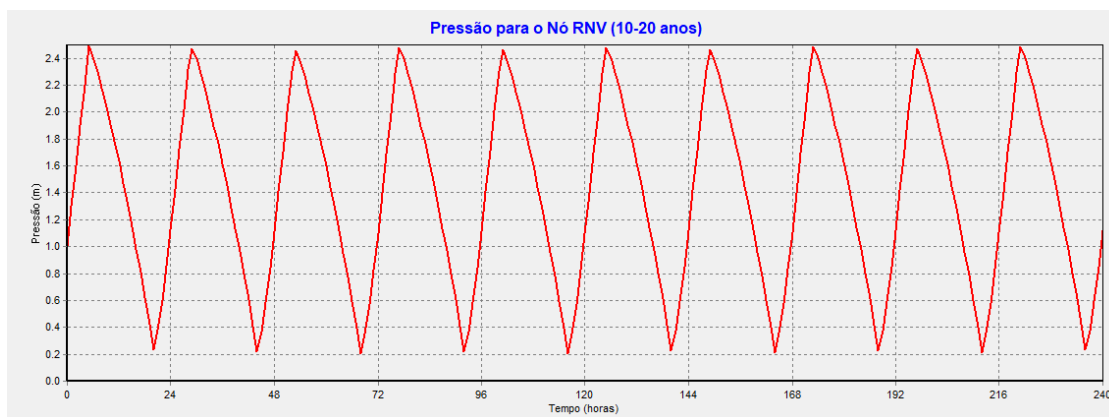
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 54 – Funcionamento da Bomba para a condição final do experimento 2, com a metodologia



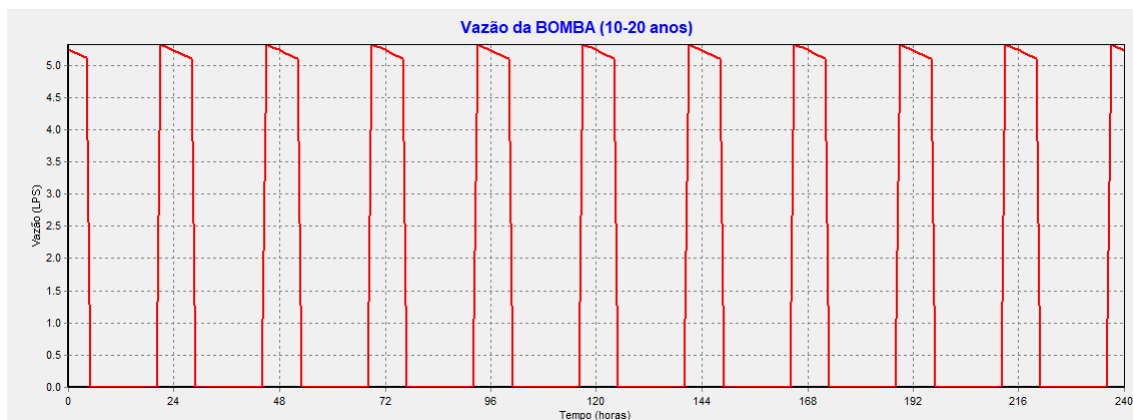
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 55 – Flutuação do reservatório para meio tempo de projeto do experimento 2, com a metodologia



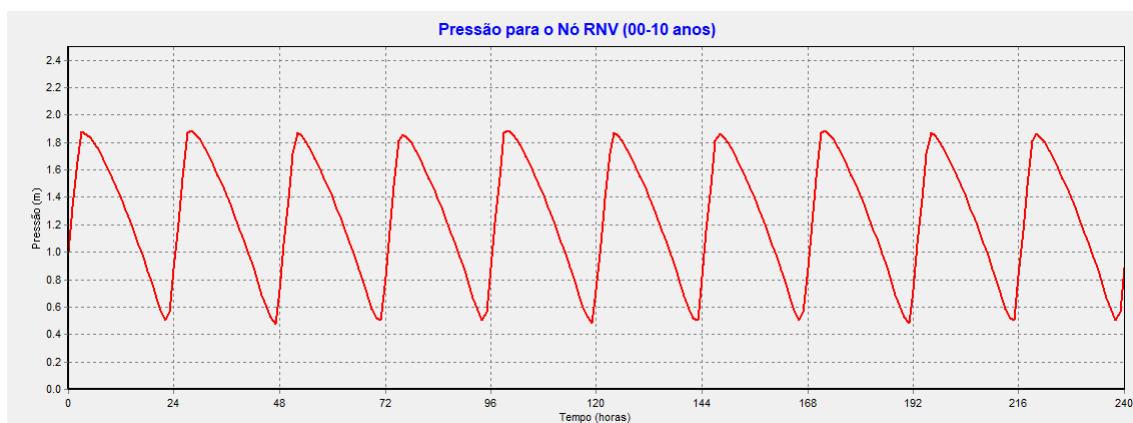
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 56 – Funcionamento da Bomba para meio tempo de projeto do experimento 2, com a metodologia



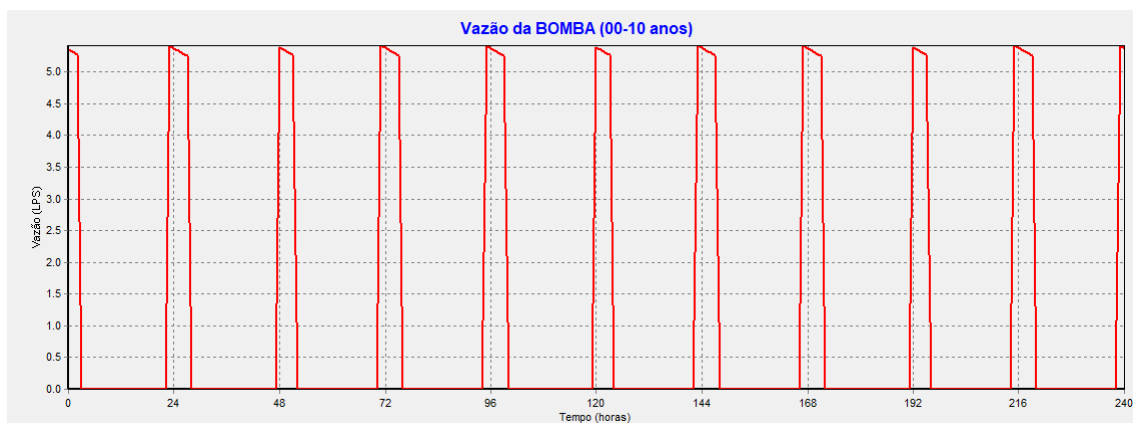
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 57 – Flutuação do reservatório para a condição inicial do experimento 2, com a metodologia



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 58 – Funcionamento da Bomba para a condição inicial do experimento 2, com a metodologia



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 21 – Resultados energéticos e econômicos do experimento 2 para a metodologia

Relatório de Energia								
Bomba	Porcentagem da Bomba ligada	Rendim. médio da bomba	kWh /m3	kW Médio	kW Máximo	Custo /dia	%utilização reservatório	Situação
B1 - 00 anos	20%	75,52	0,20	3,82	3,85	6,87	54,67%	OK!
B1 - 10 anos	34%	75,73	0,20	3,78	3,82	15,57	89,66%	OK!
B1 - 20 anos	64%	75,84	0,20	3,75	3,78	29,91	69,83%	OK!

Fonte: Elaborada pelo autor.

B.3 Discussão

Dos resultados apresentados desses dois experimentos e simulações complementares, mostra-se que uma alternativa operacional (chave bóia) variável, ao longo do tempo, retornou melhores desempenhos hidro energética do sistema. Por isso que precisa ser estudado as grandezas do reservatório na relação com o consumo / custo energético e custo total, para se ter êxito em diminuição do consumo e custo energético ao longo do período de projeto.

DEDUÇÃO DA FORMULA 0,2725/CEN

A variável "*CEN*" é um dos indicadores mais utilizados para mensurar a eficiência entre sistemas de bombeamento, sabido disso e acrescido a uma estratégia algébrica, pode-se conhecer o termo " $0,2725/CEN$ ", no qual se obtém o valor da eficiência do conjunto motor-bomba em operação, sendo um importante indicador dos limites energético e operacional.

$$CEN = \frac{\text{Consumo_Energia}}{\text{Volume}_{\text{bombeado}} \cdot \left(\frac{Hm}{100}\right)},$$

onde '*Consumo_Energia*', pode ser reescrito como '*Potencia · Nb*', em que potência é em [kw] e *Nb* em [h];

$$= \frac{\text{Potencia} \cdot Nb}{\text{Volume}_{\text{bombeado}} \cdot \left(\frac{Hm}{100}\right)},$$

se abrir o termo potência, e na sequência substituir o termo da vazão pelo volume bombeado por tempo de bombeamento, onde a unidade de tempo de bombeamento é em segundos, geralmente o termo *Nb* é em unidade de horas;

$$\begin{aligned} &= \frac{9,81 \cdot Q \cdot Hm}{\eta} \times \frac{Nb}{\text{Volume}_{\text{bombeado}} \cdot \left(\frac{Hm}{100}\right)} \\ &= \frac{9,81 \cdot \text{Volume}_{\text{bombeado}} \cdot Hm}{Nb \times 3600s \cdot \eta} \times \frac{Nb}{\text{Volume}_{\text{bombeado}} \cdot \left(\frac{Hm}{100}\right)} \end{aligned}$$

agora todos os termos estão na mesma unidade, sendo possível dividi-lo por ele mesmo;

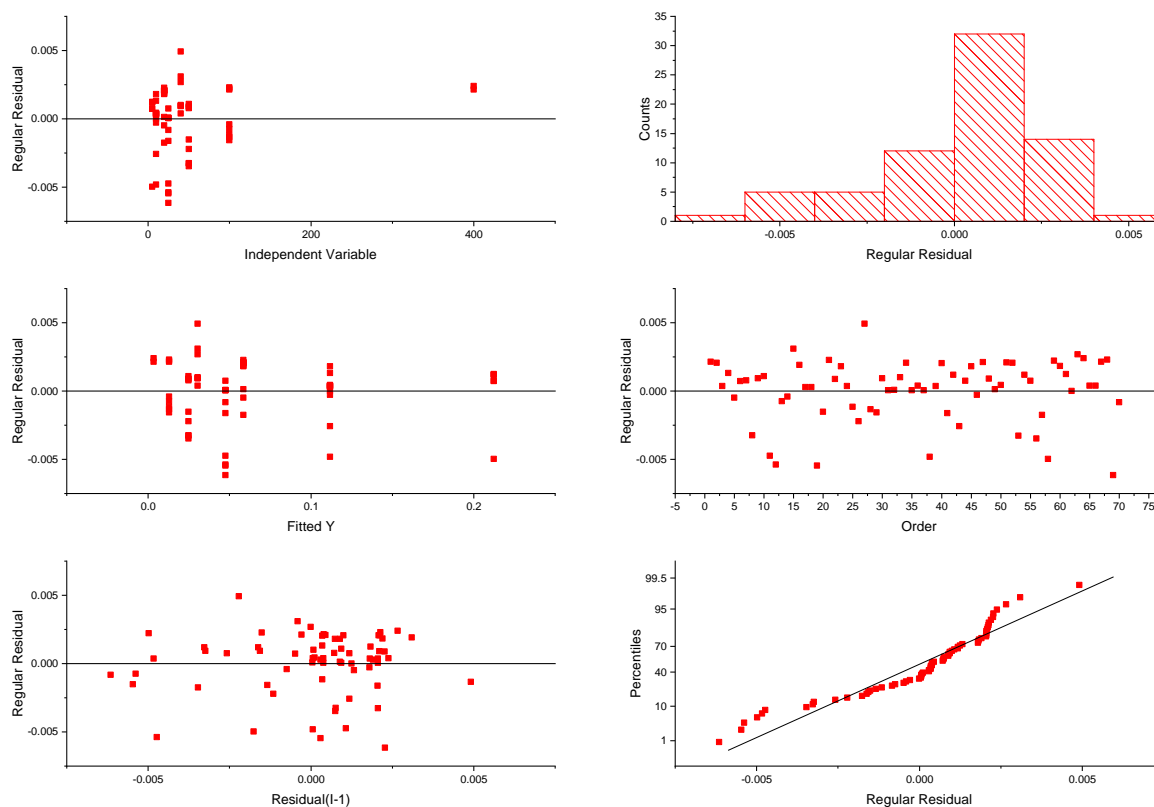
$$= \frac{9,81 \cdot \cancel{\text{Volume}_{\text{bombeado}}} \cdot Hm}{Nb \times 3600s \cdot \eta} \times \frac{Nb}{\cancel{\text{Volume}_{\text{bombeado}}} \cdot \left(\frac{Hm}{100}\right)}$$

restando somente os termos numéricos e duas variáveis;

$$\begin{aligned} CEN &= \frac{9,81}{3600s \cdot \eta} \times \frac{1}{\left(\frac{1}{100}\right)} \\ \eta &= \frac{0,2725}{CEN}. \end{aligned}$$

GRÁFICOS DA DISTRIBUIÇÃO RESIDUAL DAS FITS

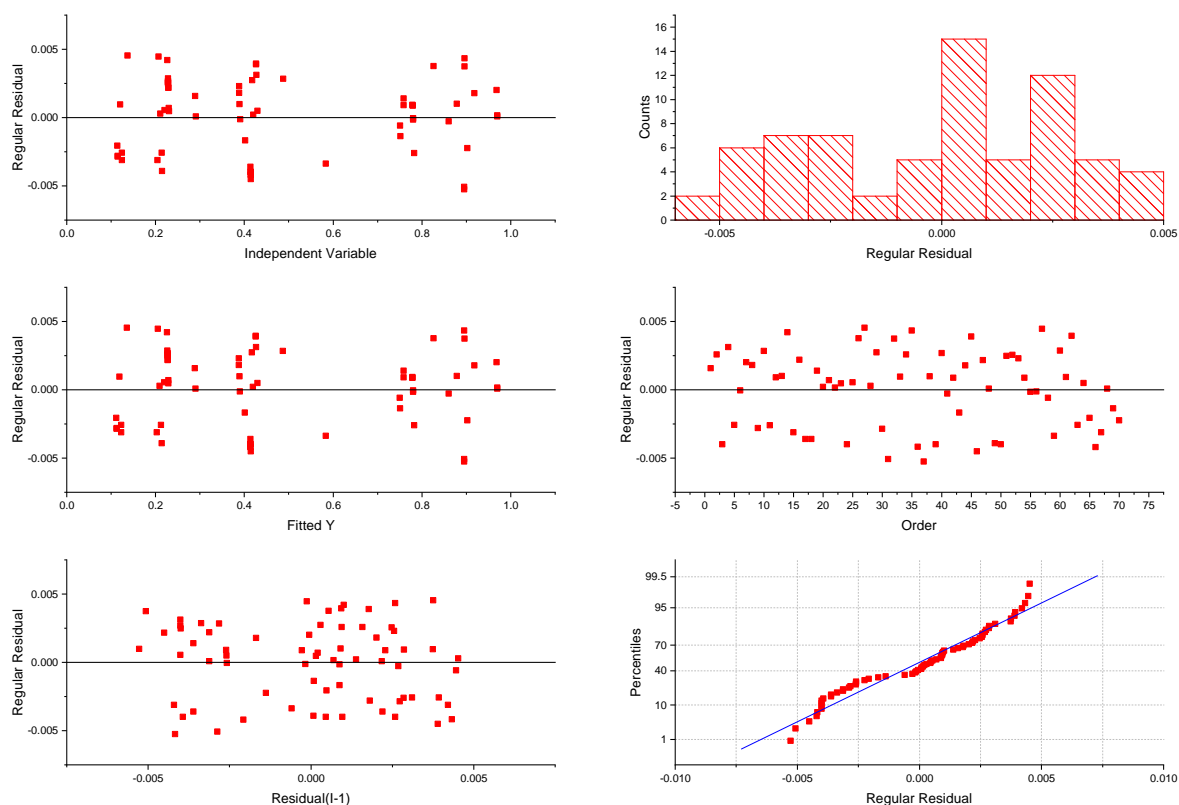
Figura 59 – Teste do erro da correlação sobre a variável "*Hm/Len*"



- (a) residual da predição, verifica a validade da regressão; (b) histograma do residual, também usado para verificar a validação do modelo de regressão utilizado; (c) ajuste y vs residual, verifica a distribuição normal do termo residual; (d) ordem dos dados vs residual, que consta ou não a existência do desvio da variação residual; (e) atraso residual, examina a dependência dos termos residual e (f) gráfico probabilidade acumulada normal dos resíduos.

Fonte: Elaborada pelo autor.

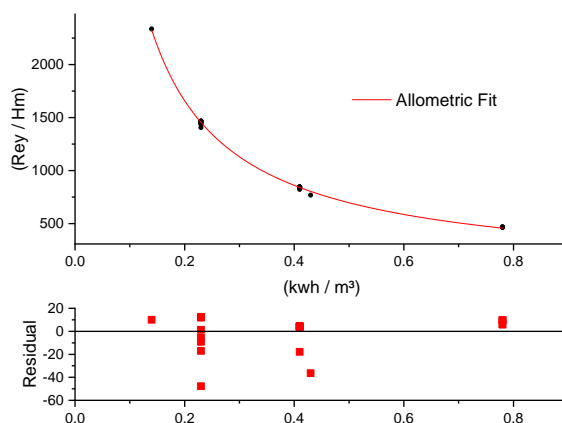
Figura 60 – Teste do erro da correlação sobre a variável "CE"



- (a) residual da predição, verifica a validade da regressão;
- (b) histograma do residual, também usado para verificar a validação do modelo de regressão utilizado;
- (c) ajuste y vs residual, verifica a distribuição normal do termo residual;
- (d) ordem dos dados vs residual, que consta ou não a existência do desvio da variação residual;
- (e) atraso residual, examina a dependência dos termos residual e
- (f) gráfico probabilidade acumulada normal dos resíduos.

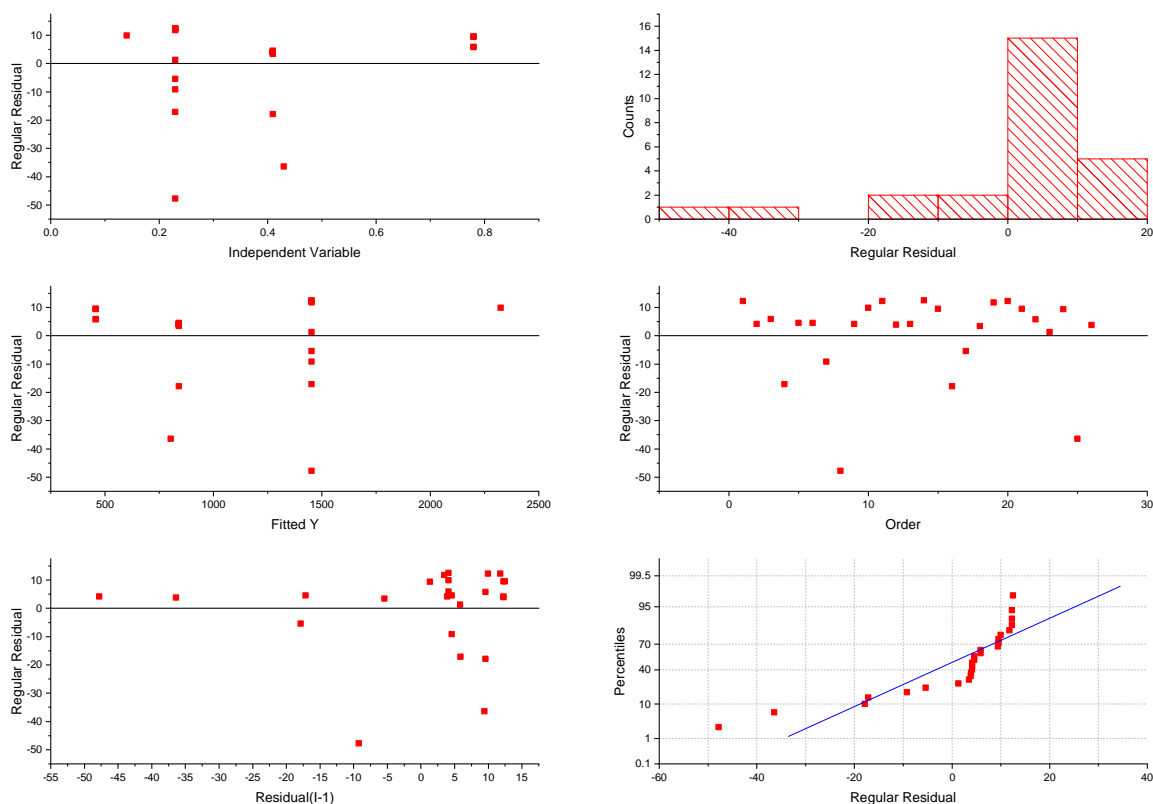
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 61 – Correlação não-linear da variável "CE" e consumo base de 3,35 l/s sobre o domínio "Rey/Hm"



Fonte: Elaborada pelo autor.

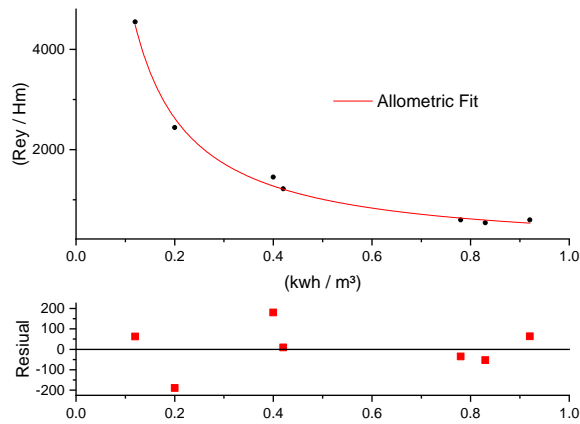
Figura 62 – Teste do erro da correlação sobre a variável "CE", para o ajuste do consumo base 3,35 l/s



(a) residual da predição, verifica a validade da regressão; (b) histograma do residual, também usado para verificar a validação do modelo de regressão utilizado; (c) ajuste y vs residual, verifica a distribuição normal do termo residual; (d) ordem dos dados vs residual, que consta ou não a existência do desvio da variação residual; (e) atraso residual, examina a dependência dos termos residual e (f) gráfico probabilidade acumulada normal dos resíduos.

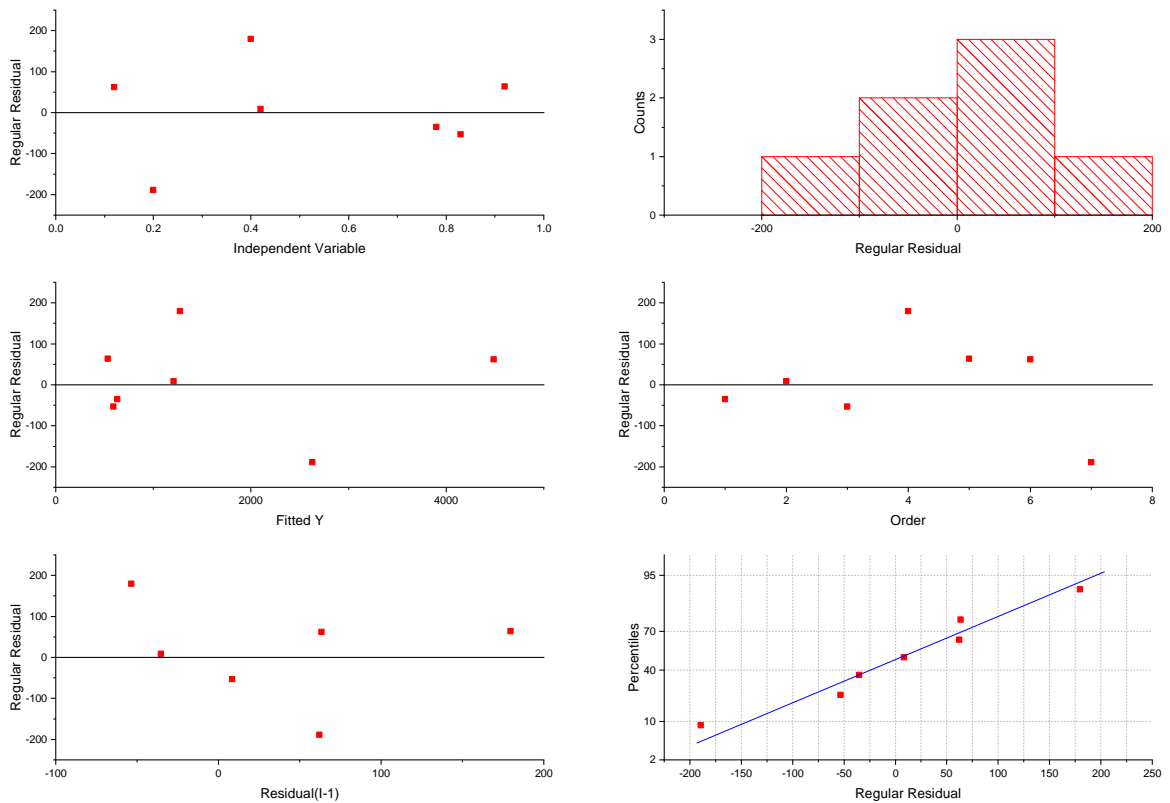
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 63 – Correlação não-linear da variável "CE" e consumo base de 8,36 l/s sobre o domínio "Rey/Hm"



Fonte: Elaborada pelo autor.

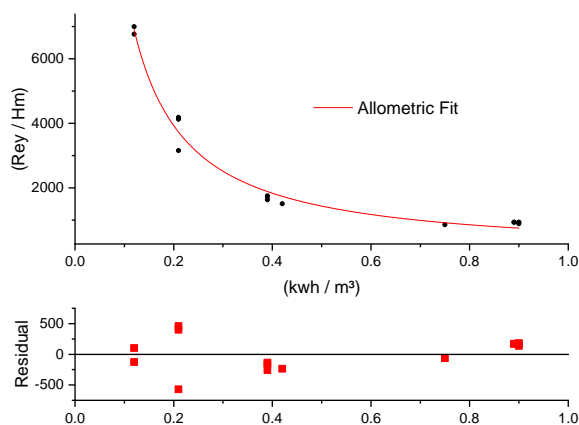
Figura 64 – Teste do erro da correlação sobre a variável "CE", para o ajuste do consumo base 8,36 l/s



(a) residual da predição, verifica a validade da regressão; (b) histograma do residual, também usado para verificar a validação do modelo de regressão utilizado; (c) ajuste y vs residual, verifica a distribuição normal do termo residual; (d) ordem dos dados vs residual, que consta ou não a existência do desvio da variação residual; (e) atraso residual, examina a dependência dos termos residual e (f) gráfico probabilidade acumulada normal dos resíduos.

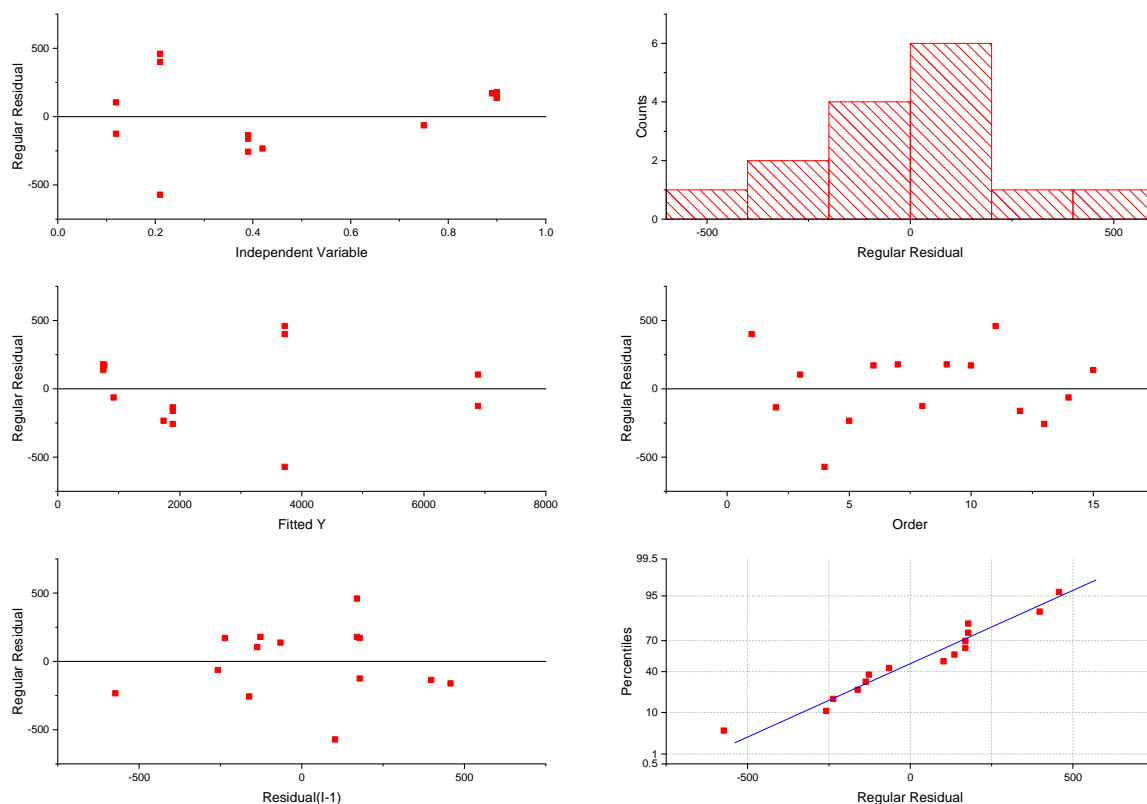
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 65 – Correlação não-linear da variável "CE" e consumo base de 16,73 l/s sobre o domínio "Rey/Hm"



Fonte: Elaborada pelo autor.

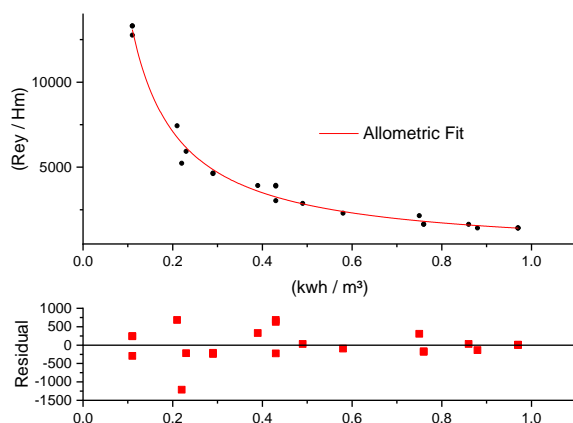
Figura 66 – Teste do erro da correlação sobre a variável "CE", para o ajuste do consumo base 16,73 l/s



(a) residual da predição, verifica a validade da regressão; (b) histograma do residual, também usado para verificar a validação do modelo de regressão utilizado; (c) ajuste y vs residual, verifica a distribuição normal do termo residual; (d) ordem dos dados vs residual, que consta ou não a existência do desvio da variação residual; (e) atraso residual, examina a dependência dos termos residual e (f) gráfico probabilidade acumulada normal dos resíduos.

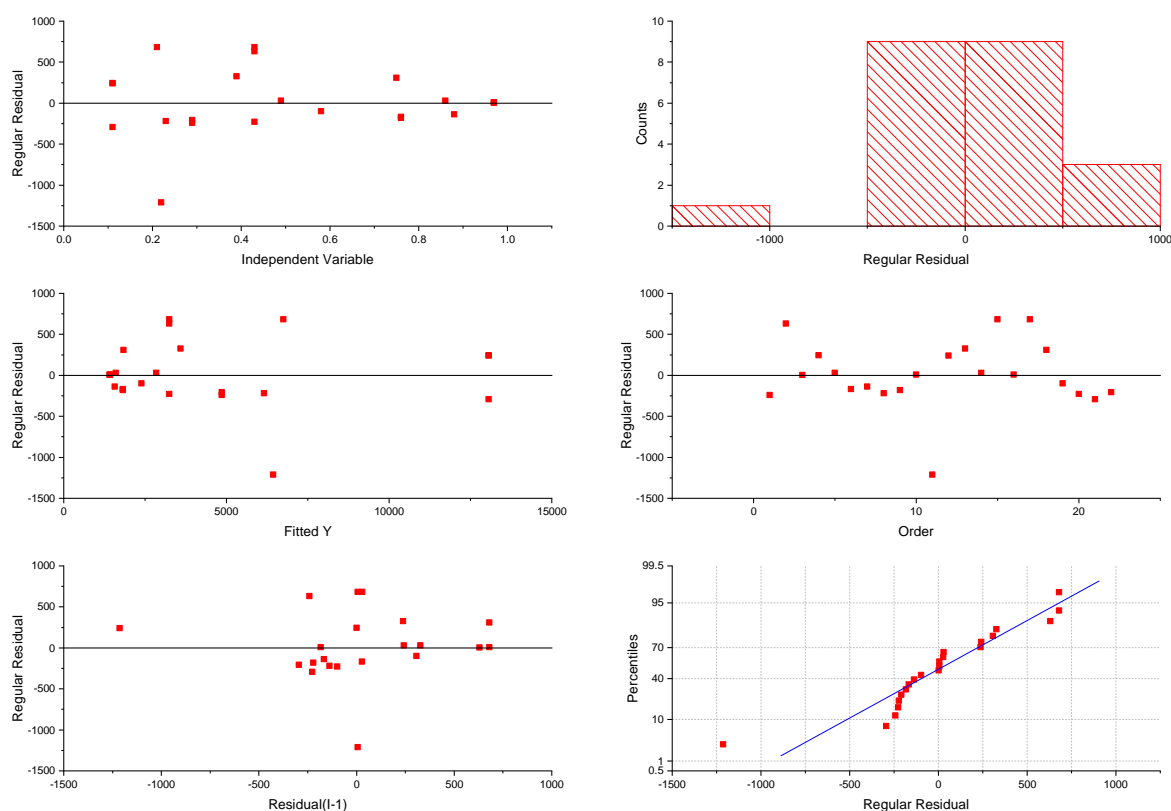
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 67 – Correlação não-linear da variável "CE" e consumo base de 41,82 l/s sobre o domínio "Rey/Hm"



Fonte: Elaborada pelo autor.

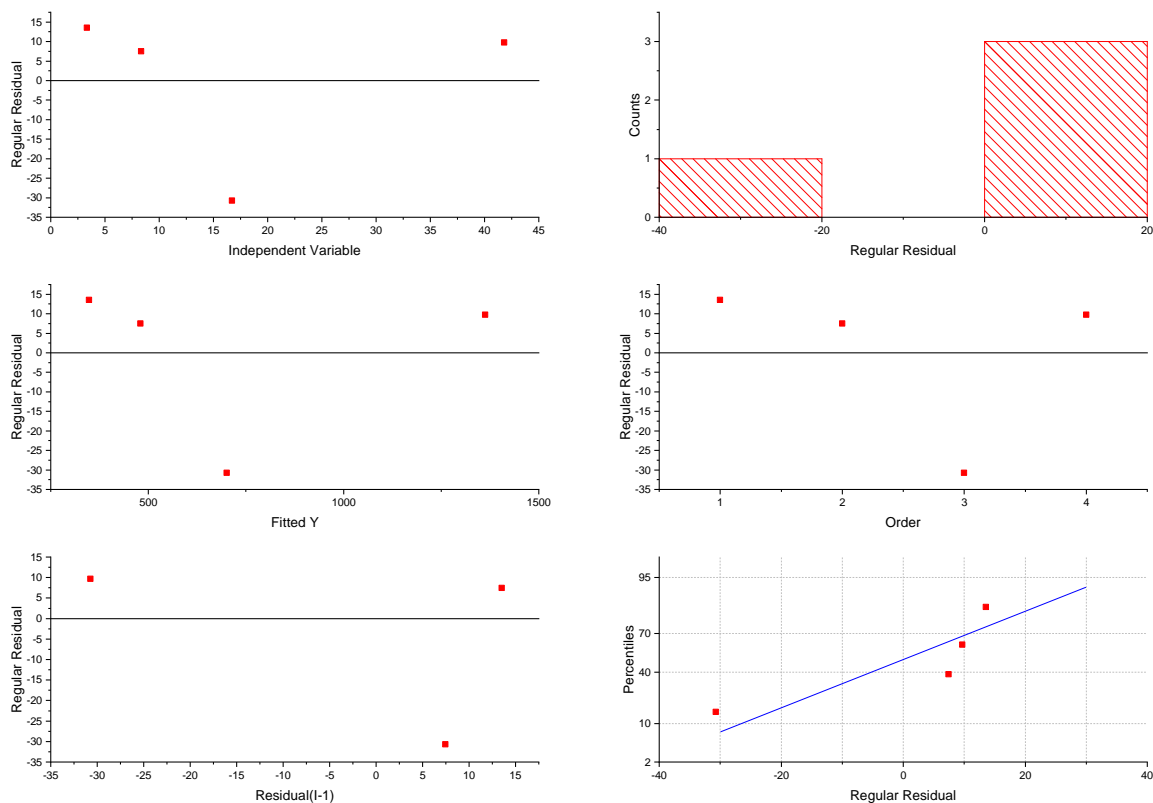
Figura 68 – Teste do erro da correlação sobre a variável "CE", para o ajuste do consumo base 41,82 l/s



- (a) residual da predição, verifica a validade da regressão;
- (b) histograma do residual, também usado para verificar a validação do modelo de regressão utilizado;
- (c) ajuste y vs residual, verifica a distribuição normal do termo residual;
- (d) ordem dos dados vs residual, que consta ou não a existência do desvio da variação residual;
- (e) atraso residual, examina a dependência dos termos residual e
- (f) gráfico probabilidade acumulada normal dos resíduos.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 69 – Teste do erro da correlação sobre o coeficiente 'A', para o ajuste da variável "Rey/Hm"

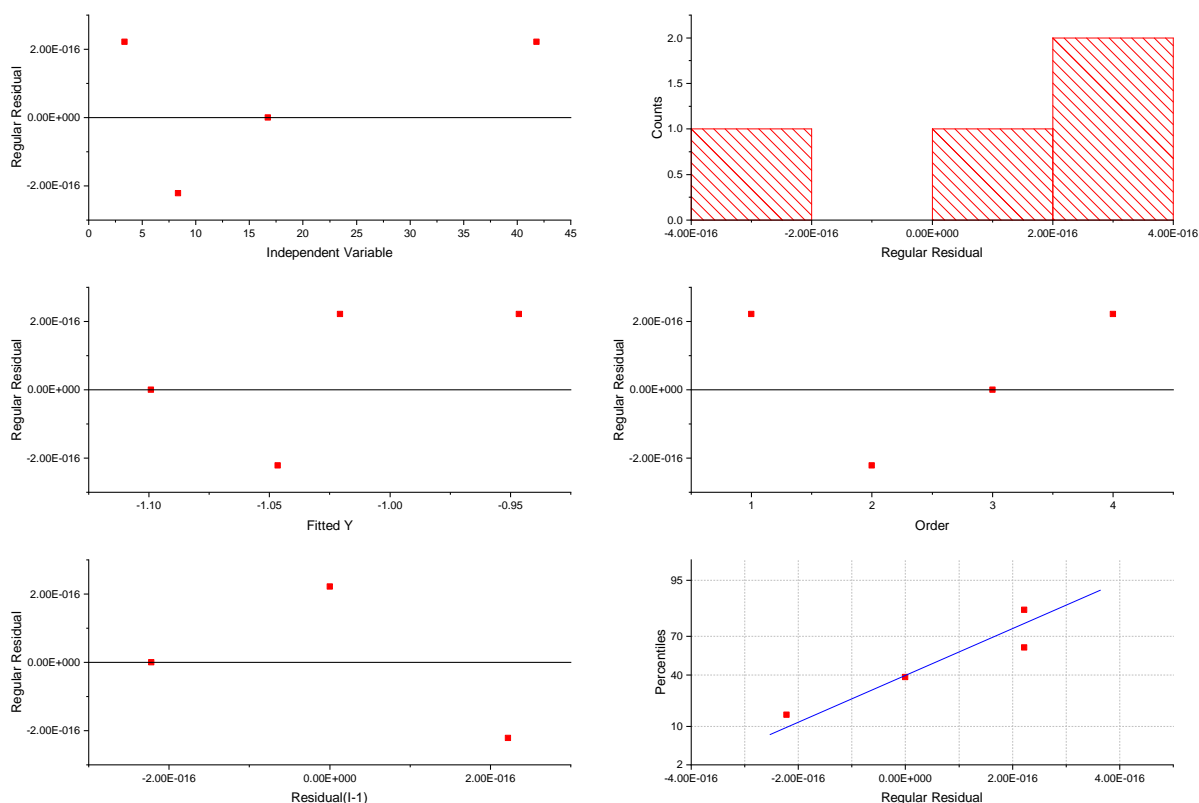


(a) residual da predição, verifica a validade da regressão; (b) histograma do residual, também usado para verificar a validação do modelo de regressão utilizado; (c) ajuste y vs residual, verifica a distribuição normal do termo residual; (d) ordem dos dados vs residual, que consta ou não a existência do desvio da variação residual; (e) atraso residual, examina a dependência dos termos residual e (f) gráfico probabilidade acumulada normal dos resíduos.

Fonte: Elaborada pelo autor.

[h]

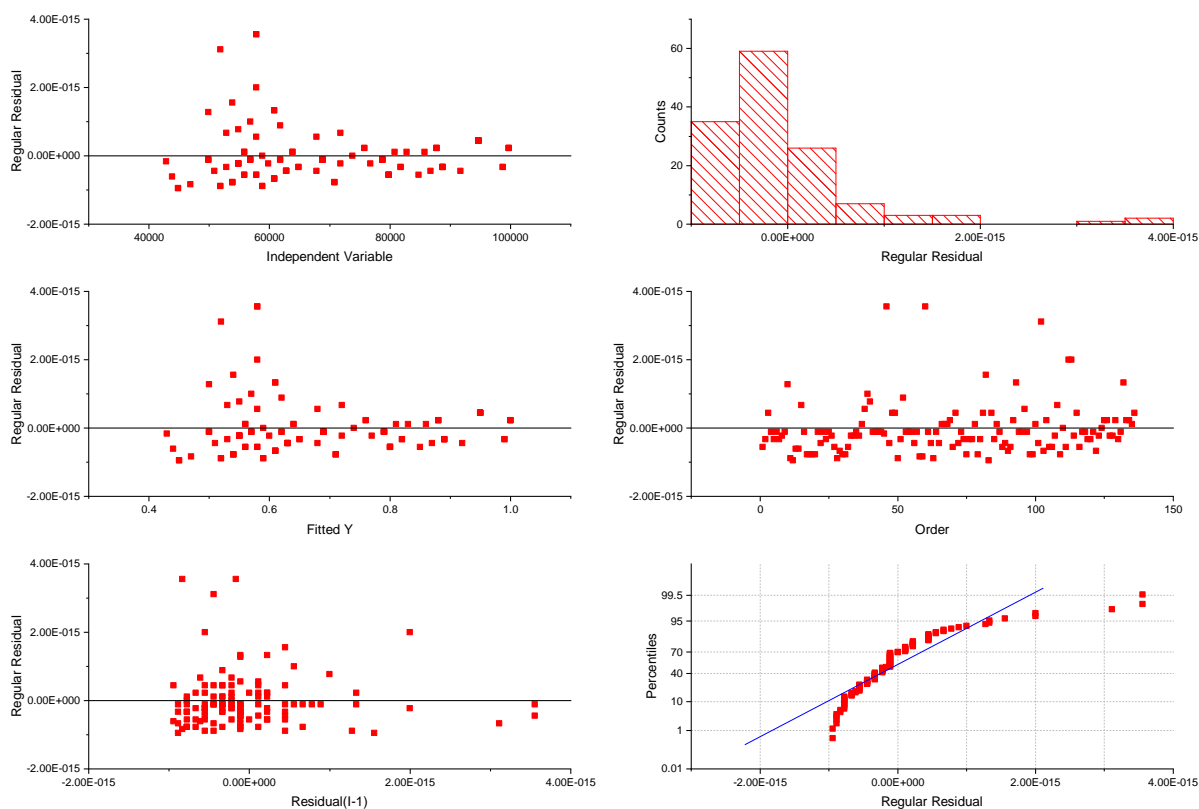
Figura 70 – Teste do erro da correlação sobre o coeficiente 'B', para o ajuste da variável "Rey/Hm"



- (a) residual da predição, verifica a validade da regressão; (b) histograma do residual, também usado para verificar a validação do modelo de regressão utilizado; (c) ajuste y vs residual, verifica a distribuição normal do termo residual; (d) ordem dos dados vs residual, que consta ou não a existência do desvio da variação residual; (e) atraso residual, examina a dependência dos termos residual e (f) gráfico probabilidade acumulada normal dos resíduos.

Fonte: Elaborada pelo autor.

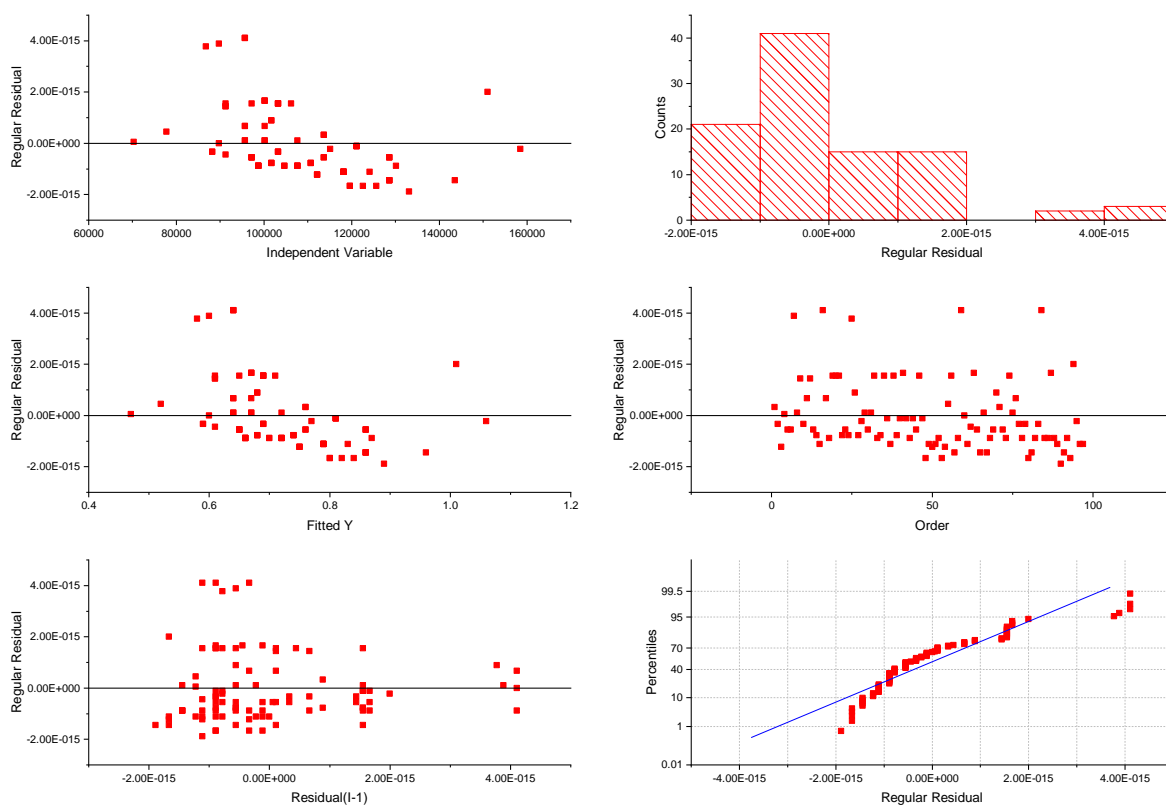
Figura 71 – Teste do erro da correlação sobre a variável "velocidade", para o ajuste do consumo base 3,35 l/s



- (a) residual da predição, verifica a validade da regressão;
- (b) histograma do residual, também usado para verificar a validação do modelo de regressão utilizado;
- (c) ajuste y vs residual, verifica a distribuição normal do termo residual;
- (d) ordem dos dados vs residual, que consta ou não a existência do desvio da variação residual;
- (e) atraso residual, examina a dependência dos termos residual e
- (f) gráfico probabilidade acumulada normal dos resíduos.

Fonte: Elaborada pelo autor.

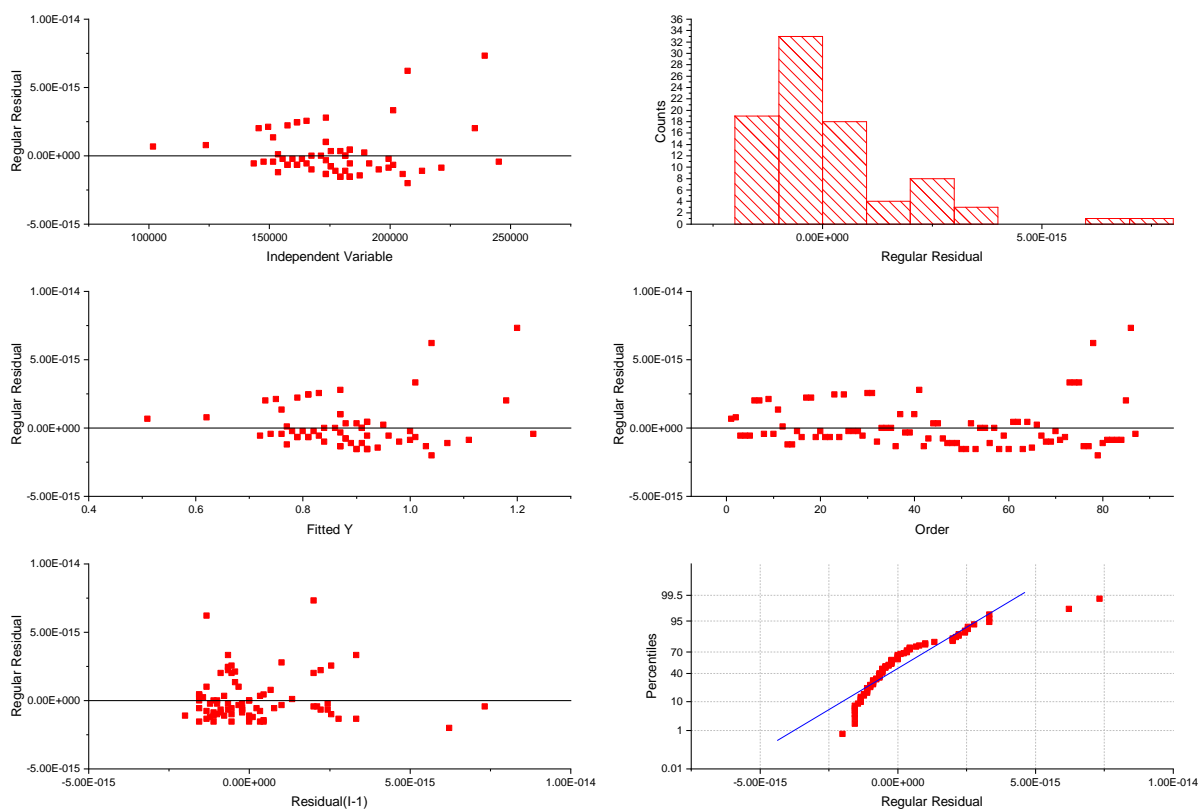
Figura 72 – Teste do erro da correlação sobre a variável "velocidade", para o ajuste do consumo base 8,36 l/s



- (a) residual da predição, verifica a validade da regressão;
- (b) histograma do residual, também usado para verificar a validação do modelo de regressão utilizado;
- (c) ajuste y vs residual, verifica a distribuição normal do termo residual;
- (d) ordem dos dados vs residual, que consta ou não a existência do desvio da variação residual;
- (e) atraso residual, examina a dependência dos termos residual e
- (f) gráfico probabilidade acumulada normal dos resíduos.

Fonte: Elaborada pelo autor.

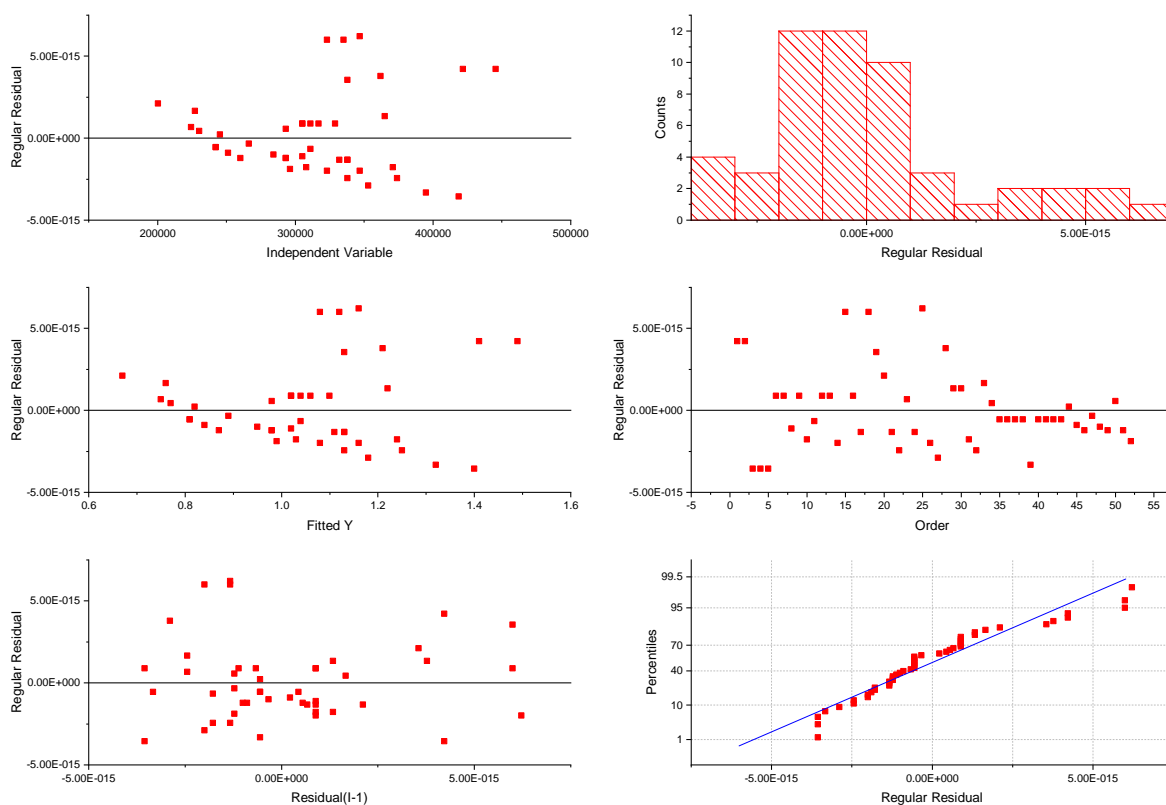
Figura 73 – Teste do erro da correlação sobre a variável "velocidade", para o ajuste do consumo base 16,73 l/s



- (a) residual da predição, verifica a validade da regressão;
- (b) histograma do residual, também usado para verificar a validação do modelo de regressão utilizado;
- (c) ajuste y vs residual, verifica a distribuição normal do termo residual;
- (d) ordem dos dados vs residual, que consta ou não a existência do desvio da variação residual;
- (e) atraso residual, examina a dependência dos termos residual e
- (f) gráfico probabilidade acumulada normal dos resíduos.

Fonte: Elaborada pelo autor.

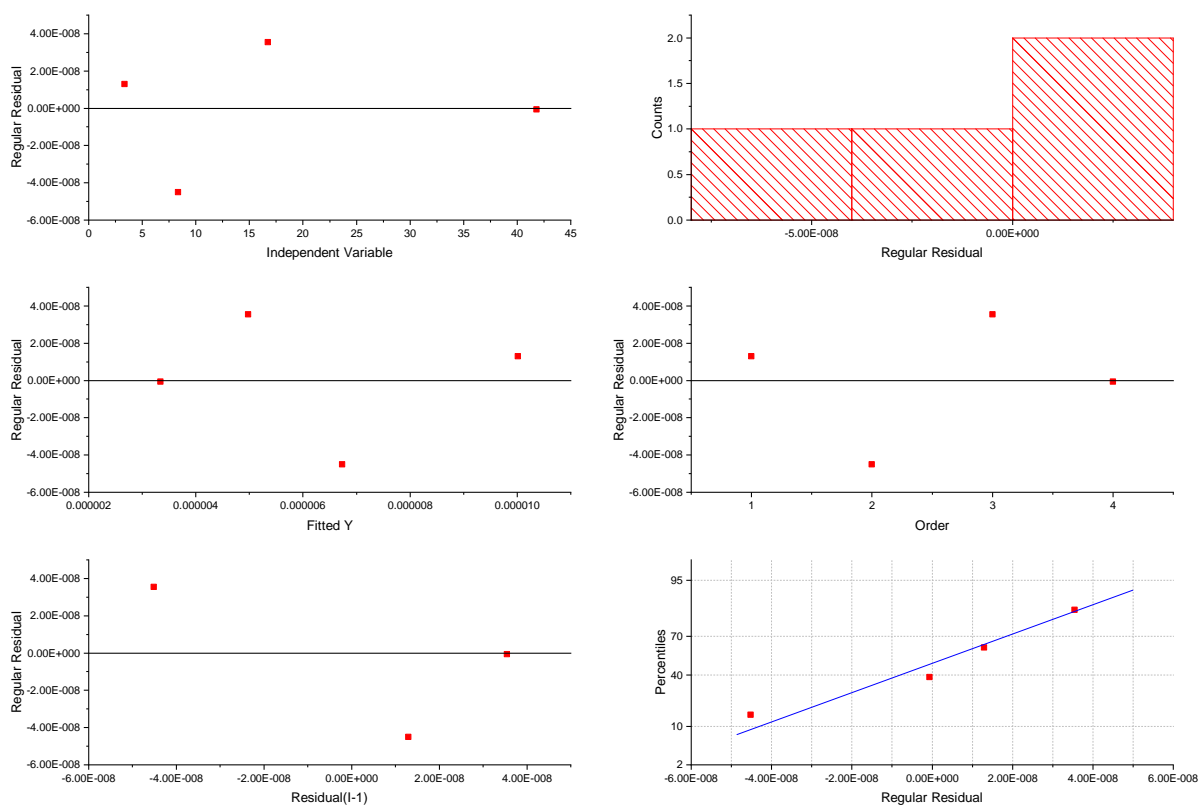
Figura 74 – Teste do erro da correlação sobre a variável "velocidade", para o ajuste do consumo base 41,82 l/s



- (a) residual da predição, verifica a validade da regressão;
- (b) histograma do residual, também usado para verificar a validação do modelo de regressão utilizado;
- (c) ajuste y vs residual, verifica a distribuição normal do termo residual;
- (d) ordem dos dados vs residual, que consta ou não a existência do desvio da variação residual;
- (e) atraso residual, examina a dependência dos termos residual e
- (f) gráfico probabilidade acumulada normal dos resíduos.

Fonte: Elaborada pelo autor.

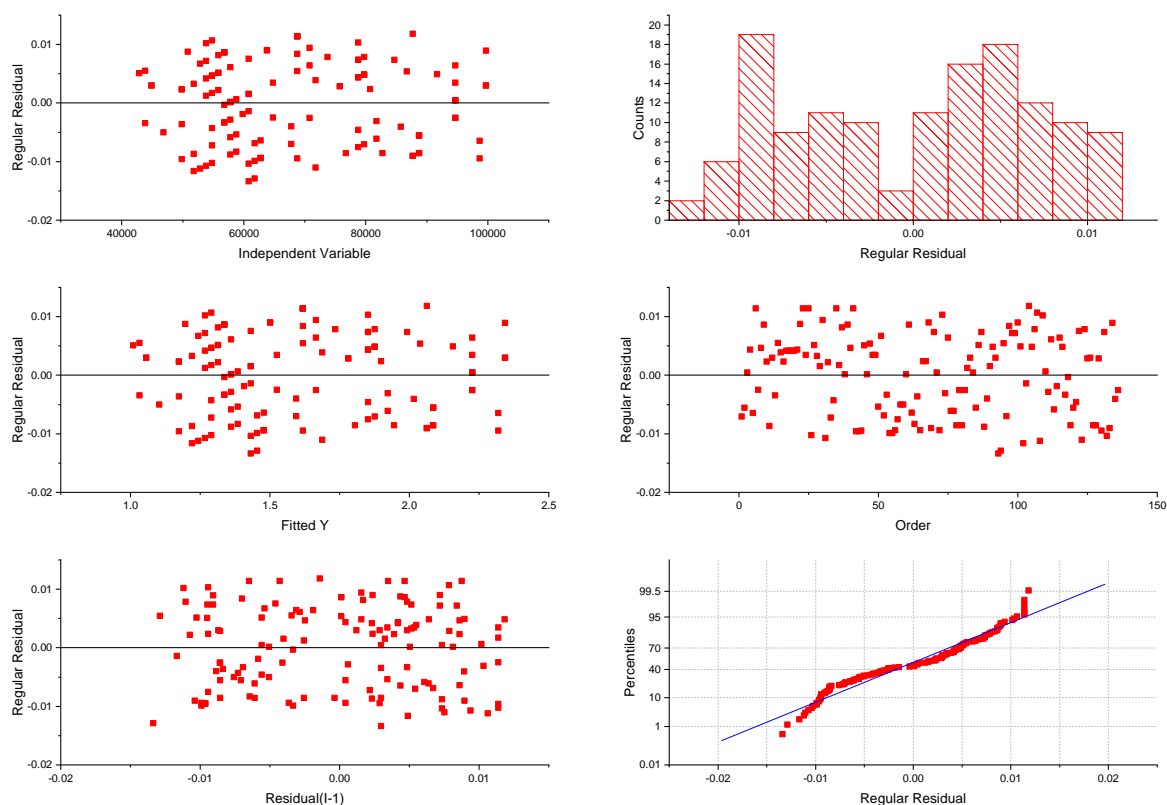
Figura 75 – Teste do erro da correlação sobre o coeficiente 'A', para o ajuste da variável "velocidade"



- (a) residual da predição, verifica a validade da regressão; (b) histograma do residual, também usado para verificar a validação do modelo de regressão utilizado; (c) ajuste y vs residual, verifica a distribuição normal do termo residual; (d) ordem dos dados vs residual, que consta ou não a existência do desvio da variação residual; (e) atraso residual, examina a dependência dos termos residual e (f) gráfico probabilidade acumulada normal dos resíduos.

Fonte: Elaborada pelo autor.

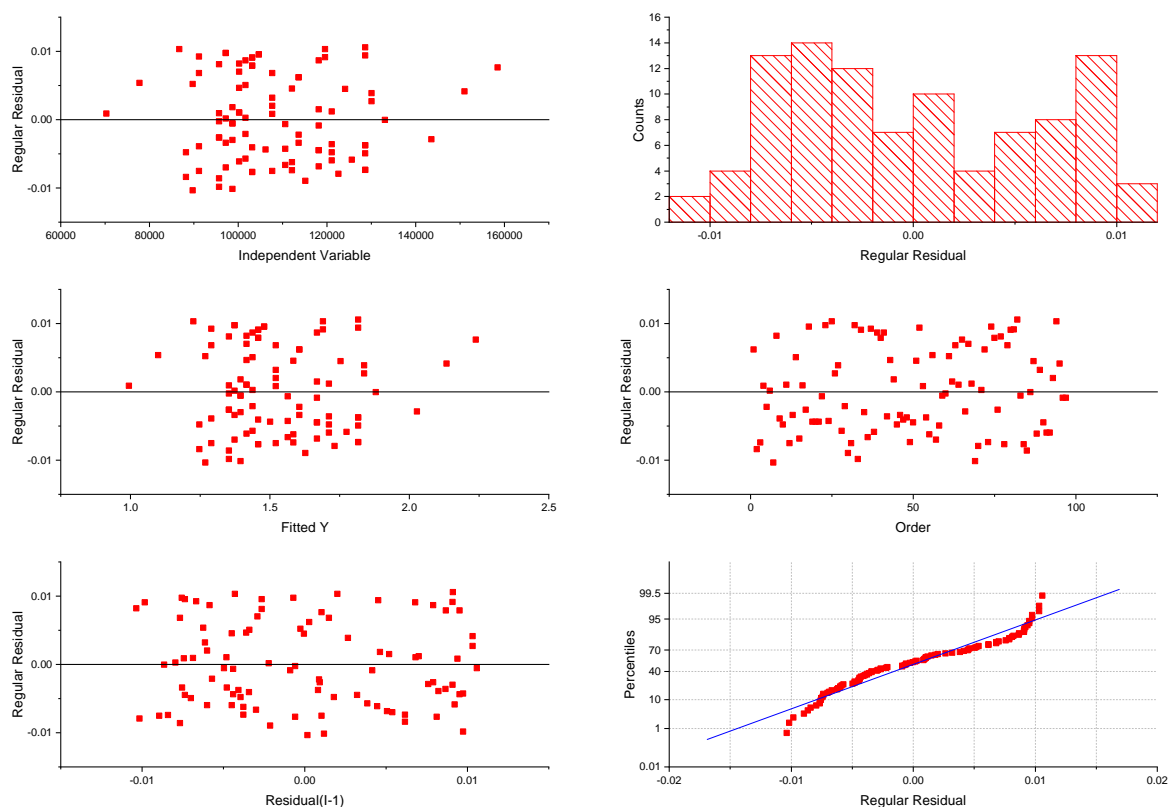
Figura 76 – Teste do erro da correlação sobre a variável "Qadutora/consumo_base", para o ajuste do consumo base 3,35 l/s



- (a) residual da predição, verifica a validade da regressão; (b) histograma do residual, também usado para verificar a validação do modelo de regressão utilizado; (c) ajuste y vs residual, verifica a distribuição normal do termo residual; (d) ordem dos dados vs residual, que consta ou não a existência do desvio da variação residual; (e) atraso residual, examina a dependência dos termos residual e (f) gráfico probabilidade acumulada normal dos resíduos.

Fonte: Elaborada pelo autor.

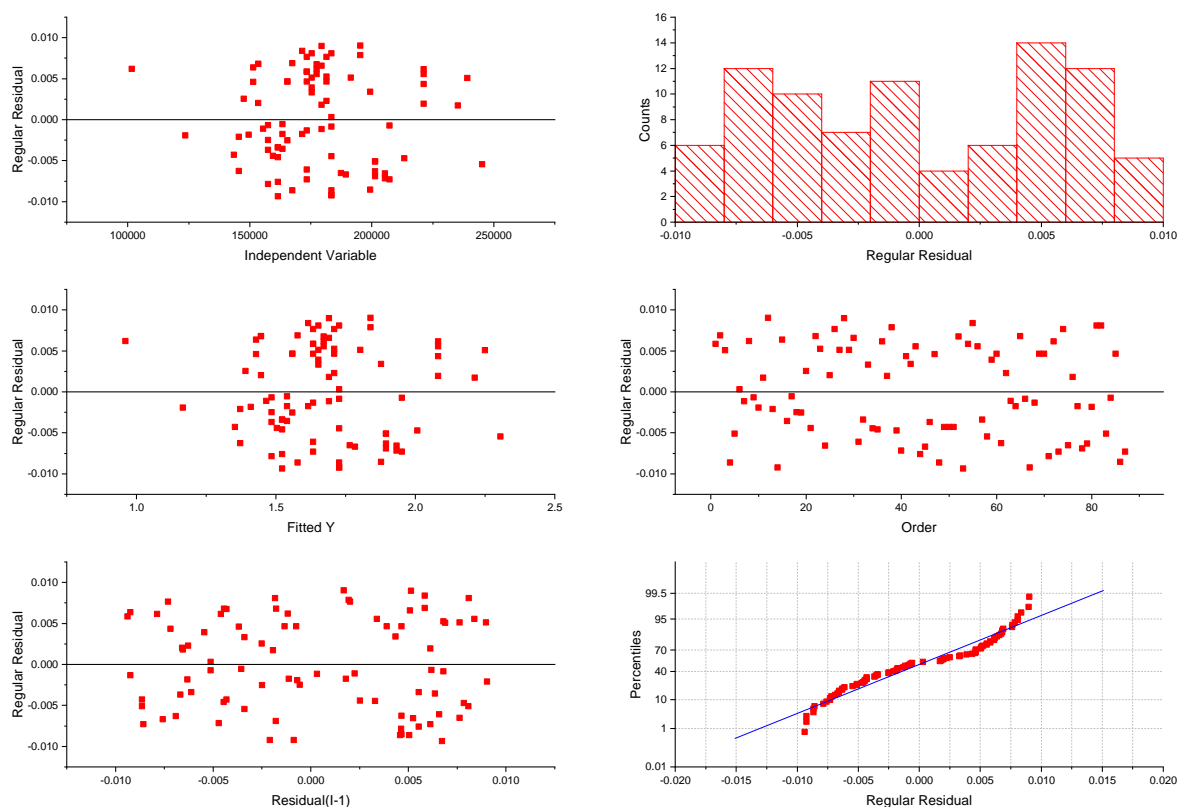
Figura 77 – Teste do erro da correlação sobre a variável "Qadutora/consumo_base", para o ajuste do consumo base 8,36 l/s



- (a) residual da predição, verifica a validade da regressão;
- (b) histograma do residual, também usado para verificar a validação do modelo de regressão utilizado;
- (c) ajuste y vs residual, verifica a distribuição normal do termo residual;
- (d) ordem dos dados vs residual, que consta ou não a existência do desvio da variação residual;
- (e) atraso residual, examina a dependência dos termos residual e
- (f) gráfico probabilidade acumulada normal dos resíduos.

Fonte: Elaborada pelo autor.

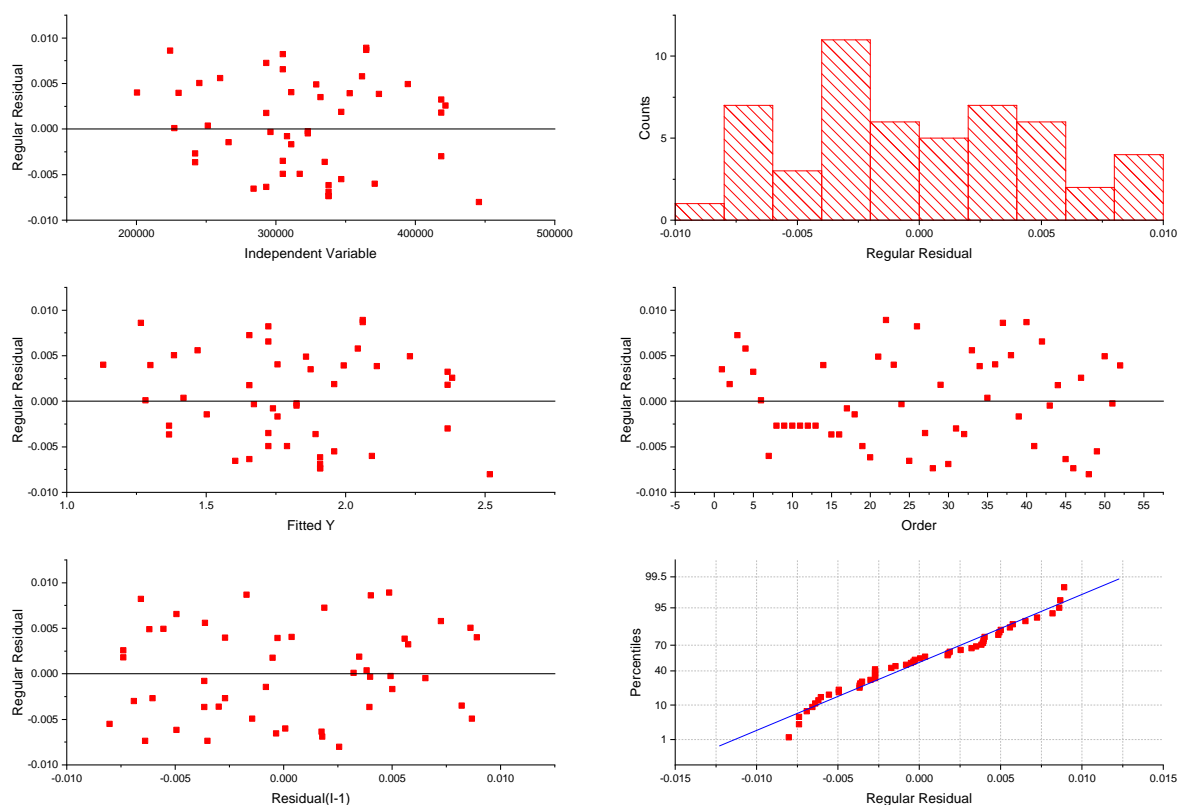
Figura 78 – Teste do erro da correlação sobre a variável "Qadutora/consumo_base", para o ajuste do consumo base 16,73 l/s



- (a) residual da predição, verifica a validade da regressão; (b) histograma do residual, também usado para verificar a validação do modelo de regressão utilizado; (c) ajuste y vs residual, verifica a distribuição normal do termo residual; (d) ordem dos dados vs residual, que consta ou não a existência do desvio da variação residual; (e) atraso residual, examina a dependência dos termos residual e (f) gráfico probabilidade acumulada normal dos resíduos.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 79 – Teste do erro da correlação sobre a variável "Qadutora/consumo_base", para o ajuste do consumo base 41,82 l/s



(a) residual da predição, verifica a validade da regressão; (b) histograma do residual, também usado para verificar a validação do modelo de regressão utilizado; (c) ajuste y vs residual, verifica a distribuição normal do termo residual; (d) ordem dos dados vs residual, que consta ou não a existência do desvio da variação residual; (e) atraso residual, examina a dependência dos termos residual e (f) gráfico probabilidade acumulada normal dos resíduos.

Fonte: Elaborada pelo autor.