

Impacto das variáveis estruturais na eficiência hidroenergética de sistema de bombeamento de água

Impact of structural variables on hydroenergetic efficientization of water pumping system

Impacto de las variables estructurales en la eficiencia hidroenergética del sistema de bombeo de agua

Recebido: 00/11/2020 | Revisado: 00/12/2020 | Aceito: 05/12/2020 | Publicado: 08/12/2020

Alcione Batista da Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5283-3114>

Universidade Federal do Pará, Brasil

E-mail: alcionelb37@gmail.com

José Almir Rodrigues Pereira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3144-1787>

Universidade Federal do Pará, Brasil

E-mail: rpereira@ufpa.br

Aline Christian Pimental Almeida

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7421-5632>

Universidade Federal do Pará, Brasil

E-mail: alinecpas@ufpa.br

Resumo

Avaliar a influência das variáveis estruturais sobre o consumo e o custo de energia elétrica do Sistema de Bombeamento de Água do Rio Guamá localizado na cidade de Belém do Pará, por meio de técnica de planejamento de experimentos de Plackett e Burman, de simulações computacionais e de análises estatísticas. A presente pesquisa foi dividida em quatro etapas. Na Etapa 1 foi realizada a caracterização da concepção e determinação dos limites (mínimo e máximo) das variáveis altura geométrica, diâmetro e comprimento das tubulações de recalque e volume útil do reservatório elevado. Em seguida (Etapa 2) foi aplicado o planejamento experimental de Plackett e Burman, com a finalidade de definir o número de ensaios a serem simulados. Na Etapa 3 foram realizadas as simulações hidráulicas de diferentes rotinas operacionais, para determinação do consumo e do custo de energia elétrica no SBA. Na última etapa foram realizadas análises estatísticas (Teste de hipótese e Diagrama de Pareto),

para nível de significância de 95%. Com base nos resultados as variáveis estruturais que mais impactaram sobre o consumo e o custo de energia elétrica do SBA Rio Guamá foram o volume útil requerido diariamente, seguido do diâmetro da tubulação de recalque. A partir da aplicação da técnica de planejamento experimental o gestor de saneamento poderá priorizar as ações de eficiência energética do sistema investigado.

Palavras-chave: Planejamento experimental; Eficiência energética; Sistema de bombeamento de água; Simulação computacional.

Abstract

Evaluate the structural variables influence on the consumption and the electrical energy cost from Guamá river's Water Pumping System (WPS) located in Belém city (Pará), through Plackett and Burman experimental planning, computational simulations and of statistical analysis. This present study was divided into four stages. In Step 1, it was carried out the design characterization and limits determination (minimum and maximum) of the variables geometric height, diameter and pressurized pipes length and stand pipe reservoir useful volume. Then (Step 2) it was applied the Plackett and Burman experimental planning, in order to define the number of tests to be simulated. In Step 3, it was held hydraulic simulations of different operational routines, to determine the consumption and electric power cost in the WPS. The last stage was accomplished statistical analysis (Hypothesis test and Pareto Diagram) for a 95% significance level. Based on the results, the structural variables that most impacted upon the consumption and the WPS electricity cost Guamá River were the useful volume daily required, followed by the pressurized pipe diameter. From the experimental planning technique application, the sanitation manager will be able to prioritize the energy efficiency actions of the investigated system.

Keywords: Experimental planning; Energy efficiency; Water pumping system; Computational simulation.

Resumen

Evaluar la influencia de variables estructurales en el consumo y costo de electricidad del Sistema de Bombeo de Agua del Río Guamá ubicado en la ciudad de Belém do Pará, utilizando técnicas de planificación experimental de Plackett y Burman, simulaciones por computadora y análisis estadístico. Esta investigación se dividió en cuatro etapas. En el Paso 1 se realizó la caracterización del diseño y determinación de los límites (mínimo y máximo) de las variables altura geométrica, diámetro y longitud de las tuberías de descarga y volumen

útil del reservorio elevado. Luego (Paso 2) se aplicó el diseño experimental de Plackett y Burman, con el propósito de definir el número de pruebas a simular. En el Paso 3, se realizaron simulaciones hidráulicas de diferentes rutinas operativas para determinar el consumo y costo de la electricidad en la SBA. En la última etapa se realizaron análisis estadísticos (Prueba de hipótesis y diagrama de Pareto), con un nivel de significancia del 95%. Con base en los resultados, las variables estructurales que más impactaron el consumo y costo de la electricidad en la SBA Río Guamá fueron el volumen útil diario requerido, seguido del diámetro de la tubería de descarga. A partir de la aplicación de la técnica de planificación experimental, el responsable de saneamiento podrá priorizar las acciones de eficiencia energética del sistema investigado.

Palabras clave: Planificación experimental; Eficiencia energética; Sistema de bombeo de agua; Simulación computacional.

1. Introdução

No Brasil, dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento Básico (SNIS) de 2018 apontam para um consumo de energia elétrica de 12,9 TWh/ano, desse valor 90% são provenientes de Sistemas de Abastecimento de Água - SAAs e 10% de sistemas de esgotamento sanitário (Brasil, 2019).

O Sistema de Bombeamento de Água (SBA) é a etapa onde ocorre a maior parte do consumo de energia elétrica nos SAAs (Brasil, 2019; Wu, Lai, Wu, & Wang, 2014; Gomes, 2012; Brandt, Middletom, Wheale & Schulting, 2011; Tarquin & Dowdy, 1989; Colombo & Karney, 2002). Nas companhias de saneamento 90% da energia elétrica consumida são provenientes de SBA (Gomes, 2019).

O elevado consumo de energia elétrica ocorre apesar de existirem na literatura diversas ações de eficiência hidroenergética a serem executadas nos SBAs de SAAs, desde ações simples, como alteração da potência contratada e alteração dos tarifários, até ações mais complexas, como a otimização do sistema. Porém, os gestores das concessionárias de saneamento têm dificuldades em priorizar as ações de eficiência energética.

Dentre as distintas ações o uso de softwares de modelagem hidráulica tem se tornado ferramentas indispensáveis na escolha de alternativa que proporcione o melhor rendimento hidroenergético em SBA (Ye Wang, Puiga & Cebrano, 2017; Qiang Xu, Qiuwen Chen; Siliang Qi & Desuo Cai, 2015; Wenyan Wu, Simpson, Asce, Maier & Marchi, 2012), no

entanto, é importante conhecer alguns critérios que favoreçam a economia de energia elétrica.

A utilização de planejamento de experimentos proposto por Plackett e Burman (1946) é uma técnica eficiente e precisa de seleção de variáveis importantes de um dado processo, com a finalidade de identificar os fatores que têm grandes efeitos e descartar os que têm pouco ou nenhum efeito sobre as respostas (Santos *et al.*, 2010). A soma do planejamento experimental aos métodos de controle estatístico são ferramentas muito poderosas para a melhoria e otimização do processo e redução dos custos envolvidos (Montgomery, Runger & Hubele, 2004; Galdámez & Carpinetti, 2004). Essas ferramentas podem fornecer suporte hidroenergético as tomadas de decisão dos responsáveis pelos SAAs.

Como as alterações das variáveis estruturais (altura geométrica, diâmetro e comprimento das tubulações de recalque e volume dos reservatórios) do SBA impactam nos valores de potência elétrica demandada para os Conjuntos Motor e Bomba (CMBs) e, naturalmente, nos custos operacionais do SAA. Assim, com a finalidade de direcionar as ações de eficiência energética no SBA, a presente pesquisa tem objetivo de avaliar a influência das variáveis estruturais sobre o consumo e o custo de energia elétrica do SBA Rio Guamá localizado na cidade de Belém, Estado do Pará, por meio de técnica de planejamento de experimentos de Plackett e Burman, de simulações computacionais e de análises estatísticas.

2. Metodologia

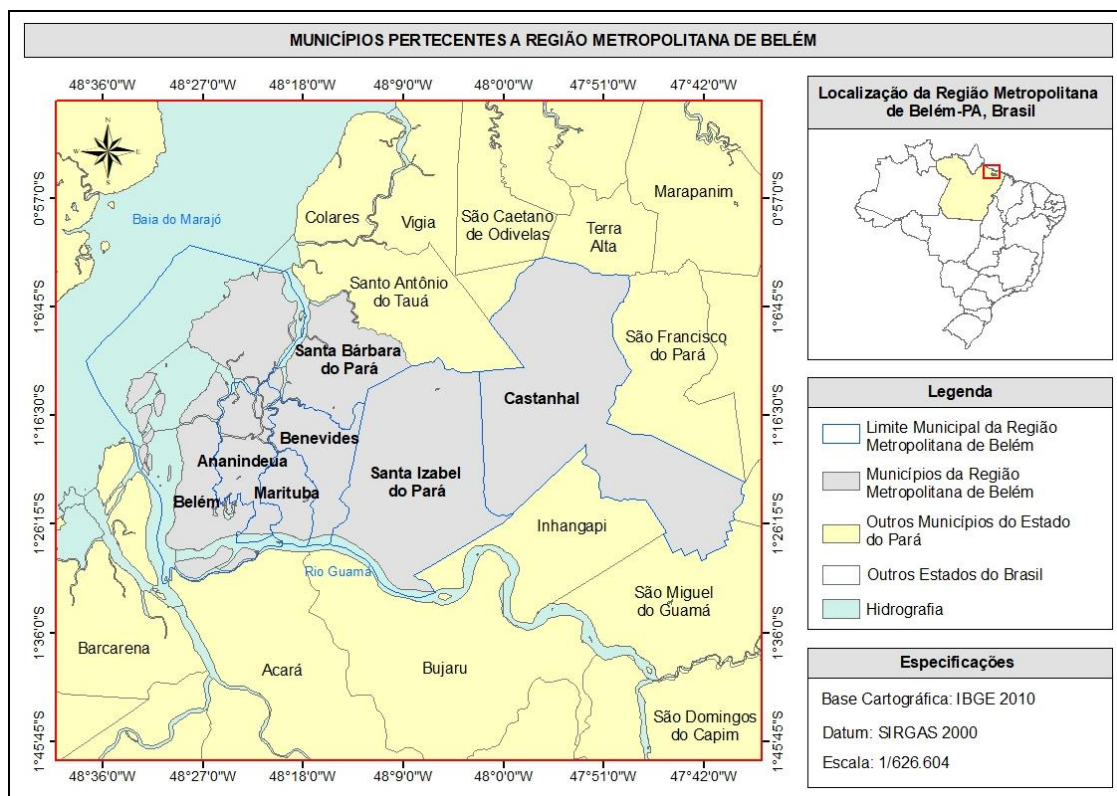
Com a finalidade de avaliar o impacto das variáveis estruturais na eficiência hidroenergética do SBA Rio Guamá, a presente pesquisa foi dividida em quatro etapas.

Na etapa I foi realizada a verificação da concepção, das características e do arranjo dos conjuntos motor e bomba e dos dispositivos hidráulicos do sistema de bombeamento de água bruta do Rio Guamá. Esses dados foram obtidos no Plano Municipal de Saneamento Básico de Abastecimento de Água e Esgotamento Sanitário de Belém (PMSB da RMB, 2014), no Plano Diretor do Sistema de Abastecimento de Água da Região Metropolitana de Belém (PDSAA da RMB, 2006), em trabalhos técnico-científicos e na política tarifária da modalidade horossazonal verde, praticada pela concessionária de energia elétrica (Equatorial energia) que fornece energia aos SAA da região Metropolitana de Belém.

A área de estudo foi o Sistema de Bombeamento e Adução de água bruta do Rio Guamá (SBA Rio Guamá), que integra o SAA da zona central da Região Metropolitana de

Belém (RMB), Estado do Pará, Brasil, conforme representado na Figura 1. A Companhia de Saneamento do Estado do Pará (COSANPA) é a empresa responsável pela captação em manancial superficial, tratamento e distribuição da água potável para atendimento das áreas centrais de Belém e Ananindeua. No PMSB da RMB (2014), a produção de água atende cerca de 74,70% (1.621.162 habitantes) da população urbana da RMB (2.170.322 habitantes).

Figura 1. Localização dos Municípios da Região Metropolitana de Belém.



Fonte: Nascimento, Silva, Santos, Ferreira e Pereira (2019).

Posteriormente foram adotados os limites mínimos (-1) e máximos (+1) das variáveis estruturais (altura geométrica de recalque; diâmetro e comprimento das tubulações de recalque e volume útil do reservatório elevado - VRE), utilizando como valores médios (0), denominados de ponto central (média aritmética entre os níveis mínimo e máximo), os dados da estação elevatória do Rio Guamá (Tabela 1).

Tabela 1. Limites das variáveis estruturais analisadas.

N°	Variáveis estruturais	Limites das variáveis		
		mínimo	médio	máximo
1	Hgr (m)	-1	0	+1
2	Dr (m)	-1	0	+1
3	Lr (m)	-1	0	+1
4	VRE (m ³)	-1	0	+1

Fonte: Autores (2020).

O ponto central foi utilizado para evitar a não inferência estatística, uma vez que, os autores Placktte & Burman não colocaram nos seus planejamentos esta condição. O ponto central possibilita verificar a existência de efeitos significativos entre os limites (mínimo e máximo). Por exemplo, suponha o estudo de rendimento de um processo avaliando a temperatura nas condições de 30°C (-1) e 50°C (+1), onde as respostas nestes níveis tenham sido aproximadamente iguais, concluindo-se que não houve efeito significativo da temperatura nessa faixa de estudo. No entanto, para que esta conclusão seja confiável, deve-se realizar ensaios no ponto central, possibilitando verificar a existência ou não de curvatura nesta região, no caso temperatura de 40°C (0) podendo ocorrer um aumento ou decréscimo no rendimento (Rodrigues & Iemma, 2014).

Na Etapa II foi realizado o planejamento experimental de Plackett e Burman do tipo 2^k , com dois níveis (mínimo e máximo) de k variáveis independentes (variáveis estruturais), de forma a determinar o número de ensaios de simulação no software Epanet 2.0 para determinação das variáveis dependentes ou resposta (consumo e custo de energia elétrica do SBA Rio Guamá), sendo em cada ensaio alteradas as variáveis estruturais entre os limites mínimos e máximos. Para determinação do número de ensaios foi utilizado o número de variáveis independentes para escolha da matriz de Plackett & Burman (Tabela 2), mais a adição do ponto central.

Tabela 2. Número de ensaios das matrizes de Plackett & Burman em função do número de variáveis independentes.

Variáveis independentes	Número de ensaios da matriz de Plackett & Burman	Variáveis independentes	Número de ensaios da matriz de Plackett & Burman
4	8, 12 e ≥ 16	11	16, 20 e ≥ 24
5	12, 16 e ≥ 20	12	16, 20 e ≥ 24
6	12, 16 e ≥ 20	13	20, 14 e ≥ 28
7	12, 16 e ≥ 20	14	20, 14 e ≥ 28
8	12, 16 e ≥ 20	15	20, 14 e ≥ 28
9	16, 20 e ≥ 24	16	20, 14 e ≥ 28
10	16, 20 e ≥ 24	≥ 17	Sempre no mínimo 4 ensaios a mais que o n° de variáveis

Fonte: Rodrigues e Iemma (2014).

Na Etapa III foram realizadas as simulações no software Epanet 2.0, desenvolvido por Lewis A. Rossman da U. S. Environmental Protection Agency (US EPA), dos Estados Unidos, e traduzido pelo Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em saneamento – LENHS, da Universidade Federal da Paraíba – Brasil. As simulações foram realizadas para um mês de rotina operacional do SBA Rio Guamá, cujos dados de entrada no Epanet foram descritos no Quadro 1.

Quadro 1. Dados de entrada para as simulações.

N°	Variável	Unidade	Observações
1	Alturas do RNV	m	Dimensionados
2	Coefficientes de perda de carga singular	-	Dimensionados
3	Comprimentos das adutoras	m	PDSSA da RMB (2006)
4	Consumo base	m ³ /hab.dia	PDSSA da RMB (2006)
5	Cota do RNV	m	Dimensionados
6	Cotas das adutoras	m	Google Earth (2018)
7	Curva da bomba	-	Dimensionados
8	Diâmetro do RNV	m	Dimensionados

9	Diâmetros das adutoras	m	PDSSA da RMB (2006)
10	Fator de consumo de água	-	Moreira (2018)
11	Fator de consumo de energia	-	Moreira (2018)
12	Nível da água - rio	m	Google Earth (2018)
13	Potência da bomba	cv	PMSB da RMB (2014)
14	Preço da energia	R\$/kwh	Equatorial energia (2018)
15	Rugosidade das adutoras	-	Azevedo Netto e Fernandez (2015)
16	Vazão do sistema	m ³ /h	PMSB da RMB (2014)

Fonte: Autores (2020).

A capacidade de reservação e a profundidade máxima do Lago Água Preta (reservatório elevado - REL) de 10.000.000 m³ e de 8 m, respectivamente observadas no PMSB DA RMB (2014), possibilitou o cálculo da área e a posterior representação das dimensões do REL no software Epanet 2.0.

Para eficiência energética desde o início das simulações de cada ensaio foram realizadas as seguintes programações no software Epanet: (1) de paralisação e acionamento dos CMB nos níveis máximo e mínimo do REL, respectivamente, considerando o volume de água retirado (Volume útil) durante período de 24 horas, para tratamento e distribuição de água e; (2) de funcionamento do CMB somente no horário fora de ponta a depender do nível do REL. De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (2020) a tarifa de energia elétrica nos dias úteis possuem três valores de tarifas, que são: ponta, com valores elevados; intermediários possuem valores médios e fora de ponta tem valor menor. Assim, foram executadas as simulações para obtenção das respostas.

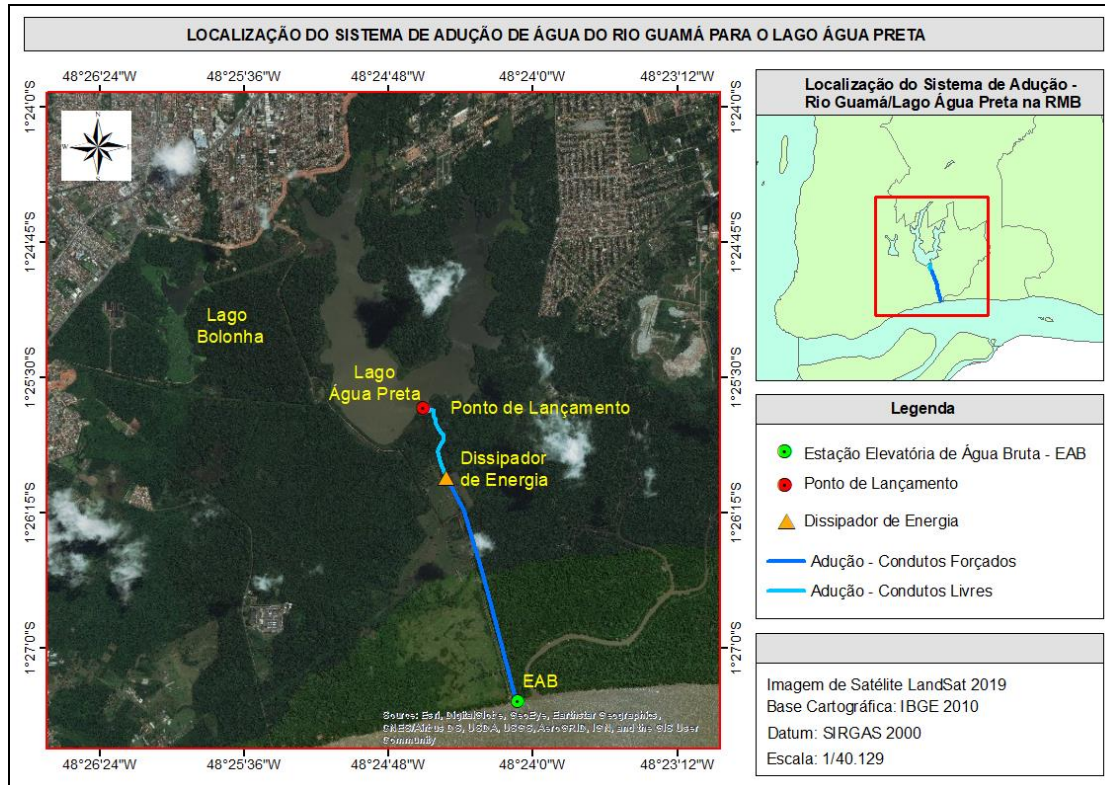
Na etapa IV os resultados de consumo e custo de energia elétrica dos distintos ensaios foram utilizados para seleção das variáveis estruturais por meio de testes estatísticos (teste de hipótese e Diagrama de Pareto) feitos com auxílio do Protimiza Experimental Design software baseado no livro Planejamento Experimental & Otimização de Processos (Rodrigues e Iemma, 2014), desenvolvido para ajudar na análise de dados experimentais utilizando a Metodologia de Planejamento Experimental.

3. Resultados e Discussão

O SAA da área central dos municípios de Belém e Ananindeua inicia com a captação de água no Rio Guamá, para bombeamento e transporte em duas linhas adutoras até o Lago

Água Preta (REL). Essas unidades são denominadas de SBA Rio Guamá - Lago Água Preta, podendo a localização ser observada na Figura 2.

Figura 2. Estação elevatória de água bruta entre o Rio Guamá e o Lago Água Preta.

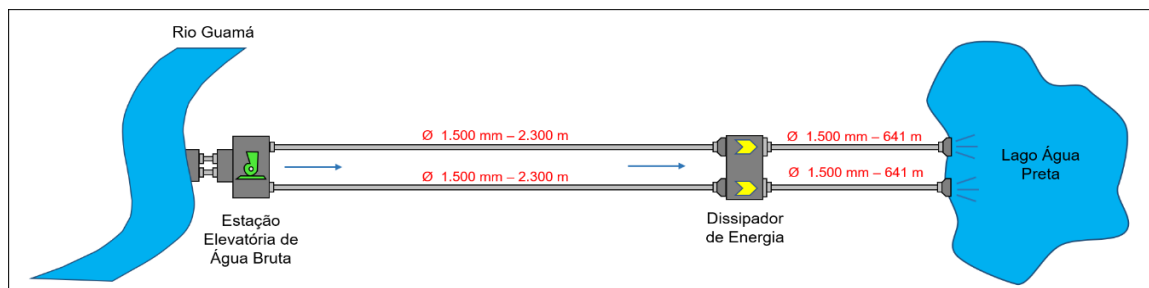


Fonte: Nascimento, Silva, Santos, Ferreira e Pereira (2019).

A tomada d'água é formada por canal de concreto construída na margem esquerda do rio Guamá, para facilitar a captação e encaminhamento da água até o poço de sucção da estação elevatória de água bruta (EAB).

O recalque é realizado por meio da EAB do rio Guamá constituída por 8 CMB's, que foram redimensionados na presente pesquisa para a avaliação do bombeamento de água nas duas adutoras de 1.500 mm de aço. A concepção da unidade de adução é composta por dois trechos distintos de escoamento da água. O primeiro trecho de 2.300m é em conduto forçado com início na EAB e final no dissipador de energia, quando ocorre a mudança para o regime de escoamento livre com 641m de extensão entre a caixa de transição (dissipador de energia) e o Lago Água Preta, conforme representado na Figura 3.

Figura 3. Esquema das tubulações de recalque do SBA



Fonte: Nascimento, Silva, Santos, Ferreira e Pereira (2019).

O ponto mais alto do relevo (23 m de altura) está localizado no dissipador de energia, ponto que separa a mudança de regime de escoamento (livre e forçado). Para a adequada proteção do funcionamento hidráulico das tubulações foram instaladas ventosas e tanque de amortecimento, estando assentadas em blocos de concreto apoiados ou enterradas em pequena profundidade do terreno.

A massa líquida do Lago Água Preta utilizado como reservação primária, escoar por gravidade até o Lago Bolonha, sendo este o reservatório superficial instalado a montante das 3 estações de tratamento que fornecem água potável para as áreas centrais dos municípios de Belém e Ananindeua.

Considerando apenas o trecho de conduto forçado, os limites médios das variáveis estruturais do SBA Rio Guamá foram obtidos no Plano Diretor do Sistema de Abastecimento de Água da Região Metropolitana de Belém (PDSAA da RMB, 2006), elaborado na cooperação técnica do Grupo de Pesquisa Hidráulica e Saneamento da Universidade Federal do Pará (GPHS/UFPA) com a Companhia de Saneamento do Pará (COSANPA), são elas a altura geométrica (11,28m), o diâmetro de recalque (1500mm), o comprimento do conduto de recalque (2300m) e o volume útil de água no reservatório elevado - VRE (405.290,5 m³/d).

O VRE foi resultado da multiplicação da população abastecida (1.621.162 habitantes) pelo valor do coeficiente de demanda per capita de água (250 l/hab.dia) utilizado neste trabalho. A partir do volume requerido durante um dia foram estabelecidos os níveis máximo e mínimo no reservatório elevado, os quais foram compatibilizados com os registros da COSANPA de variação do nível de água no Lago Água Preta.

O limite mínimo da variável altura geométrica foi adotado com base na diferença de cotas de montante (EAB do rio Guamá) e jusante (lago Água Preta), que resultou no

desnível geométrico de 5,30m e, a partir dos valores mínimo e médio determinou a altura geométrica máxima de 17,26m.

A partir da concepção do SBA Rio Guamá adotou-se os limites mínimos e máximos do comprimento da tubulação de recalque de 1870m e 2730m, respectivamente.

Os diâmetros das adutoras de recalque de 1250mm (mínimo) e 2000mm (máximo) foram adotados com referência ao diâmetro de 1500mm (valor médio) do SBA Rio Guamá.

O volume útil máximo (526.877 m³) foi a soma do volume útil médio (405.290m³) acrescido de 30% (121.587m³) dessa reservação e, conseqüentemente, o VRE mínimo diário foi de 283.703m³. Na Tabela 3 foram descritos os limites mínimos, médios e máximos adotados.

Tabela 3. Limites das variáveis estruturais adotados.

Nº	Variáveis estruturais	Limites das variáveis		
		Mínimo (-1)	Médio (0)	Máximo (+1)
1	Hgr (m)	5,30	11,28	17,26
2	Dr (mm)	1250	1500	2000
3	Lr (m)	1870	2300	2730
4	VRE (m ³)	283703	405290	526877

Fonte: Autores (2020).

Para avaliar as 4 variáveis adotadas, a matriz de Plackett-Burman com 12 ensaios foi adequada. Totalizando 13 simulações realizadas com o ensaio no ponto central, que se refere a simulação das condições reais do SBA do Rio Guamá (Tabela 4).

Tabela 4. Matriz de Plackett-Burman mais adição de ponto central.

Ensaio	Variáveis estruturais			
	Hgr	Dr	Lr	VRE
1	+	-	+	-
2	+	+	-	+
3	-	+	+	-
4	+	-	+	+
5	+	+	-	+
6	+	+	+	-
7	-	+	+	+
8	-	-	+	+
9	-	-	-	+
10	+	-	-	-
11	-	+	-	-
12	-	-	-	-
13	0	0	0	0

Fonte: Autores (2020).

Os 8 CMBs com potência requerida de 185 kW e vazão de operação de 2.775,82 m³/h foram utilizados nas simulações da estação elevatória do Rio Guamá.

Na simulação do ensaio no ponto central, os CMB's foram paralisados no horário de ponta do setor elétrico (18h30min às 21h30min), com tempo de operação do SBA Rio Guamá de 19h15min, resultando no consumo de energia elétrica de 678.728,32 kWh/mês. Com exceção dos ensaios 4, 8 e 9, que os CMBs funcionaram 24 horas por dia, provavelmente devido a utilização do diâmetro mínimo e volume útil máximo observados nos três experimentos (Tabela 5). Uma vez que, a redução do diâmetro aumenta a perda de carga e, conseqüentemente, aumenta a altura manométrica e a elevação do volume requerido diariamente faz com que aumente a potência demandada e, naturalmente aumente o consumo e custo operacional do SBA. Para Lima, Guimarães Junior, Fietz e Camacho (2009) o aumento do diâmetro da tubulação reduz a potência do conjunto elevatório e o custo operacional de energia elétrica, procedimento que pode ser economicamente viável ao longo da vida útil dos equipamentos.

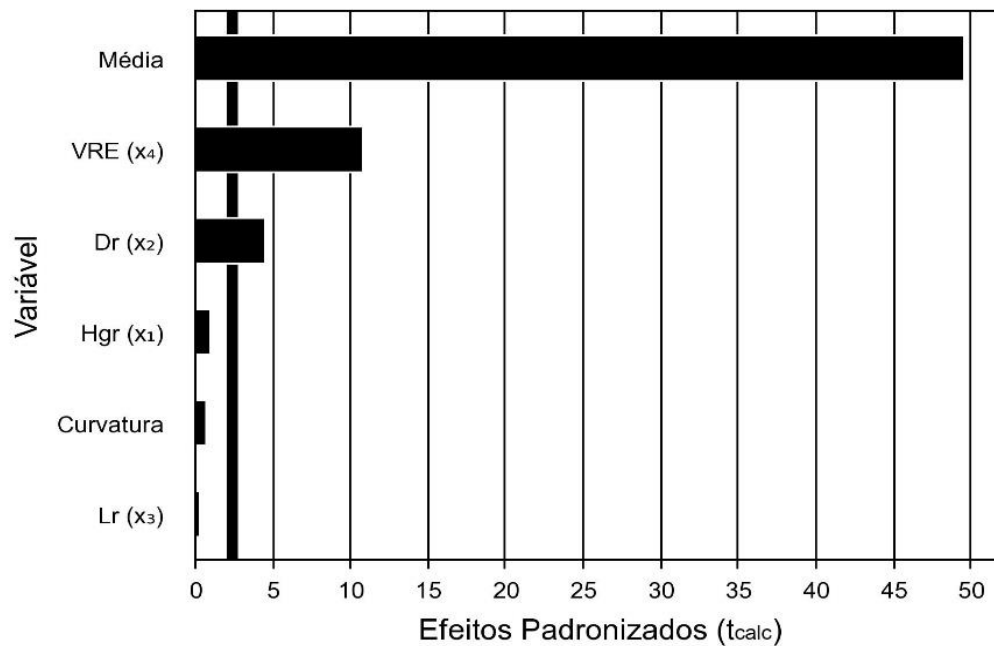
Tabela 5. Consumo e custo de energia elétrica de cada ensaio.

Ensaio	Consumo (KWh/mês)	Custo (R\$/mês)	Operação dos CMBs (hora)
1	666986,10	229915,20	19,31
2	785753,86	270974,40	20,56
3	431697,08	148112,00	11,33
4	837309,75	503112,00	24,23
5	785753,90	270974,40	20,56
6	431697,08	148526,40	11,33
7	797355,62	275526,40	20,92
8	837309,70	503112,00	24,23
9	861755,26	515779,80	24,20
10	595433,17	205240,80	16,73
11	422676,00	145428,00	11,06
12	595433,43	205240,80	16,73
13	678.728,32	237.480,30	19,15

Fonte: Autores (2020).

Para avaliar o impacto das variáveis estruturais no consumo e no custo de energia elétrica do SBA Rio Guamá foram realizados testes estatísticos (Teste de hipótese e diagrama de Pareto), com auxílio do *software* Protimiza. Conforme resultados obtidos foi observado que o p-valor do teste de nulidade da média (p-valor = 0,0000), do diâmetro (p-valor = 0,0026) e do volume útil (p-valor 0,0000) foram menores que o nível de significância de $\alpha=0,05$ (5%) indicando efeitos significativos no consumo de energia elétrica. Os resultados observados no Diagrama de Pareto confirmam o impacto significativo da média, do diâmetro e do volume útil no consumo de energia elétrica, pois $t_{calc} > t_{tab}$ rejeitando a hipótese nula (Figura 4).

Figura 4. Efeitos das variáveis estruturais no consumo de energia elétrica.

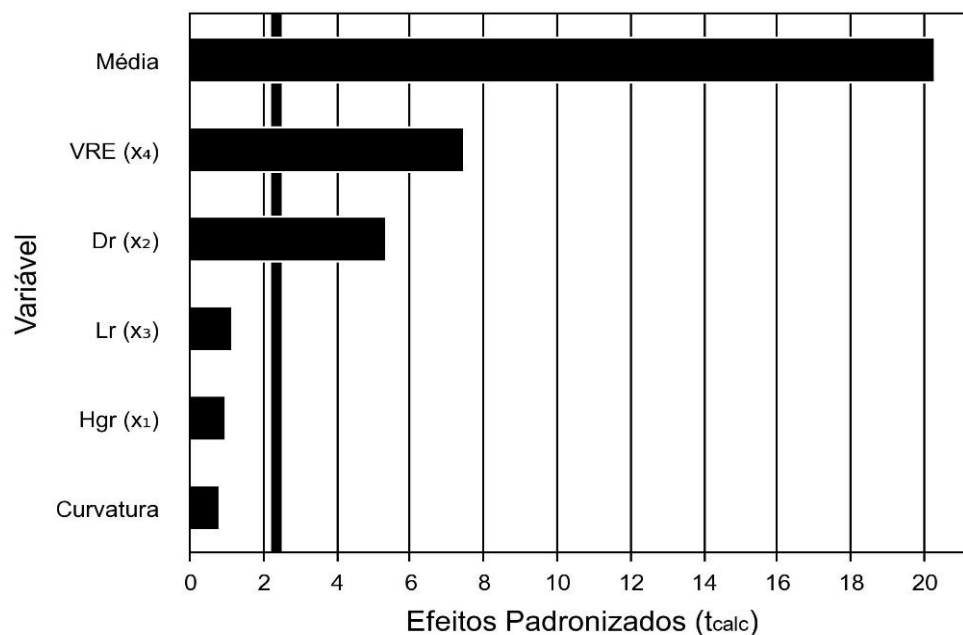


Fonte: Autores (2020).

Custódio e Lopes (2018) estudaram a utilização de bomba funcionando como turbina para geração de energia elétrica operando à frequência variável, para isso, foi preciso definir os parâmetros potência, rendimento e rotação por meio de testes em bancada experimental variando a vazão e fixando a altura de operação (método de tentativa e erro) e verificaram que o nível de potência é relevante na análise. Segundo Halland (1989) o método de análise de uma variável por vez é ineficiente por não explorar todas as soluções. O planejamento fatorial aplicada nesta pesquisa é uma técnica precisa para escolha de variáveis importantes no processo (Rodrigues & Iemma, 2014).

Na Figura 5 observa-se que a altura geométrica e o comprimento da tubulação de recalque não apresentaram efeito significativo no custo de energia elétrica ($t_{calc} < t_{tab}$) aceitando-se a hipótese nula. O que pode ser reforçado pelo valor de p igual a 0,3618 (Hg) e 0,2861 (Lr), onde não há evidências de que as amostras provêm de populações com variâncias diferentes, ou seja, as amostras estatisticamente apresentam variâncias iguais.

Figura 5. Efeitos das variáveis estruturais no custo de energia elétrica.



Fonte: Autores (2020).

Pode-se observar que o volume útil foi a variável que mais impactou no consumo e no custo de energia elétrica. Moreira; Rego e Pereira (2019) observaram a importância do volume útil do reservatório elevado em setor do sistema de distribuição de água do Setor Guanabara localizado em Belém e os principais problemas constatados em relação ao volume de reserva foram a não utilização de toda altura útil do reservatório e baixos níveis de reserva instantes antes do posto horário de ponta. Além disso, Pereira e Condurú (2014) ressaltam a relação direta do impacto do volume útil do poço de sucção na eficiência energética das estações de recalque. Uma forma de melhorar a eficiência energética de SBA é a atualização de normas específicas, por meio de recomendação de instalação de equipamentos eletrônicos localizados em pontos estratégicos da estação elevatória, com a finalidade de analisar o consumo e o custo de energia elétrica, entre outros (Moreira, Ferreira & Pereira, 2020).

Paglarini et. al. (2018) também selecionou por meio desta técnica de planejamento experimental de Plackett- Burman os ingredientes para desenvolver géis de emulsão (EG) para uso como substituto de gordura animal em produtos cárneos, no intuito, de torná-los mais saudáveis, para triagem dos melhores ingredientes um Plackett-Burman com 12 ensaios foi aplicado a 7 variáveis independentes (isolado de proteína de soja (SPI), caseinato de sódio, carragenina (CAR), inulina (INUL), pectina, tripolifosfato de sódio e lecitina de

soja) para a seleção de EG. Dessa aplicação três fatores foram efetivamente selecionados SPI, CAR e INUL, para serem utilizados como substitutos da gordura animal.

4. Conclusão

Com base nos resultados as variáveis estruturais que mais impactaram sobre o consumo e custo de energia elétrica foram o volume útil requerido diariamente, seguido do diâmetro da tubulação de recalque.

O uso de planejamento de experimentos proposto por Plackett e Burman foi uma técnica eficiente e precisa na seleção das variáveis estruturais com maiores efeitos sobre o consumo e o custo de energia elétrica no SBA Rio Guamá, com nível de significância de 95%. Importante, na tomada de decisão dos gestores de saneamento quanto a minimização dos custos energéticos, além de evitar a exclusão arbitrária das variáveis importantes no processo.

A partir da aplicação da técnica de planejamento de experimentos o gestor poderá direcionar suas ações, as variáveis que mais impactaram na eficiência energética do SBA Rio Guamá, como o monitoramento da utilização do volume útil do reservatório elevado ao longo do tempo. Importante ressaltar, que a aplicação posteriormente de um planejamento fatorial completo pode levar as condições otimizadas do processo.

Referências

Agência Nacional de Energia Elétrica. (2020). Tarifa branca. Recuperado de <https://www.aneel.gov.br/tarifa-branca>.

Azevedo Netto, J. M., Fernandez, M. F. (2015). Manual de Hidráulica (9a ed.) São Paulo: Edgard Blücher.

Brasil (2019). Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - SNIS: 24º Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2018. Recuperado de http://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/ae/2018/Diagnostico_AE2018.pdf.

Brandt, M., Middletom, R., Wheale, G. Schulting, F. (2011). Energy efficiency in the water industry, a Global Research Project. *Water Practice and Technology*. 6(2).

Colombo, A. F. & Karney, B. W. (2002). Energy and costs of leaky pipes: Toward comprehensive Picture. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 128 (6), 441-450.

Custódio, L. M. & Lopes, R. E. (2018). Análise de viabilidade da utilização de bomba funcionando como turbina operando à frequência variável como alternativa de geração de energia comparado com eletrificação rural no estado de Minas Gerais. *Research, society and development*, 7 (6). 1-12.

Equatorial Energia (2018). Valor de tarifas e serviços. Recuperado de <https://pa.equatorialenergia.com.br/informacoes-gerais/valor-de-tarifas-e-servicos/#demais-classes>.

Galdamez, E. C. & Carpinetti, L R. (2004). Aplicação de técnicas de planejamento e análise de experimentos no processo de injeção plástica. *Gestão e produção*, 11 (1). 121-134.

Gomes, H. P. (2019). *Abastecimento de Água*. João Pessoa: LENHS/UFPB.

Gomes, H. P. (2012). *Sistema de Bombeamento: Eficiência Energética*. João Pessoa: Editora Universitária/UFPB.

Haaland, P. D. *Experimental Design in Biotechnology*. (1989). Nova York: Marcel Dekker.

Lima, A. C., Guimarães Júnioe, S. C., Fietz, C. R., Camacho, J. R. (2009). Avaliação e análise da eficiência energética na irrigação em sistemas de pivô central. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 13 (4).

Montgomery, D. C., Runger, G. C., Hubele, N. F. (2004). *Estatística Aplicada à Engenharia* (2a ed.). Rio de Janeiro: LTC.

Moreira, F. N. C., Ferreira, J. F. H. e Pereira, J. A. R. (2020). Normas Brasileiras e a recomendação de eficiência energética para a elaboração do projeto de estação elevatória de esgoto sanitário. *Research, society and development*, 9 (8). 1-18.

Moreira, F. N. C., Rego, A. G., Pereira, J. A. R. (2019). Avaliação da Importância do Volume Útil de Reservatório Elevado para a Distribuição de Água para Área Urbana. *Revista Aidis de Ingeniería y Ciencias Ambientales*, 12 (3). 536-551.

Moreira, F. N. C. (2018). Dimensionamento do volume útil de reservação de água considerando o consumo de energia elétrica no horário de ponta do setor elétrico. Dissertação, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, Brasil.

Nascimento, D. L. G., Silva, A. B., Santos, A. C. P. A., Ferreira, J. F. H., Pereira, J. A. R. (2019). Impacto da Concepção no Consumo de Energia Elétrica do Sistema de Bombeamento e Adução de Água Bruta do Rio Guamá – Belém. XVI Seminário Ibero-Americano sobre Sistemas de Abastecimento e Drenagem - SEREA.

Paglarini, C. S., Furtado, G. F., Biachi, J. P., Vidal, V. A. S., Martini, S., Forte, M. B. S., Cunha, R. L., Pollonio, M. A. R. 2018. Functinal Emulsion Gels With Potential Application in Meat Products. *Journal of Food Engineering*, 222. 29-37.

Pereira, J. A. R. e Condurú, M. T. (2014). Abastecimento de água: informação para eficiência hidroenergética. João Pessoa – Brasil: Editora Universitária – UFPB.

Plackett, R. L. & Burman, J. P. (1946). The Desing of Optimum Multifactorial Experiments. *Biometrika*, 33 (4), 305-325.

Plano Diretor do Sistema de Abastecimento de Água da Região Metropolitana de Belém (2006). Universidade Federal do Pará. Grupo de Pesquisa Hidráulica e Saneamento (v. 2, p. 285).

Plano Municipal de Saneamento Básico (Água e Esgoto) (2014). Prefeitura Municipal de Belém. Recuperado de http://www.belem.pa.gov.br/arbel/wp-content/uploads/2014/09/PMSB-Bel%C3%A9m-PA_Volume-I2.pdf.

Qiang, X., et al (2015). Improving water and energy metabolism efficiency in urban water supply system through pressure stabilization by optimal operation on water tanks. *Ecological Informatics*. Journal homepage: www.elsevier.com/locate/ecolinf. 111-116.

Rodrigues, M. I. & Iemma, A. F. (2014). *Planejamento de Experimentos e otimização de processos* (3a ed.), Campinas, SP: Casa do Espírito Amigo Fraternidade Fé e Amor.

Santos, A. F., Luz, E., Freitas, S., Grell, G., Velho, H. de C., Gan, M. (2010). Análise de sensibilidade das simulações de precipitação convectiva do modelo brams as melhorias na parametrização de cumulus. In: XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia.

Tarquim, A. J., Dowdy, J. (1989). Optimal Pump Operation in Water distribution. *Journal of Hydraulic Engineering*. New York, NY, USA: Asce, 115 (2), 158-168.

Ye Wang; Puiga, V., Cebrano, G. (2017). Non-linear economic model predictive control of water distribution networks. *Journal of Process Control*. Journal homepage: www.elsevier.com/locate/jprocont. 23–34.

Wenyan, W., et al (2012). Incorporation of Variable-Speed Pumping in Multiobjective Genetic Algorithm Optimization of the Design of Water Transmission Systems. *Sociedade Americana de Engenheiros Civis. Journal of Water Resources Planning and Management*. 543-552.

Wu, P., Lai, Z., Wu, D., Wang, L. (2014). Optimization research of parallel pump system for improving energy efficiency. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141 (8).

Porcentagem De Contribuição De Cada Autor No Manuscrito

Alcione Batista da Silva – 50%

José Almir Rodrigues Pereira – 30%

Aline Christian Pimentel Almeida – 20%