

Artigo Científico

Regulador baixa tensão/baixa tensão móvel para uso nas instalações operacionais de água e esgoto com problemas de qualidade de energia

Low voltage/low voltage mobile regulator for use in water and sewage operational facilities with power quality issues

Rodrigo Masayuki Yamano^{1*} , Leandro Pereira dos Santos¹ , Marcos Cesar de Souza Brito¹ 

RESUMO

Este trabalho avalia a viabilidade da utilização de um regulador de tensão móvel e portátil, com capacidade de entrada e saída de 220/380 Vca (tensão em corrente alternada), para a estabilização da tensão em unidades operacionais críticas, frequentemente afetadas por instabilidades no fornecimento de energia elétrica. No contexto dos sistemas de abastecimento de água e esgotamento sanitário, as estações de bombeamento, dispersas geograficamente ao longo das áreas de serviço, estão comumente localizadas a grandes distâncias dos alimentadores e subestações de energia. Tal condição as torna particularmente vulneráveis a falhas em reguladores de média tensão da concessionária de energia e a sobrecargas no sistema elétrico, o que compromete a continuidade operacional. A implementação do regulador de tensão móvel e portátil visa garantir a operação ininterrupta dessas instalações essenciais, minimizando os impactos adversos decorrentes de falhas prolongadas na qualidade do fornecimento de energia. A análise proposta considera os benefícios técnicos e econômicos da tecnologia, sua aplicabilidade em cenários reais e os potenciais ganhos operacionais para o setor de saneamento.

Palavras-chave: regulador de tensão; qualidade de energia; manutenção eletromecânica; disponibilidade operacional.

ABSTRACT

This study evaluates the feasibility of using a mobile and portable voltage regulator, with an input/output capacity of 220/380 VAC (alternating current voltage), for voltage stabilization in critical operational units frequently affected by power supply instabilities. Within the context of water supply and sewage systems, pumping stations—geographically dispersed throughout the service areas—are commonly located at great distances from power feeders and substations. Such condition makes them particularly vulnerable to failures in the utility's medium-voltage regulators and power system overloads, compromising operational continuity. The implementation of the mobile and portable voltage regulator aims to ensure the uninterrupted operation of these essential facilities, minimizing adverse impacts resulting from prolonged failures in power supply quality. The proposed analysis considers the technical and economic benefits of the technology, its applicability in real-world scenarios, and the potential operational gains for the sanitation sector.

Keywords: voltage regulator; power quality; electromechanical maintenance; operational availability.

INTRODUÇÃO

Os reguladores de tensão utilizados em redes de distribuição geralmente são compostos de autotransformadores, dispositivos que integram as funções de entrada e saída em um sistema compartilhado. Essa configuração permite que o equipamento atue de forma versátil, funcionando

tanto para elevar quanto para reduzir a tensão da rede conforme a necessidade.

Quando o equipamento opera no modo elevador, a tensão entregue na saída é ajustada para ser superior à tensão recebida na entrada. Essa funcionalidade é essencial para compensar quedas de energia que ocorrem naturalmente

¹Empresa Baiana de Águas e Saneamento S.A. – Salvador (BA), Brasil.

*Endereço para correspondência: 4ª Avenida, 420, Centro Administrativo da Bahia – CAB, Salvador, Bahia. CEP: 41745-002. E-mail: rodrigoyamano@embasa.ba.gov.br

ao longo de linhas de distribuição extensas, garantindo que a unidade operacional receba a voltagem adequada.

Por outro lado, ao operar como redutor, o sistema ajusta os níveis elétricos para que a tensão de saída seja inferior à de entrada. Essa operação protege os componentes da rede contra sobretensões, evitando danos aos equipamentos e assegurando a estabilidade e a continuidade dos serviços. Os reguladores para rede de distribuição utilizados pelas concessionárias de energia são projetados com saída regulável de acordo com o diagrama de funcionamento básico mostrado na Figura 1. Esses equipamentos têm diversos TAP's (derivações) na bobina secundária possibilitando alterar a relação de transformação das espiras e, conseqüentemente, a tensão de saída.

A chave com duas posições com terminais K1 e K2 da Figura 1 é responsável pela elevação ou redução da tensão nos terminais da carga. Sensores de tensão e corrente instalados no lado secundário em conjunto com a placa de controle realizam a comutação automática entre os TAP's, variando a entrada do reator de modo a manter a tensão na carga constante.

As concessionárias de energia elétrica instalam reguladores de tensão nas redes de média tensão, ao longo dos alimentadores de distribuição, para assegurar a manutenção da tensão dentro dos limites especificados.

Conforme ilustrado na Figura 2, essas instalações que são fixas são aplicadas em sistemas de distribuição nas classes de tensão 15 a 34,5 kV. Embora projetados para serem robustos, esses equipamentos, com componentes cujo funcionamento é eletromecânico, estão sujeitos

a falhas operacionais. A manutenção corretiva é de responsabilidade exclusiva da concessionária e exige mão de obra altamente capacitada e qualificada, devido à classe de tensão envolvida.

As instalações operacionais de água e esgoto da Empresa Baiana de Águas e Saneamento (EMBASA) são compostas de conjuntos motobombas que funcionam por meio da energia elétrica disponibilizada pela Concessionária de Energia.

As empresas de saneamento, ao contrário de uma planta industrial, nas quais todos os equipamentos estão localizados em um único local, têm seu parque de produção de forma descentralizada de modo que as instalações operacionais estão afastadas umas das outras e da Estação de Tratamento de Água (ETA) ou Estação de Tratamento de Esgotos (ETE).

Considerando essa topologia de operação, as unidades operacionais atendidas em baixa tensão e mais afastadas dos centros urbanos são mais suscetíveis a problemas de qualidade de energia como subtensão e desequilíbrio de tensão.

Destaca-se, também, que instalações localizadas em regiões turísticas que recebem população flutuante sofrem com a qualidade de energia nos períodos em que a rede é sobrecarregada (eventos sazonais e periódicos), resultando em piora na qualidade de energia distribuída.

Constata-se que esses distúrbios no fornecimento de energia podem sensibilizar o relé de proteção de falta de fase/subtensão/desequilíbrio de tensão e as proteções internas dos *drives* como Inversores/*Soft Starters*, provocando o desligamento automático da Instalação. Nessa situação, os equipamentos ficam impedidos de serem acionados até

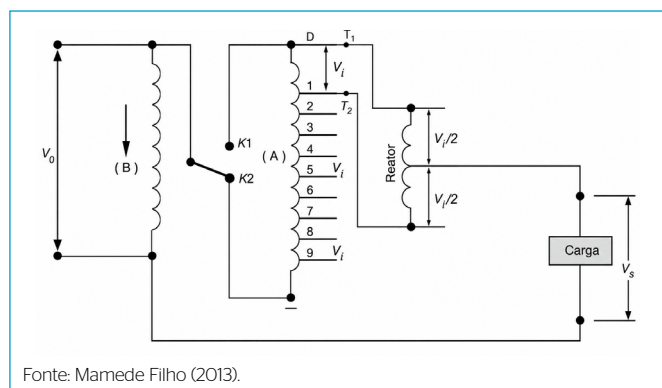


Figura 1 – Esquema básico de um regulador de tensão



Figura 2 – Regulador de tensão instalado na rede de distribuição

que a rede normalize, ocasionando desabastecimento de água ou extravasamento de esgoto.

Ocasionalmente, os problemas de qualidade de energia persistem por horas, raramente, por alguns dias, até serem resolvidos.

Nas estações elevatórias de esgotos (EEE) equipadas com geradores de emergência, a operação contínua desses geradores, quando a rede elétrica apresenta tensão inadequada, é uma preocupação significativa. Esses geradores, projetados para uso temporário, do tipo *stand-by*, sofrem desgaste mecânico e maior risco de falhas quando operados em regime contínuo.

Frequentemente, em cenários de contingência generalizada, em caso de falha do regulador, a concessionária de energia não consegue disponibilizar manutenção no tempo necessário para evitar problemas como desabastecimento de água ou extravasamento de esgoto nas EEE.

Embora uma unidade operacional possa, em certas situações, funcionar sob níveis precários de tensão, tal operação não é recomendável. Níveis críticos de subtenção e desequilíbrio de tensão provocam aquecimento e aumento da vibração nos motores elétricos, reduzindo drasticamente sua vida útil.

Conforme estudos do *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) e do *Electric Power Research Institute* (EPRI), as falhas nos estatores e nos rolamentos correspondem a 78% de todas as falhas observadas em motores elétricos de indução (Cornell *et al.*, 1982; Motor Reliability Working Group, 1985), conforme mostra a Figura 3.

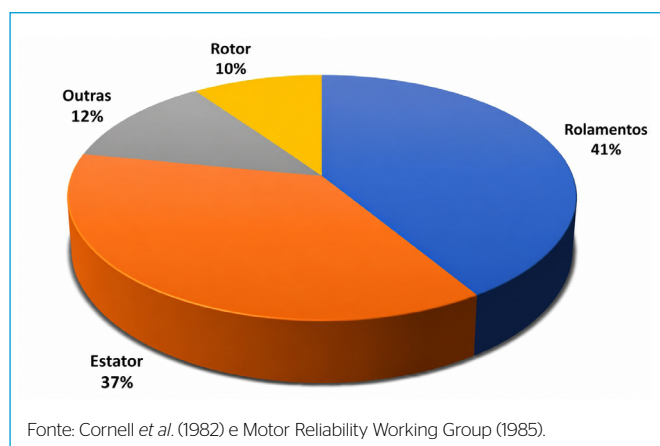


Figura 3 – Distribuição das falhas pelos principais componentes do motor

Diante disso, é possível inferir que a má qualidade da tensão pode contribuir/aumentar a probabilidade de surgimento dos dois tipos de falhas de maior representatividade (elétricas e mecânicas) nos motores elétricos de indução, responsáveis pelo funcionamento das bombas.

Acrescenta-se que o desequilíbrio de tensão pode danificar componentes eletrônicos mais sensíveis, como fontes chaveadas, *nobreaks*, relés eletrônicos e controladores, resultando na parada da unidade.

Portanto, este trabalho propõe uma alternativa para mitigar esses problemas por meio de um regulador de tensão móvel de 40 kVA, de fácil instalação pela equipe de manutenção, com entrada e saída em baixa tensão para atender de forma pontual e periódica as unidades com problemas de qualidade de energia elétrica.

METODOLOGIA

Para este trabalho foi utilizado o método experimental, consistindo no posicionamento de um regulador de tensão de pequeno porte entre o quadro geral de baixa tensão e o painel de acionamento de conjuntos motobombas, conforme o esquema operacional da Figura 4. Diferentemente dos

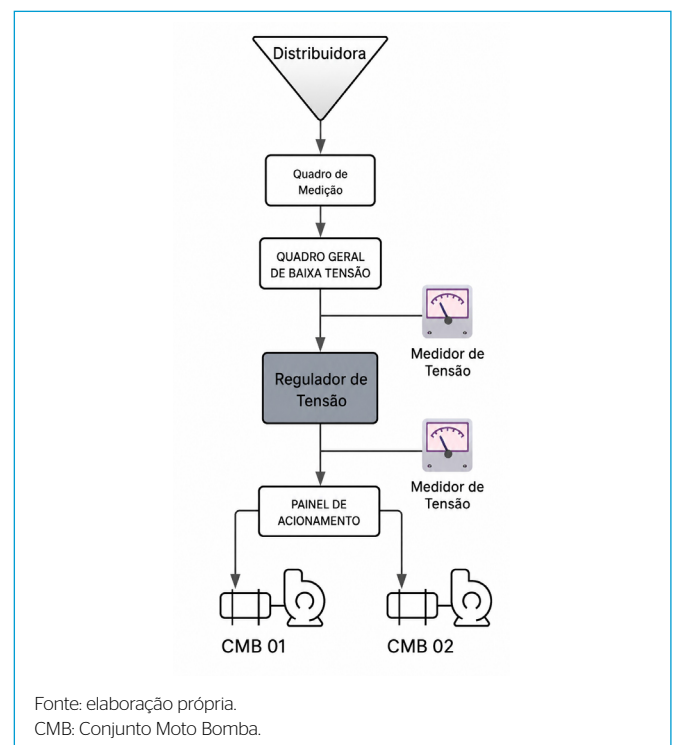


Figura 4 – Posicionamento de regulador de tensão na instalação operacional

modelos de média tensão de instalação fixa, esse equipamento foi dimensionado para fácil transporte em veículos utilitários pela equipe da EMBASA (Figura 5). Sua capacidade atende motores de até 50 CV, o que representa uma abrangência superior a 90% das instalações de baixa tensão da companhia.

Nesse procedimento serão monitoradas as tensões de entrada e saída do regulador para análise comparativa, nível de regulação e performance do equipamento.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Teste 1 - Captação de Cações

Informações da Unidade Operacional:

- 2 motores com potência nominal de 50 CV, potência requerida de 36,8 kW, sendo 1 titular e 1 reserva.
- Regime de operação: 21 horas/dia.

Na unidade de captação de Cações, vinculada à Unidade Regional de Santo Antônio de Jesus, o equipamento apresentou desempenho divergente do esperado. Devido à reduzida distância em relação ao inversor de frequência de 50 CV (inferior a 2 metros), suspeita-se que a distorção harmônica e os sinais eletromagnéticos gerados pelo inversor — que não dispunha de reator ou filtro de entrada — tenham causado interferências no circuito de controle do regulador. Ressalta-se que harmônicos provenientes da rede elétrica ou de cargas não lineares podem comprometer o funcionamento de circuitos eletrônicos sensíveis. Tal hipótese

é tecnicamente plausível, considerando que a saída do regulador estava conectada diretamente à entrada do inversor de frequência.

Teste 2 - Captação de Ouriçangas

Informações da Unidade Operacional:

- 1 motor com potência nominal de 50 CV, potência requerida de 36,8 kW.
- Regime de operação: 21 horas/dia.

Na captação de Ouriçangas, o equipamento operou de forma esperada. As tensões medidas na entrada e na saída são apresentadas na Tabela 1.

Teste 3 - Captação de Rio Real

Informações da Unidade Operacional:

- 1 motor com potência nominal de 50 CV, potência requerida de 36,8 kW.
- Regime de operação: 21 horas/dia.

Na captação de Rio Real (Figura 6), o regulador de tensão operou de forma esperada. As tensões medidas na entrada e na saída são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 1 - Tensões medidas e desequilíbrio - Captação de Ouriçangas

	Vab	Vac	Vbc	Desequilíbrio de tensão
Entrada	372,58	380,19	374,5	2,03%
Saída	378,98	376,72	380,88	1,10%

Vab: tensão entre as fases A e B; Vac: tensão entre as fases A e C; Vbc: tensão entre as fases B e C.



Figura 5 - Instalação do regulador BT/BT

Constatou-se que a referida instalação apresentava níveis de tensão em desconformidade com os limites estabelecidos pelo PRODIST (ANEEL, 2020). Para a tensão nominal de 380 Vca (fase-fase), verificaram-se violações tanto no desequilíbrio de tensão (Tabela 3), cujo limite normativo é de 3%, quanto nos níveis de sobretensão (Tabela 4), em que o intervalo adequado deveria situar-se entre 350 e 399 Vca. Tais irregularidades provocaram a atuação do sistema de proteção do equipamento.



Figura 6 – Regulador BT/BT (P1 Rio Real)

Tabela 2 – Tensões medidas e desequilíbrio – Captação de Rio Real

	Vab	Vac	Vbc	Desequilíbrio de tensão
Entrada	398,7	406,6	393,1	3,38%
Saída	368,8	378,8	372,2	2,68%

Vab: tensão entre as fases A e B; Vac: tensão entre as fases A e C; Vbc: tensão entre as fases B e C.

Tabela 3 – Limites para os desequilíbrios de tensão

Indicador	Tensão nominal	
	$V_n \leq 2,3 \text{ kV}$	$2,3 \text{ kV} < V_n < 230 \text{ kV}$
FD95%	3,0%	2,0%

FD: fator de desequilíbrio.
Fonte: ANEEL (2020).

Tabela 4 – Pontos de conexão em tensão nominal igual ou inferior a 1 kV (380/220)

Tensão de atendimento (TA)	Faixa de variação da tensão de leitura (volts)
Adequada	$(350 \leq TL \leq 399)/(202 \leq TL \leq 231)$
Precária	$(331 \leq TL < 350 \text{ ou } 399 < TL \leq 403)/(191 \leq TL < 202 \text{ ou } 231 < TL \leq 233)$
Crítica	$(TL < 331 \text{ ou } TL > 403)/(TL < 191 \text{ ou } TL > 233)$

TL: tensão de leitura.
Fonte: ANEEL (2020).

Como $V_n \leq 2,3 \text{ kV}$, aplica-se $FD95\% = 3,0\%$ (Tabela 3). Logo, o desequilíbrio de entrada 3,38% estava acima do limite; após o regulador (2,68%), ficou abaixo.

Para 380 V fase-fase, a faixa adequada é 350–399 V (Tabela 4). Na entrada, houve leitura acima de 399 V (por exemplo, 406,6 V), caracterizando sobretensão; na saída, as leituras retornaram à faixa adequada.

Destaca-se que as bombas operam em função do sistema de controle e força contidos no painel de acionamento. Esse painel é responsável pelo controle, pela proteção e pelo acionamento das bombas, e caso haja uma sobrecarga na rede ou problemas de qualidade, as proteções internas serão sensibilizadas e desligarão os equipamentos.

Vale destacar que a intermitência na operação do sistema é indesejável, uma vez que o abastecimento de água exige continuidade operacional para assegurar níveis adequados de pressão e vazão nas redes adutora e distribuidora. Na prática, com as instalações operando sem interrupções, a manutenção da rede pressurizada garante a integridade do fornecimento. Contudo, em cenários de interrupção por problemas no fornecimento de energia, a rede distribuidora é despressurizada, demandando um tempo considerável para sua plena normalização.

CONCLUSÕES

A presente investigação, conduzida por método experimental com o posicionamento de um regulador de tensão de pequeno porte entre o quadro geral de baixa tensão e o painel de acionamento de conjuntos motobombas, com monitoramento das tensões de entrada e saída para análise comparativa, permitiu avaliar o desempenho de um regulador móvel em baixa tensão para atendimento pontual de unidades operacionais com distúrbios de qualidade de energia.

Na Captação de Ouriçangas, o equipamento operou de forma esperada, reduzindo o desequilíbrio de tensão de 2,03% (entrada) para 1,10% (saída), conforme as medições registradas.

Na Captação de Rio Real, verificou-se condição de alimentação em desconformidade com os limites normativos, com sobretensão (por exemplo, 406,6 V fase-fase) e desequilíbrio de 3,38% na entrada, situação associada à

atuação do sistema de proteção do equipamento. Após a aplicação do regulador, as tensões na saída retornaram para o intervalo 368,8–378,8–372,2 V e o desequilíbrio foi reduzido para 2,68%, ficando abaixo do limite de 3% indicado para o indicador FD95% no nível de tensão considerado, além de retornar à faixa adequada de atendimento.

Por outro lado, na Captação de Cações, o equipamento apresentou desempenho divergente do esperado. Devido à proximidade do regulador em relação ao inversor de frequência de 50 CV (inferior a 2 m) e à inexistência de reator/filtro de entrada, suspeita-se que a distorção harmônica e sinais eletromagnéticos tenham interferido no circuito de controle do regulador, indicando a necessidade de critérios mínimos de instalação e mitigação para ambientes com elevada emissão eletromagnética.

Dessa forma, com base nos resultados obtidos, conclui-se que o regulador móvel apresentou viabilidade técnica para estabilização de tensão e redução do desequilíbrio em duas das três unidades testadas, inclusive em cenário com desconformidades frente ao PRODIST (ANEEL, 2020). Entretanto, o desempenho pode ser comprometido quando instalado em proximidade imediata de inversores de frequência sem filtragem, sendo recomendável incorporar medidas de imunidade/filtragem (por exemplo, reatores/filtros e critérios de afastamento) e ampliar

a campanha de ensaios para consolidar limites de aplicação e robustez do conjunto.

Quanto à potencialidade de mercado, os resultados reforçam a pertinência de uma solução móvel e portátil para o setor de saneamento, no qual estações de bombeamento são dispersas e frequentemente instaladas a grandes distâncias de alimentadores e subestações, ficando mais vulneráveis a instabilidades do fornecimento e a falhas de reguladores da concessionária, o que compromete a continuidade operacional.

Além disso, a intermitência operacional é indesejável, pois a interrupção por problemas de energia pode levar à depressurização da rede e demandar tempo considerável para normalização do abastecimento.

Nesse contexto, um regulador transportável, dimensionado para fácil deslocamento por equipes de manutenção e com capacidade para atender motores de até 50 CV (abrangendo parcela majoritária das instalações de baixa tensão da companhia), apresenta potencial para utilização como recurso contingencial e estratégia operacional planejada, seja por formação de “base móvel” regional (equipamento compartilhado entre unidades), seja por modelo de prestação de serviço para atendimento pontual e periódico, reduzindo indisponibilidades e impactos operacionais.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST: Módulo 8 – Qualidade da energia elétrica** (Revisão 11). Brasília, DF: ANEEL, 2020.

CORNELL, E. P. *et al.* **Improved motors for utility applications: final report**. Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute, 1982.

MAMEDE FILHO, João. **Manual de equipamentos elétricos**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013. 669 p.

MESH ENGENHARIA. **Regulador de tensão**. 2023. Disponível em: <https://meshengenharia.com/2023/12/19/regulador-de-tensao/>. Acesso em: 03 abr. 2025.

MOTOR RELIABILITY WORKING GROUP. Report of large motor Reliability Survey of Industrial and Commercial installations: Part I and Part II. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. IA-21, n. 4, p. 853-872, jul./ago. 1985.