



Universidade Federal de Uberlândia

Faculdade de Engenharia Elétrica

JHÔNATAS CÉSAR MARQUES DA SILVA

**ESTUDO DE CASO PARA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA EM
MOTOBOMBAS CAPTADORAS DE ÁGUA**

Uberlândia – MG

2022

JHÔNATAS CÉSAR MARQUES DA SILVA

**ESTUDO DE CASO PARA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA EM
MOTOBOMBAS CAPTADORAS DE ÁGUA**

Trabalho desenvolvido como requisito parcial de
avaliação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso
do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal
de Uberlândia

Assinatura do Orientador – Carlos Eduardo Tavares

Assinatura do 1º membro da banca – Luciano Coutinho Gomes

Assinatura do 2º membro da banca – Augusto Wohlgemuth Veloso da Silveira

Uberlândia – MG
2022

Dedico esse trabalho a meus pais, Antônio João da Silva Júnior e Luizângela Marques Silva pelo apoio e força ao longo da jornada acadêmica, à minha esposa, Ádila Hanna Ribeiro de Oliveira Marques, pelo incentivo contínuo durante todo do curso, meu irmão Tardelli Marques Silva e minha irmã Júnia Danielle Marques Silva, pela inspiração, fé depositada e em acreditar sempre.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, meu salvador, por ter me proporcionado força, saúde e paz interior para poder vencer todos os obstáculos da graduação e àqueles que a vida nos traz. Agradeço à minha mãe, Luizângela Marques Silva e ao meu pai, Antônio João da Silva Júnior, por todo apoio e carinho dado, pela motivação incondicional durante este trajeto e pelo amor pleno.

Ao meu irmão, Tardelli Marques Silva, que mesmo distante, nunca deixou de apoiar-me com palavras motivadoras, companheirismo e atenção.

À minha irmã Júnia Danielle Marques da Silva, que, também distante, nunca descreditou, e que com todo amor, incentivou a todo momento, juntamente com seu esposo Rafael, meu cunhado.

À minha esposa Adila Hanna Ribeiro de Oliveira Marques, batalhadora, companheira do dia a dia, que não mediu esforços para que este sonho se realizasse. Agradecimento especial ao meu tio Fernando César Resende, pelo suporte oferecido, auxiliando-me durante a graduação. Obrigado, tios, tias, primos, primas e demais familiares.

Aos professores da Universidade Federal de Uberlândia, em destaque aos da FEELT, pelo trabalho, companheirismo, amizade, desafios e pela oportunidade que proporcionaram a mim e a todos os alunos na qual passaram por suas salas de aula. Enfim, obrigado à direção e administração da Universidade Federal de Uberlândia pela doação, esforço e excelente corpo de colaboradores que dispõem.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo de caso real que evidencia a importância de considerar aspectos relevantes da eficiência energética, ainda em projeto, para instalações elétricas de acionamentos de motobombas para captação de água em sistemas públicos de grande porte. Voltado para questões envolvendo o fator de potência da carga, este trabalho mostra que a compensação de reativos diretamente localizada na carga pode trazer grandes benefícios na redução de perdas elétricas internas à instalação e até mesmo no dimensionamento dos demais equipamentos que fazem o acoplamento da carga com o supridor. Geralmente, a compensação é feita no ponto de conexão com o supridor com o intuito de evitar pagamentos de multas à concessionária por excedente de reativos. Este trabalho, o qual apresenta uma comparação do dimensionamento do transformador considerando a carga sem a compensação de reativos versus a carga com a compensação de reativos, mostra que a consideração da compensação local ainda em projeto pode impactar substancialmente na especificação dos equipamentos, com consequências técnicas e financeiras consideráveis.

Palavras chave: Correção fator de potência, projeto captação de água, motobombas, bombas anfíbias.

ABSTRACT

This work presents a real case study that considers the importance of the relevant aspects of energy efficiency, still in design, for electrical installations of motor pumps to capture water in large public systems. Aimed at problems related to the same load power factor, the work can show that there is a compensation of reactives located in the load that can occur in the reduction of loads and even load problems with the other equipment. the supplier. The compensation device is not designed for connection with the supply device in order to avoid packets of fines to the concessionaire for reactives. This work, which a comparison of transformer sizing considering the load without a comparison of reactives versus a load with a comparison of reactives, shows the consideration of project measurement that can impact the location even in the equipment specification, with consequences technical and considerable.

Keywords: Power factor correction, water intake project, motor pumps, amphibious pumps.

Lista de figuras/Tabelas

- Figura 1 - Aqueduto de Segóvia, Espanha
- Figura 2 – Sistema básico de captação de água.
- Figura 3 – Motobomba emersa e motobomba imersa.
- Figura 4 – Representação do triângulo de potências.
- Figura 5 – Relação fator de potência x seção cabo condutor
- Figura 6 – Variação potência do transformador em função do fator de potência
- Figura 7– Motobomba anfíbia – 250 cavalos (CV).
- Figura 8 – Motobomba anfíbia – 150 cavalos (CV).
- Figura 9 – Transformador com núcleo imerso a óleo (500 kVA).
- Figura 10 – Esquema de compensação individual do fator de potência.
- Figura 11 – Triângulo de potência após correção.
- Figura 12 - Capacitores utilizados para implementação do projeto.
- Figura 13 – Monitoramento em tempo real motobomba 150 cv (outubro/2021)
- Figura 14 – Processo de instalação das motobombas concluído (I)
- Figura 15 – Processo de instalação das motobombas concluído (II)
- Figura 16 – Sala comando e acionamento Motobombas e banco de capacitores.
- Tabela 1 - Dados nominais motobombas e transformador.

LISTA DE ABREVIATURAS

i – Corrente elétrica.
cv – Cavalos de potência.
V – Tensão elétrica.
kW – Kilowatts.
fp – Fator de potência.
 η – Rendimento.
A – Ampere.
P – Potência ativa (kW).
Q – Potência reativa (kvar).
S – Potência aparente (VA).
kvar – Unidade de medida de potência reativa.
kVA – Unidade de medida de potência aparente.
 Q_c – Potência reativa calculada para correção do fator de potência.
 S_1 – Potência aparente antes da correção.
 S_2 – Potência aparente após correção.
 Q_1 – Potência reativa antes da correção.
 Q_2 – Potência reativa após correção.
tg – Tangente

SUMÁRIO

1. Objetivos	10
2. Estrutura	10
2.1 - Introdução	11
2.1.1 – Fator de potência	14
2.2 - Desenvolvimento do estudo	16
2.2.1 – Cálculos do dimensionamento	18
2.2.2 – Alternativas propostas	19
2.3 - Implementação do estudo e resultados obtidos	20
2.3.1 – Cálculos correção do fator de potência	21
2.3.2 – Resultados obtidos	23
3. Conclusão e considerações finais	25
4. Referências	26

1 – Objetivos

Este trabalho visa o estudo de caso encontrado em redes de captação de água, presente na maioria das empresas que exercem este tipo de atividade. Trata-se de um estudo de grande relevância, pois, neste segmento a falta de supervisão da parte elétrica do sistema pode implicar em grandes perdas de energia elétrica. Portanto, a mitigação desses problemas é um dos principais objetivos de qualquer departamento que busca eficiência energética nas empresas do setor de captação e saneamento.

2 – Estrutura

A apresentação deste trabalho está estruturada da seguinte forma:

- **2.1 - Introdução:**

Neste tópico introdutório tem-se a descrição do problema encontrado, os principais objetivos da pesquisa, a localidade onde houve a pesquisa e local da implementação da solução encontrada.

- **2.2 - Desenvolvimento do estudo:**

Neste tópico é apresentada a realização do estudo, dificuldades encontradas, procedimentos na coleta dos dados e levantamento do material para implementação e procedimento para a análise e para o levantamento de dados, além de possíveis soluções.

- **2.3 - Implementação do estudo e resultados obtidos:**

Neste tópico encontra-se os procedimentos para a execução da pesquisa, análise dos dados obtidos, viabilidade financeira para possível implementação do estudo, implementação e análise dos resultados obtidos.

- **3 - Conclusão e considerações finais:**

Neste tópico é feita uma breve descrição do trabalho estudado, breve resumo dos resultados obtidos, impactos gerados pelo estudo, limitações encontradas e possíveis projetos futuros.

2.1 - Introdução

Desde a mais remota civilização conhecida, a utilização dos recursos naturais norteou o surgimento das grandes cidades. Tendo a água como principal recurso natural, os homens superaram vários obstáculos, naturais ou não, a fim de obter esse importantíssimo recurso, fonte primordial para a vida. Porém, nem sempre foi uma tarefa simples. Ao longo do tempo, várias técnicas foram utilizadas para a obtenção, armazenamento e abastecimento de água nas cidades, pois, além do próprio consumo humano, havia a necessidade da água para agricultura e pecuária, atividades de extrema importância durante o processo evolutivo das civilizações [1]. A partir do momento que iniciou o armazenamento de água em poços, aquedutos (desvio de rios ou pela chuva), transporte em vasos cerâmicos ou qualquer outro recipiente, passando pelas bombas manuais e bombas a vapor até os processos mais modernos de captação d'água, a demanda por água sempre foi crescente e diferentes técnicas de captação tornaram-se cada vez mais necessárias [2]. A Figura 1 mostra um aqueduto espanhol do século I d.C.

Figura 1 – Aqueduto Segóvia na Espanha.



Fonte: Aqueduto de Segóvia, Espanha. In: MORAES, José Geraldo V. de. História integrada: Geral e do Brasil. São Paulo: Atual, 1998. p. 76.

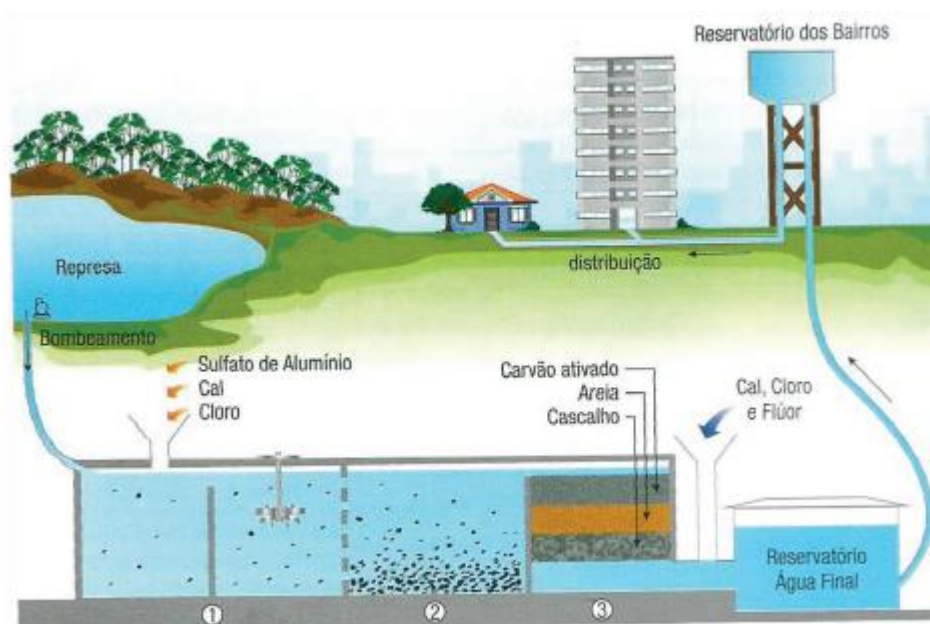
Com o advento tecnológico passou-se a utilizar energia elétrica na alimentação de motores e bombas, aumentando a capacidade de captação d'água em proporção com o aumento populacional. Mas por outro lado a degradação do meio ambiente e uso incorreto da energia elétrica para este fim, tornou-se algo preocupante o que gera grandes discussões atualmente sobre este assunto. [3]

As bombas são as responsáveis, desde a primeira revolução industrial, pelo bombeamento de água ou outro qualquer fluido. Dotadas de elevadas potências, são capazes de bombear enorme quantidade de água por grandes distâncias ou qualquer desnível geográfico. Embora a engenharia mecânica empregada seja praticamente a mesma desde sua invenção, o que mudou no sistema de bombeamento atual foi o que a tecnologia trouxe de melhorias no modo de funcionamento dessas bombas. A alimentação elétrica a partir de motores monofásicos e os poderosos motores de indução trifásicos tem sido responsável pela força motriz ao funcionamento das bombas nas últimas décadas.

De uma forma bem simplificada, existem dois tipos básicos de bombas para captação de fluidos: as bombas volumógenas (deslocamento positivo) e as rotodinâmicas (turbo bombas, motobombas ou hidrodinâmicas). As bombas volumógenas tem como principal característica o transporte de fluidos com viscosidade alta ou extrema, como por exemplo concreto, asfalto ou compostos particulados na presença de água. Já as bombas rotodinâmicas estão mais presentes em transportes de fluidos menos viscosos, com água, compostos industriais, captação de minérios, dentro outros. [4]

Há casos em que a própria gravidade desempenha o papel de captação de água, conhecido por escoamento por gravidade, mas em grande parte, a tarefa é feita através de bombas. Isso ocorre devido o desnível geográfico da localização da fonte hídrica, ou seja, captada em regiões mais baixas geograficamente para algum reservatório localizado em alguma região mais alta (figura 2). De acordo com termos técnicos utilizados na mecânica hidráulica, pode-se dizer que o deslocamento d'água, neste caso, ocorre no local de menor energia para local de maior energia. Importante ressaltar que há perdas de energia do próprio transporte deste fluido durante o caminho, porém, varia conforme a composição dos dutos por onde este fluido é transportado. Neste caso é necessário “oferecer” maior quantidade de energia para proporcionar que este transporte seja realizado com sucesso, fator principal para a utilização de bombas. Após essa primeira captação aos reservatórios, feita de uma fonte primária do recurso hídrico, a água é redistribuída aos setores das cidades, sendo estes bairros, outros pequenos reservatórios ou diretamente para indústrias de maior porte.

Figura 2 – Esquema de uma estação de tratamento de água.



Fonte: <http://ineam.com.br/solucao-para-a-crise-hidrica-passa-pelo-tratamento-da-agua-que-volta-ao-sistema/>.

Desde meados do século passado, ao fazer a captação de água das fontes de recursos hídricos em regiões mais baixas e aumentar o volume d'água a ser captado, utiliza-se motores elétricos acoplados direta ou indiretamente a bombas, também chamadas de motobombas. Diferentemente das bombas manuais, à vapor e bombas convencionais, as motobombas são construídas para atuar de forma imersa ou emersa, denominadas motobombas híbridas ou anfíbias (figura 3), bastante utilizadas em despressurização de linhas de abastecimento em saneamento, captação de água em rios e lagos, mineração, recirculação de água em tratamento de efluentes (despejos líquidos provenientes de atividades humanas e industriais) e alimentação de sistemas de irrigação.

Figura 3 – Motobomba emersa (esq.) e motobomba imersa (dir.).



Fonte: <https://helibombas.com.br/produtos/bombas-anfibia/> [2]

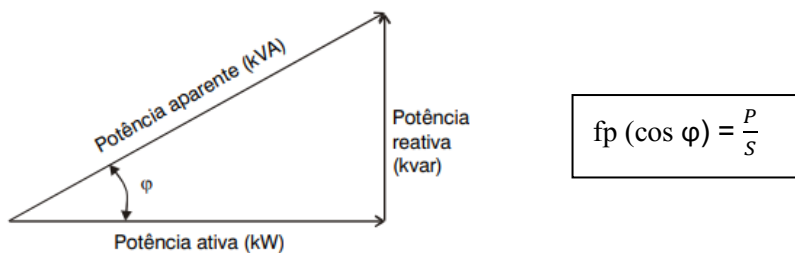
As motobombas anfíbias são caracterizadas por serem máquinas elétricas de grande potência. Assim, a corrente elétrica demandada pelo equipamento é elevada, na qual, exige-se uma fonte confiável de alimentação, normalmente oriunda de transformadores. A capacidade de corrente disponibilizada pelos transformadores é diretamente

proporcional à potência que o mesmo pode oferecer. Neste sentido, além de toda a preocupação da eficiência dos sistemas mecânicos, a parte elétrica deste processo, principalmente sob o aspecto de motores elétricos e transformadores, assume grande importância em termos do uso eficiente da energia elétrica envolvida neste processo. Este é o foco principal deste trabalho, o qual apresenta um caso real que evidencia a grande importância do uso eficiente da energia elétrica em sistemas de bombeamento hidro sanitário e os possíveis impactos decorrentes de sua negligencia.

2.1.1 – Fator de potência

O **fator de potência** é um dos principais parâmetros a serem analisados no estudo da eficiência elétrica nos sistemas elétricos atuais. Ele é definido como a razão entre a potência ativa (P) e potência aparente (S) e indica a eficiência energética do sistema. Quanto maior for o fator de potência, mais eficiente será o sistema. Uma representação muito utilizada no meio acadêmico é o triângulo de potências (figura 6).

Figura 4 – Representação do triângulo de potências.



Triângulo de potências Fonte: (CODI, 2004)

É de extrema importância a correção do fator de potência para patamares aceitáveis e de acordo com a legislação vigente, pois, há enormes prejuízos ao operar uma planta industrial com fator de potência baixo, são eles:

- Perdas elétricas na instalação na forma de calor: A corrente elétrica aumenta com o excedente de potência reativa, levando o aumento de temperatura dos cabos condutores e demais equipamentos. Com este aumento de temperatura fica impossível a utilização plena do sistema instalado. Tratando-se de equipamentos e materiais com valores elevados, é mais viável, financeiramente e estruturalmente, a compensação do fator de potência do que a substituição dos componentes. A figura 5 apresenta a influência do baixo fator de potência na seção transversal adequada dos cabos condutores.

Figura 5 – Relação fator de potência x seção cabo condutor

Fator de Potência	Seção relativa do cabo
1,0	1,0
0,90	1,23
0,80	1,56
0,70	2,04
0,60	2,78
0,50	4,0

Fonte: Manual correção fator de potência – WEG – www.weg.net – pág.8

Observa-se que a queda do fator de potência de 1,00 para 0,70 exige que a seção dos cabos condutores seja o dobro do dimensionado. O cenário piora quando o fator de potência atinge o patamar de 0,50 fazendo com que a seção dos cabos condutores seja quatro vezes maior para suportar a mesma potência ativa demandada pelo sistema.

- Ocorrência de quedas de tensão no sistema e variações de tensão: Com o excedente de reativos no sistema ocorre o superaquecimento da fiação (perdas proporcionais ao quadrado da corrente devido ao aumento da corrente que circula pela instalação. Assim, ocasiona perdas adicionais no sistema por calor. Os motores tendem a compensar a queda da tensão aumentando a corrente, além de possível atuação dos sistemas de proteção, ocorrendo assim a interrupção de energia do sistema. Com grandes variações na tensão equipamentos mais sensíveis podem vir a serem danificados;

- Redução do aproveitamento pleno do transformador: Ao serem dimensionados para alguma instalação, os transformadores devem atender à potência de todos os equipamentos projetados na planta industrial, contudo, devido ao excesso de reativos no sistema, os transformadores podem ficar comprometidos. A título de exemplo, pode-se conferir na figura 6 um exemplo da especificação de um transformador alimentando uma carga de 500 kW considerando diferentes valores de fator de potência.

Figura 6 – Variação potência do transformador em função do fator de potência

Potência útil absorvida (kW)	Fator de potência	Potência do transformador kVA
500	0,5	1000
	0,8	625
	1	500

- Possíveis multas aplicadas pela concessionária de energia: A potência reativa não realiza trabalho, porém, segundo a ANEEL por meio da resolução normativa N° 414/2010 artigo 76 [4], dispõem que o fator de potência de uma unidade consumidora do grupo A (agrupamento composto de unidades consumidoras com fornecimento em tensão igual ou superior a 2,3 kV), deve ser verificado pela distribuidora por meio de medição permanente e obrigatória, prescreve ainda que o valor mínimo permitido para o fator de potência indutivo ou capacitivo seja de 0,92. De acordo com a Resolução N° 456 [3] da ANEEL, de 29 de novembro de 2000 (ANEEL, 2000), tanto o excesso de energia reativa e indutiva como o de energia capacitiva é medida e faturada pelos consumidores do grupo A.

Portanto, é cobrado a título de multa por excesso de reativo quando o sistema elétrico é operado com fator de potência abaixo de 0,92 [Prodist, módulo 8, item 3]. Assim, a eficiência do sistema é medida por este fator. A título de exemplo, outros países também estabeleceram o fator de potência próximo ou igual ao Brasil, a saber:

- Espanha – 0,92
- Coréia do Sul – 0,93
- França – 0,93
- Bélgica – 0,95
- Argentina – 0,95
- Alemanha – 0,96
- Suíça – 0,96

2.2 – Desenvolvimento do estudo

O estudo foi realizado numa autarquia da Prefeitura Municipal da cidade de Uberlândia, estado de Minas Gerais. Empresa destinada à prestação de serviços de saneamento, captação, tratamento e distribuição de água para a população e indústrias presentes na cidade.

O projeto idealizado pela empresa previa a instalação de três (3) motobombas, de mesma marca, sendo duas delas com potências distintas da terceira motobomba sendo uma motobomba com potência de 250 cv (figura 7) e duas motobomba de 150 cv (figura 8).

Figura 7 – Motobomba anfíbia – 250 cavalos (cv).



Fonte: Autor

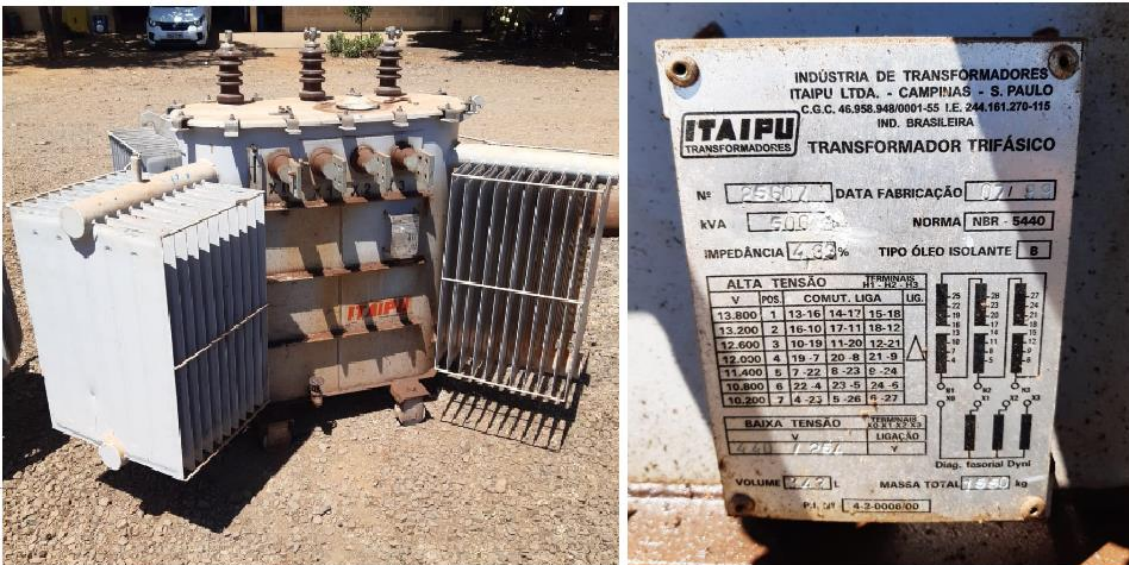
Figura 8 – Motobomba anfíbia – 150 cavalos (cv).



Fonte: Autor

A escolha das três motobombas foi pelo estudo da pressão necessária para a realização do trabalho em uma elevatória de água bruta. A empresa já possuía disponível em estoque um transformador de 500kVA. Contudo, de acordo com os estudos e cálculos, apresentados a seguir, constatou-se que o transformador disponibilizado (figura 9) para a execução do projeto não era viável, ou seja, o mesmo não seria corretamente dimensionado pelo fato da corrente demandada na operação conjunta das três motobombas exigir um nível de corrente que o transformador não poderia disponibilizar. A tabela 1 apresenta os dados nominais destes equipamentos e na sequência são apresentados os passos para o dimensionamento do sistema descrito.

Figura 9 – Transformador com núcleo imerso a óleo (500 kVA).



Fonte: Autor

Tabela 1 – Dados nominais motobombas e transformador.

Dados			
Dados placa	Motobomba 250 cv	Motobomba 150 cv	Transformador
Potência	184 kW	110,4 kW	550 kVA
Tensão (V)	440	440	13800/440
Fator de potência	0,81	0,75	-
Rendimento (%)	91	91	-

2.2.1 - Cálculos do dimensionamento

I - Motobomba 250 cv:

- Primeiramente, deve-se transformar a unidade de potência de cavalos (cv) para kW:

$$\begin{aligned} 1 \text{ cv} &\cong 736 \text{ Watts} \\ 250 \text{ cv} &\cong 184000 \text{ Watts} \end{aligned}$$

$$i = \frac{\text{Potência}}{\sqrt{3} \cdot V \cdot \cos \phi \cdot f \cdot p \cdot \eta} = \frac{184000}{\sqrt{3} \cdot 440 \cdot 0,81 \cdot 0,91} \rightarrow i \cong 327,939 \text{ Amperes (A)} \quad (1)$$

II - Motobomba 150 cv:

- Primeiramente, deve-se transformar a unidade de potência de cavalos (cv) para kW:

$$\begin{aligned} 1 \text{ cv} &\cong 736 \text{ Watts} \\ 150 \text{ cv} &\cong 110400 \text{ Watts} \end{aligned}$$

$$i = \frac{\text{Potência}}{\sqrt{3} \cdot V \cdot \cos \phi \cdot f \cdot p \cdot \eta} = \frac{110400}{\sqrt{3} \cdot 440 \cdot 0,75 \cdot 0,91} \rightarrow i \cong 212,504 \text{ Amperes (A)} \quad (2)$$

III – Calculo corrente (I) fornecida pelo transformador:

$$i = \frac{\text{Potência}}{\sqrt{3} \cdot V} = \frac{500000}{\sqrt{3} \cdot 440} \rightarrow i \cong 656,858 \text{ Amperes (A)} \quad (3)$$

IV – Resultados obtidos:

Corrente disponibilizada pelo transformador = 656,858 A

Corrente exigida pela motobomba 250 cv = 327,939 A

Corrente exigida pela motobomba 150 cv = 212,504 A

Assim:

i_{total} (1 motobomba 250 cv + 2 motobombas 150 cv) $\rightarrow i_{\text{total}} = 752,947$ A

Ao se comparar a corrente total solicitada pelo sistema de bombeamento com a corrente nominal do transformador, percebe-se que o transformador ficaria subdimensionado para esta condição de carga, ou seja o transformador não suporta a potência demandada pelas três motobombas operando simultaneamente, em plena carga.

Dentro deste cenário, foram realizados estudos para encontrar a melhor solução. A primeira proposta seria comprar um novo transformador de maior potência enquanto a segunda proposta seria fazer um estudo de compensação de reativos de modo a deixar o sistema mais eficiente tendo em vista o baixo fator de potência observado para as motobombas (tabela 1), conforme descrito na sequência.

2.2.2 – Alternativas propostas

1ª alternativa: Compra de um transformador novo

A compra de um novo transformador é uma solução para o caso em estudo, pois, com potência nominal maior o transformador poderia suprir a demanda de potência das três motobombas em operação simultânea. Foi estudada a compra de um transformador de 750 kVA para o projeto, conforme apresentado nos cálculos que se seguem.

Calculo corrente (I) fornecida pelo transformador:

$$i = \frac{\text{Potência}}{\sqrt{3} \cdot V} = \frac{750000}{\sqrt{3} \cdot 440} \rightarrow i \cong 984,120 \text{ Amperes (A)} \quad (4)$$

i_{total} (1 motobomba 250 cv + 2 motobombas 150 cv) $\rightarrow i_{\text{total}} = 752,947$ A

Percebe-se pela equação (4) que no transformador de 750kVA aceita um carregamento correspondente em até 984,12 amperes, valor este superior aos 752,94 solicitados pela carga total. Contudo, pode-se constatar outras implicações associadas a esta solução:

- Custo inicial para compra do transformador foi prontamente afastado. Por se tratar de autarquia pública, o prazo para licitações, logística para transporte e demais custos de instalação impediriam a instalação de forma célere;
- Necessidade de redimensionamento de cabos de proteção e dos alimentadores, redimensionamento estrutural do projeto civil. Assim, tornou-se inviável a adoção desta alternativa.

2ª alternativa: Utilização do banco de capacitores para compensação de reativos

Os motores de indução trifásicos (cargas indutivas) e transformadores necessitam dos campos eletromagnéticos para o perfeito funcionamento requerendo assim dois tipos de potência: potência ativa (P) e potência reativa (Q). A potência ativa é aquela responsável pela execução de tarefas (realização de trabalho) tendo o Watt como medida de unidade física. A potência reativa, tendo o Var como unidade de medida, é responsável pelo campo magnético das cargas indutivas, e, apesar de ser essencial no processo de rotação de máquinas indutivas, esta potência tem determinado valor limite a ser fornecida pela concessionária, conforme legislação vigente.

Existem várias formas de mitigar as perdas elétricas presentes em plantas industriais e uma das principais medidas adotadas é a utilização de capacitores, ou banco de capacitores para a correção do fator de potência. Os capacitores são constituídos por duas placas condutoras e isoladas, que, quando ligadas a uma fonte de tensão em seus terminais realizam a compensação da energia reativa característica das cargas indutivas (MAMEDE, 2007), corrigindo assim o fator de potência.

2.3 – Implementação do estudo e resultados obtidos

Existem diversas formas para a correção do fator de potência utilizando banco de capacitores. Não é viável a correção deste fator na entrada de alta tensão do sistema, pois além do custo elevado dos equipamentos, somente será corrigido o fator de potência visto pela concessionária, permanecendo os mesmos problemas internos da empresa, anteriormente citados. A correção do fator de potência na entrada em nível de baixa tensão também é uma prática para maior grupo de cargas com potências nominais distintas e também terá impactos somente do ponto de vista da concessionária. A maneira com maior viabilidade técnica, porém conhecida como de maior custo é a correção individual. Este tipo de correção consiste em corrigir o fator de potência apenas localmente, pois assim, há redução de perdas energéticas em toda a instalação, favorece o sistema de acionamento e a compensação de energia reativa é localizada, ou seja, há incremento de reativos somente onde é necessário. A figura 10 ilustra este tipo de solução.

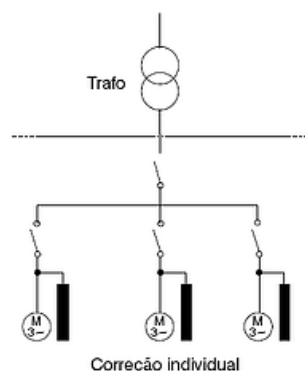
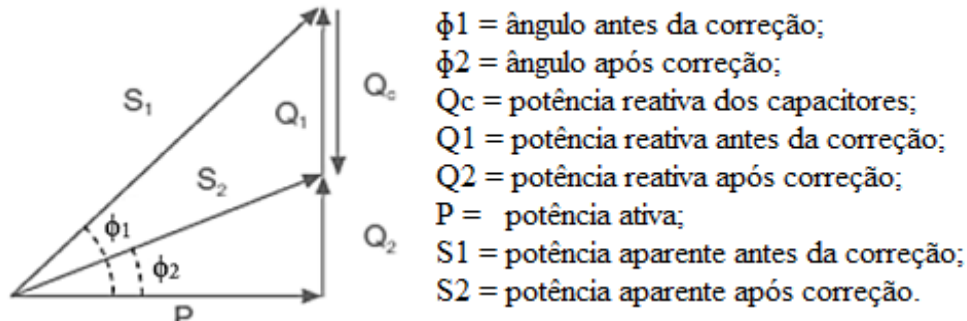


Figura 10 – Esquema de compensação individual do fator de potência.

Iniciou-se a implementação do estudo de caso com os cálculos da correção do fator de potência, pois, das três motobombas implementadas, duas tinham como fator de potência nominal $\cos \phi = 0,75$ e uma com fator de potência nominal $\cos \phi = 0,81$. Para o correto dimensionamento do banco de capacitores, deve-se calcular o fator de potência de acordo com a planta ou equipamento a ser corrigido. Sabendo o fator de potência do equipamento e o fator de potência desejado, é possível calcular a potência reativa (Q_c) que os capacitores devem fornecer para a correção do fator de potência. Assim, temos:

Figura 11 – Triângulo de potência após correção



Fonte: (SILVA, 2009, p.36).

2.3.1 – Cálculos correção do fator de potência do sistema estudado

- Correção fator de potência Motobomba 250 cv:

$$P_{(250cv)} = 184kW$$

$$\cos \phi_1 = 0,81 \rightarrow \phi_1 \cong 36^\circ$$

$$\cos \phi_2 = 0,92 \rightarrow \phi_2 \cong 23^\circ$$

$$Q_{c(250cv)} = \frac{P}{\eta} \cdot [t g(\phi_1) - t g(\phi_2)]$$

$$Q_{c(250cv)} = \frac{184000}{0,91} \cdot [t g(36^\circ) - t g(23^\circ)]$$

$$Q_{c(250cv)} \cong 61,07 \text{ kvar}$$

- Correção fator de potência Motobomba 150 cv:

$$P_{(150cv)} = 110,4kW$$

$$\cos \phi_1 = 0,75 \rightarrow \phi_1 \cong 41^\circ$$

$$\cos \phi_2 = 0,92 \rightarrow \phi_2 \cong 23^\circ$$

$$Q_{c(150cv)} = \frac{P}{\eta} \cdot [t g(\phi_1) - t g(\phi_2)]$$

$$Q_{c(150cv)} = \frac{110400}{0,91} \cdot [t g(41^\circ) - t g(23^\circ)]$$

$$Q_{c(150cv)} \cong 53,96 \text{ kvar}$$

Baseando-se nos cálculos apresentados, tem-se:

$$Q_c \text{ (250 cv)} \cong 61,07 \text{ kvar}$$

$$Q_c \text{ (150 cv)} \cong 53,96 \text{ kvar}$$

Assim, para corrigir o fator de potência das 3 motobombas é necessário a instalação (individual) de bancos de capacitores que forneçam as potências especificadas nos cálculos apresentados. No estoque da empresa continha os capacitores necessários para a implementação estudada, conforme indicado na figura 12.

Figura 12 - Capacitores utilizados para implementação do projeto

SIBRATEC			WEG UCWT 10,0 V49 11758279			WEG UCWT 5,00 V49 10046020		
MODELO	CS25D440		VN	50Hz	60Hz	VN	50Hz	60Hz
Composição	Ligação	Tolerância	(V)	(kvar)	(kvar)	(V)	(kvar)	(kvar)
3x114,2uF	Δ	- 5% ~+10%	440	8,33	10,00	440	4,17	5,00
			415	7,41	8,90	415	3,71	4,45
			380	6,22	7,46	380	3,11	3,73
Reativo			Cn: 3x45,7 $\mu\text{F} \pm 5\%$ \square Δ SH			Cn: 3x22,8 $\mu\text{F} \pm 5\%$ \square Δ SH		
Rede	Q (60Hz)	Q (50Hz)	IEC 60831-1(1996-A1 2002) / IEC 60831-2 (1996)			IEC 60831-1(1996-A1 2002) / IEC 60831-2 (1996)		
3x440Vca	25 kVAr	20,8 kVAr	-25/D	UI=3/-kV	NO PCB	-25/D	UI=3/-kV	NO PCB
3x380Vca	18,6 kVAr	15,5 kVAr	L: 1110317151	10/08/17		L: 1109975428	03/07/17	
Ui = 3/-kV	Tmax = 55°C	SH	AFC 10kA PROTECTED CSA C22.2 No. 190 (AMB 45°C)			AFC 10kA PROTECTED CSA C22.2 No. 190 (AMB 45°C)		

Fonte: Catálogo de componentes e especificações WEG e Sibratec

Em posse dos capacitores, a disposição necessária para a adequada correção será da seguinte forma:

- Bomba (250 cv) = 2 capacitores 25 kvar + 1 capacitor 10 kvar + 1 capacitor 5 kvar = **65 kvar**
- Bomba (150cv) = 2 capacitores 25 kvar + 1 capacitor 5 kvar = **55 kvar**

Após a correção do fator de potência das motobombas, a corrente consumida passará a ser conforme apresentado na sequência:

I - Motobomba 250 cv:

$$i = \frac{\text{Potência}}{\sqrt{3} \cdot V \cdot \cos \phi \cdot \eta} = \frac{184000}{\sqrt{3} \cdot 440 \cdot 0,92 \cdot 0,91} \rightarrow i \cong 288,386 \text{ Amperes (A)}$$

II - Motobomba 150 cv:

$$i = \frac{\text{Potência}}{\sqrt{3} \cdot V \cdot \cos \phi \cdot \eta} = \frac{110400}{\sqrt{3} \cdot 440 \cdot 0,92 \cdot 0,91} \rightarrow i \cong 173,032 \text{ Amperes (A)}$$

III – Calculo corrente (I) fornecida pelo transformador:

$$i = \frac{\text{Potência}}{\sqrt{3} \cdot V} = \frac{500000}{\sqrt{3} \cdot 440} \rightarrow i \cong 656,858 \text{ Amperes (A)}$$

IV – Resultados obtidos:

Corrente disponibilizada pelo transformador = 656,858 A

Corrente exigida pela motobomba 250 cv (após correção) = 288,386 A

Corrente exigida pela motobomba 150 cv (após correção) = 173,032 A

Assim, tem-se:

$i_{\text{total (corrigido)}}$ (1 motobomba 250 cv + 2 motobombas 150 cv) $\rightarrow i_{\text{total}} = 634,45 \text{ A}$

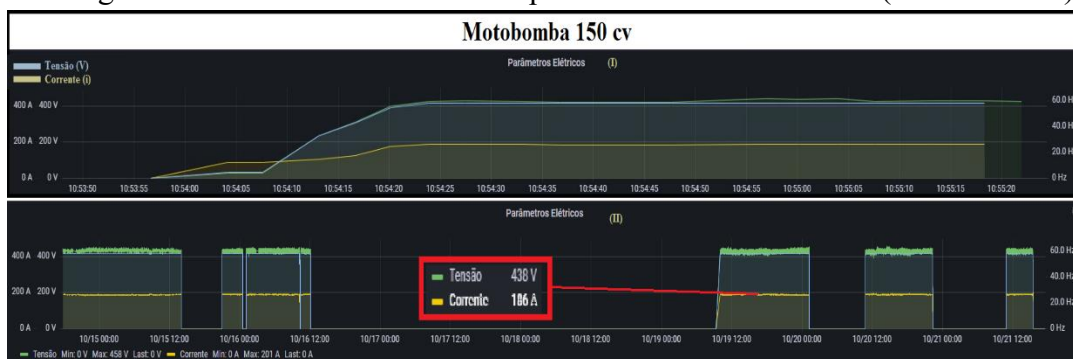
$i_{\text{transformador}} < i_{\text{total (corrigido)}}$ \rightarrow Transformador supri a exigência das motobombas instaladas.

Os cálculos foram feitos com base de correção um fator de potência de 0,92. Logo, caso a empresa tenha interesse em operar com um fator de potência maior, poderá fazê-lo, através do chaveamento de outros capacitores, mantendo assim o correto dimensionamento do transformador.

2.3.2 – Resultados obtidos após instalação

Apesar da operação simultânea das três motobombas ainda não ter sido necessária, o resultado obtido foi satisfatório. É possível constatar a redução da corrente da motobomba em operação (150 cv) conforme mostra a dados do monitoramento obtido (Figura 13).

Figura 13 – Monitoramento em tempo real motobomba 150 cv (outubro/2021)



Fonte: Sistema supervisorío departamento municipal de água e esgoto – Uberlândia-MG

As figuras 14 e 15 mostram a instalação do sistema real no local de operação e a figura 16 mostra o painel de acionamento das motobombas



Figura 14 – Processo de instalação das motobombas concluído (I)



Figura 15 – Processo de instalação das motobombas concluído (II)



Figura 16 – Sala comando e acionamento Motobombas e banco de capacitores.

3 – Conclusão e considerações finais

A captação da água, principal recurso natural escasso do planeta, ao longo dos anos evoluiu de forma exponencial. Diferentes meios de se obter esse recurso foram implementados durante o período evolutivo das civilizações e a proteção das fontes hídricas é de extrema importância, garantindo o abastecimento para as próximas gerações. Garantia esta que passa por novos meios de captação d'água, mas também pela eficiência de novos equipamentos evitando assim o desperdício desse bem tão valioso para a humanidade. Com este estudo foi possível aumentar, consideravelmente, a vazão d'água para a população de uma cidade de médio porte utilizando equipamentos reaproveitados (transformador) e robustas motobombas anfíbias, demandando menos energia do sistema elétrico.

Instalado numa estação de tratamento de água na zona rural da cidade de Uberlândia, as motobombas anfíbias mostraram ser bastante eficientes e, apesar dos cálculos serem feitos para a utilização das três motobombas simultaneamente, ainda não houve necessidade de operarem de forma conjunta. Contudo, o objetivo do trabalho foi alcançado, pois, após a instalação e monitoramento, caso haja a necessidade de operação das três motobombas em plena carga, o projeto implementado supre a exigência da planta tendo alcançado o objetivo desejado inicialmente. Outra observação importante é que a compensação de reativos local (por equipamento) além de trazer grandes benefícios ao funcionamento do sistema elétrico no âmbito da eficiência energética, também pode trazer grandes benefícios no dimensionamento e nos custos da implementação do sistema, sendo em alguns casos mais economicamente viável do que a compensação no ponto de conexão com a concessionária de energia.

4 – Referências

[1,2] Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005.

MAMEDE FILHO, J. (2007). Instalações Elétricas Industriais (7ª ed.). Rio de Janeiro, RJ, Brasil: LTC.

<https://helibombas.com.br/produtos/bombas-anfibias/>

[3] Agência Nacional de Energia Elétrica - (ANEEL). Resolução ANEEL nº 456. Brasília: ANEEL, 2000. p. 62.

[4] Eficiência energética em sistemas de bombeamento - ELETROBRÁS/PROCEL

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Resolução Normativa Nº 414/2010.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – Prodinst: Módulo 8 – Brasília: ANEEL, 2005.

MARTINHO, Edson. Distúrbio da energia elétrica. 3. ed. São Paulo: Saraiva, 2013. Pág.142.

WEG BRASIL S. A. Manual de correção de fator de potência. Disponível em <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-correcao-do-fator-de-potencia-958-manualportugues-br.pdf>. Acesso em 29 de maio de 2016

SILVA, M. C. I. Correção do fator de potência de cargas Industriais com dinâmica rápida. Dissertação de mestrado apresentado na universidade federal de Minas Gerais. Belo Horizonte - MG, 2009.