

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

MICHELE PAIVA DE OLIVEIRA

**PROPOSTA DE AUTOMAÇÃO DE ENERGIA REATIVA NO
SUPERMERCADO ESCOLA**

VIÇOSA
2015

MICHELE PAIVA DE OLIVEIRA

**PROPOSTA DE AUTOMAÇÃO DE ENERGIA REATIVA NO
SUPERMERCADO ESCOLA**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. José Carlos da Costa Campos.

VIÇOSA
2015

MICHELE PAIVA DE OLIVEIRA

**PROPOSTA DE AUTOMAÇÃO DE ENERGIA REATIVA NO
SUPERMERCADO ESCOLA**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 29 de Junho de 2015.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. José Carlos da Costa Campos - Orientador
Universidade Federal de Viçosa

Prof. Dr. José Tarcísio de Resende - Membro
Universidade Federal de Viçosa

Prof. Dr. Mauro de Oliveira Prates - Membro
Universidade Federal de Viçosa

“Todos os nossos sonhos podem-se realizar se tivermos a coragem de persegui-los.”

(Walt Disney)

*Dedico este trabalho, com muito carinho, aos meus pais, Edmar e Aida, e ao meu
irmão Guilherme.*

Agradecimentos

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus por tudo que Ele tem me concedido. Aos meus pais, Edmar e Aida, por todo amor, carinho e por nunca ter medido esforços para que eu pudesse realizar os meus sonhos. Ao meu irmão Guilherme, pela amizade incondicional. Aos meus avós que, no céu, intercederam por mim. Aos meus familiares, pela torcida que, de alguma forma, me ajudou a chegar até aqui. Aos meus amigos, pelo incentivo e apoio constantes. Ao meu orientador Prof. José Carlos, pela ajuda na realização desta monografia. A todos os professores, pelos conhecimentos compartilhados. Ao Supermercado Escola, por permitir a realização deste projeto, que foi possível com o empenho da equipe de eletricitas da PAD (Pró-Reitoria de Administração), extensivo a Pró-Reitora Leiza Maria Granzinoli por entender da importância do nosso trabalho. Muito obrigada, de coração, a todos que contribuíram para a conclusão dessa etapa.

Resumo

O fator de potência quantifica a parte útil da energia elétrica, sendo utilizado para medir a eficiência energética de uma instalação, visto que essa pagará pela energia, independentemente de ser ou não utilizada para realizar trabalho. Baixos valores de fator de potência resultam num aumento da corrente total, o que pode sobrecarregar o sistema elétrico, prejudicar a estabilidade e trazer inconvenientes, como perdas na instalação, quedas de tensão e subutilização da capacidade instalada. Também ocasiona o uso de condutores de maiores seções, o superdimensionamento dos dispositivos de comando e proteção, e possível má operação dos demais equipamentos conectados à mesma rede. Por causa disso, cada vez mais, há a busca por sua correção, que é introduzir elementos reativos para elevá-lo a um valor mais próximo a um. Tal correção é normalmente realizada por banco de capacitores, que geram correntes contrárias às geradas pelos equipamentos.

Devido aos impactos causados por um baixo fator de potência, este trabalho tem como objetivo o projeto de um banco de capacitores inteligente, capaz de acrescentar e retirar cargas capacitivas em determinados horários automaticamente, controlado por um CLP, de acordo com medições realizadas no Supermercado Escola utilizando o Analisador de Qualidade de Energia Trifásica Fluke 435.

Abstract

The power factor quantifies the useful part of electrical energy, being used to measure the energy efficiency of an installation, as this unit will pay for energy, independently to be or not to be used to perform work. Low power factor values result in an increase of the total current, which can overload the electrical system, harm the stability and bring inconvenience and losses in the installation, voltage drops and underutilisation of installed capacity. Also involves the use of bigger section wires, the oversizing of command and protection devices and possible bad operation of the other equipments connected to the same network. Because of that, increasingly, there is the search for its correctness, which is introduce reactive elements to raise it to a value closer to one. Such fix is usually held by capacitor bank, which produces contrary chains those generated by the equipment.

Due to impacts caused by a low power factor, this work has as objective the project of a smart capacitor bank, able to add and remove capacitive loads automatically at certain times, controlled by a PLC, according to measurements made at the Supermercado Escola using the Fluke 435 Three-Phase Power Quality Analyzer.

Sumário

1	Introdução	13
1.1	Fator de Potência	14
1.1.1	Introdução	14
1.1.2	Cálculo do Fator de Potência	15
1.1.3	Correção do Fator de Potência	17
1.2	Automação	19
1.2.1	Introdução	19
1.2.2	Controlador Lógico Programável (CLP)	20
1.2.3	Lógica Ladder.....	21
1.3	Objetivo Geral.....	23
2	Materiais e Métodos	24
2.1	Medições Realizadas	24
2.2	Correção do Fator de Potência	25
2.3	Automação do Banco de Capacitores.....	26
3	Resultados e Discussões	28
4	Conclusões	34
	Referências Bibliográficas.....	35

Lista de Figuras

Figura 1 - Diagrama do fator de potência.	16
Figura 2 - Triângulo de potências para correção do fator de potência.....	18
Figura 3 - Sistema de controle automatizado.	20
Figura 4 - Sentido do fluxo de corrente fictícia.	22
Figura 5 - Representação de contato NA.	22
Figura 6 - Representação de contato NF.....	22
Figura 7 - Representação da instrução de bobina.	23
Figura 8 - Representação da instrução SET (S).....	23
Figura 9 - Representação da instrução RESET (R).	23
Figura 10 - Analisador de Qualidade de Energia Trifásica Fluke 435.	24
Figura 11 - Painel geral do Supermercado Escola.	25
Figura 12 - Fator de potência medido.	25
Figura 13 - Taxa de distorção harmônica total da corrente.....	26
Figura 14 - Estrutura de um contator.	27
Figura 15 - Banco de capacitores mínimo em VAR.	28
Figura 16 - Fator de potência corrigido.....	29
Figura 17 - Potência aparente antes e após a correção.....	30
Figura 18 - Redução percentual da potência aparente.	30
Figura 19 - Diagrama Ladder para automação do banco de capacitores	31
Figura 20 - Esquema de ligação do contator à saída do CLP.....	32
Figura 21 - Esquema de ligação do contator ao banco de capacitores.....	32

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Potência das cargas capacitivas necessárias ao longo do dia.....	28
---	----

1 Introdução

Desde a criação da primeira rede de energia elétrica, construída por Nikola Tesla em 1888, não aconteceram inovações significativas na maneira como a energia elétrica é fornecida ao consumidor. Muitas tecnologias que eram usadas naquela época ainda continuam em uso, o que limita a capacidade de inovação [1].

Nos últimos cinquenta anos, as redes não evoluíram para encarar os desafios das mudanças modernas. Ameaças à segurança, possibilidade de uso de energia alternativa e intermitente, metas de economia de energia para redução de picos de demanda e controles digitais para aumentar a confiabilidade e abreviar a restauração são alguns exemplos de desafios que terão que ser enfrentados nos próximos anos. Mesmo vivendo na era da tecnologia, as empresas de distribuição ainda dependam dos clientes para ser notificadas de uma falta de energia, o que implica em um maior tempo e custo na restauração da rede elétrica [1].

O uso racional da energia elétrica é de extrema importância, visto que, cada vez mais, ela tem se tornado imprescindível para todos os setores produtivos existentes no país, além do alto custo a ela vinculado, sendo que, segundo informações da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a média de perdas elétricas no Brasil é de 16%. Dessa forma, a qualidade de energia elétrica (QEE), que faz referência aos diversos tipos de distúrbios em um sistema elétrico [2], tem se tornado uma preocupação dos diversos tipos de tipos de consumidor, visto que tais distúrbios geram impactos econômicos significativos, além dos efeitos produzidos nos equipamentos elétricos, que podem ser um ligeiro aquecimento até a falha total [3]. Antes de estudar os distúrbios que afetam a qualidade da energia elétrica, as condições ideais de operação de um sistema elétrico devem ser verificadas. Assim, na falta de critérios específicos para avaliar a qualidade de energia, pode-se comparar as condições reais de operação com as características de um sistema ideal e, a partir daí, estabelecer uma escala quantitativa e classificatória para os desvios observados [4].

As condições ideais de operação de um sistema elétrico são:

- Tensões e correntes alternadas com formas de ondas senoidais puras;
- Amplitudes constantes nos valores nominais;
- Frequência da rede constante no valor síncrono;
- Tensões trifásicas equilibradas;
- Fator de potência unitário nas cargas;

- Perdas nulas na transmissão [4].

O fator de potência, que é um número compreendido entre 0 e 1, indica o quanto da energia elétrica está sendo realmente utilizada para realizar trabalho. Quando baixo, decorrente do excesso de energia reativa, é um dos problemas que resultam em uma má qualidade de energia elétrica [5], visto que há um aumento da corrente total que, dentre outros prejuízos, gera perdas na instalação, quedas de tensão e subutilização da capacidade instalada [6]. Por causa disso, há a busca por sua correção, que é introduzir elementos que gerem correntes reativas contrárias àquelas geradas pelos equipamentos, para elevá-lo a um valor mais próximo de um [7]. Quando corrigido, percebe-se a liberação de capacidade nas fontes supridoras, seja transformador ou gerador próprio, o que permite que sejam ligadas novas cargas nos circuitos alimentadores e distribuidores sem acréscimo de kVA [8]. Também, ocorre uma redução das variações de tensão (oscilações), aumento na vida útil dos equipamentos e os condutores tornam-se menos aquecidos, o que diminui as perdas de energia elétrica na instalação [9].

1.1 Fator de Potência

1.1.1 Introdução

Diversos equipamentos, tais como, motores elétricos, fornos a arco, transformadores, dentre outros, necessitam para sua operação de energia reativa, que pode ser fornecida por geradores e motores síncronos, bancos de capacitores, etc [10].

A energia reativa indutiva é consumida normalmente por equipamentos constituídos de bobinas como, por exemplo, motores de indução, reatores e transformadores ou, que operam com a formação de arco elétrico, como os fornos a arco. Já a energia reativa capacitiva pode ser gerada por motores síncronos superexcitados ou capacitores [10].

A maioria dos equipamentos são consumidores parciais de energia reativa indutiva, visto que, necessitam de campo eletromagnético para o seu funcionamento. Desta forma, sua operação requer dois tipos de potência: a potência ativa e a potência reativa.

A potência ativa, cuja unidade de medida é o watt (W), é a que efetivamente realiza trabalho, gerando movimento, luz, calor, etc. Já a potência reativa, cuja unidade de medida é o volt-ampère reativo (VAr), é responsável por criar e manter os campos eletromagnéticos das cargas indutivas e, ao contrário da potência ativa, que é sempre consumida, a potência reativa,

além de não produzir trabalho, circula entre a carga e a fonte, o que limita a capacidade do sistema elétrico no transporte de energia ativa. A potência total absorvida é denominada potência aparente, cuja unidade é o volt-ampère (VA).

O número que representa a proporção da potência aparente utilizada para realizar trabalho é denominado fator de potência (FP). É um valor compreendido entre 0 e 1, podendo ter ângulo positivo quando é indutivo ou negativo quando é capacitivo. É utilizado para medir a eficiência energética de uma instalação, sendo que, quanto mais alto o seu valor, mais eficiente é o sistema [11].

Os bancos de capacitores são usados extensivamente em sistemas de energia para controle de tensão, correção do fator de potência, filtragem e compensação de energia reativa. Com a proliferação de cargas não lineares e a propagação de harmônicos, a possibilidade de ressonâncias paralelas/série entre o sistema elétrico e capacitores na frequência harmônica tornou-se causa de preocupação constante [12].

Desde a década de 1990, houve um aumento de cargas não lineares, dispositivos e equipamentos de controle em sistemas de energia elétrica, incluindo cargas eletrônicas, alimentadas por alimentadores residenciais e comerciais, unidades de controle de velocidade (inversor de frequência) e fornos a arco em redes industriais, bem como o recém-desenvolvimento de fontes de geração distribuída (GD) em sistemas de transmissão e distribuição. Isso conduziu a uma crescente presença de distorções harmônicas que deteriorou a qualidade de energia elétrica. Além disso, algumas cargas não lineares e equipamentos de controle eletrônico de energia tendem a operar com fatores de potência relativamente baixos, causando má regulação de tensão, aumentando as perdas na linha e, forçando as empresas de energia a fornecer um maior valor de potência aparente [12].

1.1.2 Cálculo do Fator de Potência

O fator de potência (FP), dado pela equação (1), é a relação entre a potência ativa (P) e a potência aparente (S), consumidas por um equipamento [13].

$$FP = \frac{P}{S} \quad (1)$$

Quando as cargas são lineares, isso é, há uma relação linear (equação diferencial linear com fatores constantes) entre corrente e tensão, o fator de potência também pode ser expresso

pela equação (2), onde φ é o ângulo formado entre a componente da potência ativa e a componente da potência aparente.

$$FP = \cos \varphi \quad (2)$$

A Figura 1 permite reconhecer o ângulo do fator de potência e as potências envolvidas no seu conceito, onde Q representa a potência reativa, sendo positivo quando representa uma carga com perfil indutivo ou negativo quando representa uma carga com perfil capacitivo [10].

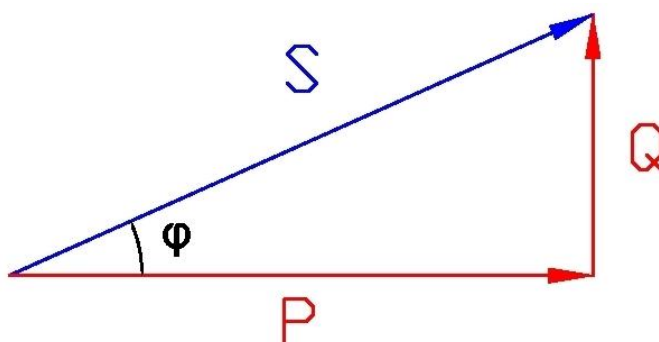


Figura 1 - Diagrama do fator de potência.

Quando há cargas não lineares, a corrente que passa por ela não é proporcional à tensão aplicada [14]. Com isso, para determinar o fator de potência na presença de componentes harmônicas deve-se utilizar a equação (3), onde φ_f é o ângulo formado na frequência fundamental entre a componente da potência ativa e a componente da potência aparente, I_f é o valor eficaz da corrente fundamental e I_h é o valor eficaz das correntes harmônicas de diferentes ordens [10].

$$FP = \frac{I_f \times \cos \varphi_f}{\sqrt{I_f^2 + \sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}} \quad (3)$$

Sabendo que a taxa de distorção harmônica total (*THD*, do inglês *total harmonic distortion*), em porcentagem, de um sinal y é dado pela equação (4), substituindo em (3), obtém-se a equação (5), onde THD_i é a taxa de distorção harmônica da corrente [15].

$$THD = \frac{\sum_{h=2}^{\infty} y_h^2}{y_f} \times 100 \quad (4)$$

$$FP = \frac{\cos \varphi_f}{\sqrt{1 + \left(\frac{THD_i}{100}\right)^2}} \quad (5)$$

Geralmente, mede-se o $\cos \varphi$ da componente fundamental e o fator de potência do sinal deformado (total). Neste caso, em circuitos que apresentam valores de fator de potência e $\cos \varphi$ muito diferentes entre si possuem forte quantidade de harmônicas tanto de corrente quanto de tensão. Isso pode causar aquecimentos excessivos generalizados na instalação e, sobretudo, sérios danos em bancos de capacitores. Ao contrário, valores muito próximos de fator de potência e $\cos \varphi$ indicam a pequena presença de harmônicas nos circuitos [16].

1.1.3 Correção do Fator de Potência

Devido aos problemas causados por um baixo valor de fator de potência, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estabelece que o fator de potência nas unidades consumidoras conectadas em níveis de tensão inferiores a 69 kV deve ser superior a 0,92 capacitivo durante as 6 primeiras horas do dia e 0,92 indutivo durante as 18 horas restantes. Quem descumprir esse limite, está sujeito a uma penalidade que leva em conta o fator de potência medido e a energia consumida ao longo de um mês [17]. Também é estabelecido que a medição do fator de potência pelas concessionárias, para fins de cobrança, deve ser verificado pela distribuidora por meio de medição permanente, de forma obrigatória para as unidades consumidoras do grupo A (alimentadas com mais de 2,3 kV), e facultativa para unidades consumidoras dos subgrupos B2 (rurais), B3 (demais classes) e B4 (iluminação pública) do grupo B (alimentadas com menos de 2,3 kV) [18].

A correção do fator de potência consiste em reduzir o montante de potência reativa que o sistema provê através da injeção de potência reativa, a fim de se chegar a um fator de potência desejado [19]. Normalmente, a solução mais adequada para elevar o fator de potência consiste na instalação de bancos de capacitores em paralelo com as cargas. Esses dispositivos fornecem a potência reativa necessária para neutralizar a corrente de magnetização dos equipamentos indutivos [20].

O método para dimensionar o banco de capacitores que deverá ser utilizado é baseado na resolução do triângulo das potências ilustrado na Figura 2, e sua equação é dada em (6), onde Q_{cap} é potência do capacitor, φ é o ângulo do fator de potência original e φ_{corr} é o ângulo do fator de potência desejado [21].

$$Q_{cap} = P \times (\tan \varphi - \tan \varphi_{corr}) \quad (6)$$

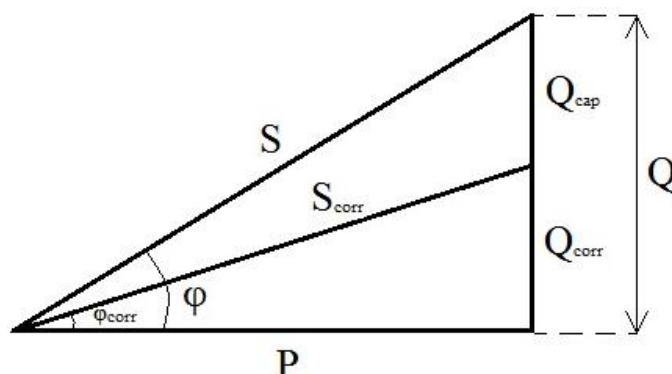


Figura 2 - Triângulo de potências para correção do fator de potência.

A conexão dos bancos de capacitores pode ser feita das seguintes formas:

- Conexão em delta: é usada em tensões inferiores a 2,4 kV. Para tensões superiores, se torna antieconômica quando comparada com as outras, devido ao elevado custo da proteção associada. Essa ligação impede a circulação no sistema elétrico de correntes de 3^a harmônica.
- Conexão estrela com neutro aterrado: fornece uma via de escoamento de baixa impedância para correntes de descarga atmosférica. Oferece baixo custo de instalação e ocupa pouca área. Porém, pode provocar interferência em circuitos de comunicação e proteção, devido à circulação de correntes harmônicas de seqüência zero para terra. Sendo assim, os relés associados devem estar condicionados ao uso filtros. Devido à circulação de correntes harmônicas, podem surgir problemas de atuações indevidas na proteção de sobrecorrente do banco, queima acima do normal de fusíveis, além de possíveis danificações nas unidades capacitivas.
- Conexão em estrela com neutro isolado: não provoca interferências nos circuitos de comunicação, pois bloqueia a circulação de correntes harmônicas. Dependendo do risco assumido, não há necessidade de preocupações tão fortes, como no caso do neutro aterrado, para a proteção do secundário dos transformadores de corrente. Porém, deverá ser dada atenção especial para tensões transitórias de restabelecimento nos equipamentos de manobra do banco. Este fato poderá encarecer o disjuntor ou chave associada ao banco. O neutro do banco para este tipo de ligação deverá ser isolado para tensão fase-fase, por prevenção contra surtos de manobras [22].

O uso de capacitores para melhorar o fator de potência em uma rede com harmônicas pode causar o fenômeno de ressonância, o que pode causar tensões de linha perigosamente altas nos barramentos de alimentação e provocar fluxos de correntes danosos circulando pelos capacitores. As presenças de componentes harmônicas ainda podem causar um sobreaquecimento e um maior estresse dielétrico do capacitor, reduzindo, portanto sua vida útil [23]. Assim, para a instalação de banco de capacitores, deve-se verificar as seguintes diretrizes:

- Se a potência harmônica das cargas não lineares é menor que 10% da potência nominal do transformador, capacitores podem ser utilizados sem preocupação de ressonância.
- Se a potência harmônica das cargas não lineares for menor que 30% da potência nominal do transformador e a potência reativa dos capacitores for menor que 20% da potência nominal do transformador, capacitores podem ser utilizados sem preocupação de ressonância.
- Se a potência harmônica das cargas não lineares for maior que 30% da potência nominal do transformador, devem ser empregados filtros aos capacitores. [22]

1.2 Automação

1.2.1 Introdução

Desde a primeira utilização da roda, ocorrida na Ásia entre 3500 e 3200 a.C., o homem vem procurando simplificar o seu trabalho, de forma a substituir o esforço braçal por outros meios e mecanismos, liberando o tempo disponível para outros afazeres, como as atividades do intelecto, das artes, lazer, pesquisa ou simplesmente entretenimento [24]. Dessa forma, a automação, que é um sistema de equipamentos eletrônicos e/ou mecânicos que controlam seu próprio funcionamento, praticamente sem a intervenção humana, vem se tornando cada vez mais importante. Seu conceito é diferente de mecanização, visto que o último consiste apenas no uso de máquinas para realizar um trabalho, substituindo assim o esforço físico do homem, enquanto a automação possibilita fazer um trabalho por meio de máquinas controladas automaticamente, capazes de se regularem sozinhas [25].

1.2.2 Controlador Lógico Programável (CLP)

Um sistema automatizado é composto basicamente sensores, atuadores e controlador. Os sensores são dispositivos sensíveis a um fenômeno físico, tal como temperatura, umidade, luz, pressão, etc. Eles são responsáveis pelo monitoramento do processo, enviando um sinal ao controlador que pode ser discreto (abertura ou fechamento de contatos), ou analógico. Já os atuadores são os dispositivos responsáveis pela realização de trabalho no processo ao qual está se aplicando a automação. Podem ser magnéticos, hidráulicos, pneumáticos, elétricos, ou de acionamento misto. Por fim, o controlador é o responsável pelo acionamento dos atuadores, segundo um programa inserido pelo usuário do sistema de controle [26]. A Figura 3 ilustra um sistema de controle automatizado.

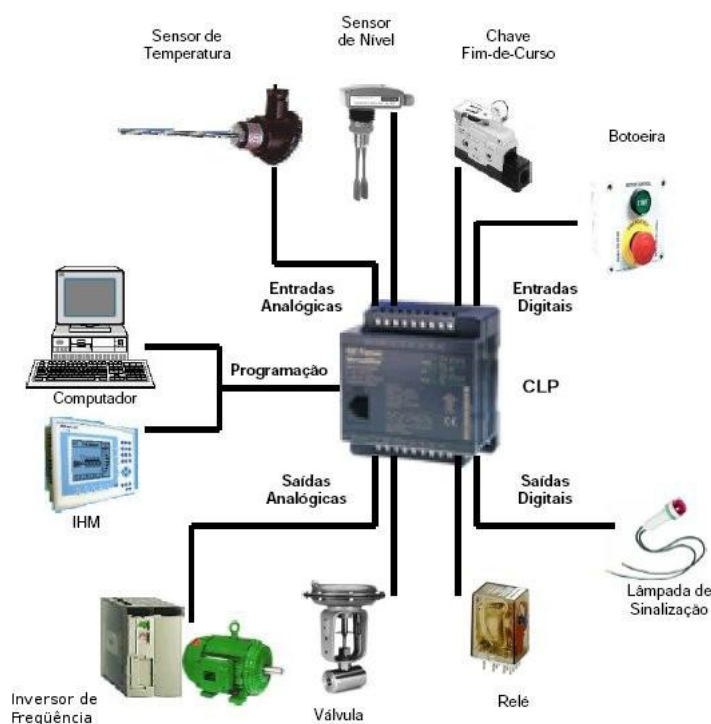


Figura 3 - Sistema de controle automatizado.

Os controladores lógicos programáveis (CLP ou, em inglês, *Programmable Logic Controller* – PLC), que são amplamente utilizados como elementos controladores em sistemas automatizados, foram criados com o intuito de substituir painéis de controle a relé [27], já que o último exigia modificações na fiação quando havia alterações no processo automatizado, o que o tornava inviável em muitos casos, sendo mais barato substituir todo o painel por um novo.

O CLP revolucionou os comandos e controles industriais desde seu surgimento, que aconteceu no final da década de 60, possuindo como grande vantagem a possibilidade de transferir modificações em *hardware* em modificações em *software* [28].

O controlador lógico programável composto basicamente por:

- CPU (Central Processor Unit/Unidade Central de Processamento): executa os programas e algumas tarefas internas;
- Memória de Programa: armazena os programas ligados ao controle objetivado, geralmente são mantidas por baterias e são não voláteis;
- Memória de Dados: armazenam as condições de entrada e saída, variáveis e constantes instantâneas relativas ao programa;
- Entradas e Saídas (I/O): são módulos que agrupam os sinais de I/O, podendo ser analógicos ou digitais;
- Fontes de Alimentação: as fontes devem alimentar tanto a CPU quanto os blocos de I/O;
- Terminal de Programação: equipamento externo utilizado na programação e gravação na Memória de Programa [29].

1.2.3 Lógica Ladder

Apesar de ainda não existir uma padronização para a programação de CLP's, existe uma representação gráfica parecida entre eles, denominada lógica de relés ou Ladder [30], cujos símbolos se assemelham aos símbolos usados para representar esquemas elétricos.

Em um diagrama Ladder a leitura e, conseqüentemente, acionamento dos elementos, é feita sempre em um único sentido, da esquerda para a direita. O que acontece é que se supõe um modelo físico, onde a barra situada à esquerda representa o ponto de maior potencial, enquanto a barra à direita, representa o ponto de menor potencial. Dessa maneira, assim como em um circuito elétrico, onde a corrente flui sempre do ponto de maior para o de menor potencial, a corrente lógica fictícia também obedece a esse princípio e, portanto, flui sempre da barra da esquerda para a da direita, como representado na Figura 4. Além disso, a leitura do diagrama Ladder é sempre feita de cima para baixo[31].

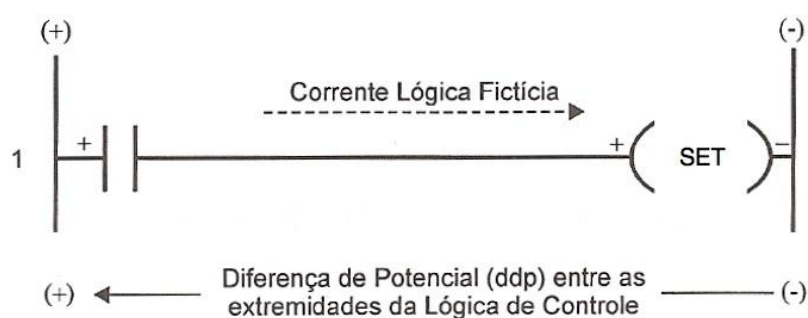


Figura 4 - Sentido do fluxo de corrente fictícia.

Um dos elementos da linguagem Ladder primordiais no desenvolvimento são os contatos NA (normalmente aberto ou, em inglês, *normally open* - NO) e NF (normalmente fechado ou, em inglês, *normally closed* - NC), representados nas Figuras 5 e 6, respectivamente [31].

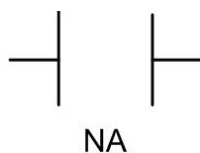


Figura 5 - Representação de contato NA.

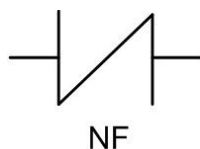


Figura 6 - Representação de contato NF.

A instrução de contato NA é utilizada no Ladder para determinar se um bit está ligado, isso é, se a variável binária associada à lógica do contato é 1. Se o bit endereçado estiver ligado (1) quando a instrução é executada, a lógica da instrução será avaliada como verdadeira. Caso o bit endereçado esteja desligado (0) quando a instrução for executada, a lógica da instrução será avaliada como falsa [31].

A instrução de contato NF é utilizada no Ladder para determinar se um bit está desligado, isso é, se a variável binária associada à lógica do contato é 0. Se o bit endereçado estiver desligado (0) quando a instrução será executada, a lógica da instrução é então avaliada como verdadeira. Caso o bit endereçado esteja ligado (1) quando a instrução for executada, a lógica da instrução será avaliada como falsa [31].

Outro componente essencial para escrita de uma rotina de um CLP é a bobina, representada na Figura 7.



Figura 7 - Representação da instrução de bobina.

A instrução de bobina possui uma variável binária associada, que recebe valor 1 quando a lógica é verdadeira, podendo funcionar tanto como uma saída do controle como uma variável interna [31].

As instruções *SET* (S) e *RESET* (R), representadas respectivamente nas Figuras 8 e 9, são instruções de retenção de informação de saída. A instrução *SET* é capaz de ligar um bit com apenas com um pulso, enquanto a instrução *RESET* é capaz de desligá-lo com apenas com um pulso. Estas instruções são utilizadas em pares, sendo que ambas endereçam o mesmo bit [31].

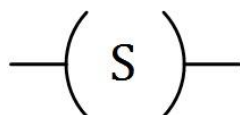


Figura 8 - Representação da instrução SET (S).

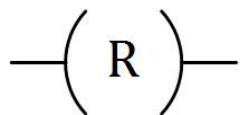


Figura 9 - Representação da instrução RESET (R).

1.3 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo a proposta de um controle de forma automatizada de energia reativa do Supermercado Escola da UFV, visando à correção do baixo fator de potência. Para isso, foram realizadas medições durante 24 horas, utilizando o Analisador de Qualidade de Energia Trifásica Fluke 435, com o intuito de se conhecer as características do sistema e propor uma alternativa para a elevação do fator de potência.

2 *Materiais e Métodos*

2.1 *Medições Realizadas*

Utilizando o Analisador de Qualidade de Energia Trifásica Fluke 435, representado na Figura 10, foram realizadas medições da tensão, potência ativa, reativa e aparente, fator de potência e taxa de distorção harmônica total da corrente, durante 24 horas e 30 minutos, em intervalos de 30 segundos, se iniciando às 15 horas do dia 26 de maio de 2015 e se encerrando às 15 horas e 30 minutos do dia 27 de maio de 2015.



Figura 10 - Analisador de Qualidade de Energia Trifásica Fluke 435.

Essas medições foram executadas no painel geral, representado na Figura 11, do Supermercado Escola, localizado no campus da Universidade Federal de Viçosa (UFV), que possui uma alimentação elétrica a 4 fios, sendo 3 fases e 1 neutro (3F+N), cuja tensão é 220V entre fases e 127V entre fase e neutro.

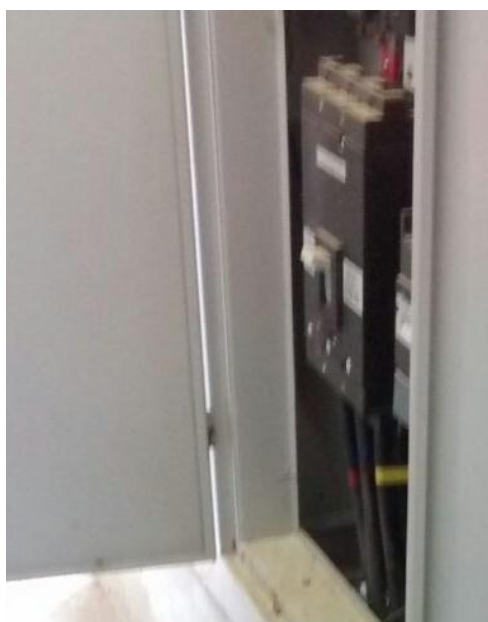


Figura 11 - Painel geral do Supermercado Escola.

2.2 *Correção do Fator de Potência*

A partir da análise dos dados coletados do fator de potência, representado na Figura 12, foi observado que ele se encontra abaixo do valor de 0,92 estabelecido pela ANEEL. Assim, foi necessário examinar a taxa de distorção harmônica total da corrente, representada na Figura 13, a fim de avaliar os impactos das correntes harmônicas no valor do fator de potência.

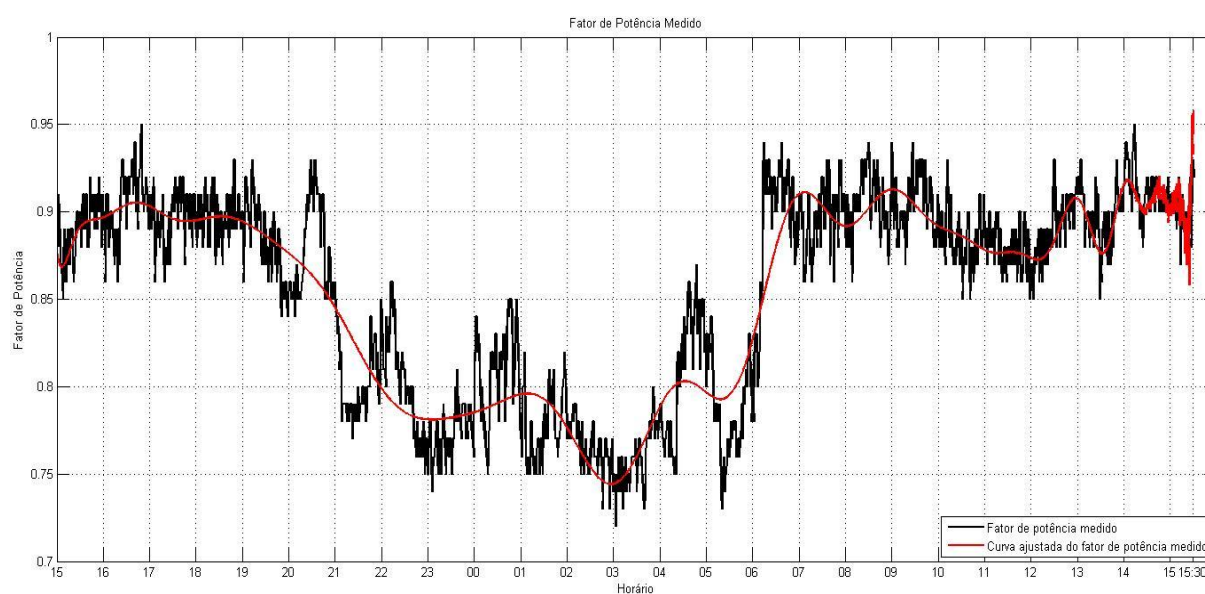


Figura 12 - Fator de potência medido.

Através da análise da Figura 12, percebe-se que no período em que o supermercado não está funcionando, isso é, entre 21 horas e 6 horas, o fator de potência atinge o seu valor mais crítico, sendo causado pelos refrigeradores, visto que esses representam o consumo quase total nesse horário. Nas demais horas do dia, quando o supermercado está em funcionamento, as cargas resistivas, por exemplo o forno presente na padaria, ajudam a elevar o fator de potência, porém não é suficiente para corrigí-lo para 0,92.

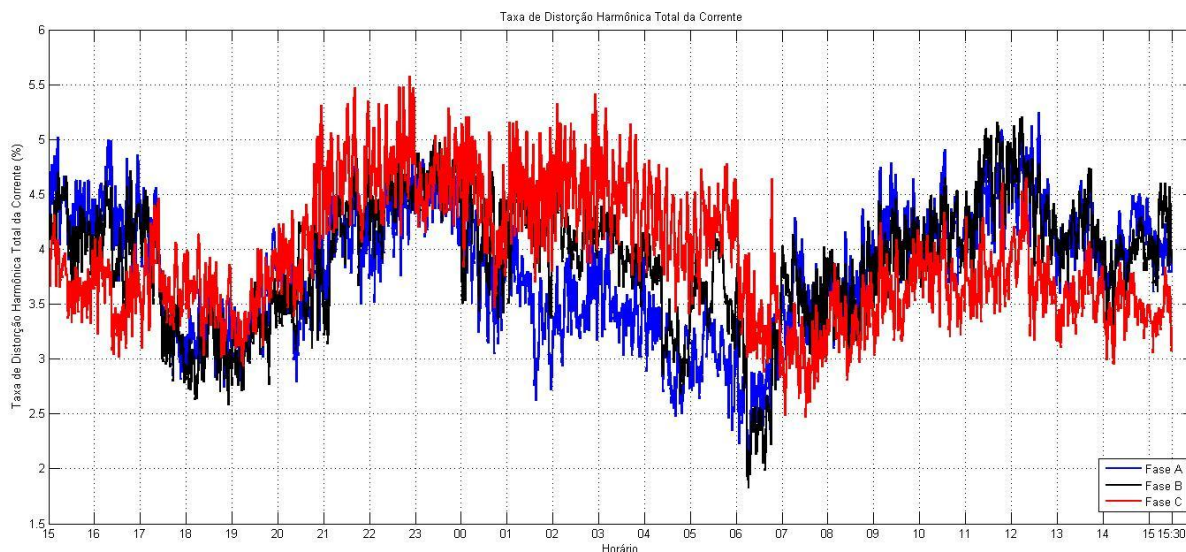


Figura 13 - Taxa de distorção harmônica total da corrente.

Pela Figura 13, percebe-se que a taxa de distorção harmônica total da corrente não interfere de forma significativa no fator de potência, visto que o valor máximo medido foi aproximadamente 5,6 %, o que está dentro do considerado normal, que é até 10% [16]

Como a potência das cargas não lineares é menor que 10% da potência total, o que permite o uso de banco de capacitores sem preocupação de ressonância, essa foi a alternativa encontrada para a correção do fator de potência.

Assim, utilizando a equação (6), foi calculada a potência reativa do banco de capacitores para elevar o fator de potência a 0,92. A partir desse valor, foi encontrado o valor comercial capaz de atender o sistema por um maior intervalo de tempo.

2.3 Automação do Banco de Capacitores

A fim de automatizar o banco de capacitores, foi implementado um diagrama Ladder para o CLP do fabricante WEG, modelo CLW-02/20VT-D, utilizando o *software* Clic02 Edit,

cujas saídas eram controladas no tempo. Para isso, foi utilizada a função *Real Time Clock* (RTC), que energiza uma saída do CLP em um tempo pré-programado.

Como as saídas desse CLP suportam no máximo 0,5 A, para utilizá-lo em um banco de capacitores, cuja corrente é superior a esse valor, deve-se dimensionar um contator, que é um dispositivo capaz de manobrar cargas elétricas de alta potência, sendo acionado por um circuito de baixa potência. Além disso, o contator também permite que uma mesma chave opere vários circuitos simultaneamente. A estrutura de um contator está representada na Figura 14, indicando que quando a bobina do circuito de comando, cujos terminais são A1 e A2, está desenergizada, os contatos de força (1) e (2), (3) e (4), e (5) e (6) estão abertos, e quando a bobina do circuito de comando está energizada, os contatos de força (1) e (2), (3) e (4), e (5) e (6) estão fechados.

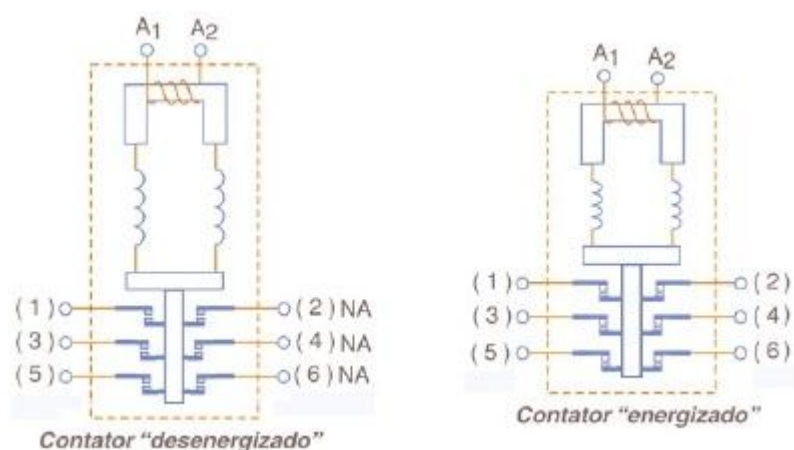


Figura 14 - Estrutura de um contator.

3 Resultados e Discussões

Após analisar as Figuras 12 e 13, e concluir que a correção do fator de potência poderá ser realizada através de bancos de capacitores, utilizando a equação (6) para fazer o seu dimensionamento, foi obtida a Figura 15, que representa o valor mínimo de sua potência reativa capaz de elevar o fator de potência a 0,92.

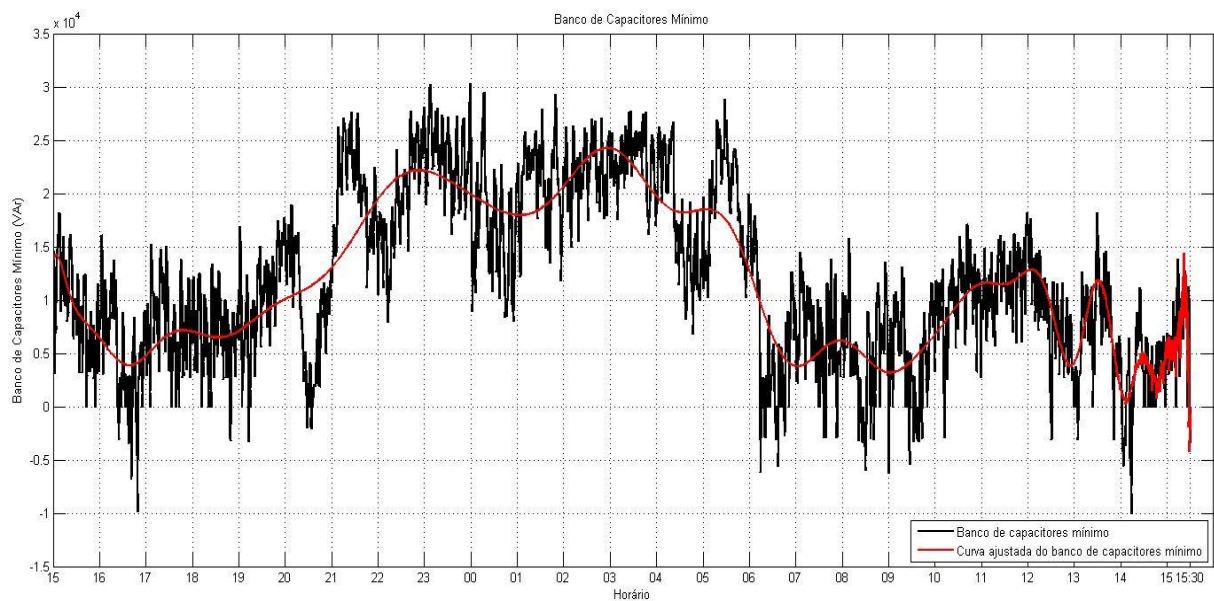


Figura 15 - Banco de capacitores mínimo em VAr.

A partir da análise da Figura 15, obtém-se a Tabela 1, onde estão representados os valores comerciais das cargas capacitivas que deverão ser utilizadas e o horário em que precisarão estar ligadas.

Tabela 1 - Potência das cargas capacitivas necessárias ao longo do dia.

Horário	Potência das cargas capacitivas (kVAr)
6 horas até 21 horas	20
21 horas até 6 horas	32,5

Assim, para se corrigir o fator de potência de forma a se ter um menor número de manobras e um menor custo com a aquisição de cargas capacitivas, deverá existir uma carga

de 20 kVAr operando durante as 24 horas do dia e, entre 21 horas e 6 horas, deverá ser adicionada em paralelo com essa carga, outra de 12,5 kVAr. Como se trata de uma rede de baixa tensão, a ligação dessas cargas deverá ser em triângulo, a uma tensão de 220 V.

O gráfico da Figura 16 representa o fator de potência corrigido, calculado pela equação (1), onde a potência ativa (P) não se altera com a adoção do banco de capacitores, permanecendo igual à medida, e a potência aparente simulada após a correção ($S_{simulada}$) é dada por (7), sendo Q_{medida} a potência reativa medida e $Q_{simulada}$ a potência reativa simulada após o acréscimo das cargas capacitivas. Já na Figura 17 está representada a comparação entre a potência aparente medida e a potência aparente simulada após a correção, e a Figura 18 representa a redução percentual da potência aparente após o acréscimo do banco de capacitores, dada por (8).

$$S_{simulada} = \sqrt{P^2 - (Q_{medida} - Q_{simulada})^2} \quad (7)$$

$$Redução = \frac{S_{medida} - S_{simulada}}{S_{medida}} \times 100\% \quad (8)$$

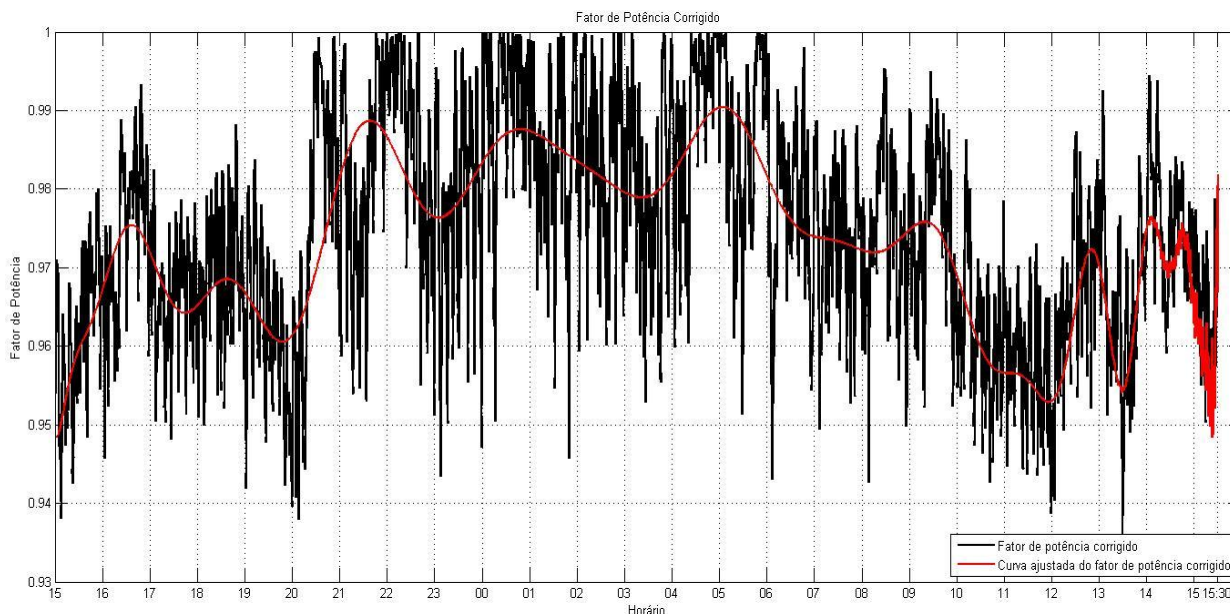


Figura 16 - Fator de potência corrigido.

Após a adição das cargas capacitivas, através da Figura 16, percebe-se que ele se encontra acima de 0,95 em grande parte do período da simulação, apresentando os maiores valores entre 20 horas e 30 minutos e 10 horas.

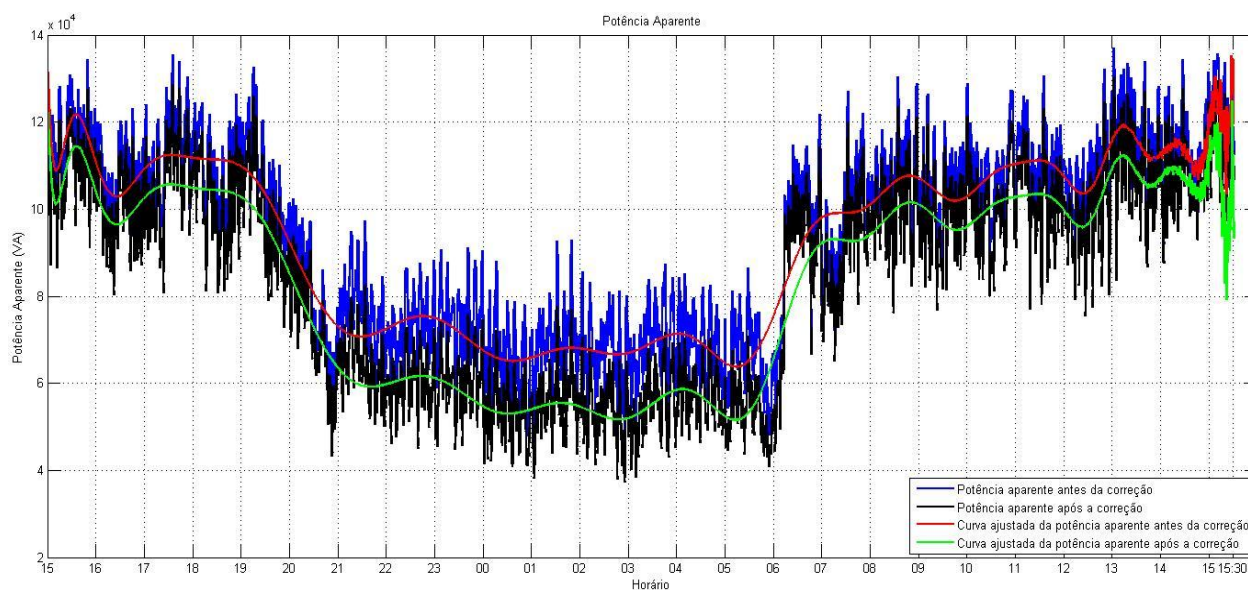


Figura 17 - Potência aparente antes e após a correção.

Quanto a potência aparente, após a instalação dos bancos de capacitores, há uma redução da ordem de 10 kVAr, conforme a Figura 17, potência essa que poderá ser utilizada para alimentar novas cargas, tanto no supermercado quanto na UFV, visto que não há um medidor individual, sendo esse ligado à rede da universidade.

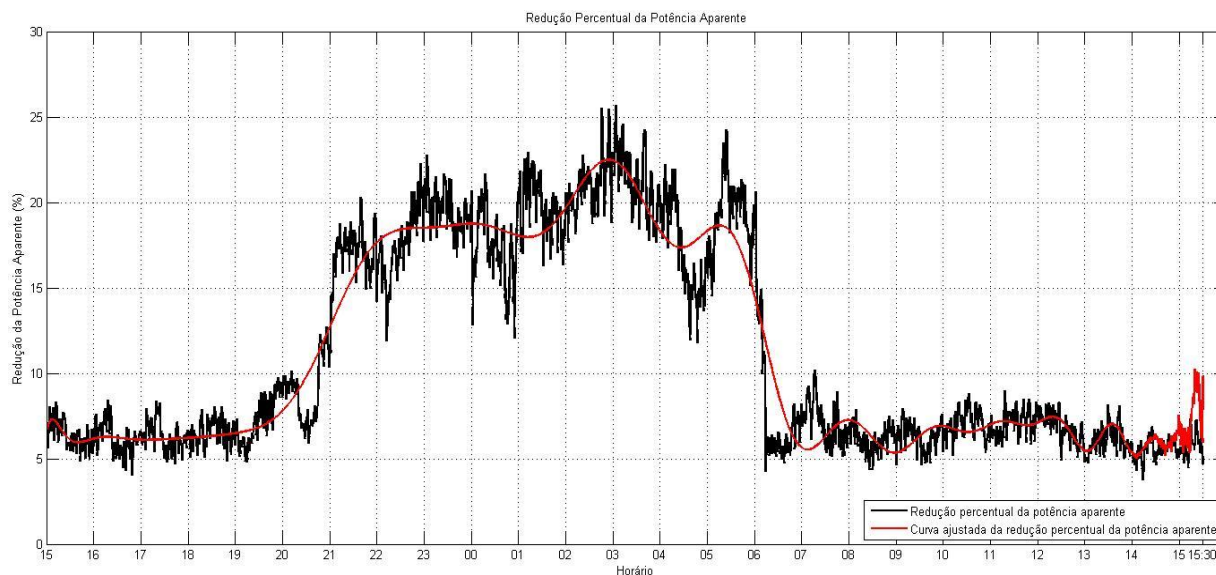


Figura 18 - Redução percentual da potência aparente.

Como é possível visualizar na Figura 18, com a correção do fator de potência, há uma redução significativa na potência aparente, o que poderá reduzir o custo com a energia elétrica. A economia de energia elétrica devido a essa correção é dada pela equação (9), onde P_{medida} é a potência aparente medida, a $P_{simulada}$ é a potência aparente simulada após adição do

banco de capacitores e o tempo é o intervalo de tempo entre cada medição. Ao longo das 24 horas e 30 minutos da medição, a economia com a adoção do banco de capacitores seria de 223,05 kVAh.

$$Economia\ de\ Energia\ Elétrica = \sum [(P_{medida} - P_{simulada}) \times tempo] \quad (9)$$

Como a correção do fator de potência não é realizada apenas por cargas capacitivas fixas, visto que a de 12,5 kVAr deverá funcionar apenas das 21 horas até às 6 horas, uma alternativa para facilitar o acréscimo e retirada dessa carga é a adoção de um CLP com o intuito de automatizar o sistema. Desta forma, o CLP realizará essa tarefa automaticamente, com base em um diagrama Ladder.

Para o CLP CLW-02/20VT-D, do fabricante WEG, foi utilizando o *software* Clic02 Edit para implementar a programação em Ladder, representada na Figura 19, e simular o seu comportamento, visto que não foi possível realizar testes utilizando-o juntamente com o banco de capacitores. A variável R01 é controlada pela função RTC, sendo ativada às 21 horas e desativada às 6 horas em todos os dias da semana.

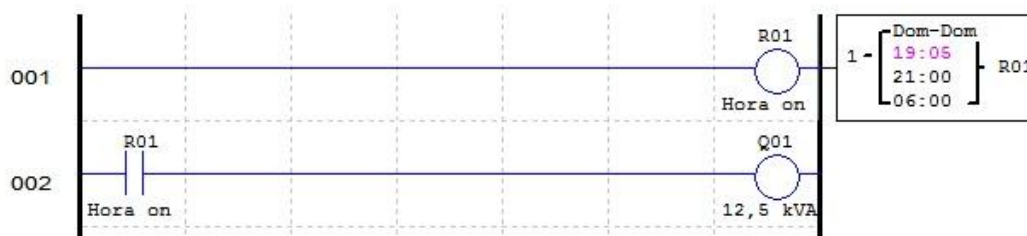


Figura 19 - Diagrama Ladder para automação do banco de capacitores

Para se ligar a saída Q01 à carga capacitiva deve-se utilizar um contator, visto que a corrente suportada pelos transistores da saída é 0,5 A, enquanto a corrente que circula na carga é de 32,8 A. Essa ligação está representada na Figura 20, onde os terminais A1 e A2 da bobina de controle não tem relação com as entradas analógicas A1 e A2 do CLP.

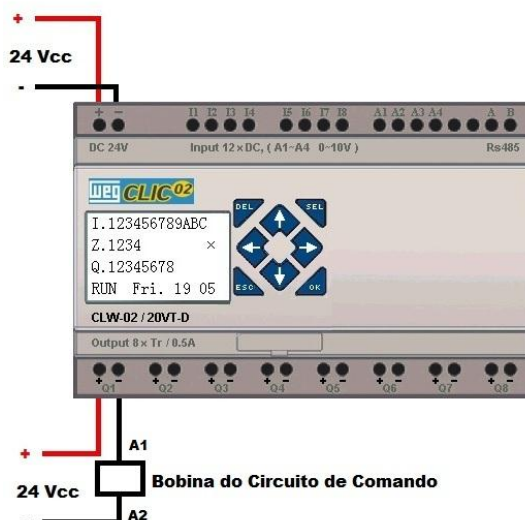


Figura 20 - Esquema de ligação do contator à saída do CLP.

Esse contator utilizado deverá ser um projetado para manobras de bancos de capacitores, visto que esses possuem resistores de pré-carga, que diminuem as correntes de *in-rush*, que acontecem quando se manobra um banco de capacitores e, devido ao seu elevado valor, reduz a vida útil dos capacitores, e um bloco de contatos adiantados, que conectam esses resistores de pré-carga antes do fechamento dos contatos principais, e os desconectam após os contatos principais serem fechados. O diagrama de sua ligação ao banco de capacitores, incluindo os resistores de pré-carga, está representado na Figura 21.

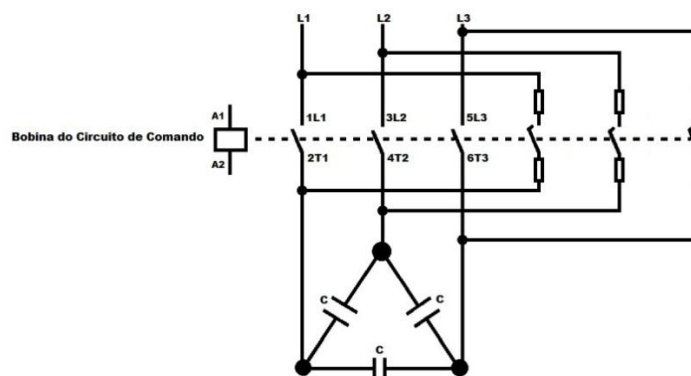


Figura 21 - Esquema de ligação do contator ao banco de capacitores

Dessa forma, os contatos dos resistores de pré-carga localizados à direita na Figura 21 se fecham antes dos contatos principais quando o circuito de comando é energizado. Após alguns instantes, os contatos principais se fecham e os contatos dos resistores de pré-carga se abrem.

É importante se atentar à tensão do circuito de comando do contator, que no caso do que está ligado ao CLP na Figura 20, deverá ser de 24 V em corrente contínua. O contator também deverá ser dimensionado para suportar, nesse caso, pelo menos, um banco de capacitores de 12,5 kVAr.

Quanto ao banco de capacitores de 20 kVAr, que deverá funcionar durante as 24 horas do dia, não há necessidade de ligá-lo ao CLP, visto que existiria um custo com contator desnecessário, uma vez que essa carga não será manobrada.

4 *Conclusões*

A partir da análise do fator de potência medido, nota-se que ele se encontra abaixo do valor mínimo aceito pela ANEEL, que é de 0,92. Isso se deve ao excesso de cargas indutivas, sendo que, no período noturno, onde a energia elétrica é quase que em sua totalidade utilizada para alimentar os refrigeradores, o fator de potência é ainda mais baixo, ficando por volta de 0,78. Durante o período de funcionamento do Supermercado Escola, as cargas resistivas, como o forno, ajudam a elevar o valor do fator de potência, porém não é o suficiente, visto que ele fica por volta de 0,90.

Como a potência das cargas não lineares não representa uma proporção significativa da potência total, os bancos de capacitores podem ser utilizados para o controle do fator de potência, sem a preocupação com a ressonância.

Com a adoção do banco de capacitores, foi possível elevar o fator de potência de forma a deixá-lo superior ao valor mínimo aceito pela ANEEL. Tal correção, além de evitar possíveis sanções da concessionária de energia, implicou em uma redução na energia de 223,05 kVAh nas 24 horas e 30 minutos que foram realizadas as medições.

Ao se automatizar o banco de capacitores de 12,5 kVAr, que funcionará entre 21 horas e 6 horas, além da comodidade, aumenta-se a segurança, visto que o acréscimo e retirada dessa carga não será realizado por um funcionário.

Para trabalhos futuros, com os conhecimentos aqui adquiridos, seria interessante a implementação de um sistema automatizado que consiga calcular a necessidade de energia reativa para se corrigir o fator de potência e, a partir disso, ativar a carga correspondente, juntamente com o projeto de filtros harmônicos, caso .

Referências Bibliográficas

- [1] Relatório Smart Grid. Grupo de Trabalho de Redes Elétricas Inteligentes. Ministério de Minas e Energia.
- [2] MALTA, Priscilla Leite. Estudo de Qualidade de Energia no Acionamento de Máquinas Elétricas no SAAE de Viçosa. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, p. 13. 2011. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica).
- [3] SACRAMENTO, Rebeca Neves. Estudo de Qualidade de Energia Elétrica de um Transformador Trifásico em um Sistema Elétrico Industrial. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, p. 13. 2010. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica).
- [4] CAMPOS, José Carlos da Costa. Estratégias de Conservação e Qualidade de Energia Aplicadas na Indústria. Universidade Estadual de Campinas. 2001. Tese de Mestrado.
- [5] PÓVOA, Marcos Cortez Brito Leite. Fatores de Influência na Eficiência Energética. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, p. 25. 2014. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica).
- [6] ALVES, Valter Luiz. Construção e Integração de um Protótipo de Hardware/Software para Monitoração e Correção de Fator de Potência em uma Rede Elétrica. Universidade Regional de Blumenau. Blumenau, SC, p. 19. 2003. Monografia (Graduação em Ciências da Computação).
- [7] JUNIOR, Erasto Leonel Sommerfeld. PETRY, Jacir Rodrigo. Bancada Didática para Estudo de Fator de Potência. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, PR, p. 9. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Tecnologia em Manutenção Industrial).
- [8] DUALIBE, Paulo. Capacitores: Instalação e Correção do Fator de Potência. Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. P. 8, janeiro/2000.
- [9] SILVA, Davi Leite da. Controle de Fator de Potência no Secundário (Lado da Carga) de um Transformador Trifásico. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, MG, p. 18. 2009. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação).
- [10] MAMEDE FILHO, João. Instalações Elétricas Industriais, 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.
- [11] BORDIM, Joao Ricardo Graminha. Instalação de Banco de Capacitores em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica para Correção de Fator de Potência e Regulação de Tensão: Projeto e Simulação Computacional. Universidade de São Paulo. São Carlos, SP, p. 5. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica).
- [12] FUCHS, Ewald F. MASOUN, Mohammad A.S. Power Quality in Power Systems and Electrical Machines. Elsevier Academic Press, 2013.
- [13] GUEDES, Rodrigo Luiz. Sistema de Controle, Utilizando CLP e Supervisório, para Correção de Fator de Potência e Balanceamento de Fases no Secundário de um Transformador de uma Subestação. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, MG, p. 23. 2009. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação).
- [14] BARCELOS, Vinícius Barros. Estimativa da Real Contribuição Harmônica de Cargas Não-Lineares Utilizando Redes Neurais. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, p. 21. 2012. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica).
- [15] SCHNEIDER ELETRIC. Qualidade de Energia - Harmônicas. 19p.
- [16] DALBOSCO, Ricardo Rafael. Implementação de um Medidor de Harmônicas Usando o Software LabVIEW. Universidade São Francisco. Itatiba, SP, 2008. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica).
- [17] NETO, João Vicente Torres. Diagnóstico Energético em uma Unidade de Separação de Gases. Universidade de Pernambuco. Recife, PE, p. 30. 2010. Projeto Final de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica).
- [18] Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. Contribuições Referentes à Audiência Pública Nº 65/2012.
- [19] BARROS, Alessandro Areal. Análise de Sobretensões e Sobrecorrentes Transitórias na Energização de Bancos de Capacitores. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, p. 10. 2015. Projeto de Graduação (Graduação em Engenharia Elétrica).
- [20] NAKAMURA, Roberta Dantas Ribeiro. Instalação de Capacitores de Potência em Redes Poluídas por Harmônicos e com Baixa Potência de Curto-Circuito. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG, p.29. 2011. Projeto de Diplomação (Mestrado em Engenharia Elétrica).

[21] FEITOSA, Marcos Viana. Eficiência Energética da Superintendência Federal da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE, p. 21. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica).

[22] FRAGOAS, Alexandre Gracioli. Estudo de Caso do Uso de Bancos de Capacitores em uma Rede de Distribuição Primária - Indicativos da sua Viabilidade Econômica. Universidade de São Paulo. São Carlos, SP, p.13. 2008. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica).

[23] DARDENGO, Victor Pellanda. Análise de Variações de Tensão de Curta Duração em uma Planta Industrial. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, p. 15. 2011. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica).

[24] SILVEIRA, Paulo Rogério da. SANTOS, Winderson Eugenio dos. Automação e Controle Discreto. São Paulo: Editora Érica, 1999.

[25] PINTO, Fábio da Costa. Sistemas de Automação e Controle. Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial. P. 9, 2005.

[26] SILVA, Marcelo Eurípedes da. Automação Industrial. Colégio Técnico Industrial de Piracicaba. Agosto/2005.

[27] VIEIRA, Fredy. Protótipo de um Transportador Industrial Utilizando um Sistema Analógico de Controle de Velocidade Programado em um CLP da μ DX. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, p. 16. 2010. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica).

[28] MARTINS, Geomar Machado. Princípios de Automação Industrial. Universidade Federal de Santa Maria. P. 18, março/2012.

[29] PRADO, Vinicius Reis do. Controladores Lógicos Programáveis, Norma IEC61131-3 e suas Implicações Práticas em Projetos. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, MG, 2013. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação).

[30] PUPO, Maurício Santos. Interface Homem-Máquina para Supervisão de um CLP em Controle de Processos Através da WWW. Universidade de São Paulo. São Carlos, SP, p. 27. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica).

[31] SILVESTRE, Rafael Pentagna. Implementação em Ladder de Sistemas de Automação Descritos por Redes de Petri Interpretadas para Controle. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Riode Janeiro, RJ. 2010. Projeto de Graduação (Graduação em Engenharia Elétrica).