

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

JOEL ANTONIO DA SILVA JUNIOR

**CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA POR BANCO DE  
CAPACITORES FIXOS E AUTOMÁTICOS: ANÁLISE DE  
VIABILIDADE ECONÔMICA APLICADA A UM ESTUDO DE CASO  
DO PRÉDIO DA BIOAGRO/UFV**

VIÇOSA  
2017

JOEL ANTONIO DA SILVA JUNIOR

**CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA POR BANCO DE  
CAPACITORES FIXOS E AUTOMÁTICOS: ANÁLISE DE  
VIABILIDADE ECONÔMICA APLICADA A UM ESTUDO DE CASO  
DO PRÉDIO DA BIOAGRO/UFV**

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. Erick Matheus da Silveira Brito.

VIÇOSA  
2017





**JOEL ANTONIO DA SILVA JUNIOR**

**CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA POR BANCO DE  
CAPACITORES FIXOS E AUTOMÁTICOS: ANÁLISE DE  
VIABILIDADE ECONÔMICA APLICADA A UM ESTUDO DE  
CASO DO PRÉDIO DA BIOAGRO/UFV**

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.

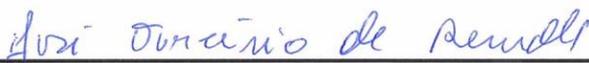
Aprovada em 28 de novembro de 2017.

**COMISSÃO EXAMINADORA**



---

**Prof. Ms. Erick Matheus da Silveira Brito - 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

*“Força não vem da vitória. Suas lutas que desenvolvem suas forças. Quando você passar por dificuldades e decidir não se render, isso é força.”*

*(Arnold Schwarzenegger)*

*Dedico este trabalho, assim como minha vida, aos meus verdadeiros heróis, Joel e Joselita. E as minhas queridas irmãs, Ana Paula e Simone.*

## *Agradecimentos*

Agradeço aos meus pais, Joel e Joselita, por acreditarem quando nem eu mesmo acreditei e, principalmente, confiarem em mim. As minhas irmãs Ana Paula e Simone e aos meus avós Manuel e Perpétua, agradeço todo o carinho que tem por mim.

Agradeço ao meu amigo, professor e orientador Prof. Erick Matheus, o “Bahia”, por aceitar me ajudar sabendo de toda dificuldade que encontraria, pois conhecia minhas limitações.

Agradeço meu amigo João Victor, por toda boa vontade, paciência e compreensão em me ajudar com as simulações deste trabalho. Sua ajuda foi de extrema importância. Também quero agradecer ao Josias Paoli, companheiro do início ao fim nessa jornada. Ao Felipe Campolina, pela companhia e conversas no desenvolvimento de nossos trabalhos. E quero agradecer ao Mateus Ruiz, meu último companheiro de morada, que acompanhou e aturou todo meu enjoamento nessa reta final.

Agradeço todos meus amigos de Viçosa, que amenizaram a saudade de casa e a todos meus amigos de Passos, amo vocês.

## *Resumo*

No presente trabalho, foram feitas medições no prédio da BIOAGRO/UFV, com a ajuda no Fluke 435, para análise do fator de potência. Foi constatado que o sistema opera, na maior parte do tempo, abaixo do valor mínimo estipulado por norma, podendo causar diversos danos, tanto no que se refere à qualidade da energia quanto em termos financeiros, para concessionária e principalmente ao consumidor. As correções do fator de potência, não foram feitas na prática de fato. Elas se deram através de bancos de capacitores fixos e automáticos, com valores diferentes de células capacitivas em simulações computacionais. Constataram-se vantagens, tanto no desempenho quanto ao custo de projeto, na aplicação de bancos automáticos, sendo o de células de 2,0 kVAr o mais eficiente.

Para que se pudesse fazer uma análise econômica, primeiramente foi estimado um valor a ser pago referente ao consumo de energia ativa e posteriormente, o valor referente ao reativo excedente, com o objetivo de verificar a viabilidade econômica do projeto de correção do fator de potência. O valor estimado referente ao consumo de energia ativa no mês de Maio, antes das correções, foi de R\$ 14.963,55, já com os impostos. A multa do reativo excedente no mesmo período, com as fases ainda desbalanceadas, foi de R\$ 3.454,66, representando 23,09% em relação ao valor de energia ativa. Com o balanceamento das fases e conseqüentemente, melhora do fator de potência medido, houve uma queda no valor da multa, sendo R\$ 2.609,39 o novo valor, correspondendo a 17,44% do valor de energia ativa. Logo, a correção do fator de potência do prédio pode acarretar em uma economia de R\$ 3.454,66, ou seja, 18,76% de economia na conta de luz.

## *Abstract*

In the present work, measurements were made in the BIOAGRO / UFV building, with help in Fluke 435, for power factor analysis. It was found that the system operates, for the most part, below the minimum value stipulated by standard, and can cause several damages, both in terms of energy quality and in financial terms, to the concessionaire and mainly to the consumer. The power factor corrections were made through fixed and automatic capacitor banks, with different values of capacitive cells, made through computational simulations. Advantages, both in performance and cost of design, were found in the application of automatic banks, with 2.0 kVA cells being the most efficient.

In order to make a economic analysis, it was first estimated a value to be paid referring to the active energy consumption and later, the value referring to the excess reactive, in order to verify the economic viability of the power factor correction project . The estimated amount referring to the active energy consumption in May, before corrections, was R \$ 14,963.55, already with taxes. The fine of the surplus reactive in the same period, with the phases still unbalanced, was R \$ 3,454.66, representing 23.09% in relation to the value of active energy. With the balance of the phases and consequently, an improvement in the measured power factor, there was a decrease in the fine, R \$ 2,609.39 being the new value, corresponding to 17.44% of the active energy value. Therefore, the correction of the power factor of the building can result in an economy of R \$ 3,454.66, or 18.76% savings in the electricity bill.

## *Sumário*

1	Introdução.....	15
1.1	Objetivo Geral .....	16
2	Revisão Teórica.....	17
2.1	Fator de Potência .....	17
2.2	Causas do Baixo Fator de Potência .....	20
2.3	Problemas Causados por um Baixo Fator de Potência.....	20
2.4	Vantagens da Correção do Fator de Potência.....	21
2.5	Correção do Fator de Potência.....	22
2.5.1	Utilização de Capacitores .....	22
2.6	Legislação.....	24
2.6.1	Conceitos Importantes .....	24
2.6.2	Tributos Aplicáveis ao Setor Elétrico.....	25
2.6.3	Faturamento do Reativo Excedente.....	27
3	Estudo de caso .....	29
3.1	Introdução.....	29
3.2	Materiais e Métodos .....	30
3.2.1	Transformador Trifásico de Alimentação.....	30
3.2.2	Medidor de Energia .....	31
3.2.3	Softwares .....	32
3.3	Medições.....	32
3.3.1	Ponto de medição .....	32
3.4	Considerações.....	32
4	Resultados e Discussões.....	34
4.1	Dados Coletados .....	34
4.2	Equilibrando as Fases .....	35
4.3	Correção do Fator de Potência por Banco de Capacitores .....	37
4.3.1	Simulações.....	37
4.3.2	Banco de Fixo – Células de 1,5 kVAr.....	37
4.3.3	Banco Automático - Células de 1,5 kVAr.....	40
4.3.4	Banco Automático - Células de 2,0 kVAr.....	41
4.4	Faturamento do Reativo Excedente.....	43
4.4.1	Circuito desequilibrado .....	44
4.4.2	Circuito equilibrado.....	45

4.5	Orçamento do Projeto.....	46
4.6	Análise de Viabilidade.....	48
5	Conclusões.....	51
6	Referências Bibliográficas .....	52

## *Lista de Figuras*

Figura 1 - Triângulo de Potência (WEG Automação S.A., 2001).....	18
Figura 2 - Ângulo de defasagem entre tensão e corrente (Silva, 2009).....	18
Figura 3 – Controlador para correção do fator de potência da série BR6000 (Siemens, 2016). .....	24
Figura 4 – (a) Bioagro. (b) Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia – INCT (BIOAGRO). .....	29
Figura 5 – Circuito equivalente do transformador (Fitzgerald, 2014).....	30
Figura 6 – Transformador trifásico de alimentação (Amiky, 2016).....	31
Figura 7 – Medidor de Qualidade de Energia Fluke 435. ....	31
Figura 8 – Painel geral (Amiky, 2016). ....	32
Figura 9 - Potência Ativa em W, por fase, coletada inicialmente. ....	34
Figura 10 - Fator de potência, por fase, coletado inicialmente.....	35
Figura 11 - Potência Ativa em W, por fase (fases equilibradas). ....	36
Figura 12 – Fator de Potência Total (fases equilibradas). ....	36
Figura 13 – Simulação do sistema e correção (carga e banco). ....	37
Figura 14 – Banco Fixo: Fator de potência atual e corrigido referente ao dia 20 (1,5 kVAr). ....	39
Figura 15 – Banco Fixo: Fator de potência atual e corrigido referente aos oito dias de medições (1,5 kVAr).....	39
Figura 16 - Fator de potência atual e corrigido referente ao dia 20 (1,5 kVAr).....	41
Figura 17 - Fator de potência atual e corrigido referente aos oito dias de medições (1,5 kVAr). .....	41
Figura 18 - Banco Automático: Fator de potência atual e corrigido referente ao dia 20 (2,0 kVAr). ....	43
Figura 19 - Banco Automático: Fator de potência atual e corrigido referente aos oito dias de medições (2,0 kVAr).....	43
Figura 20 - Fator de potência e potência ativa (em W) em função do tempo (desequilibrado). .....	45
Figura 21 - Fator de potência e potência ativa (em W) em função do tempo (equilibrado).....	46

## *Lista de Tabelas*

Tabela 1 – Variação da potência do Trafo em função do fator de potência (WEG Automação S.A., 2001). .....	21
Tabela 2 – Banco fixo: reativo em VAR necessário e manobrados e número de células necessárias (1,5 kVAr).....	38
Tabela 3 – Banco Automático: Reativo (VAR) necessário e manobrado e número de células necessárias (1,5 kVAr).....	40
Tabela 4 – Banco Automático: Reativo em VAR necessário e manobrados e número de células necessárias (2,0 kVAr).....	42
Tabela 5 – Orçamento: Banco Fixo.....	47
Tabela 6 – Orçamento: Banco Automático (1,5 kVAr).....	47
Tabela 7 – Orçamento: Banco Automático (2,0 kVAr).....	48
Tabela 8 – Dados da análise de viabilidade.....	49

# ***1 Introdução***

O termo Qualidade de Energia Elétrica (QEE) está relacionado a estudos que visam melhorar as condições de fenômenos que afetam direta ou indiretamente os Sistemas Elétricos de Energia (SEE) (Sacramento, 2010). Entende-se também como a condição na qual equipamentos, instalações e sistemas elétricos operem de forma satisfatória, sem prejuízo econômico, de desempenho e de vida útil (Dugan, 2003).

O rigor da fiscalização da QEE, através da ANEEL, intensificou-se com o aumento do consumo da energia elétrica no Brasil. Num primeiro momento, em 1966, através do Decreto nº 59.414, definiu-se regras relacionadas à energia reativa. Limitou-se, para consumidores de serviço de transmissão, um fator de potência indutivo de 0,90 e, para os demais consumidores, 0,85 (Barros, 2015). Desde então foram feitas alterações nesses níveis e atualmente o Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica do PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, da ANEEL, estabelece que para uma unidade consumidora ou conexão entre distribuidoras com tensão inferior a 230 kV, o fator de potência no ponto de conexão deve estar compreendido entre 0,92 e 1,00, capacitivo ou indutivo (Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, 2000). Além do mais, perdas elétricas, complicações com o perfil da tensão, subutilização de transformadores, maior carregamento de circuitos, entre outros malefícios, podem ser ocasionadas pela falta de controle de potência reativa que circula na rede, trazendo prejuízos aos consumidores em forma de multas (Hofmann, et al., 2012).

Ao se negligenciar a correção do fator de potência, além dos problemas relacionados à QEE já mencionados, surge o prejuízo econômico. Operando abaixo do valor mínimo de 0,92 regulamentado por norma, o consumidor irá pagar uma multa referente ao reativo excedente, chegando muitas das vezes a valores consideráveis. Sendo o sistema elétrico formado por cargas predominantemente indutivas, elevar o fator de potência significa injetar potência reativa. Métodos como controle de demanda de reativo sem deslocamento de fase, compensação com motores síncronos superexcitados e banco de capacitores, são utilizados na tentativa de se manter o fator de potência em níveis desejáveis. A técnica de alocação de bancos de capacitores no circuito primário ou secundário das redes de distribuição de energia elétrica tem sido bastante utilizada (Godoi, 2009).

Os bancos de capacitores são dimensionados para atender as exigências de potência reativa, de maneira que possam assim manter o fator de potência próximo de 1,0. Com energia reativa armazenada, eles operam permutando com as cargas indutivas. Eles podem ser fixos ou automáticos. Bancos fixos tem a característica de funcionarem permanentemente na rede. Já os automáticos são acionados em horários pré-estabelecidos, através de algum equipamento automático. Esse último se torna mais atraente devido, muitas das vezes, a inviabilidade de colocação e retirada do equipamento, por execução manual diariamente, na qual necessita o primeiro (Bordim, 2011).

### **1.1 Objetivo Geral**

Este trabalho tem como objetivo fazer um estudo e correção do fator de potência do prédio da BIOAGRO/UFV, além de uma análise econômica, verificando a viabilidade de implementação da correção por banco de capacitores.

Dado o objetivo geral, têm-se como objetivos específicos:

1. Estudar a qualidade da energia do prédio;
2. Identificar os possíveis fatores que levam o prédio a possuir um baixo fator de potência;
3. Corrigir o fator de potência visando não só a qualidade da energia, mas também reduzir ou eliminar o prejuízo financeiro; e,
4. Estudar e analisar a viabilidade econômica da implementação do projeto de correção.

## **2 Revisão Teórica**

### **2.1 Fator de Potência**

Na grande maioria das aplicações industriais, existem equipamentos que requerem um campo magnético para seu funcionamento, como transformadores, motores, reatores de lâmpadas de descarga e fornos de indução, também chamados de cargas indutivas. Para o funcionamento de tais equipamentos, a energia elétrica apresenta duas componentes: a componente ativa, que realmente realiza trabalho, gerando calor, luz e movimento, e componente reativa (energia reativa indutiva ou capacitiva), necessária para criar e manter campos magnéticos (Siemens, 2016).

Para reduzir as perdas na transmissão, faz-se necessário instalar nas proximidades das cargas consumidoras fontes de energia reativa, melhorando seu transporte e assim resultando em melhor rendimento do sistema elétrico (Filho, 2012).

De acordo com (Filho, 2012), a energia reativa indutiva é consumida por aparelhos normalmente dotados de bobina, tais como motores de indução, reatores, transformadores etc., ou que operam com formação de arco elétrico, como fornos a arco. Este tipo de carga apresenta fator de potência dito reativo indutivo. Já a energia reativa capacitiva pode ser gerada por motores síncronos superexcitados (compensadores síncronos) ou por capacitores. Neste caso, estas cargas apresentam fator de potência dito reativo capacitivo.

A potência elétrica é a medida de quanto trabalho (energia gerada ou consumida) pode ser realizado em determinado período de tempo. A potência ativa  $P$ , medida em Watts (W), é a componente ativa da energia. Já a potência reativa  $Q$ , medida em Var, é a componente reativa da energia. A soma vetorial da potência ativa  $P$  com a potência reativa  $Q$ , constituem a potência aparente  $S$ , medida em VA. A Figura 1 mostra o triângulo retângulo de potência (WEG Automação S.A., 2001).

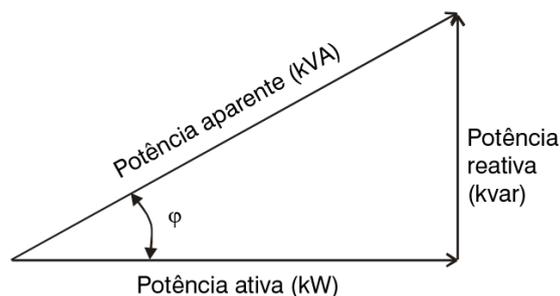


Figura 1 - Triângulo de Potência (WEG Automação S.A., 2001).

As Equações 1, 2 e 3, representam o cálculo das potências ativa, reativa e aparente, respectivamente, sendo  $V_L$  a tensão de fase e  $I_L$  a corrente de fase, conforme a Figura 2. Nesta figura está representada a potência para um sistema monofásico.

$$P = \sqrt{3}V_L I_L \cos \varphi \quad (1)$$

$$Q = \sqrt{3}V_L I_L \sin \varphi \quad (2)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{3}V_L I_L \quad (3)$$

O ângulo  $\varphi$ , medido em graus, é a defasagem entre a tensão  $V_L$  e corrente  $I_L$ .

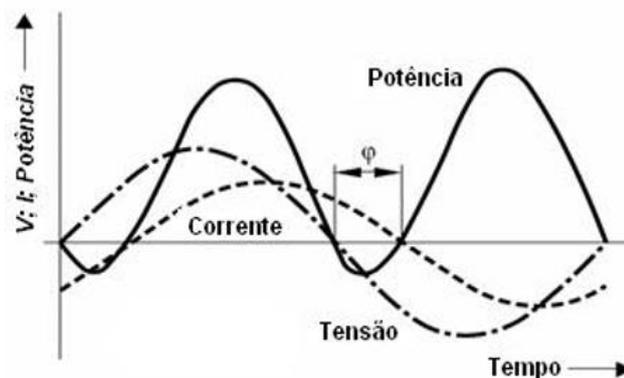


Figura 2 - Ângulo de defasagem entre tensão e corrente (Silva, 2009).

Então, o fator de potência (FP) pode ser definido como a razão entre a potência ativa  $P$  e a potência aparente  $S$ , observado na Equação 4.

$$FP = \frac{kW}{kVA} = \cos \varphi = \cos \left( \text{arc tg} \frac{kVar}{kW} \right) \quad (4)$$

O cosseno do ângulo  $\varphi$  representa o fator de potência para ondas perfeitamente senoidais. No caso de sistemas onde se considere as distorções harmônicas, o fator de

potência é calculado considerando todas as tensões e correntes ( $V_{rms}$  e  $I_{rms}$ ), representados na Equação 5 (Amiky, 2016).

$$FP = \frac{V_0 \cdot I_0 + \sum_{k \neq 0} V_{rms,k} \cdot I_{rms,k} \cos \theta_k}{\left( \sqrt{V_0^2 + \sum_{k \neq 0} V_{rms}^2} \right) \cdot \left( \sqrt{I_0^2 + \sum_{k \neq 0} I_{rms,k}^2} \right)} \quad (5)$$

O fator de potência é dito indutivo quando a onda da corrente está atrasada em relação à onda da tensão. Caso contrário, o fator de potência é dito capacitivo. Quando não há defasagem ( $\varphi=0$ ), o fator de potência é unitário (Filho, 2012).

Os valores do FP estão compreendidos entre 0 e 1, sendo positivo (indutivo) ou negativo (capacitivo). Um circuito puramente resistivo apresenta FP igual a 1 e um circuito puramente indutivo ou capacitivo apresenta FP igual a 0. Um alto FP indica uma eficiência do uso da energia alta. Já um baixo FP, indica uma baixa eficiência. Logo, FP indica a eficiência do uso da energia elétrica.

Cargas como aquecedores elétricos, lâmpadas incandescentes e outros, são constituídas apenas de potência ativa. Nesse caso, haverá apenas perdas no transporte, ou seja, toda potência gerada é transportada pela concessionária de energia elétrica e absorvida pelas cargas mencionadas. Logo, toda energia consumida é registrada no medidor e faturada pela concessionária (Filho, 2012).

Em se tratando de aparelhos como motores, que além da energia ativa para realizar trabalho, também necessitam de energia reativa de magnetização para ativar seu campo indutor, o sistema de suprimento transporta uma parcela de energia reativa indutiva, que não produz trabalho e também o sobrecarrega. Esta carga deve ser cobrada a partir de determinado valor, segundo a legislação, que é dado pelo limite do fator de potência de 0,92 indutivo ou capacitivo (Filho, 2012).

Um banco e capacitores conectado num ponto próximo ao da carga permitem que o excedente de energia reativa indutiva não ocupe espaço nos condutores, transformadores etc. do sistema de suprimento. Esse banco irá fornecer à carga energia capacitiva complementar, permitindo que o sistema de suprimento transporte mais energia ativa. Caso a carga não realize nenhum trabalho, deixando de consumir energia ativa, o banco deve ser desligado, caso contrário, passará a fornecer energia reativa capacitiva ao sistema de suprimento (Filho, 2012).

## 2.2 Causas do Baixo Fator de Potência

Um baixo fator de potência pode ser resultado das causas apresentadas a seguir (Filho, 2012):

- Motores de indução trabalhando a vazio durante um longo período de operação;
- Motores superdimensionados para as máquinas a eles acoplados;
- Transformador em operação a vazio ou em carga leve;
- Grande número de reatores de baixo fator de potência suprindo lâmpadas de descarga (lâmpadas fluorescentes, vapor de mercúrio, vapor de sódio etc.);
- Fornos a arco;
- Fornos de indução eletromagnética;
- Máquinas de solda a transformador;
- Equipamentos eletrônicos;
- Grande número de motores de pequena potência em operação durante um longo período.

## 2.3 Problemas Causados por um Baixo Fator de Potência

Grandes quantidades de potência reativa que aumentam a corrente total que circula nas redes de distribuição de energia elétrica da concessionária e das unidades consumidoras, resultam em baixos valores de FP. Linhas de transmissão e distribuição, assim como subestações, podem sobrecarregar devido a essa condição, trazendo inconvenientes, tais como perdas elétricas na instalação, quedas de tensão e subutilização da capacidade instalada (WEG Automação S.A., 2001).

O excesso de energia reativa faz com que a corrente total aumente. Visto que as perdas elétricas se dão em forma de calor e são proporcionais ao quadrado da corrente total ( $I^2R$ ), faz-se uma relação entre o baixo fator de potência e um incremento de perdas elétricas, aquecendo equipamentos e condutores (WEG Automação S.A., 2001).

Já as quedas de tensões bruscas nos transformadores se dão devido a grande demanda de energia reativa, podendo levar o desligamento de aparelhos sensíveis a essa variação ou a interrupção no fornecimento de energia. Há também o risco do aumento de tensão, caso o fator de potência seja fortemente capacitivo, podendo operar os dispositivos de proteção e assim desligar o sistema. A diminuição ou aumento da intensidade no brilho de lâmpadas e de corrente em motores evidenciam esses efeitos (Barrêto, 2017).

Por fim, o “espaço” ocupado pela energia reativa em excesso poderia ser utilizado para o atendimento de novas cargas. Logo, esse excesso de energia reativa sobrecarrega a instalação elétrica, fazendo-se necessário um investimento para a instalação de novas cargas, o que seria evitado caso o fator de potência apresentasse valores mais altos. Esses investimentos estão relacionados a transformadores e condutores, sendo que esses devem atender aos equipamentos utilizados e sua capacidade deve ser calculada com base na potência aparente das instalações (WEG Automação S.A., 2001)

A Tabela 1 relaciona uma carga útil de 800 kW e fatores de potência crescentes.

Tabela 1 – Variação da potência do Trafo em função do fator de potência (WEG Automação S.A., 2001).

Potência útil absorvida - kW	Fator de Potência	Potência do trafo - kVA
800	0,50	1.600
	0,80	1.000
	1,00	800

## 2.4 ***Vantagens da Correção do Fator de Potência***

Segundo (WEG Automação S.A., 2001), corrigindo o fator de potência, a empresa terá as seguintes vantagens:

- Redução significativa do custo da energia elétrica;
- Aumento da eficiência energética da empresa;
- Melhoria da tensão;
- Aumento da capacidade dos equipamentos de manobra;
- Aumento da vida útil das instalações e equipamentos;
- Redução do efeito Joule;

- Redução da corrente reativa na rede elétrica.

Também segundo (WEG Automação S.A., 2001), corrigindo o fator de potência, a concessionária terá as seguintes vantagens:

- O bloco de potência reativa deixa de circular no sistema de transmissão e distribuição;
- Evita perdas pelo efeito Joule;
- Aumenta a capacidade do sistema de transmissão e distribuição para conduzir o bloco de potência ativa;
- Aumenta a capacidade de geração com intuito de atender mais consumidores;
- Diminui os custos de geração.

## **2.5 Correção do Fator de Potência**

### **2.5.1 Utilização de Capacitores**

Podemos considerar essa como sendo o método mais efetivamente utilizado na prática, com o objetivo de correção do fator de potência. Dentre os principais motivos, são que capacitores estáticos são equipamentos de custo relativamente baixo, fácil instalação, dimensões reduzidas e que, justamente com cargas indutivas presentes, operam permutando a energia reativa por eles acumulada. Sendo assim, os bancos de capacitores fornecem energia reativa que originalmente seria fornecida pela concessionária (Silva, 2009).

O esquema de ligação de capacitores em sistemas de distribuição pode ser empregado de duas maneiras: em série com as linhas ou em paralelo com as cargas.

O objetivo da ligação em série é reduzir as quedas de tensão causadas pelas reatâncias indutivas. Mesmo com aumentos de tensão, esse tipo de ligação não proporciona correção do fator de potência como na ligação em paralelo e as correntes nas linhas não são consideravelmente reduzidas. Portanto, justamente associados à sensibilidade de transitórios, seja de tensões e/ou correntes, esses aspectos fazem com que a ligação em série de capacitores se limite, praticamente, ao controle de flutuações de tensão (Fragoas, 2008). Já ligação em paralelo seria a mais utilizada na correção do fator de potência, injetando energia reativa adequada na instalação.

Os bancos de capacitores podem ser dimensionados para operarem de maneira fixa (Banco de Capacitores Fixo) ou de maneira controlada (Banco de Capacitores Automáticos).

Bancos de capacitores fixos são interessantes quando, ao longo de uma curva diária, a carga da indústria praticamente não varia. A potência capacitiva de base corresponde à demanda mínima da instalação (Filho, 2012).

A determinação da potência capacitiva necessária para corrigir o fator de potência, tanto no banco fixo quanto no automático, será pelo Método Analítico. O Método Analítico se baseia na resolução do triângulo das potências, de acordo com a Equação 6 (Filho, 2012).

$$P_c = P_{at} \times (tg\psi_1 - tg\psi_2) \quad (6)$$

Onde,

$P_c$  – potência dos capacitores;

$P_{at}$  – potência ativa, em kW;

$\psi_1$  – ângulo do fator de potência original;

$\psi_2$  – ângulo do fator de potência desejado

Em instalações de médio e grande porte, para uma correção global ou por setores, onde exista uma manutenção do fator de potência em uma faixa estreita de variação ou haja uma considerável variação da curva diária de carga reativa, utilizam-se os bancos de capacitores automáticos. Eles levam em consideração as necessidades momentâneas de energia reativa das instalações, suprindo-as e assim, promovendo o controle dinâmico do fator de potência (Silva, 2009), (Filho, 2012).

Um dispositivo utilizado para a correção do fator de potência em bancos de capacitores automáticos é o controlador, observado na Figura 3, que tem a função de monitorar o fator de potência da instalação e manobrar os estágios, adicionando ou retirando kVAr da instalação, de acordo com a necessidade (Siemens, 2016).

É importante que a potência máxima capacitiva a ser chaveada por estágio do controlador deve ser: 15kVar para bancos trifásicos de 220V e 25kVar para 380/440V. Essa recomendação visa à redução das correntes de surto que ocorrem na energização de cada célula capacitiva, corrente essa que pode chegar a 100 vezes o valor da corrente nominal do capacitor. Também impede problemas como queima de fusíveis e danos nos contatos dos

contactores, permitindo a utilização de contactores convencionais e dispensando os indutores antissurto (Filho, 2012).



Figura 3 – Controlador para correção do fator de potência da série BR6000 (Siemens, 2016).

## 2.6 Legislação

### 2.6.1 Conceitos Importantes

A seguir, seguem alguns conceitos, tais como grupos e subgrupos de fornecimento e também as atuais modalidades tarifárias, presentes na Resolução 456 da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, 2012)

- Estrutura tarifária: conjunto de tarifas aplicáveis às componentes de consumo de energia elétrica e/ou demanda de potência ativas de acordo com a modalidade de fornecimento.
- Estrutura tarifária convencional: estrutura caracterizada pela aplicação de tarifas de consumo de energia elétrica e/ou demanda de potência independentemente das horas de utilização do dia e dos períodos do ano.
- Estrutura tarifária horo-sazonal: estrutura caracterizada pela aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica e de demanda de potência de acordo com as horas de utilização do dia e dos períodos do ano, conforme especificação a seguir:
  - a) Tarifa Azul: modalidade estruturada para aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica de acordo com as horas de utilização do dia e os períodos do ano, bem como de tarifas diferenciadas de demanda de potência de acordo com as horas de utilização do dia.

- b) Tarifa Verde: modalidade estruturada para aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica de acordo com as horas de utilização do dia e os períodos do ano, bem como de uma única tarifa de demanda de potência.
- c) Convencional Binômia: aplicada às unidades consumidoras do grupo A caracterizada por tarifas de consumo de energia elétrica e demanda de potência, independentemente das horas de utilização do dia.

- Grupo “A”: grupamento composto de unidades consumidoras com fornecimento em tensão igual ou superior a 2,3 kV, ou, ainda, atendidas em tensão inferior a 2,3 kV a partir de sistema subterrâneo de distribuição e faturadas neste Grupo nos termos definidos no art. 82, caracterizado pela estruturação tarifária binômia e subdividido nos seguintes subgrupos:

- a) Subgrupo A1 - tensão de fornecimento igual ou superior a 230 kV;
- b) Subgrupo A2 - tensão de fornecimento de 88 kV a 138 kV;
- c) Subgrupo A3 - tensão de fornecimento de 69 kV;
- d) Subgrupo A3a - tensão de fornecimento de 30 kV a 44 kV;
- e) Subgrupo A4 - tensão de fornecimento de 2,3 kV a 25 kV;
- f) Subgrupo AS - tensão de fornecimento inferior a 2,3 kV, atendidas a partir de sistema subterrâneo de distribuição e faturadas neste Grupo em caráter opcional.

### **2.6.2 Tributos Aplicáveis ao Setor Elétrico**

Com o intuito de assegurar recursos para o desenvolvimento de atividades do Governo, os tributos são, a partir de determinação legal, pagamentos compulsórios devidos ao poder público. Estão embutidos nos preços dos bens e serviços. Na conta de luz estão: os federais, estaduais e municipais. (Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, 2008).

#### **Tributos Federais**

- **Programas de Integração Social (PIS) e Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social (COFINS):** cobrados pela União para manter programas voltados ao trabalhador e para atender a programas sociais do Governo Federal. A aplicação desses tributos foi recentemente alterada, com elevação no valor da conta de energia. Com a edição das Leis nº 10.637/2002, 10.833/2003 e 10.865/2004, o PIS e a COFINS tiveram suas alíquotas alteradas para 1,65% e 7,6%, respectivamente, passando a ser apurados de forma

não cumulativa. Dessa forma, a alíquota média desses tributos passou a variar com o volume de créditos apurados mensalmente pelas concessionárias e com o PIS e COFINS pagos sobre custos e despesas no mesmo período, tais como a energia adquirida para revenda ao consumidor.

### **Tributos Estaduais**

- **Imposto sobre a Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS):** previsto no artigo 155 da Constituição Federal de 1988, este imposto incide sobre as operações relativas à circulação de mercadorias e serviços e é de competência dos governos estaduais e do Distrito Federal. O ICMS é regulamentado pelo código tributário de cada estado, ou seja, estabelecido em lei pelas casas legislativas. Por isso são variáveis. A distribuidora tem a obrigação de realizar a cobrança do ICMS direto na fatura e repassá-lo integralmente ao Governo Estadual.

### **Cálculo do ICMS aplicado à fatura de consumidores Comerciais e Serviços**

Segundo (CEMIG):

$$ICMS = \frac{I \times A}{100 - A} \quad (6)$$

Onde:

I = Importe (Consumo kWh × Tarifa);

A = Alíquota vigente (25%)

### **Tributos Municipais**

- **Contribuição para Custeio do Serviço de Iluminação Pública (CIP):** prevista no artigo 149-A da Constituição Federal de 1988 que estabelece, entre as competências dos municípios, dispo, conforme lei específica aprovada pela Câmara Municipal, à forma de cobrança e a base de cálculo da CIP. Assim, são atribuídas ao Poder Público Municipal toda e qualquer responsabilidade pelos serviços de projeto, implantação, expansão, operação e manutenção das instalações de iluminação pública. Neste caso, a concessionária apenas arrecada a taxa de iluminação pública para o município.

De acordo com (Prefeitura Municipal de Viçosa, 2015), o valor do CIP é de 15% em cima do valor bruto, para consumidores pertencentes ao Art 4º LEI N° 2530/2015.

**Art. 4º.** O sujeito passivo da Contribuição para Custeio do Serviço de Iluminação Pública é o consumidor de energia elétrica residente ou estabelecido no território do Município e que esteja cadastrado junto à concessionária distribuidora de energia elétrica titular da concessão no território do Município, excetuando-se os consumidores localizados em área rural.

### 2.6.3 Faturamento do Reativo Excedente

Segue a transcrição da Seção IV, da Resolução 414 da ANEEL, que se trata do faturamento do reativo excedente.

**“Art. 95.** O fator de potência de referência “f<sub>R</sub>”, indutivo ou capacitivo, tem como limite mínimo permitido, para as unidades consumidoras do grupo A, o valor de 0,92. (Redação dada pela REN ANEEL 569, de 23.07.2013)

Parágrafo único. Aos montantes de energia elétrica e demanda de potência reativa que excederem o limite permitido, aplicam-se as cobranças estabelecidas nos arts. 96 e 97, a serem adicionadas ao faturamento regular de unidades consumidoras do grupo A, incluídas aquelas que optarem por faturamento com aplicação da tarifa do grupo B nos termos do art. 100. (Redação dada pela REN ANEEL 569, de 23.07.2013)

**Art. 96.** Para unidade consumidora que possua equipamento de medição apropriado, incluída aquela cujo titular tenha celebrado o CUSD, os valores correspondentes à energia elétrica e demanda de potência reativas excedentes são apurados conforme as seguintes equações: (Redação dada pela REN ANEEL 418, de 23.11.2010).

$$E_{RE} = \sum_{T=1}^n \left[ EEAM_T \times \left( \frac{f_R}{f_T} - 1 \right) \right] \times VR_{ERE} \quad (7)$$

One:

$E_{RE}$  = valor correspondente à energia elétrica reativa excedente à quantidade permitida pelo fator de potência de referência “f<sub>R</sub>”, no período de faturamento, em Reais (R\$);

$EEAM_T$  = montante de energia elétrica ativa medida em cada intervalo “T” de um (uma) hora, durante o período de faturamento, em megawatt-hora (Mwh);

$f_R$  = fator de potência de referência igual a 0,92;

$f_T$  = fator de potência da unidade consumidora, calculado em cada intervalo “T” de 1 (uma) hora, durante o período de faturamento, observadas as definições dispostas nos incisos I e II do § 1o deste artigo;

$VR_{ERE}$  = valor de referência equivalente à tarifa de energia "TE" da bandeira verde aplicável ao subgrupo B1, em Reais por megawatt-hora (R\$/MWh); (Redação dada pela REN ANEEL 547, de 16.04.2013.)

§ 1o Para a apuração do  $E_{RE}$  deve-se considerar:

I – o período de 6 (seis) horas consecutivas, compreendido, a critério da distribuidora, entre 23h 30min e 6h 30min, apenas os fatores de potência “fT” inferiores a 0,92 capacitivo, verificados em cada intervalo de 1 (uma) hora “T”; e

II – o período diário complementar ao definido no inciso I, apenas os fatores de potência “fT” inferiores a 0,92 indutivo, verificados em cada intervalo de 1 (uma) hora “T”.

§ 2o O período de 6 (seis) horas, definido no inciso I do § 1o , deve ser informado pela distribuidora aos respectivos consumidores com antecedência mínima de 1 (um) ciclo completo de faturamento.

§ 3º Na cobrança da demanda de potência reativa excedente, quando o VRDRE for nulo, a distribuidora deve utilizar valor correspondente ao nível de tensão imediatamente inferior. (Redação dada pela REN ANEEL 418, de 23.11.2010)”

### 3 *Estudo de caso*

#### 3.1 *Introdução*

Este trabalho foi realizado no prédio do BIOAGRO/UFV (Instituto de Biotecnologia Aplicada à Agropecuária da Universidade Federal de Viçosa). Desenvolvendo pesquisas há 26 anos na área de biotecnologia para criação de processos e produtos biotecnológicos, a estrutura do prédio é composta por dois pavimentos: o BIOAGRO (área: 2.913 m<sup>2</sup>) e o Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia – INCT / Anexo ao BIOARGO (área: 1.796 m<sup>2</sup>). A estrutura é composta por 27 laboratórios instalados, 3 laboratórios associados e agrupa aproximadamente 600 pessoas entre pesquisadores, técnicos, estudantes e visitantes, representados na Figura 4 (BIOAGRO).



(a)



(b)

Figura 4 – (a) Bioagro. (b) Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia – INCT (BIOAGRO).

A escolha deveu-se, principalmente, à constatação de um transformador de alimentação mal dimensionado presente no prédio. Esse e outros fatos fazem com que o prédio obtenha um fator de potência abaixo de 0,92 na maior parte do tempo.

## 3.2 Materiais e Métodos

### 3.2.1 Transformador Trifásico de Alimentação

Dado uma potência de entrada, se a potência de saída estiver muito abaixo, as perdas magnéticas no núcleo de ferro do transformador tornam-se relevantes se comparado a potencia ativa, podendo causar um baixo fator de potência.

A Figura 5 mostra o circuito equivalente de um transformador, onde estão representadas as tensões nos terminais do primário  $\widehat{V}_1$  e secundário  $\widehat{V}_2$ , correntes do primário  $\widehat{I}_1$  e secundário  $\widehat{I}_2$ , componente de carga  $\widehat{I}'_2$ , componente de excitação  $\widehat{I}_\varphi$ , resistência de perdas no núcleo  $R_c$ , reatância de magnetização  $X_m$ , resistências de primário  $R_1$  e secundário  $R_2$ , indutâncias de primário  $X_{l1}$  e secundário  $X_{l2}$ , número de espiras do enrolamento primário  $N_1$  e secundário  $N_2$  e tensões induzidas no primário  $\widehat{E}_1$  e secundário  $\widehat{E}_2$ .

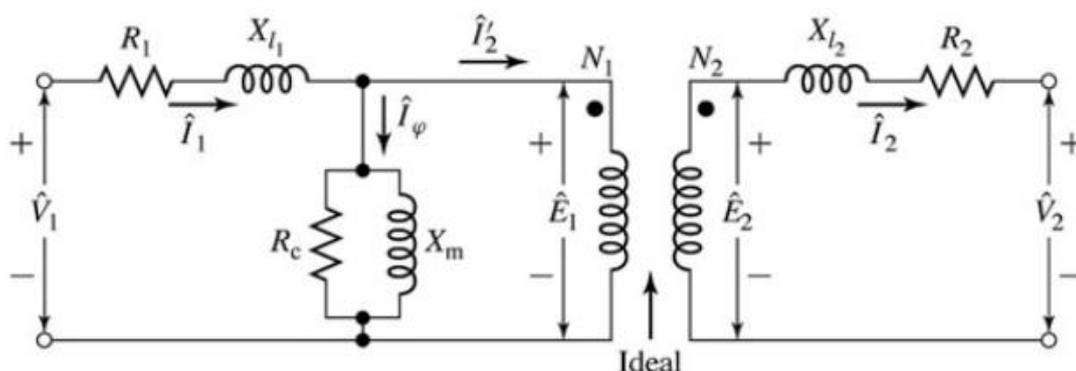


Figura 5 – Circuito equivalente do transformador (Fitzgerald, 2014)

O transformador de alimentação do prédio é um transformador trifásico, com potência nominal de 500 kVA, 60 Hz de frequência e impedância de 4,57%. Fabricado pelo antigo consórcio SIEMENS/TUSA, o mesmo é da marca União S.A. Sua corrente nominal no primário é de 20,91 A e secundário 656,07 A. A corrente de curto no primário é de 0,46 kA, em 13,8 kV e secundário 14,36 kA (Amiky, 2016).

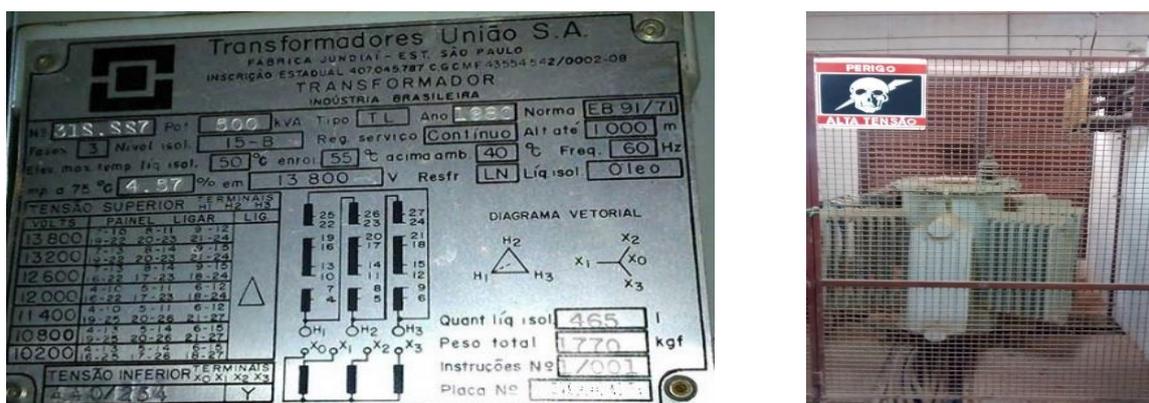


Figura 6 – Transformador trifásico de alimentação (Amiky, 2016).

No mês de Maio de 2017 foi estimado um consumo de aproximadamente 35 KWh, valor baixo comparado à potência nominal de 500 kVA do transformador de alimentação, sendo essa uma das principais razões do baixo fator de potência.

### 3.2.2 Medidor de Energia

O medidor utilizado foi o medidor de qualidade de energia Fluke 435, representado na Figura 7. Com iterações de quinze minutos, as medições de potência ativa, reativa, aparente e o fator de potência, foram realizadas durante oito dias (de 20 a 27 de maio de 2016), na tentativa de obter o comportamento do consumo de energia durante os dias da semana, incluindo o final de semana, onde, espera-se um consumo diferente dos demais, devido a um fluxo menor de pessoas no prédio. Esse fluxo menor pode resultar em redução das cargas, com lâmpadas e equipamentos eletroeletrônicos desligados.



Figura 7 – Medidor de Qualidade de Energia Fluke 435.

### 3.2.3 Softwares

Foram utilizados 2 tipos de softwares para a análise dos dados medidos. Para que os dados pudessem ser transferidos do Fluke para o computador, utilizou-se o PowerLog 430-II V5.3. Já para análise e simulação, utilizou-se o MatLab R2016a, juntamente com o Simulink.

## 3.3 *Medições*

### 3.3.1 Ponto de medição

As medições foram realizadas no secundário do transformador, onde o medidor Fluke foi ligado no painel geral, representado na Figura 8. Este painel é do tipo quatro fios (3F + N), cujos são advindos da saída do Trafo, com 127V entre fase e neutro e 220V entre fases.



Figura 8 – Painel geral (Amiky, 2016).

## 3.4 *Considerações*

As medições, como dito anteriormente, foram realizadas num período de 8 dias, em razão das dificuldades encontradas em realizar medições por períodos mais longos, como o de o medidor ser muito requisitado pelos alunos do departamento de engenharia elétrica. Além disso, era sempre necessária a presença de um técnico responsável para acessar o local, o que muitas das vezes o mesmo não estava disponível. Portanto, procurou-se fazer as medições ao longo de uma semana completa, contemplando todos os dias da semana, inclusive finais de semanas, para que assim, pudesse ser feito uma média do comportamento da energia durante o período de 1 (um) mês.

A maioria dos prédios da UFV não apresenta faturamento próprio. Portanto, não há uma preocupação pela correção do fator de potência individual, uma vez que essa correção é

feita na entrada do transformador que alimenta a universidade. O prédio da BIOAGRO apresenta um transformador de alimentação superdimensionado, fazendo com que a energia reativa necessária para seu funcionamento seja elevada em comparação ao consumo de potência ativa do prédio. Isso contribui para valores abaixo de 0,92 durante o dia. A existência desse transformador superdimensionado e má qualidade do uso da energia foram decisivas na escolha do prédio para a realização do trabalho. Além disso, a carga do prédio é composta, em sua maioria, por freezers, lâmpadas fluorescentes, motores, etc. Por isso, considerou-se a carga como sendo uma carga indutiva. Este trabalho consistiu em uma simulação de um prédio que apresenta essas mesmas características, ou seja, fator de potência indutivo abaixo de 0,92 na maior parte do tempo.

## 4 Resultados e Discussões

### 4.1 Dados Coletados

As figuras a seguir mostram os dados que foram coletados do dia 20 a 28 de maio de 2016, em intervalos de 15 minutos. A Figura 9 destaca a discrepância existente entre potências ativas nas três fases. Nota-se o desequilíbrio entre as cargas, o que também contribui para um baixo fator de potência. Na Figura 10 observou-se que, a Fase 2, que apresenta um consumo de potência ativa maior em relação às outras duas fases, apresenta um fator de potência razoavelmente melhor (acima de 0,92 em determinados instantes), enquanto o fator de potência das outras duas se encontra abaixo do limite permitido por norma, na maior parte do tempo.

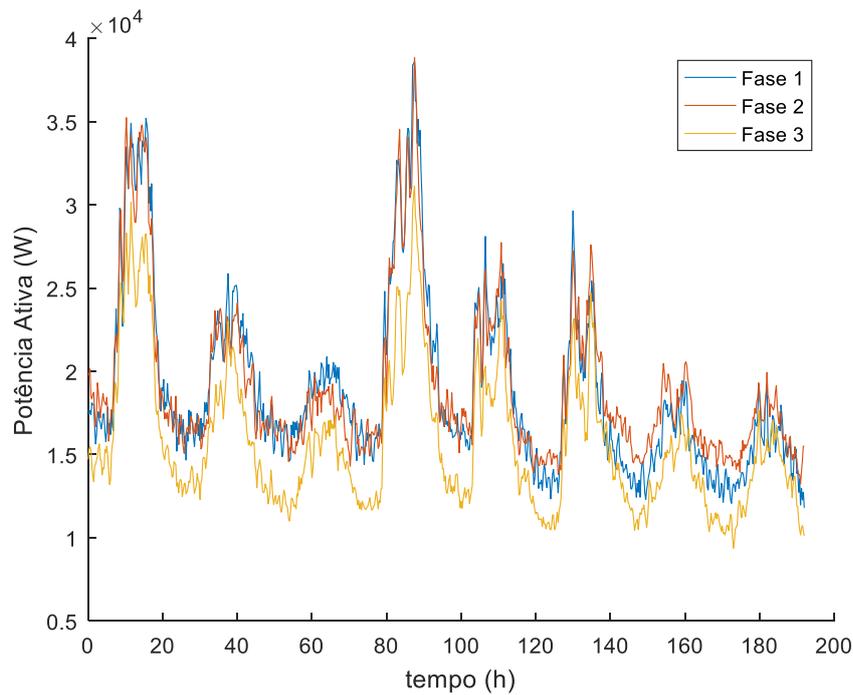


Figura 9 - Potência Ativa em W, por fase, coletada inicialmente.

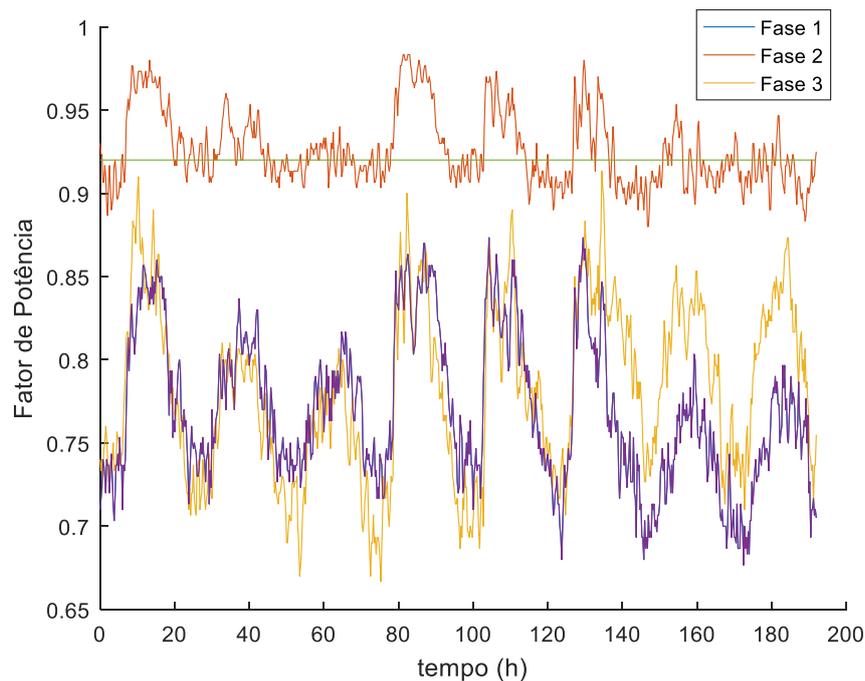


Figura 10 - Fator de potência, por fase, coletado inicialmente.

Dessa maneira, além dos problemas relacionados à qualidade da energia, o prédio pagaria multa relacionada ao excedente de energia reativa. A seguir foi calculado esse excedente.

## 4.2 Equilibrando as Fases

Denomina-se circuito elétrico o agrupamento de pontos de consumo, ligados ao mesmo dispositivo de proteção, no caso o disjuntor e alimentados pelos mesmos condutores. Com o intuito de assegurar um melhor equilíbrio de cargas entre fases, em sistemas polifásicos, os circuitos devem ser distribuídos de maneira a conter valores de potência mais próximos da igualdade uns dos outros (Creder, 2004). Um desequilíbrio entre fases também pode ser umas das causas de um baixo fator de potência.

Para equilibrar as fases, na tentativa de corrigir total ou parcialmente o fator potência, foram somadas suas respectivas potências ativas e distribuído esse valor igualmente entre elas, fazendo com que cada fase apresente cargas de mesmo valor. Esse procedimento foi adotado devido à inviabilidade de se fazer uma distribuição de maneira que cada disjuntor possua o mesmo valor de potência ativa. Logo, há uma pequena diferença, pois a divisão puramente matemática das cargas permite que cada fase apresente o mesmo valor potência, o que na prática não ocorreria, havendo uma diferença mínima entre elas.

A Figura 11 apresenta o consumo por fase, agora equilibrado. Feito o equilíbrio das fases, foi verificada uma melhora em relação no fator de potência medido pelo Fluke, representado na Figura 12.

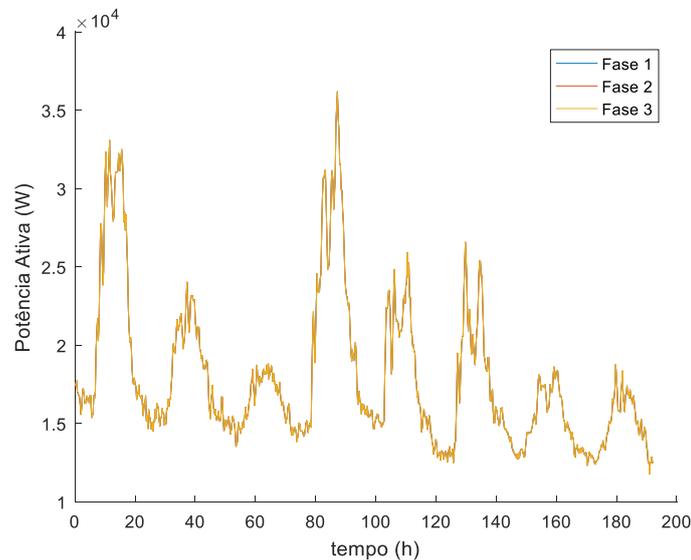


Figura 11 - Potência Ativa em W, por fase (fases equilibradas).

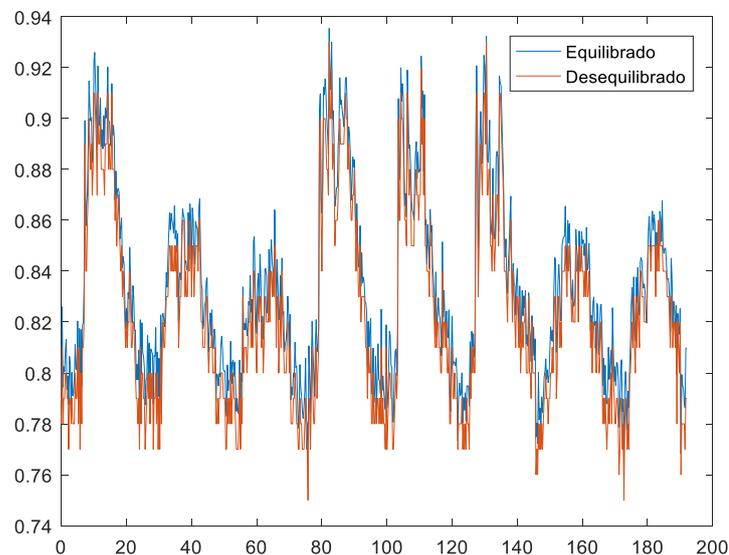


Figura 12 – Fator de Potência Total (fases equilibradas).

Portanto, pelo gráfico da Figura 12 observou-se que, apesar da melhora do fator de potência, apenas equilibrar as fases não foi suficiente para manter esse valor acima de 0,92, recomendado pela norma, necessitando-se assim, outro método de correção.

## 4.3 Correção do Fator de Potência por Banco de Capacitores

### 4.3.1 Simulações

Para representar o sistema que constitui o prédio e fazer a correção do fator de potência, utilizou-se o Matlab Simulink R2016a. O circuito representado na Figura 13 é constituído basicamente de uma fonte trifásica senoidal, representando o secundário do transformador que alimenta o prédio, e duas fontes trifásicas dinâmicas, para assim simular os valores medidos a cada hora. Uma fonte dinâmica representa as cargas indutivas do prédio e a outra, o banco de capacitores para correção.

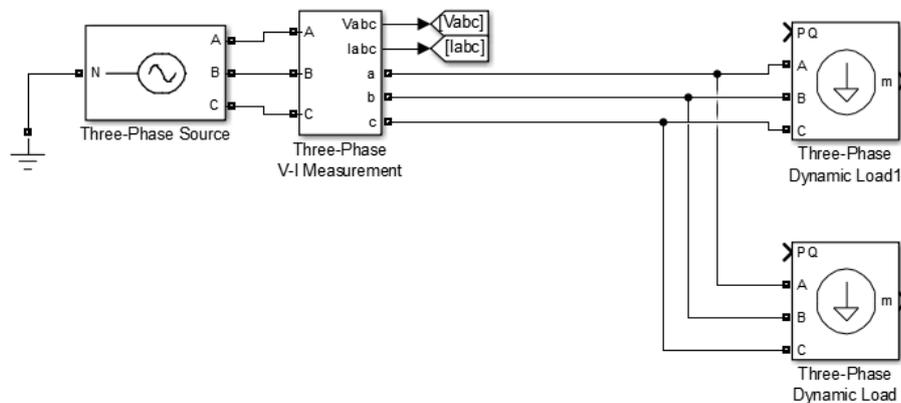


Figura 13 – Simulação do sistema e correção (carga e banco).

### 4.3.2 Banco de Fixo – Células de 1,5 kVAr

Considerando-se as cargas lineares, ou seja, não existindo grande variação no consumo diário, não houve preocupação em adotar o dia de maior consumo, mesmo o banco sendo fixo. Por praticidade, foram ilustradas apenas as correções do fator de potência relativas ao dia 20 de maio de 2017, sendo a metodologia utilizada para os demais.

Pelo método analítico, foram calculados os valores de energia reativa necessários para corrigir o fator de potência horário em 0,95. Esse valor foi adotado de maneira a compensar erros como o de aproximação matemática, entre outros. Como as cargas do prédio foram consideradas indutivas, não há faturamento no período de 00:00 às 05:59, pois o fator de potência, apesar de estar abaixo de 0,92, não é capacitivo. Posteriormente, calculou-se o número máximo de células necessário para correção, com base no horário compreendido entre 16:00 às 17:00 horas, sendo esse o horário de maior demanda de reativo para a correção. Os

valores considerados de 1,5 kVAr e 2,0 kVAr são valores comerciais e apresentaram melhor custo benefício.

$$N = \frac{Q_{CMAX}}{1,5 k} = \frac{22352}{1500} = 14,90 \quad (8)$$

Logo, são necessárias 15 células de 1,5 kVAr para correção. Os valores de reativo e o número de células utilizado por estágio estão representados na Tabela 2, assim como o fator de potência já corrigido.

Tabela 2 – Banco fixo: reativo em VAR necessário e manobrados e número de células necessárias (1,5 kVAr).

Hora	Pot. Ativa (W)	FP Atual	VAR Necessário	VAR Manobrado	N° células	FP Corrigido
00:00 - 01:00	49050	0,78	-	-	-	-
01:00 - 02:00	47750	0,79	-	-	-	-
02:00 - 03:00	46750	0,78	-	-	-	-
03:00 - 04:00	47350	0,78	-	-	-	-
04:00 - 05:00	50500	0,79	-	-	-	-
05:00 - 06:00	52050	0,8	-	-	-	-
06:00 - 07:00	52050	0,81	20576	22500	15	0,97
07:00 - 08:00	57250	0,84	18163	22500	15	0,97
08:00 - 09:00	66900	0,87	15925	22500	15	0,96
09:00 - 10:00	87050	0,89	15985	22500	15	0,97
10:00 - 11:00	90800	0,89	16674	22500	15	0,97
11:00 - 12:00	84800	0,88	17898	22500	15	0,96
12:00 - 13:00	88550	0,89	16261	22500	15	0,97
13:00 - 14:00	87250	0,88	18415	22500	15	0,97
14:00 - 15:00	89650	0,88	18921	22500	15	0,97
15:00 - 16:00	88950	0,88	18774	22500	15	0,96
16:00 - 17:00	84450	0,86	22352	22500	15	0,97
17:00 - 18:00	70100	0,85	20403	22500	15	0,96
18:00 - 19:00	56300	0,84	17861	22500	15	0,96
19:00 - 20:00	54700	0,83	18780	22500	15	0,96
20:00 - 21:00	53600	0,83	18402	22500	15	0,96
21:00 - 22:00	52500	0,83	18024	22500	15	0,97
22:00 - 23:00	49200	0,8	20729	22500	15	0,97
23:00 - 24:00	43650	0,78	20673	22500	15	0,96

Na Figura 14, foi feita uma comparação entre o fator de potência medido pelo Fluke e o fator de potência corrigido pelo banco fixo. Nota-se que o banco de capacitores foi eficiente, mantendo o fator de potência acima de 0,92 no período de 06:00 da manhã às 23:59. Na

Figura 15, demonstrou-se a correção dos oito dias de medições, o que também se mostrou eficiente e acima de 0,92.

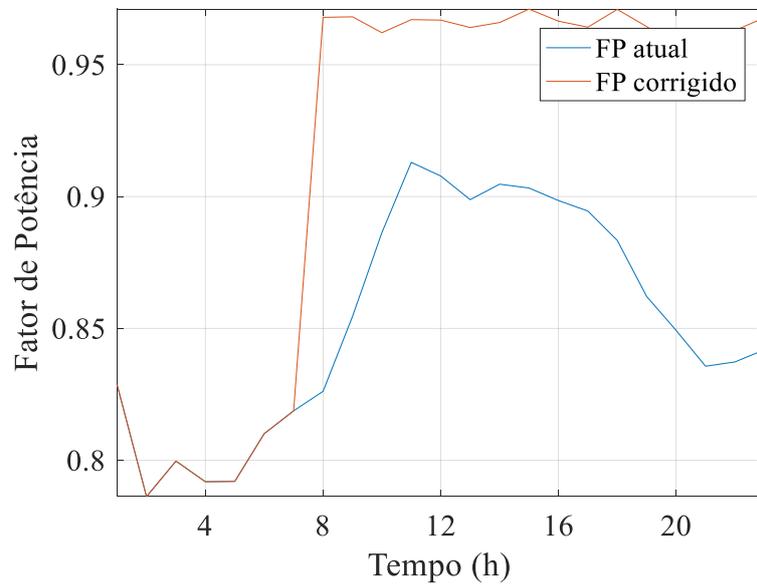


Figura 14 – Banco Fixo: Fator de potência atual e corrigido referente ao dia 20 (1,5 kVAr).

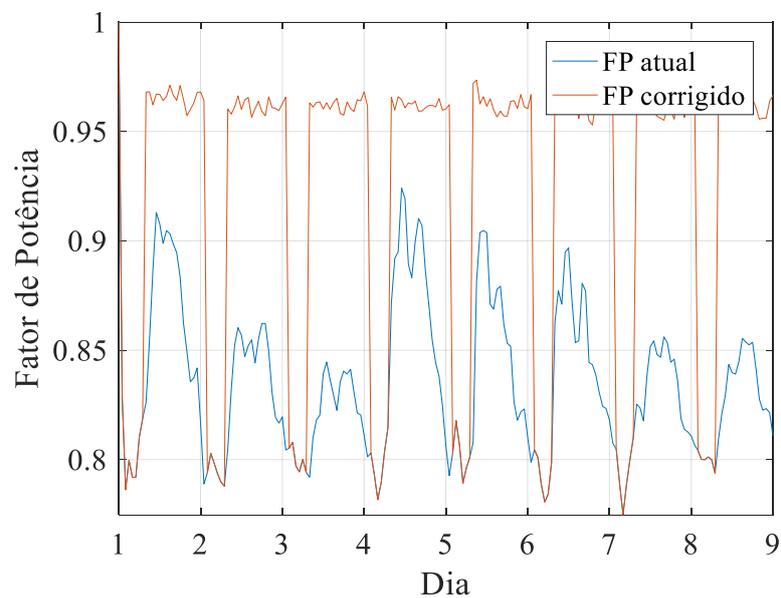


Figura 15 – Banco Fixo: Fator de potência atual e corrigido referente aos oito dias de medições (1,5 kVAr).

Concluiu-se assim que, para os oito dias de medições, o banco de capacitores fixo com células de 1,5 kVAr foi satisfatório na correção do fator de potência, mantendo-o acima de 0,92, como recomenda a norma.

### 4.3.3 Banco Automático - Células de 1,5 kVAr

A mesma metodologia aplicada ao banco fixo foi empregada para o banco automático. Também foram calculados pelo método analítico todos os valores de energia reativa necessária para corrigir o fator de potência horário, para os oito dias. O número máximo de células necessário para correção com banco automático com células de 1,5 kVAr é igual ao do banco fixo com células de 1,5 kVAr, ou seja, 15 células. Por praticidade, a Tabela 3 representa apenas os valores de reativo e os números de células utilizados por estágio, assim como o fator de potência corrigido, correspondente ao dia 20 de Maio de 2017. Lembrando que o mesmo procedimento foi adotado para os demais dias em que ocorreram as medições.

Tabela 3 – Banco Automático: Reativo (VAR) necessário e manobrado e número de células necessárias (1,5 kVAr).

Hora	Pot. Ativa (W)	FP Atual	VAr Necessário	VAr Manobrado	Nº células	FP Corrigido
00:00 - 01:00	49050	0,78	-	-	-	-
01:00 - 02:00	47750	0,79	-	-	-	-
02:00 - 03:00	46750	0,78	-	-	-	-
03:00 - 04:00	47350	0,78	-	-	-	-
04:00 - 05:00	50500	0,79	-	-	-	-
05:00 - 06:00	52050	0,8	-	-	-	-
06:00 - 07:00	52050	0,81	20576	21000	14	0,96
07:00 - 08:00	57250	0,84	18163	19500	13	0,97
08:00 - 09:00	66900	0,87	15925	16500	11	0,96
09:00 - 10:00	87050	0,89	15985	16500	11	0,97
10:00 - 11:00	90800	0,89	16674	18000	12	0,97
11:00 - 12:00	84800	0,88	17898	18000	12	0,96
12:00 - 13:00	88550	0,89	16261	18000	12	0,97
13:00 - 14:00	87250	0,88	18415	19500	13	0,97
14:00 - 15:00	89650	0,88	18921	19500	13	0,97
15:00 - 16:00	88950	0,88	18774	19500	13	0,96
16:00 - 17:00	84450	0,86	22352	22500	15	0,97
17:00 - 18:00	70100	0,85	20403	21000	14	0,96
18:00 - 19:00	56300	0,84	17861	18000	12	0,96
19:00 - 20:00	54700	0,83	18780	19500	13	0,96
20:00 - 21:00	53600	0,83	18402	19500	13	0,96
21:00 - 22:00	52500	0,83	18024	19500	13	0,97
22:00 - 23:00	49200	0,8	20729	21000	14	0,96
23:00 - 24:00	43650	0,78	20673	21000	14	0,96

Na Figura 16 encontra-se a comparação entre o fator de potência medido pelo Fluke e o fator de potência corrigido pelo banco automático. O banco de capacitores automático também se mostrou eficiente, mantendo o fator de potência acima de 0,92 no período de 06:00 da manhã às 23:59. Na Figura 17, demonstrou-se a correção dos oito dias de medições.

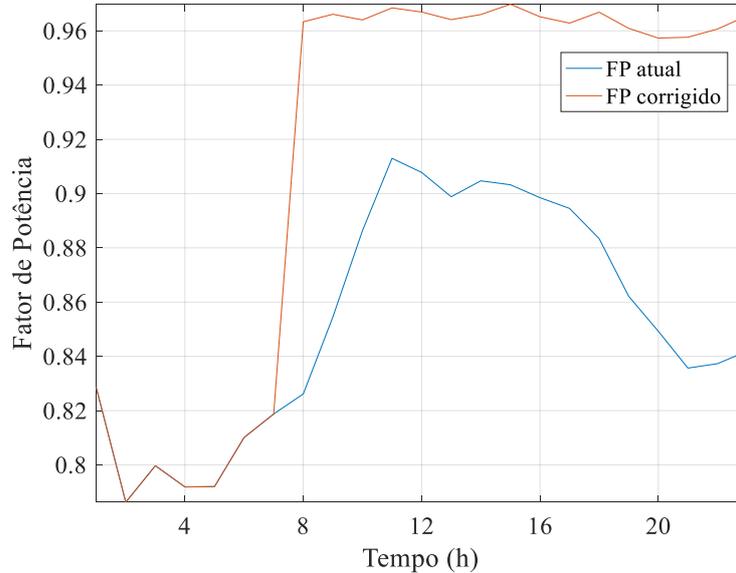


Figura 16 - Fator de potência atual e corrigido referente ao dia 20 (1,5 kVAr).

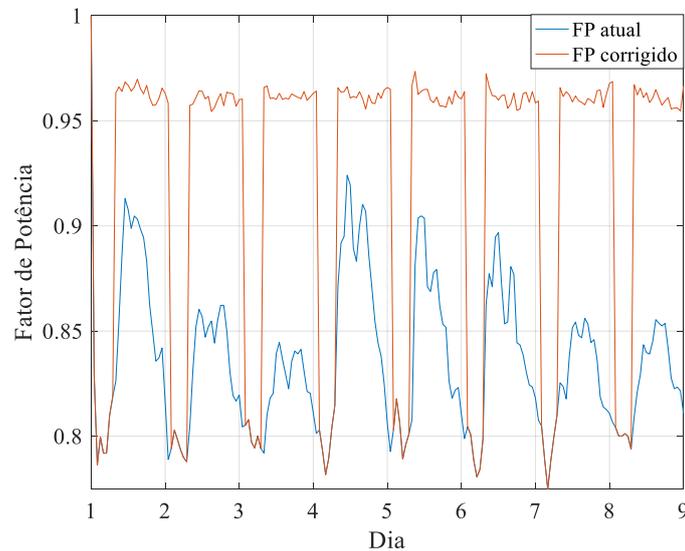


Figura 17 - Fator de potência atual e corrigido referente aos oito dias de medições (1,5 kVAr).

#### 4.3.4 Banco Automático - Células de 2,0 kVAr

O número de células por estágio necessário para correção com células de 2,0 kVAr está representado pela Equação 9.

$$N = \frac{Q_{CMAX}}{2,0 k} = \frac{22352}{2000} = 11,18 \quad (9)$$

Logo, para células de 2,0 kVAr, o número máximo é de 12 células. Na Tabela 4, estão representados os valores de reativo e os números de células utilizados por estágio, assim como o fator de potência corrigido, necessários para o dia 20 de Maio.

Tabela 4 – Banco Automático: Reativo em VAR necessário e manobrados e número de células necessárias (2,0 kVAr).

Hora	Pot. Ativa (W)	FP Atual	Var Necessário	Var Manobrado	N° CÉLULAS	FP Corrigido
00:00 - 01:00	49050	0,78	-	-	-	
01:00 - 02:00	47750	0,79	-	-	-	-
02:00 - 03:00	46750	0,78	-	-	-	-
03:00 - 04:00	47350	0,78	-	-	-	-
04:00 - 05:00	50500	0,79	-	-	-	-
05:00 - 06:00	52050	0,8	-	-	-	-
06:00 - 07:00	52050	0,81	20576	22000	11	0,97
07:00 - 08:00	57250	0,84	18163	20000	10	0,97
08:00 - 09:00	66900	0,87	15925	16000	8	0,96
09:00 - 10:00	87050	0,89	15985	16000	8	0,97
10:00 - 11:00	90800	0,89	16674	18000	9	0,97
11:00 - 12:00	84800	0,88	17898	18000	9	0,96
12:00 - 13:00	88550	0,89	16261	18000	9	0,97
13:00 - 14:00	87250	0,88	18415	20000	10	0,97
14:00 - 15:00	89650	0,88	18921	20000	10	0,97
15:00 - 16:00	88950	0,88	18774	20000	10	0,96
16:00 - 17:00	84450	0,86	22352	24000	12	0,97
17:00 - 18:00	70100	0,85	20403	22000	11	0,96
18:00 - 19:00	56300	0,84	17861	18000	9	0,96
19:00 - 20:00	54700	0,83	18780	20000	10	0,96
20:00 - 21:00	53600	0,83	18402	20000	10	0,96
21:00 - 22:00	52500	0,83	18024	20000	10	0,97
22:00 - 23:00	49200	0,8	20729	22000	11	0,97
23:00 - 24:00	43650	0,78	20673	22000	11	0,97

Na Figura 18 foi plotado o gráfico do fator de potência medido pelo Fluke e o corrigido, para células de 2,0 kVAr, referente ao dia 20. Já na Figura 19, representou-se a comparação dos mesmos fatores de potência, mas referentes aos oito dias de medições. Nas duas figuras observou-se que o banco automático com células de 2,0 kVAr manteve o fator de potência em valores desejáveis.



ativa consumida durante a semana por quatro, obtendo-se assim a energia ativa consumida durante o mês (37.670,4 kWh). Assim, calculou-se o valor a ser pago pelo consumo de energia ativa mensal, multiplicando o valor da tarifa pelo valor do consumo de energia ativa.

O valor mensal bruto a ser cobrado é de R\$ 10.494,60. O ICMS foi calculado pela Equação 6 e representou um valor de R\$ 3.498,20. Já o PIS e o COFINS representaram R\$ 173,16 e R\$ 797,59, respectivamente. E o CIP, 15% do valor bruto, foi de R\$ 1574,19. Logo, foi estimado o valor de R\$ 14.963,55 a ser pago pelo consumo de energia ativa referente ao mês de Maio.

Como o prédio opera na maior parte do tempo com fator de potência abaixo de 0,92, foi estimado o valor a ser pago referente ao consumo de energia reativa.

#### **4.4.1 Circuito desequilibrado**

Como mencionado, foi considerado que as cargas presentes no prédio são indutivas. Sendo assim, como no período de 00:00 às 06:00 da manhã só haverá faturamento de reativo excedente para fatores de potência abaixo de 0,92 capacitivos, esse período não geraria custo.

De acordo com a resolução 414 da ANEEL, o faturamento é dado pela Equação 7, onde os parâmetros são o montante de energia ativa, o fator de potência atual (medido pelo Fluke) e o fator de referência (0,92). A Figura 20, podemos notar os instantes em que o fator de potência se encontra abaixo de 0,92 e o seu respectivo valor de energia ativa.

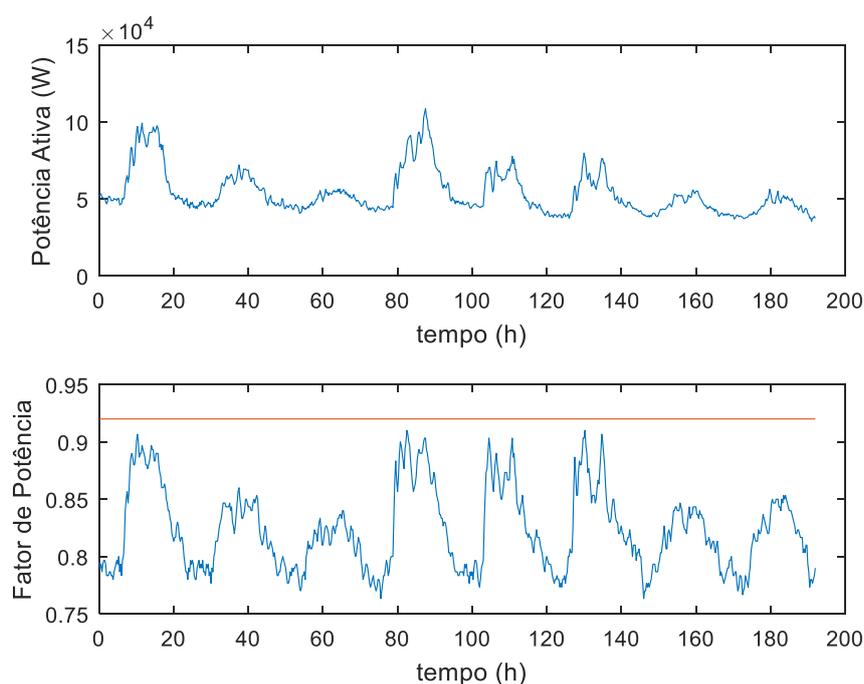


Figura 20 - Fator de potência e potência ativa (em W) em função do tempo (desequilibrado).

Para o cálculo do faturamento de reativo excedente, utilizamos a tarifa B1, antes do imposto (0,49414 R\$/kWh) (CEMIG). Logo, o valor para os oito dias de medições foi de R\$ 548,19. Multiplicou-se esse valor em quatro vezes, obtendo assim o faturamento mensal sem impostos, no valor de R\$ 2.192,76. Os impostos ICMS, PIS, COFINS e CIP em cima desse valor são R\$730,92, R\$ 36,18, R\$ 166,65 e R\$ 328,91, respectivamente. O valor total estimado para o reativo excedente com os impostos foi de R\$ 3.454,66.

#### 4.4.2 Circuito equilibrado

Uma vez que o sistema foi equilibrado, adotou-se o mesmo procedimento para o cálculo do reativo excedente utilizado no sistema desequilibrado. Na Figura 21 plotou-se o valor de potência ativa, em W, e no novo fator de potência.

As Figuras 20 e 21 mostraram que o faturamento para o circuito equilibrado deve ser menor que o desequilibrado, pois houve uma melhora em relação ao fator de potência medido pelo Fluke e existem instantes em que é maior ou igual a 0,92, não havendo reativo excedente.

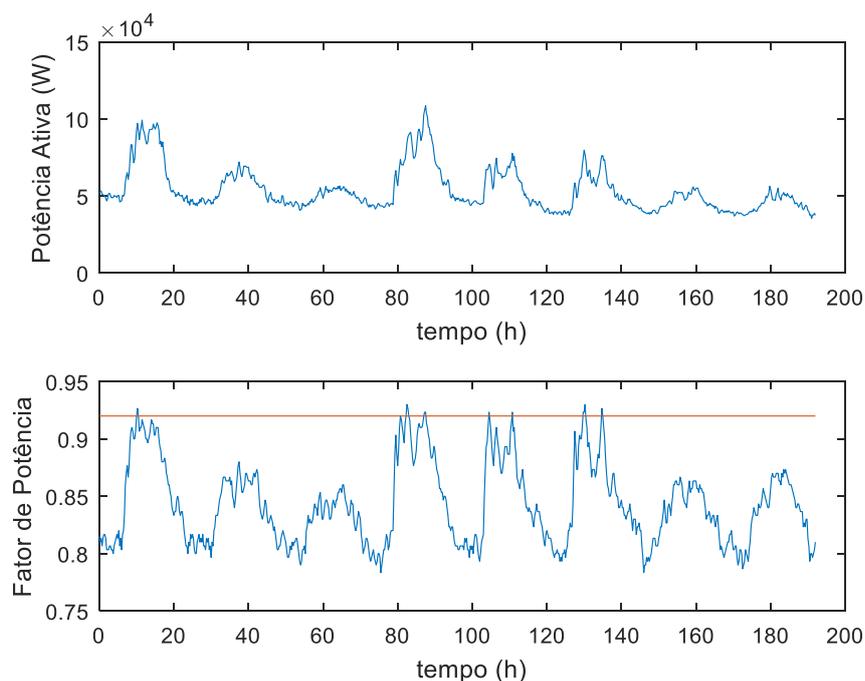


Figura 21 - Fator de potência e potência ativa (em W) em função do tempo (equilibrado).

Portanto, para os oito dias de medições, obteve-se o valor de R\$ 413,97, sem impostos. O valor mensal estimado foi de R\$1655,88. Os impostos ICMS, PIS, COFINS e CIP em cima desse valor são R\$551,96, R\$ 27,32, R\$ 125,85 e R\$ 248,38, respectivamente. Logo, valor total da multa de reativo excedente para o circuito equilibrado foi de R\$ 2.609,39, sendo menor que o valor referente ao circuito desequilibrado.

#### 4.5 Orçamento do Projeto

Um orçamento aproximado foi feito para que pudesse ser analisado à viabilidade, do ponto de vista financeiro, do projeto do banco de capacitores. Os equipamentos pesquisados, tais como células capacitivas, controladores, foram todos da marca Weg. As Tabelas 5, 6 e 7 contêm os orçamentos feitos para os bancos de capacitores fixos e automáticos, com células de 1,5 kVAr e 2,0 kVAr.

Tabela 5 – Orçamento: Banco Fixo.

<b>Banco de Capacitores Fixo – Células de 1,5 kVAr</b>			
<b>Descrição</b>	<b>Preço unidade (R\$)</b>	<b>Qtd.</b>	<b>Preço Total (R\$)</b>
Unidade Capacitiva Trifásica 220 V Ucw1,5v25 1,5kVA Weg	85,00	15	1.275,00
Chave Seccionadora Tripolar Siemens Ergonfuse	350,00	1	350,00
Mão de Obra (10%)	-	-	162,50
Projeto (15%)	-	-	243,75
Total	-	-	2031,25

Tabela 6 – Orçamento: Banco Automático (1,5 kVAr).

<b>Banco de Capacitores Automático – Células de 1,5 kVAr</b>			
<b>Descrição</b>	<b>Preço unidade (R\$)</b>	<b>Qtd.</b>	<b>Preço Total (R\$)</b>
Unidade Capacitiva Trifásica 220 V Ucw1,5v25 1,5kVA Weg	85,00	15	1.275,00
Controlador Automático Fator De Potência Weg Trif 12estagios	2.590,00	1	2.590,00
Mão de Obra (10%)	-	-	386,50
Projeto (15%)	-	-	579,75
Total	-	-	4.831,25

Tabela 7 – Orçamento: Banco Automático (2,0 kVAr).

<b>Banco de Capacitores Automático – Células de 2,0 kVAr</b>			
<b>Descrição</b>	<b>Preço unidade (R\$)</b>	<b>Qtd.</b>	<b>Preço Total (R\$)</b>
Unidade Capacitiva Trifásica 220V Ucwt2,0v25 2,0kVA Weg	95,00	12	R\$1.140,00
Controlador Automático Fator De Potência Weg Trif 12estagios	2.590,00	1	2.590,00
Mão de Obra (10%)	-	-	373,00
Projeto (15%)	-	-	559,50
Total	-	-	4.662,50

#### **4.6 Análise de Viabilidade**

Nas condições em que o prédio se encontra, ou seja, com fases desequilibradas e sem a correção do fator de potência, o valor a ser pago em razão do reativo excedente seria de R\$ 3.455,42, já com impostos, correspondendo a 23,09% do valor relativo à energia ativa consumida no mês de Maio de 2017. Feito o balanceamento das fases, a multa diminuiu para um valor de R\$ 2609,39, já com impostos, correspondendo a 17,44% do valor relativo à energia ativa consumida, podendo ocasionar em uma economia interessante, porém um prejuízo considerável ainda existirá. Esses foram discriminados na Tabela 8.

Tabela 8 – Dados da análise de viabilidade.

<b>Sistema</b>	<b>Consumo de energia ativa (em R\$)</b>	<b>Multa referente ao reativo excedente (em R\$)</b>	<b>Relação entre o valor o consumo de energia ativa e multa (em %)</b>	<b>Valor total da conta de luz (em R\$)</b>	<b>Custo do Projeto (em R\$)</b>
Desequilibrado	14.963,55	3.454,66.	23,09	18.418,21	-
Equilibrado	14.963,55	2.609,39	17,44	17.572,94	-
c/ Banco Fixo	14.963,55	-	-	14.963,55	2.031,25
c/ Banco Aut. (células de 1,5 kVAr)	14.963,55	-	-	14.963,55	4.831,25
c/ Banco Aut. (células de 2,0 kVAr)	14.963,55	-	-	14.963,55	4.662,50

Na tentativa eliminar esse prejuízo, tanto o banco fixo quanto o automático se mostraram eficientes, mantendo o valor acima de 0,92 nos períodos em que é taxado o reativo excedente. Portanto, pela análise dos gráficos obtidos nas simulações, qualquer que fosse o projeto, não haveria multa em relação ao reativo excedente, resultando em uma economia de 18,76 % do faturamento total da conta de luz concernente ao mês de Maio de 2017. O tempo necessário estimado para o retorno do investimento no banco de capacitores fixo é aproximadamente 24 dias. Já para os bancos automáticos, o tempo de retorno estimado é de 42 dias.

Os bancos automáticos apresentam algumas vantagens em detrimentos aos fixos, pois existe a necessidade de um profissional habilitado para manobra-lo, além de o banco fixo ser colocado permanentemente na rede, injetando sempre o mesmo valor de reativo. Já no banco automático, o controlador é quem monitora se há a necessidade de reativo ou não, sendo mais eficiente. O banco automático com células de 1,5 kVAr mostrou-se um pouco mais preciso em relação ao que utiliza células de 2,0 kVAr, no que se refere ao valor de reativo necessário e o injetado. Porém, o banco com células de 2,0 kVAr necessita de menos células (12 células), tendo um custo de projeto estimado menor que o com células de 1,5 kVAr (15 células).

Em suma, do ponto de vista financeiro, seria de extrema importância à instalação de um projeto para a correção do fator de potência o quanto antes. O banco de capacitores automático é o indicado devido às vantagens de ter um controlador responsável em manobrá-lo ao invés de um funcionário habilitado, e ser mais preciso, não sendo ligado permanentemente na rede. E dentre os automáticos, o que utiliza células de 2,0 kVAR, apresentou melhor custo benefício.

## 5 *Conclusões*

Este trabalho teve como resultado a análise da qualidade do sistema de energia do prédio da BIOAGROS da UFV. A proposta presente é a correção do fator de potência e também uma análise econômica para a viabilidade do mesmo.

Inicialmente, constatou-se um baixo fator de potência do sistema, que poderia ser causado pelo desequilíbrio das fases. A qualidade da energia pode estar comprometida com perdas por efeitos joule, diminuição da vida útil dos equipamentos, sobrecarga do sistema devido ao reativo excedente, etc. Balanceando as fases, por um método puramente matemático, percebeu-se uma relativa melhora do fator de potência medido pelo medidor Fluke. Uma vez balanceadas, foi feita a correção do fator de potência.

As correções com os bancos de capacitores se mostraram eficientes, mantendo o valor acima de 0,92 durante todo o período em que é faturado o reativo excedente. Para fins de comparação, dois tipos de bancos (fixo e automáticos) e de células (1,5 kVAr e 2,0 kVAr) foram utilizados e em todos os casos os projetos se mostraram eficientes na correção.

A escolha de um banco automático em detrimento a um fixo foi recomendada, pois, bancos fixos são alocados permanentemente na rede, independente da hora do dia ou carga, sendo menos eficientes que os automáticos, que injetam o valor de reativo conforme o valor da carga. Além disso, o banco fixo necessita de um profissional habilitado para operá-lo, gerando mais um inconveniente. Dentre os automáticos utilizados, o com células de 2,0 kVAr seria o indicado, pois, mesmo sendo um pouco menos preciso, atendeu bem as necessidades de correções a um custo menor do que o banco que utiliza células de 1,5 kVAr.

Para cálculo de faturamento de reativo excedente, primeiramente estimou-se, de maneira simplificada, o valor a ser pago pelo consumo de energia ativa. Posteriormente, estimou-se a multa causada pelo reativo excedente para as fases desequilibradas e equilibradas, o que mostrou um valor considerável.

Portanto, o trabalho comprovou a extrema importância de se fazer um projeto para a correção do fator de potência do prédio BIOAGRO/UFV. O baixo fator de potência apresentado pode estar comprometendo a qualidade da energia da instalação e, caso o prédio fosse faturado, um valor expressivo de multa seria pago na conta de luz.

## 6 Referências Bibliográficas

- Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. 2008.** Por Dentro da Conta de Luz. Brasília : s.n., 2008.
- , **2000.** Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST. Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica. 2000.
- , **2012.** Resolução N.º 456. 2012.
- Agencia Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. 2017.** Resolução Normativa N° 414. 2017.
- Amiky, Luiz Pereira. 2016.** Proposta de Melhoria na Qualidade de Energia Elétrica no Prédio do Bioagro. Viçosa : s.n., 2016.
- Barrêto, Túlio Zambaldi Oliveira. 2017.** Análise da Correção do Fator de Potência do Instituto de Biotecnologia Aplicada à Agropecuária (BIOAGRO) da Universidade Federal de Viçosa. Viçosa : s.n., 2017.
- BIOAGRO, Instituto de Biotecnologia Aplicada à Agropecuária -**  
[http://www.bioagro.ufv.br/?page\\_id=232](http://www.bioagro.ufv.br/?page_id=232). [Online]
- Bordim, João Ricardo Graminha. 2011.** Instalações de Bancos de Capacitores em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica para Correção de Fator de Potência e Regulação de Tensão: Projeto e Simulação Computacional. São Carlos : s.n., 2011.
- CEMIG. Cálculo do ICMS.** [Online] <https://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/Paginas/C%C3%A1lculo-de-ICMS.aspx>.
- , **Valores de Tarifas e Serviços.** [Online] [https://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/Paginas/valores\\_de\\_tarifa\\_e\\_servicos.aspx](https://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/Paginas/valores_de_tarifa_e_servicos.aspx).
- Creder, Hélio. 2004.** *Instalações Elétricas*. s.l. : LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 2004.
- Dugan, Roger C. 2003.** *Eletral Power Systems Quality. Second Edition. 2003.* 2003.
- Filho, João Mamede. 2012.** *Instalações Elétricas Industriais* . s.l. : LTC, 2012.
- Fragoas, Alexandre Graciolli. 2008.** Estudo de Caso do Uso de Banco de Capacitores em uma Rede de Distribuição Primária - Indicativos da sua Viabilidade Econômica. São Carlos : s.n., 2008.
- Godoi, Adelino Anderson. 2009.** Alocação de Bancos de Capacitores em Redes Primária e Secundária de Energia Elétrica. Curitiba : s.n., 2009.
- Hofmann, Wolfgang, Schlabbach, Jurgen e Just, Wolfgang. 2012.** *Reactive Power Compensation: A Practical Guide*. Wiley : s.n., 2012.
- Mercado Livre. [Online] [https://lista.mercadolivres.com.br/celula-capacitiva-trifasica-220v-2%2C0-kvar#D\[A:celula-capacitiva-trifasica-220v-2,0-kvar\]](https://lista.mercadolivres.com.br/celula-capacitiva-trifasica-220v-2%2C0-kvar#D[A:celula-capacitiva-trifasica-220v-2,0-kvar]).
- Prefeitura Municipal de Viçosa. 2015.** *LEI N° 2.530/2015*. Viçosa : s.n., 2015.
- Sacramento, Rebeca Neves. 2010.** Estudo de Qualidade de Energia Elétrica de um Transformador Trifásico em um Sistema Elétrico Industrial. Viçosa : s.n., 2010.
- Siemens. 2016.** Soluções para Correção do Fator de Potência . 2016.
- Silva, Marcos César Isoni. 2009.** Correção do Fator de Potência de Cargas Industriais com Dinâmica Rápida. Belo Horizonte MG : s.n., 2009.
- WEG Automação S.A. 2001.** *Manual para Correção do Fator de Potência*. 2001.

