

ANÁLISE FINANCEIRA COMPARATIVA PARA INSTALAÇÃO DE REATORES DESSINTONIZADOS EM BANCOS DE CAPACITORES¹

Fabio Junior de Quadros²

Fabiano Faller³

Paulo Miguel de Toni⁴

RESUMO

O objetivo principal deste artigo é fazer uma análise financeira comparativa entre duas soluções técnicas para a correção do fator de potência utilizando bancos de capacitores com reatores dessintonizados e bancos de capacitores convencionais (sem reatores). Este artigo apresenta os resultados de um estudo realizado em uma agroindústria no estado do Mato Grosso, onde foi instalado um sistema de correção de fator de potência através da instalação de um banco de capacitores convencional. Durante o desenvolvimento do projeto, foram realizadas medições da qualidade de energia em campo, onde foram identificados alguns níveis de distorções harmônicas de tensão e de corrente. Como a instalação de bancos de capacitores em sistemas elétricos com distorções harmônicas necessitam de soluções específicas, e até mesmo aumentam as distorções harmônicas quando não possuem filtros, serão apresentadas neste artigo duas soluções técnicas comerciais, sendo uma delas o dimensionamento de um banco de capacitores com reatores dessintonizados e uma solução convencional, sem o uso de reatores. Como resultado da análise, a diferença entre as duas soluções foi de 72,2%, sendo a solução com o uso de reatores financeiramente mais cara, porém a mais indicada devido a minimização dos efeitos das harmônicas nos capacitores e conseqüentemente no sistema elétrico.

Palavras-chave: Análise Comparativa. Banco de capacitores. Distorções harmônicas. Reatores dessintonizados.

1 INTRODUÇÃO

A presença das componentes harmônicas em um sistema de corrente alternada não é novidade, conhecidas desde o início da história dos sistemas elétricos de potência. Segundo Leão, Sampaio e Antunes (2014), em todo sistema elétrico, o ideal é que todas as cargas sejam alimentadas por fontes com base senoidais, pois transformadores, aparelhos elétricos e máquinas são projetados para essas condições, o que na prática não é muito comum.

Com a crescente demanda mundial por alimentos e o novo padrão de consumo da população, as indústrias tem buscado cada vez mais tecnologias para melhorar a produção com introdução da automação, inteligência artificial e a internet das coisas (IoT). Com o avanço tecnológico da eletrônica de potência, as cargas elétricas instaladas nas indústrias não possuem

¹ Pré-requisito para obtenção do título de Engenheiro Eletricista. Pela UCEFF.

² UCEFF Faculdades. Acadêmico do Curso de Engenharia Elétrica. E-mail: fjquadros@gmail.com.

³ UCEFF Faculdades. Esp. MBA em Gestão de Projetos. E-mail: fabiano.faller@uceff.edu.br.

⁴ Docente do curso de Eng.enharia Mecânica UCEFF. E-mail: paulomiguel@uceff.edu.br.

as mesmas características de décadas atrás quando praticamente todas eram cargas lineares. Toda essa tecnologia vem acompanhada de muita eletrônica, alterando o perfil das cargas tornando-as não lineares. Cargas não lineares geram distorções harmônicas.

O uso da eletrônica em equipamentos elétricos trouxe muitos avanços tecnológicos, mas também inúmeros problemas relacionados a qualidade de energia.

Para Cogo e Siqueira Filho (2018), a presença das harmônicas em um sistema elétrico de potência afetam diretamente os bancos de capacitores, que são dimensionados para melhorar a qualidade e capacidade de fornecimento de energia ativa nas instalações elétricas. Um baixo fator de potência indica que a energia não está sendo aproveitada plenamente e uma das alternativas técnicas utilizadas para compensar a potência reativa indutiva do sistema é a instalação de bancos de capacitores.

Segundo Leão, Sampaio e Antunes (2014), a presença das componentes harmônicas em um Sistema Elétrico de Potência (SEP) tem dois tipos de efeitos: os imediatos, como o disparo de dispositivos de proteção sem causa aparente, interferências, etc, e de longo prazo, como estresse nos isolamentos de condutores e dielétricos, devido as tensões harmônicas.

O problema acontece quando os bancos de capacitores são instalados em um sistema com altos índices de distorções harmônicas de tensão e de corrente, onde podem ser danificados pelas variações de tensões, excesso de corrente e também pela ressonância. Diante dessa situação, questiona-se: **o que pode ser feito para minimizar os efeitos causados pelas distorções harmônicas em bancos de capacitores?**

O objetivo geral deste artigo é fazer uma análise comparativa financeira entre duas soluções técnicas para a correção do fator de potência, sendo uma solução convencional e outra específica para sistemas com a presença de distorções harmônicas. Para que a solução específica seja realmente eficiente, se faz necessária a análise técnica de no mínimo três pontos importantes: identificar e interpretar a presença de harmônicas nas instalações elétricas, conhecer os níveis aceitáveis de distorções harmônicas (regulamentação) e analisar os efeitos da presença de harmônicas em bancos de capacitores.

Com essas análises é possível fazer um dimensionamento eficaz para minimização dos efeitos nos bancos de capacitores e conseqüentemente no sistema elétrico de potência.

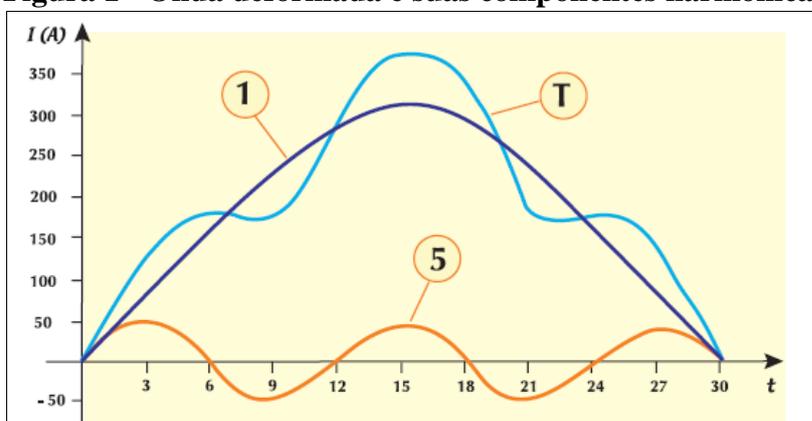
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 HARMÔNICAS

Segundo Leão, Sampaio e Antunes (2014), harmônicas são componentes de uma onda periódica senoidal cuja frequência é o múltiplo inteiro da sua frequência fundamental.

Para Kagan, Robba e Schmidt (2009), distorções harmônicas são o surgimento de tensões e correntes não senoidais, provocadas por cargas não lineares. A Figura 1 demonstra a forma final de uma onda deformada de tensão ou de corrente podendo ter o aspecto do sinal T, onde o sinal 1 e o sinal 5 são ondas senoidais perfeitas de amplitudes diferentes, e o sinal T é a resultante correspondente dos dois sinais.

Figura 1 - Onda deformada e suas componentes harmônicas



Fonte: (PROCOBRE, 2001).

A Tabela 1 mostra como são classificadas as harmônicas.

Tabela 1 - Ordens e frequências harmônicas

Ordem	Hz	Ordem	Hz	Ordem	Hz	Ordem	Hz	Ordem	Hz
1 ^a	60	6 ^a	360	11 ^a	660	16 ^a	960	21 ^a	1260
2 ^a	120	7 ^a	420	12 ^a	720	17 ^a	1020	22 ^a	1320
3 ^a	180	8 ^a	480	13 ^a	780	18 ^a	1080	23 ^a	1380
4 ^a	240	9 ^a	540	14 ^a	840	19 ^a	1140	24 ^a	1440
5 ^a	300	10 ^a	600	15 ^a	900	20	1200	25 ^a	1500

Fonte: (Adaptado PROCOBRE, 2001).

As ordens das harmônicas mostradas na Tabela 1 estão classificadas até a vigésima quinta, mas podem ser apresentadas “n” ordens.

Segundo Leão, Sampaio e Antunes (2014), a frequência fundamental do sistema elétrico brasileiro é de 60Hz. A harmônica de segunda ordem por exemplo é de 120Hz, a terceira de 180Hz, a quarta 240Hz e assim por diante, sendo a h -ésima harmônica ($h \cdot 60\text{Hz}$). Sinais

situados entre as múltiplas inteiras, por exemplo 200Hz, são denominadas inter-harmônicas, ou seja, apresentam frequências não múltiplas da fundamental. Sinais com frequências abaixo da fundamental são as sub-harmônicas, por exemplo 40Hz.

2.2 CARACTERIZAÇÃO DA PRESENÇA DAS HARMÔNICAS

Segundo Leão, Sampaio e Antunes (2014), para caracterização da presença das componentes harmônicas em uma onda senoidal geralmente é utilizado a Série de Fourier, desenvolvida pelo matemático francês Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830). Matematicamente, a amplitude, frequência e fase de uma onda não senoidal são determinadas por meio da utilização da Série de Fourier, que é o processo da conversão de formas de ondas não senoidais no domínio do tempo.

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} (a_h * \cos(h\omega_1 t) + b_h * \text{sen}(h\omega_1 t)) \quad (1)$$

Onde:

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (2)$$

$$a_h = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) * (\cos(h\omega_1 t) dt), h = 1, \dots \dots \infty \quad (3)$$

$$b_h = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) * (\text{sen}(h\omega_1 t) dt), h = 1, \dots \dots \infty \quad (4)$$

Onde:

$f(t)$: Função contínua no domínio do tempo;

$\frac{a_0}{2}$: Valor médio da função, ou componente de corrente contínua CC;

a_h e b_h : Amplitudes ou valor de pico da componente de ordem h da série;

ω_1 : frequência angular da fundamental de f(t) definida como $\omega_1 = 2\pi/T$;

h: Ordem da harmônica;

T: Período da função.

2.3 MEDIDAS DE DISTORÇÃO HARMÔNICA

Para Leão, Sampaio e Antunes (2014), a presença de harmônicas em uma instalação elétrica pode ser tratada de forma individual ou total.

2.3.1 Distorção Harmônica Individual

As distorções harmônicas individuais de tensão e corrente apresentam valores de acordo com a ordem da harmônica.

2.3.1.1 Distorção Harmônica Individual de Tensão

Distorção harmônica individual de tensão (DHI_v) é a relação entre a amplitude da tensão harmônica de ordem n (V_h) e a tensão correspondente da fundamental (V_1):

$$DHI_v(\%) = \frac{V_h}{V_1} * 100 \quad (5)$$

O valor de V_1 na frequência fundamental pode ser obtido através de medições, ou pode ser considerado como a tensão nominal da barra ou também um valor definido pelo usuário.

2.3.1.2 Distorção Harmônica Individual de Corrente

Distorção harmônica individual de corrente (DHI_I) é a relação entre a amplitude da corrente harmônica de ordem n (I_h) e a corrente correspondente da fundamental (I_1):

$$DHI_I(\%) = \frac{I_h}{I_1} * 100 \quad (6)$$

O valor de I_1 na frequência fundamental pode ser obtido através de medições, ou pode ser considerado como a corrente nominal da barra com a demanda máxima.

2.3.2 Distorção Harmônica Total

Um dos índices mais comuns utilizados para indicação das componentes harmônicas em um sistema elétrico é a Distorção harmônica Total (DHT). Tem por meta a representação de uma variável representativa contendo a somatória quadrática de todas as frequências harmônicas de tensão e corrente.

2.3.2.1 Distorção Harmônica Total de Tensão

Distorção harmônica total de tensão (DHT_v) pode ser expressa pela equação 7:

$$DHT_v(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hm\acute{a}x} V_h^2}}{V_1} * 100 \quad (7)$$

2.3.2.2 Distorção Harmônica Total de Corrente

Distorção harmônica total de corrente (DHT_I) pode ser expressa pela equação 8:

$$DHT_I(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hm\acute{a}x} I_h^2}}{I_1} * 100 \quad (8)$$

2.4 MEDIÇÕES EM CAMPO DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS

Segundo Cogo e Siqueira Filho (2018), a medição presente em qualquer atividade humana, quantifica ou qualifica parâmetros para determinação de sucesso ou de falha. As medições garantem valores, amplitudes e ângulos reais de tensão e de corrente, diferentemente de uma estimativa ou de um cálculo aproximado que podem gerar grandes discrepâncias nos resultados finais. Com as medições em campo é possível diagnosticar se determinado sistema de potência possui distorções harmônicas de tensão e de corrente.

2.5 NÍVEIS ACEITÁVEIS DE DISTORÇÃO HARMÔNICA

Segundo Cogo e Siqueira Filho (2018), os problemas relacionados a cargas não lineares nos sistemas elétricos de potência fez com que órgãos responsáveis pelas legislações em cada país, adotassem medidas para limitar as distorções harmônicas de tensão e de corrente.

2.5.1 Recomendações Brasileiras

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), vinculada ao Ministério de Minas e Energia criou o PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional), mais precisamente no Módulo 8 – Qualidade de Energia, regras para limitação dos níveis harmônicos. Essas regras permitem as concessionárias avaliar a qualidade do serviço no que diz respeito as distorções harmônicas, identificando a necessidade de medidas corretivas para amenizar as distorções harmônicas. Também possibilita aos consumidores adequarem e adquirirem equipamentos e sistemas de processos ao padrão das concessionárias. O Módulo 8 do PRODIST trata somente dos limites de tensão.

A Tabela 2 apresenta os limites de distorção harmônicas do PRODIST.

Tabela 2 - Limites de distorção harmônica para diferentes níveis de tensão

Indicador	Tensão Nominal		
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1,0 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
DTT95%	10,0%	8,0%	5,0%
DTT _p 95%	2,5%	2,0%	1,0%
DTT _i 95%	7,5%	6,0%	4,0%
DTT ₃ 95%	6,5%	5,0%	3,0%

Fonte: PRODIST (2018).

Onde:

DTT95%: Distorção harmônica total de tensão;

DTT_p95%: DTT para as componentes pares não múltiplas de 3;

DTT_i95%: DTT para as componentes ímpares não múltiplas de 3;

DTT₃95%: DTT para as componentes múltiplas de 3.

Segundo PRODIST (2018), o valor do indicador DTT95% na Tabela 2 pode ser superado em apenas 5% de 1008 leituras válidas. Um mês civil consiste em 1008 leituras em intervalos consecutivos de 10 minutos cada (período de agregação).

Para um sistema de baixa tensão até 1.000 Volts, a taxa de distorção total de harmônica permitida é de 10%.

2.5.2 Recomendações do IEEE Sd 519-2014

O Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE), um Grupo de Trabalho e Força Tarefa, sob o subcomitê SCC-22 (Standards Coordinating Committee on Power Quality) também possui recomendações sobre as distorções harmônicas de tensão, diferentemente do PRODIST, existem limites para distorções de corrente.

2.5.2.1 Limites de Distorção Harmônica de Tensão

A Tabela 3 apresenta os valores limites de distorção harmônica de tensão segundo o IEEE SD 519-2014.

Tabela 3 - Limites de Distorção Harmônica de Tensão

Tensão da Barra no PCC (V) (PCC - Ponto Acoplamento Comum)	Distorção Harmônica Individual DHI_v (%)	Distorção Harmônica Total DHT_v (%)
$V \leq 1,0$ kV	5,0%	8,0%
$1,0$ kV $< V \leq 69$ kV	3,0%	5,0%
69 kV $< V \leq 161$ kV	1,5%	2,5%
161 kV $< V$	1,0%	1,5%

Fonte: IEEE Std 519 (2014).

Para um sistema de baixa tensão até 1.000 Volts, a taxa de distorção harmônica individual de tensão (DHI_v) é de 5%, e a taxa de distorção harmônica total de tensão (DHT_v) é de 8%.

2.5.2.2 Limites de Distorção Harmônica de Corrente

A Tabela 4 representa os limites de distorção harmônica de corrente, que dependem da capacidade do sistema e da carga por ele alimentado.

Tabela 4 - Limites de Distorção Harmônica de Corrente (120V até 69kV)

Máxima Distorção de Corrente em Percentual de I_L (120V até 69kV)						
Ordem de Harmônica Individual de Corrente (Harmônicas Impares)						
I_{sc}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
< 20	4,0%	2,0%	1,5%	0,6%	0,3%	5,0%
$20 < 50$	7,0%	3,5%	2,5%	1,0%	0,5%	8,0%
$50 < 100$	10%	4,5%	4,0%	1,5%	0,7%	12%
$100 < 1000$	12%	5,5%	5,0%	2,0%	1,0%	15%
> 1000	15%	7,0%	6,0%	2,5%	1,4%	20%

Fonte: IEEE Std 519 (2014).

Onde:

Isc: Corrente máxima de curto circuito no ponto de acoplamento comum (PCC);

IL: Corrente de demanda máxima da carga;

TDD: Taxa de distorção de demanda.

Todo equipamento de geração é limitado a esses valores de corrente independente da relação I_{sc}/I_L . Para um sistema com I_{sc} abaixo de 20, a taxa de distorção harmônica individual de corrente (DHI_I) para as harmônicas da 3ª até 11ª ordem é de 4%.

Segundo Leão, Sampaio e Antunes (2014) os limites de distorção de corrente, dependem do tamanho do sistema de suprimento em relação ao consumidor. A relação I_{sc}/I_L é calculada no ponto de entrega da concessionária (PCC – Ponto Conexão Comum). Essa relação representa a capacidade do sistema de suprimento em relação a demanda máxima em kVA da carga no PCC. Quanto menor for o tamanho da carga em relação ao sistema, maior será o percentual de harmônica que o consumidor poderá injetar no sistema. As recomendações feitas pelo IEEE são para as redes de distribuição, não para equipamentos, mas podem ser utilizados como referência.

2.6 EFEITOS DAS COMPONENTES HARMÔNICAS EM UM SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

Segundo Cogo e Siqueira Filho (2018), os efeitos causados em um sistema elétrico de potência (SEP) na presença das componentes harmônicas são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 - Efeitos das componentes harmônicas em um SEP

Baixo fator de potência;
Correntes nos condutores de neutro elevadas, podendo ultrapassar as correntes de fase;
Sobreaquecimento de transformadores;
Sobreaquecimento em motores elétricos;
Disparo de dispositivos de proteção sem causa aparente;
Aumento da DDP (Diferença de Potencial) entre terra-neutro;
Aumento da temperatura dos condutores devido à elevação das correntes;
Estresse térmico, devido ao fluxo das correntes harmônicas;
Estresse nos isolamentos de condutores e dielétricos, devido as tensões harmônicas;
Alteração no fator de cristas das ondas de tensão e de corrente;
Aumento de vibração pelas diferentes frequências;
Capacidade de ruptura de disjuntores e acionamentos elétricos;
Influência nas reatâncias indutivas e capacitivas;
Influência no funcionamento de reles de proteção;
Influência em dispositivos de medição;
Interferências em sistemas de comunicação como telefone e redes de dados;
Interferências em sistemas de imagens.

Fonte: Adaptado Cogo e Siqueira Filho (2018).

2.7 EFEITOS DAS COMPONENTES HARMÔNICAS EM BANCOS DE CAPACITORES

Segundo Garcia (2019), os efeitos das harmônicas em bancos de capacitores é um assunto pouco conhecido na área elétrica industrial, pois não é em todo sistema elétrico de potência que existem problemas com distorções harmônicas, mas quando existem, os problemas causados por esses fenômenos geram muitos prejuízos, e a qualidade de energia elétrica é diretamente afetada por estes fenômenos.

2.7.1 Ressonâncias Série e Paralela e Amplificação das Harmônicas

Para Cogo e Siqueira Filho (2018), um Sistema Elétrico de Potência é composto por combinações de resistências série e paralelo, capacitâncias e indutâncias. Devido a frequência do sistema a qual estão submetidos, estes conjuntos apresentam pontos de ressonância, ou seja, frequências para quais as impedâncias do sistema assumem valores máximos, para ressonância paralela, e valores mínimos para ressonância série. Além dos pontos de ressonância, podem surgir no sistema sobretensões ou sobrecargas.

A frequência de ressonância em um circuito LC (ideal), é obtida quando as reatâncias indutivas (X_{LS}) e capacitivas (X_{CS}) são iguais:

$$(X_{LS}) = (X_{CS}) \quad (9)$$

Onde:

(X_{LS}): Reatância indutiva na frequência de sintonia;

(X_{CS}): Reatância capacitiva na frequência de sintonia.

A frequência de ressonância neste caso é dada por:

$$f_{ns} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (10)$$

Onde:

f_{ns} : Frequência de ressonância (Hz);

L: Indutância do circuito (H);

C: Capacitância do circuito (F).

Da equação acima, pode-se obter:

$$n_s = \frac{f_{ns}}{f_1} \quad (11)$$

Onde:

n_s : relação entre as frequências de ressonância e a frequência industrial;

f_1 : Frequência industrial do sistema (no Brasil 60Hz).

Ainda segundo Cogo e Siqueira Filho (2018), quando um circuito se encontra em ressonância série, a corrente aumenta e a tensão diminui tornando-a mínima no circuito, formado pelas reatâncias indutivas e capacitivas. Deste modo, a impedância no circuito reduz a resistência do trecho, e tem-se uma corrente circulante alta. Quando um circuito se encontra em ressonância paralela, a impedância no sistema é bastante elevada, podendo chegar ao infinito, elevando a tensão no sistema, podendo chegar a níveis muito acima dos limites operacionais. A amplificação das harmônicas pode ocorrer quando a reatância capacitiva do banco de capacitores alcançar valores próximos a parte imaginária da impedância da rede no ponto de conexão, e as cargas não lineares forem conectadas ao mesmo ponto, ocasionando sobretensões perigosas pondo em risco a integridade do sistema. Isso ocorre, pois a reatância capacitiva é inversamente proporcional a frequência.

2.7.2 Efeitos das Ressonâncias Série e Paralela

Para Leão, Sampaio e Antunes (2014), os efeitos das ressonâncias série e paralela devido as harmônicas em bancos de capacitores podem ser:

Quadro 2 - Efeitos das componentes harmônicas em banco de capacitores

Sobrecarga devido as correntes harmônicas, pois com o aumento da frequência a reatância dos capacitores diminui;
Ruptura de fusíveis de proteção e disparo intempestivo de disjuntores de proteção, pois as tensões harmônicas produzem grandes correntes;
Aumento das perdas dielétricas (isolamento), tendo como consequência o aumento do calor e diminuição da vida útil do capacitor;
Tensões resultantes excedem muito a tensão nominal da rede, tendo como consequência a deterioração e avaria nos capacitores.

Fonte: Adaptado Cogo e Siqueira Filho (2018).

2.8 CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

Para Cogo e Siqueira Filho (2018), a correção do fator de potência em instalações elétricas traz grandes benefícios para o consumidor e também para as concessionárias de

energia. Essa correção quando realizada alivia o sistema elétrico de potência, libera a capacidade de transformadores, reduz a corrente de condutores e melhora o perfil da tensão.

Segundo a Resolução Aneel 414/2010, o fator de potência de referência tem como limite mínimo permitido, para as unidades consumidoras do grupo A, indutivo ou capacitivo, o valor de 0,92.

2.8.1 Fator de Potência

Segundo o Guia do Montador de Painéis – Schneider Electric (2015), todas as instalações elétricas em sistemas de corrente e tensão alternadas consomem dois tipos de potência elétrica, a potência ativa em kW e a potência reativa em kVAr.

A potência ativa P em kW, é aquela que realiza o trabalho, a potência real enviada as cargas, onde é transformada em potência mecânica, calor ou luz.

A potência reativa Q em kVAr, é utilizada para alimentar os campos magnéticos das cargas, como motores e transformadores. Essa potência não realiza trabalho, ela circula entre a fonte e a carga ocupando um espaço onde poderia ser fornecida mais potência ativa, com isso a corrente circulante é maior no circuito.

Com a combinação dos vetores das potências ativa e reativa obtêm-se a potência aparente S, que é dada em kVA.

O fator de potência FP é a relação entre a potencia ativa P e a potência aparente S.

$$FP = \frac{P}{S} \quad (12)$$

Onde:

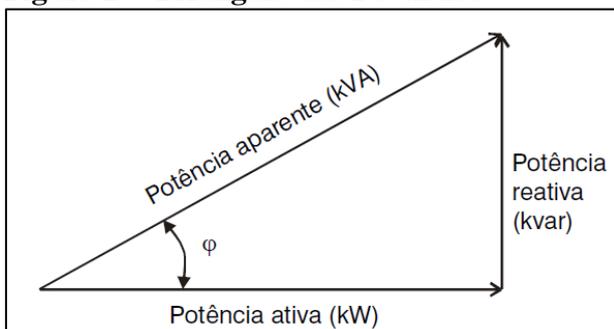
FP: Fator de potência ou cosseno de φ ;

P: Potência ativa (kW);

S: Potência aparente (kVA).

Trigonometricamente o FP pode ser representado como cosseno de φ conforme a

Figura 2.

Figura 2 – Triângulo das Potências

Fonte: WEG Automação S.A, (2009).

Quanto mais alto for o fator de potência mais eficiente é a instalação. Ao contrário, um baixo fator de potência indica que a instalação possui baixa eficiência.

2.8.2 Princípios para Correção do Fator de Potência

Segundo o Guia do Montador de Painéis – Schneider Electric (2015), para correção do fator de potência de uma instalação elétrica, quatro etapas devem ser consideradas.

1) Cálculo da energia reativa requerida

Deve-se calcular quantos kVAr são necessários para correção do fator de potência do sistema elétrico. Para calcular a energia reativa necessária podem ser utilizadas as fórmulas abaixo.

$$Q_1 = P * \tan(\varphi_1) \quad (13)$$

$$Q_2 = P * \tan(\varphi_2) \quad (14)$$

$$Q_{\text{banco}} = Q_1 - Q_2 \quad (15)$$

Onde:

Q1: Potência reativa com o FP inicial (kVAr);

Q2: Potência reativa com o FP desejado (kVAr);

φ_1 : Fator de potência inicial;

φ_2 : Fator de potência desejado;

Qbanco: Potência reativa do banco de capacitores (kVAr).

2) Seleção do Modo de Compensação

Definir a forma de compensação. A compensação da energia reativa no sistema pode ser feita de três maneiras:

- Global, para toda instalação;
- Por setores ou por painéis elétricos;
- Por cargas individuais.

3) Seleção do Tipo de compensação

A seleção do tipo de compensação pode ser feita de duas maneiras:

- Capacitores fixos;
- Estágios automáticos, através de um controlador automático de fator de potência os capacitores são inseridos no sistema conforme a necessidade da instalação.

4) Condições de Operação

Para realizar a correção do fator de potência de uma instalação devem ser observadas as condições de operação dos bancos de capacitores. Deve-se observar se a correção se dará em um sistema convencional ou em um sistema com a presença das distorções harmônicas.

2.8.3 Instalações de Bancos de Capacitores em Sistemas Convencionais

Instalações convencionais são aquelas onde as formas de onda de tensão e corrente são senoidais. A correção do fator de potência neste caso é feita para atingir os objetivos descritos no Quadro 3.

Quadro 3 – Objetivos da correção do FP nas instalações convencionais

Attingir o fator de potência mínimo exigido pelas concessionárias;
Melhorar a perfil de tensão;
Liberação de capacidade de transformadores;
Diminuição da corrente de condutores elétricos;
Reduzir as perdas de energia da fonte até o ponto de correção;
Redução da temperatura de condutores, disjuntores e componentes do sistema elétrico.

Fonte: Adaptado Cogo e Siqueira Filho (2018).

2.8.4 Instalações de Bancos de Capacitores com a presença de Distorções Harmônicas

Segundo o Guia do Montador de Painéis – Schneider Electric (2015), para especificação de componentes para correção do fator de potência, o nível de distorções harmônicas deve ser considerado para que seja garantido o correto funcionamento do sistema.

Como os capacitores são sensíveis as correntes harmônicas, se faz necessário o uso de técnicas específicas para minimizar os efeitos nesses componentes.

2.8.4.1 Reatores Dessintonizados

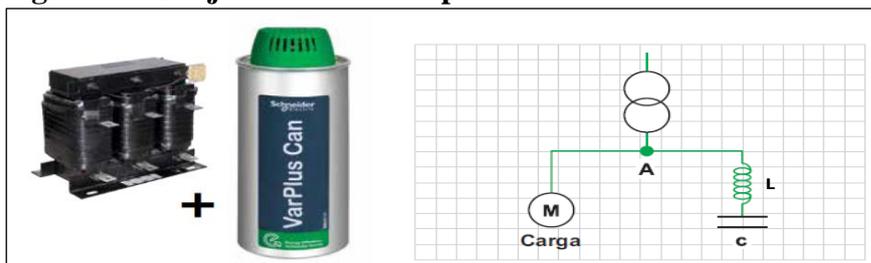
Uma das técnicas utilizadas por alguns fabricantes de capacitores é o uso de reatores dessintonizados nos bancos de capacitores. Segundo o Guia do Montador de Painéis – Schneider Electric (2015), reatores dessintonizados são filtros reatores indutores, e são associados aos bancos de capacitores em sistemas com altos índices de distorções harmônicas.

Os reatores são instalados em um circuito série com o capacitor, configurando um circuito ressonante, sintonizados, para que a frequência ressonante fique abaixo da menor frequência harmônica presente na instalação.

O uso destes reatores previne os problemas relacionados a ressonância com as harmônicas, evitando sobretensões e sobrecargas no capacitor, e também contribui para redução das harmônicas no sistema elétrico onde o mesmo se encontra instalado.

A Figura 3 apresenta o conjunto reator dessintonizado e um capacitor da linha VarPlus Can da Schneider Electric e a forma de conexão com a rede elétrica.

Figura 3 – Conjunto reator + capacitor



Fonte: Schneider Electric (2015).

2.8.4.2 Frequência de Sintonização do Reator e Capacitor

Ainda, segundo o Guia do Montador de Painéis – Schneider Electric (2015), a frequência de sintonização do conjunto pode ser expressa pela ordem de sintonização, pela frequência em Hz, ou ainda pela impedância relativa do reator (em %) conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Frequência de sintonização

Impedância Relativa (%)	Ordem de Sintonização	Frequência de Sintonização (60Hz)
5,7%	4,2	250Hz
7%	3,8	230Hz
14%	2,7	160Hz

Fonte: Schneider Electric (2015).

Conforme a Tabela 5, a frequência de sintonização para harmônicas de 5ª ordem deve ser de 250Hz, com impedância relativa de 5,7% (Z_R) e ordem de sintonização de 4,2.

O Guia do Montador de Panéis – Schneider Electric (2015), traz ainda alguns cuidados que se fazem necessários para o correto dimensionamento de capacitores com o uso de reatores dessintonizados.

2.8.4.3 Cálculo da Tensão Nominal do Capacitor

O primeiro cuidado é com relação a tensão nominal do capacitor. Na aplicação com reatores dessintonizados a tensão nos capacitor é maior do que a tensão nominal da rede, portanto a tensão nominal do capacitor deve ser maior.

A tensão aplicada no conjunto reator + capacitor é dada por:

$$U_C = \frac{U_S}{(1 - Z_R)} \quad (16)$$

Onde:

U_C : Tensão nominal do capacitor (V);

U_S : Tensão nominal do sistema (V);

Z_R : Impedância relativa do reator dessintonizado (%).

Tabela 6 – Tensão nominal recomendada

Tensão nominal do capacitor (U_n) V		Tensão de Serviço da Rede (U_s) V		
		60Hz		
		400V	480V	600V
Impedância Relativa (%)	5,7%	480V	575V	690V
	7%			
	14%	480V	480V	

Fonte: Schneider Electric (2015).

Conforme a Tabela 6, a tensão nominal do capacitor (U_C) para harmônicas de 5ª Ordem, com impedância relativa de 5,7% (Z_R), em um sistema com tensão nominal (U_S) próxima aos 400V, deve ser de 480V.

2.8.4.4 Cálculo da Potência Reativa do Banco de Capacitores

Outro cuidado que deve ser tomado é com relação potência nominal do capacitor. Dependendo da frequência de sintonização escolhida, parte das correntes harmônicas são absorvidas pelo conjunto (reator + capacitor), por isso os capacitores do banco devem ser especificados com potências reativas maiores do que as nominais.

A potência reativa efetiva fornecida pelo banco de capacitores com a combinação capacitores + reatores na tensão nominal do sistema é expressa pela equação 17.

$$Q_N = \frac{Q_s}{(1 - Z_R)} * \left(\frac{U_N}{U_S}\right)^2 \quad (17)$$

Onde:

QN: Potência reativa efetiva do banco de capacitores (kVAr);

Qs: Potência reativa desejada (kVAr);

ZR: Impedância relativa do reator dessintonizado (%);

Un: Tensão nominal capacitor (V);

Us: Tensão nominal do sistema (V).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa realizada para o desenvolvimento deste artigo foi embasada em dados coletados em uma agroindústria no estado de Mato Grosso, em um Frigorífico Abatedouro de Bovinos em dezembro de 2018.

3.3 MEDIÇÕES DA QUALIDADE DE ENERGIA

Um dos objetivos citados nesta pesquisa foi identificar e interpretar a presença das componentes harmônicas em um sistema elétrico de potência (SEP), para tal fim, serão utilizados dados de medições em campo realizados nesta agroindústria.

3.1.1 Equipamento Utilizado

O equipamento utilizado para as medições em campo foi um Analisador de Energia modelo RE6000N do fabricante Embrasul conforme a Figura 4. O Analisador de Energia é

capaz de detectar, registrar e armazenar diversas grandezas elétricas e fenômenos relacionados a qualidade de energia, inclusive a presença das componentes harmônicas.

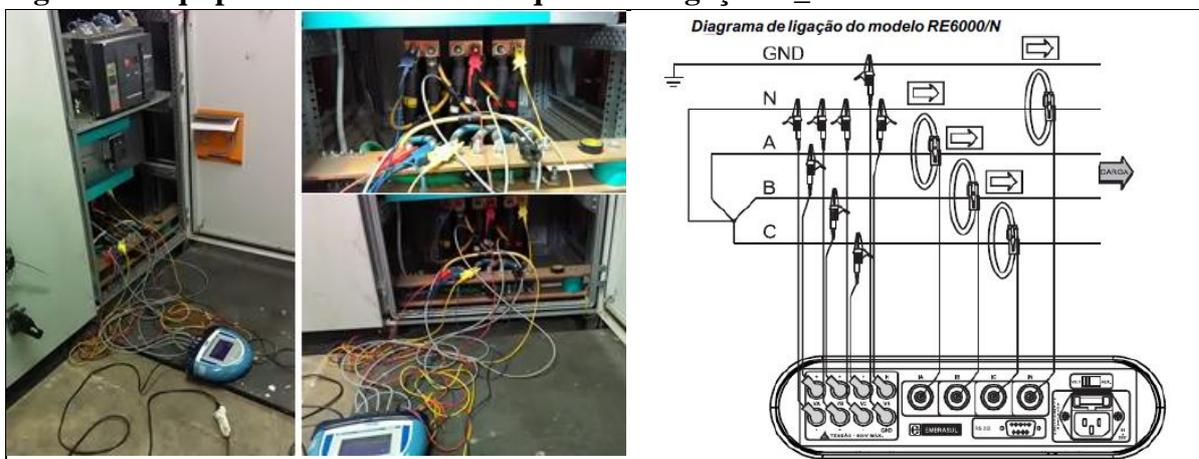
Figura 4 - Analisador de Energia RE6000



Fonte: Embrasul (2015).

O Analisador de Energia foi conectado na entrada de um quadro geral de baixa tensão, denominado QGBT_2MVA. O equipamento realizou as leituras analógicas de tensão e de corrente do sistema. O tempo total de medição foi de aproximadamente 24 horas, sendo que o ideal para um bom resultado de medições seja de no mínimo sete dias (168 horas), mas devido às circunstâncias especiais, optou-se por esse tempo mínimo de medições. A Figura 5 mostra o equipamento instalado no QGBT_2MVA e o esquema de ligação que foi utilizado para conexão do Analisador de Energia.

Figura 5 - Equipamento instalado e esquema de ligação Y_RE6000N



Fonte: o autor, Embrasul (2015).

3.4 NÍVEIS DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS ENCONTRADOS

Durante o período de medições o Analisador de Energia fez 2.780 registros, com um intervalo de 5 em 5 segundos. A Tabela 7 apresenta os dados das medições realizadas.

Tabela 7 - Dados das medições

Fase	Nº Registro	Data	Horário	RMS (V)	RMS (A)	FP	Frequência (Hz)
B	1.581	11/12/2018	23:50:10	219,47	1080,3	0,92	60,06

Fonte: o autor.

Na Tabela 7, no registro de número 1.581 foi identificada a maior taxa de distorção harmônica individual de corrente, sendo de 5ª ordem, registrado nas medições na fase B do sistema elétrico. O valor encontrado foi de 16,04%.

A Tabela 8 apresenta todos os níveis de distorções encontrados no QGBT_2MVA na fase B.

Tabela 8 - Níveis de distorções harmônicas no QGBT_2MVA

Ordem	DHI_V (%)	DHI_I (%)	DHT_V (%)	DHT_I (%)
3ª	-	1,28	3,224	17,493
5ª	2,56	16,04		
7ª	1,3	5,61		
9ª	-	-		
11ª	0,78	3,00		
13ª	0,62	1,69		
15ª	-	-		
17ª	0,54	1,21		
19ª	0,48	0,98		
21ª	-	-		
23ª	-	0,52		
25ª	-	0,52		
27ª	-	-		
29ª	0,38	0,52		
31ª	-	-		
33ª	-	-		
35ª	0,51	0,51		
37ª	-	-		
39ª	-	-		
41ª	0,44	0,35		

Fonte: Quadros (2019).

Na Tabela 8, a taxa de distorção harmônica total de tensão foi de 3,224%, e a taxa de distorção harmônica total de corrente foi de 17,493%.

3.5 NÍVEIS ACEITAVEIS DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS NO SEP

Outro objetivo proposto nesta pesquisa foi conhecer os níveis aceitáveis de distorções harmônicas em um sistema elétrico de potência, para tal, foi realizado um estudo aprofundado nas normas vigentes do país que tratam sobre qualidade de energia e também em normas internacionais.

3.5.1 Níveis de Distorções Harmônicas de Tensão

Conforme mostrado nesta pesquisa, os níveis aceitáveis de distorções harmônicas de tensão no Brasil estão descritos no Módulo 8 do PRODIST (Qualidade de Energia), conforme a Tabela 2 - Limites de distorção harmônica para diferentes níveis de tensão.

Quadro 4 - Dados de tensão do sistema elétrico de potência analisado

Tensão nominal do sistema (V_n)	380V
$V_n \leq 1,0$ kV para DTT95%	10%

Fonte: Quadros (2019).

Portanto a distorção harmônica total de tensão (DTT) para o sistema elétrico de potência analisado deve ser no máximo 10%.

3.5.2 Níveis de Distorções Harmônicas de Corrente

As normas brasileiras que tratam de assuntos relacionados a qualidade de energia não citam limites para distorções harmônicas de corrente, portanto nesta pesquisa serão utilizados os limites descritos em uma norma internacional muito utilizada pela comunidade acadêmica e também por profissionais da área da engenharia elétrica, que é a IEEE SD 519-2014.

Para análise deste índice foram levadas em consideração as taxas de distorções harmônicas individuais de corrente, e não a TDD, que é a taxa de distorção da demanda, pois seriam necessários os dados de demanda de 12 meses.

Conforme a Tabela 4 - Limites de Distorção Harmônica de Corrente (120V até 69kV) da IEEE SD 519-2014, os limites devem ter relação com o I_{sc}/I_L , conforme dimensionados com dados da própria instalação.

Quadro 5 - Dados de potência do sistema elétrico analisado

Tensão nominal do sistema (V_n)	380V
Potência nominal do transformador	2.000kVA
Impedância do transformador	6,5%
I_{sc}	49.750A
Demanda máxima (I_L)	2.642A
Relação I_{sc}/I_L	18,83

Fonte: Quadros (2019).

Conforme relação $I_{sc}/I_L = 18,83$, abaixo de 20, os limites de distorção harmônica de corrente devem ser:

Quadro 6 - Limites de distorção harmônica de corrente

$3 \leq h < 11$	4,0%
$11 \leq h < 17$	2,0%
$17 \leq h < 23$	1,5%
$23 \leq h < 35$	0,6%
$35 \leq h \leq 50$	0,3%

Fonte: Quadros (2019).

3.6 ANÁLISE DOS EFEITOS DA PRESENÇA DAS HARMÔNICAS

Como demonstrado nesta pesquisa, os efeitos das componentes harmônicas em bancos de capacitores são muito prejudiciais, pois além dos pontos de ressonância, podem surgir no sistema sobretensões ou sobrecargas, causando o aquecimento excessivo das células capacitivas, podendo as mesmas entrar em combustão, dependendo do tipo de capacitor utilizado, ou até mesmo explodir por falta de dissipação do calor interno.

3.7 DIMENSIONAMENTO DO BANCO DE CAPACITORES

Para o sistema analisado nesta pesquisa, o dimensionamento do banco de capacitores foi realizado conforme as fórmulas 13, 14 e 15.

1) Cálculo da energia reativa requerida

$$Q_1 = P * \tan(\varphi_1) \quad (13)$$

$$Q_2 = P * \tan(\varphi_2) \quad (14)$$

$$Q_{\text{banco}} = Q_1 - Q_2 \quad (15)$$

Quadro 7 - Cálculo da energia reativa requerida

Fator de potência inicial φ_1	0,758
Fator de potência desejado φ_2	0,92
Potência P (kW)	1560 kW
Q1 (kVAr)	1.342,37 kVAr
Q2 (kVAr)	664,55 kVAr
Qbanco (kVAr)	677 kVAr

Fonte: Quadros (2019).

O fator de potência de 0,758 foi estimado de acordo com as cargas instaladas, conforme dados obtidos de projeto. Deste modo a potência reativa do banco de capacitores foi dimensionada para que o transformador de 2MVA forneça potência máxima.

2) Seleção do Modo de Compensação

O modo de compensação no sistema analisado foi feito de forma global, para toda a instalação, com o banco de capacitores acoplado ao QGBT_2MVA.

3) Seleção do Tipo de compensação

O tipo de compensação no sistema analisado foi feito com atuação automática, controlada por um controlador eletrônico de fator de potência, com múltiplos estágios, permitindo o ajuste da potência reativa conforme a necessidade da carga.

4) Condições de Operação

A solução adotada para o QGBT_2MVA foi o dimensionamento de um banco de capacitores convencional, sem a utilização de reatores dessintonizados, pois as medições de qualidade de energia foram realizadas depois da instalação do conjunto QGBT + Banco de Capacitores, e não haviam dados para o dimensionamento correto dos reatores dessintonizados.

3.7.1 Dimensionamento do Banco de Capacitores Considerando as Distorções Harmônicas

No caso do QGBT_2MVA, a potência nominal efetiva (Q_S) do banco de capacitores foi calculada em 667kVAr. Conforme os valores das medições realizadas em campo, a menor ordem harmônica individual de corrente com o maior valor encontrado foi a de 5ª ordem com 16,04%, por isso o dimensionamento foi realizado somente para essa ordem.

Quadro 8 – Dados do sistema analisado

Qs	667kVAr
Us	380V
ZR	5,7%
Ordem harmônica considerada	5ª Ordem
Relação I_{sc} / I_L	18,83
Limite para $I_{sc} / I_L < 20$	4,0%
DHI medida	16,4%

Fonte: Quadros (2019).

Cálculo da Tensão Nominal dos Capacitores:

A tensão aplicada no conjunto reator + capacitor é dada por:

$$U_C = \frac{U_S}{(1 - Z_R)} = \frac{380}{(1 - 0,057)} = 402,97V \quad (16)$$

O capacitor será escolhido com $U_N = 480V$, pois a linha específica de capacitores do fabricante Schneider Electric para sistemas com altos níveis harmônicos parte de 480V (VarPlus Can Schneider Electric).

Cálculo da Potência Reativa dos Capacitores:

A potência reativa nominal do banco de capacitores (Q_N) com a combinação capacitores + reatores na tensão nominal dos capacitores $U_N = 480V$ será de:

$$Q_N = \frac{Q_s}{(1 - Z_R)} * \left(\frac{U_N}{U_S}\right)^2 = 707317 * \left(\frac{480}{380}\right)^2 = 1.128,6kVAr \quad (17)$$

A potência reativa necessária para corrigir o fator de potência neste sistema considerando as harmônicas de 5ª ordem será de 1.128,6kVAr, um acréscimo de 69% de potência reativa no banco de capacitores.

4 RESULTADO E DISCUSSÕES

Como o objetivo principal deste artigo é fazer uma análise financeira comparativa, serão apresentadas duas soluções técnicas comerciais para a correção do fator de potência na indústria em questão, sendo uma delas a solução com banco de capacitores convencional, e a outra uma solução com banco de capacitores com reatores dessintonizados.

4.3 ANÁLISE FINANCEIRA COMPARATIVA

Após as análises técnicas das duas soluções apresentadas acima, pode ser desenvolvida a análise financeira, comparando os valores financeiros das duas soluções apresentadas.

4.3.1 Valor da Solução com Banco de Capacitores Convencional 667kVAr

A Tabela 9 abaixo apresenta a descrição e os valores dos materiais e acessórios necessários para fabricação e montagem do banco de capacitores no sistema convencional (sem reatores dessintonizados).

Tabela 9 – Valores banco de capacitores convencional 667kVAr

Banco de Capacitores Convencional – 667kVAr						
Item	Descrição	Qtde.	Unid.	Vlr. Unit.	Vlr. Total	
1	Chaparia (Estrutura Metálica Autoportante)	1	Cjt	R\$ 19.800,00	R\$	19.800,00
2	Disjuntor Geral e Acessórios	1	Cjt	R\$ 13.929,89	R\$	13.929,89
3	Barramentos e Isoladores	1	Cjt	R\$ 8.017,81	R\$	8.017,81
4	Controlador de Fator e Potência e Acessórios	1	Cjt	R\$ 3.575,12	R\$	3.575,12
5	Estágio Capacitivo 01 (2x27,1kVAr) (Disjuntor + Contator + Capacitor)	1	Cjt	R\$ 2.596,85	R\$	2.596,85
6	Estágio Capacitivo 02 (2x27,1kVAr) (Disjuntor + Contator + Capacitor)	1	Cjt	R\$ 2.596,85	R\$	2.596,85
7	Estágio Capacitivo 03 (2x27,1kVAr) (Disjuntor + Contator + Capacitor)	1	Cjt	R\$ 2.596,85	R\$	2.596,85
8	Estágio Capacitivo 04 (2x27,1kVAr) (Disjuntor + Contator + Capacitor)	1	Cjt	R\$ 2.596,85	R\$	2.596,85
9	Estágio Capacitivo 05 (2x27,1kVAr) (Disjuntor + Contator + Capacitor)	1	Cjt	R\$ 2.596,85	R\$	2.596,85
10	Estágio Capacitivo 06 (2x27,1kVAr) (Disjuntor + Contator + Capacitor)	1	Cjt	R\$ 2.596,85	R\$	2.596,85
11	Estágio Capacitivo 07 (2x27,1kVAr) (Disjuntor + Contator + Capacitor)	1	Cjt	R\$ 2.596,85	R\$	2.596,85
12	Estágio Capacitivo 08 (2x27,1kVAr) (Disjuntor + Contator + Capacitor)	1	Cjt	R\$ 2.596,85	R\$	2.596,85
13	Estágio Capacitivo 09 (2x27,1kVAr) (Disjuntor + Contator + Capacitor)	1	Cjt	R\$ 2.596,85	R\$	2.596,85
14	Estágio Capacitivo 10 (2x27,1kVAr) (Disjuntor + Contator + Capacitor)	1	Cjt	R\$ 2.596,85	R\$	2.596,85
15	Estágio Capacitivo 11 (2x21,7kVAr) (Disjuntor + Contator + Capacitor)	1	Cjt	R\$ 2.303,93	R\$	2.303,93
16	Estágio Capacitivo 12 (2x21,7kVAr) (Disjuntor + Contator + Capacitor)	1	Cjt	R\$ 2.303,93	R\$	2.303,93
17	Estágio Capacitivo Fixo (2x21,7kVAr) (Disjuntor + Capacitor)	1	Cjt	R\$ 1.567,07	R\$	1.567,07
18	Acessórios Diversos e Miscelâneas	1	Cjt	R\$ 8.525,13	R\$	8.525,13
Total Banco de Capacitores Convencional 667kVAr						R\$ 85.991,36

Fonte: Quadros (2019).

O valor total para fabricação e montagem do banco de capacitores convencional de 667kVAr é de R\$ 85.991,36.

4.3.2 Valor da Solução com Banco de Capacitores com Reatores Dessintonizados 1.128,6kVAr

A Tabela 10 abaixo apresenta a descrição e os valores dos materiais e acessórios necessários para fabricação e montagem do banco de capacitores com reatores dessintonizados.

Tabela 10 - Valores banco de capacitores dessintonizados 1.128,6kVAr

Banco de Capacitores Dessintonizados – 1.128,6kVAr						
Item	Descrição	Qtde.	Unid.	Vlr. Unit.	Vlr. Total	
1	Chaparia (Estrutura Metálica Autoportante)	1	Cjt	R\$ 22.000,00	R\$	22.000,00

2	Disjuntor Geral e Acessórios	1	Cjt	R\$	13.929,89	R\$	13.929,89
3	Barramentos e Isoladores	1	Cjt	R\$	8.369,26	R\$	8.369,26
4	Controlador de Fator e Potência e Acessórios	1	Cjt	R\$	3.575,12	R\$	3.575,12
5	Estágio Capacitivo 01 (4x31kVAr) (Disjuntor + Contator + Reator Dessintonizado + Capacitor)	1	Cjt	R\$	9.504,20	R\$	9.504,20
6	Estágio Capacitivo 02 (4x31kVAr) (Disjuntor + Contator + Reator Dessintonizado + Capacitor)	1	Cjt	R\$	9.504,20	R\$	9.504,20
7	Estágio Capacitivo 03 (4x31kVAr) (Disjuntor + Contator + Reator Dessintonizado + Capacitor)	1	Cjt	R\$	9.504,20	R\$	9.504,20
8	Estágio Capacitivo 04 (4x31kVAr) (Disjuntor + Contator + Reator Dessintonizado + Capacitor)	1	Cjt	R\$	9.504,20	R\$	9.504,20
9	Estágio Capacitivo 05 (4x31kVAr) (Disjuntor + Contator + Reator Dessintonizado + Capacitor)	1	Cjt	R\$	9.504,20	R\$	9.504,20
10	Estágio Capacitivo 06 (4x31kVAr) (Disjuntor + Contator + Reator Dessintonizado + Capacitor)	1	Cjt	R\$	9.504,20	R\$	9.504,20
11	Estágio Capacitivo 07 (4x31kVAr) (Disjuntor + Contator + Reator Dessintonizado + Capacitor)	1	Cjt	R\$	9.504,20	R\$	9.504,20
12	Estágio Capacitivo 08 (2x21,6kVAr) (Disjuntor + Contator + Reator Dessintonizado + Capacitor)	1	Cjt	R\$	3.880,78	R\$	3.880,78
13	Estágio Capacitivo 09 (2x21,6kVAr) (Disjuntor + Contator + Reator Dessintonizado + Capacitor)	1	Cjt	R\$	3.880,78	R\$	3.880,78
14	Estágio Capacitivo 10 (2x21,6kVAr) (Disjuntor + Contator + Reator Dessintonizado + Capacitor)	1	Cjt	R\$	3.880,78	R\$	3.880,78
15	Estágio Capacitivo 11 (2x21,6kVAr) (Disjuntor + Contator + Reator Dessintonizado + Capacitor)	1	Cjt	R\$	3.880,78	R\$	3.880,78
16	Estágio Capacitivo 12 (2x21,6kVAr) (Disjuntor + Contator + Reator Dessintonizado + Capacitor)	1	Cjt	R\$	3.880,78	R\$	3.880,78
17	Estágio Capacitivo Fixo (2x21,6kVAr) (Disjuntor + Reator Dessintonizado + Capacitor)	1	Cjt	R\$	3.131,12	R\$	3.131,12
18	Acessórios Diversos e Miscelâneas	1	Cjt	R\$	11.146,39	R\$	11.146,39
Total Banco de Capacitores Dessintonizados 1.128,6kVAr						R\$	148.085,07

Fonte: Quadros (2019).

O valor total para fabricação e montagem do banco de capacitores com reatores dessintonizados de 1.128,6kVAr é de R\$ 148.085,07.

Conforme os cálculos realizados neste estudo, houve um sobre dimensionamento do sistema de correção do fator de potência, com a inclusão de mais capacitores em paralelo, mais disjuntores de proteção, contadores, reatores dessintonizados, condutores elétricos, acessórios, acréscimo na chaparia metálica do painel elétrico, inclusão de mais ventiladores para troca térmica devido os reatores causarem um aquecimento elevado no interior do painel.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta pesquisa foi possível identificar e interpretar a presença das harmônicas no sistema elétrico analisado, através das medições realizadas em campo, e também foi possível conhecer os níveis das distorções máximas para aquela instalação de acordo com as normas vigentes. Outro objetivo atingido foi a análise dos efeitos que as componentes harmônicas causam em bancos de capacitores, com isso, foi possível o dimensionamento de uma solução específica para minimizar tais efeitos.

Analisando as duas soluções técnicas, temos uma diferença de valores de R\$ 62.093,71, sendo a solução com reatores dessintonizados 72,2% mais cara financeiramente do que a solução convencional.

- Análise Financeira:

Se for analisado somente o lado financeiro da solução, essa diferença de R\$ 62.093,71 é bem considerável, podendo as vezes não ser muito atrativa para os olhos da empresa, que geralmente está preocupada em não pagar multa por falta de correção do fator de potência, e também em direcionar os seus investimentos para aumentar a produtividade, deixando de se preocupar com a qualidade de energia da sua própria instalação.

- Análise Técnica:

Analisado tecnicamente, essa solução é a mais indicada, pelo fato da preservação dos componentes elétricos do banco de capacitores, a diminuição das correntes harmônicas circulantes na instalação, causando a diminuição da temperatura dos condutores e equipamentos elétricos, a melhora no fator de potência com a filtragem das componentes harmônicas mais severas.

Ao aplicar a técnica correta, a instalação elétrica fica protegida contra os efeitos causadores de aquecimento, reduzindo consideravelmente o risco de incêndios, prevenindo prejuízos muito maiores que a diferença financeira de 72,2%.

Um exemplo disso, foi a ocorrência de um sinistro em dezembro de 2018 em um dos bancos de capacitores existente nas dependências da indústria em questão. Na época, um painel com mais de 10 anos de uso pegou fogo, ocasionando a perda de alguns painéis elétricos instalados na mesma sala, e vários danos na subestação principal da planta. Não se pode afirmar que a causa do incêndio foram as harmônicas, mas o incêndio iniciou em um banco de capacitores.

O valor orçado para recuperação dos painéis danificados e da instalação elétrica ficou em torno de R\$ 650.000,00, um investimento muito maior em reparos do que em uma solução técnica correta.

No caso da indústria citada neste artigo, a solução fornecida na época foi um banco de capacitores convencional. As medições da qualidade de energia foram realizadas depois da instalação do banco de capacitores, e com o banco conectado, o que não é o correto, pois as harmônicas nesta situação são amplificadas quando não existem filtros no sistema.

Estudos mais aprofundados sobre esse assunto podem ser realizados, sempre tomando o cuidado para que as medições em campo sejam feitas com os bancos de capacitores desconectados, e o tempo de medição também deve ser o maior possível, próximo de sete dias consecutivos.

Existem também outros fabricantes de capacitores, onde são encontrados diferentes níveis de tensão, que podem ser utilizados nessas soluções, com isso pode-se reduzir a potência reativa final do banco de capacitores, diminuindo a diferença financeira com os mesmos resultados.

REFERÊNCIAS

ABNT, Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 5410: Instalações elétricas de baixa tensão**. Rio de Janeiro, 2004.

ANEEL, Agencia Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa Nº 414**. 2010.

ANEEL, Agencia Nacional de Energia Elétrica. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**. Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. Revisão 10. 2018.

COGO, João Roberto, SIQUEIRA FILHO, José Batista. **Capacitores de Potência e Filtros de Harmônicos**. Rio de Janeiro. Ciência Moderna. 2018.

EMBRASUL. **Manual de Instalação e Operação do RE6001**. Disponível em: https://drive.google.com/file/d/1M5sBzsWHxLx0Ua5Zf5_uFngTClutbTca/view

GARCIA, Eng. MSc. Flávio Resende. **Harmônicos em Sistema Elétricos de Potência. IESA**. Disponível em: <http://www.iesa.com.br/institucional/pdf/pdf_reativa/ap_harmonicosePCap.pdf>. Acesso em 09 mar. 2019.

IEEE , Institute of Electrical and Electronics Engineers. **Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems**. IEEE Std 519, 2014.

LEÃO, Ruth, Pastora, SAMPAIO, Raimundo Furtado, ANTUNES, Fernando Luiz Marcelo. **Harmônicos em Sistemas Elétricos**. Elsevier. 2014.

KAGAN, Nelson, ROBBA, João Ernesto, SCHMIDT, Hernán Prieto. **Estimação de Indicadores de Qualidade de Energia Elétrica**. São Paulo. Blucher. 2009.

ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e dos barramentos dos transformadores de fronteira, e de seus componentes**. Submódulo 2.8. Revisão 1.1. 2010a.

ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Requisitos técnicos mínimos para a conexão às instalações de transmissão**. Submódulo 3.6. Revisão 1.1. 2010b.

PROCOBRE, Instituto Brasileiro do Cobre. **Harmônicas nas instalações elétricas: causas, efeitos e soluções**. 1ª Edição São Paulo, 2001.

ROCKWELL AUTOMATION. **Considerações Sobre Harmônicas**. São Paulo, 2015.

SCHNEIDER ELECTRIC. **Guia para Projeto e Montagem de Cubículos de BT para Correção de Fator de Potência**. São Paulo, 2015.

WEG Automação S.A. **Manual para Correção de Fator de Potência**. São Paulo, 2009.

VOLTIMUM S.A. **Qualidade De Energia: Harmônicas**. Seminário Online. São Paulo, 2014.