

# **SISTEMAS DE COMPENSAÇÃO DE ENERGIA REATIVA EM REDES DE BAIXA TENSÃO COM DISTORÇÃO HARMÔNICA**

**NATÁLIA PEREIRA RIZENTAL**

**Trabalho realizado sob a orientação de**

**Prof. Dr. Ângela Paula Ferreira**

**Prof. Dr. Paulo Cícero Fritzen**

**Bragança**

**2020/2021**

# **SISTEMAS DE COMPENSAÇÃO DE ENERGIA REATIVA EM REDES DE BAIXA TENSÃO COM DISTORÇÃO HARMÔNICA**

**NATÁLIA PEREIRA RIZENTAL**

**42785**

Dissertação apresentada à Escola Superior de Tecnologia e Gestão para obtenção do Grau de Mestre em Energias Renováveis e Eficiência Energética no âmbito da Dupla Diplomação com a Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**Trabalho realizado sob a orientação de**

**Prof. Dr. Ângela Paula Ferreira**

**Prof. Dr. Paulo Cícero Fritzen**

**Bragança**

**2020/2021**

A Escola Superior de Tecnologia e Gestão não se responsabiliza pelas opiniões expressas neste relatório.



# Dedicatória

*Ao meu pai, René Francisco Rizental (in memoriam).*

# Agradecimentos

Primeiramente agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), que é minha formadora desde meus 14 anos, quando ingressei no curso Técnico em Eletrônica, no qual sou formada, e seguidamente ingressei no curso de Engenharia Elétrica na mesma instituição. Assim como agradeço ao Instituto Politécnico de Bragança (IPB) que, por meio do acordo de Dupla Diplomação com minha instituição de origem, possibilitou que eu ingressasse em um curso de excelência fora de meu país natal.

Quanto à Professora Ângela Ferreira, minha orientadora no IPB, gratifico toda a experiência e discernimento com que me instruiu, ademais, sempre com muita compreensão. Ao Professor José dos Santos Batista, agradeço o apoio técnico relacionado à parametrização e instalação de analisadores de energia assim como discussão do tema. Ao Professor Paulo Fritzen, meu orientador na UTFPR, agradeço por aceitar representar a instituição neste trabalho e o apoio que constantemente me ofereceu.

Por fim deixo minhas gratulações à minha família e aos meus amigos: à família pelo apoio incondicional e respeito à minha decisão de estudar no exterior; e aos amigos, tanto do Brasil quanto de Portugal, que estiveram ao meu lado nos momentos agradáveis e nos pesados, de forma que eu me sentisse sempre acolhida.



# Resumo

A eficiência energética também engloba o tema da qualidade de energia, que será tratada neste trabalho no âmbito do estudo da ressonância entre uma instalação elétrica e as capacidades de uma bateria de condensadores compensadora do fator de potência.

O trabalho utiliza dados recolhidos nas instalações do Instituto Politécnico de Bragança. A metodologia adotada no trabalho foi o equacionamento da indutância da rede e a correlação da mesma com a capacidade da bateria. Os dados foram obtidos por analisadores de energia.

Após o desenvolvimento da metodologia com a premissa de uma rede indutiva, que é uma suposição comum, foi constatado pelas medições que a rede teve seu comportamento deslocado para uma característica capacitiva. A datação deste comportamento foi aferida e mostrada no trabalho.

O trabalho foi concluído com a premissa de que pode ser aplicado para redes com características indutivas, podendo ser estendido para aplicações industriais.

**Palavras-chave:** Harmônicos, Correção de fator de potência, Ressonância

elétrica, Redes elétricas.



# Abstract

Energy efficiency also encompasses the energy quality theme, which will be addressed in this work in the context of the study of resonance between harmonics and the capacity of a battery of condensers that compensate the power factor.

The work took place in the facilities of the Polytechnic Institute of Bragança. The methodology adopted in the work was the equation of the inductance of the electric network and the correlation of it with the capacity of the battery. The database was obtained by energy analyzers before being equated.

After the development of the equation with the premise of an inductive network, which is a common assumption, it was verified by the measurements that the network had its behavior shifted to a capacitive characteristic. The dating of this behavior was measured and shown at work.

The work was completed with the premise that it can be applied to networks with inductive characteristics and can be extended to industrial applications.

**Keywords:** Harmonics, Power factor correction, Electric resonance, Electric networks.



# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1	Motivação .....	1
1.2	Descrição do estudo de caso .....	2
1.3	Objetivos.....	2
1.3.1	Objetivo Geral .....	2
1.3.2	Objetivos Específicos .....	2
1.4	Justificativa .....	3
1.5	Procedimentos metodológicos .....	3
1.6	Estrutura do trabalho .....	3
<b>2</b>	<b>Estado da arte.....</b>	<b>5</b>
2.1	Fundamentos dos harmônicos .....	5
2.2	Distorção harmônica.....	7
2.3	Principais causas da distorção harmônica .....	8
2.4	Taxas de harmônicos .....	9
2.5	Legislação .....	10
2.5.1	IEC 61000 .....	11
2.5.2	IEEE 519 2014. ....	14
2.6	Correção de fator de potência .....	15
2.7	Ressonância .....	18
2.8	Correção de fator de potência e ressonância .....	20
2.9	Filtros.....	21
2.9.1	Filtros passivos.....	21
2.9.2	Filtros ativos.....	24
2.9.2.1	Filtros ativos paralelos de potência.....	25
<b>3</b>	<b>Avaliação da frequência de ressonância .....</b>	<b>27</b>

3.1	Representação unifilar e esquemático da rede.....	27
3.2	Admitância da rede e suas componentes .....	28
3.3	Estimativa da indutância do transformador do PT .....	30
3.3.1	Cálculo da capacitância da bateria .....	32
3.3.2	Cálculo da indutância da rede .....	32
3.3.3	Cálculo da frequência de ressonância .....	33
<b>4</b>	<b>Caso de estudo .....</b>	<b>34</b>
4.1	Transformador .....	34
4.2	Analisador de energia e <i>software</i> .....	35
4.3	Bateria de condensadores .....	37
4.4	Dados obtidos .....	39
4.4.1	Estimativas de potência.....	44
<b>5</b>	<b>Conclusão.....</b>	<b>47</b>



# Lista de Tabelas

Tabela 1 Ordem, frequência e sequência de harmônicos (adaptado de [5]).....	6
Tabela 2. Limites para harmônicos de corrente para IEC 61000-3-2 [11].....	12
Tabela 3. Limites gerais para harmônicos de corrente para IEC 61000-3-4 [15] .....	13
Tabela 4. Limites para harmônicos de corrente para IEC 61000-3-4, para equipamento monofásico ou trifásico desbalanceado [15] .....	14
Tabela 5. Limites para harmônicos de corrente para IEC 61000-3-4, para equipamento trifásico equilibrado [15].....	14
Tabela 6. Limites de distorção de corrente para IEEE 519 2014, para sistemas classificados de 120 V a 69 kV [16] .....	15
Tabela 7 Dados resumidos da chapa de características do transformador da ESA1 ....	34
Tabela 8 Combinações possíveis dos escalões de potência [29].....	37
Tabela 9. Exemplo de dados obtidos pelos analisadores de energia .....	42
Tabela 10 Variação de potência e FP durante o fechamento das escolas.....	45
Tabela 11 Variação percentual de potências .....	45



# Lista de Figuras

Figura 1 Domínios do tempo e da frequência [4].....	5
Figura 2 Sequências de fase (adaptado de [3]).....	6
Figura 3 Somatório de ondas exemplificando a Série de Fourier (adaptado de [2]).....	7
Figura 4. Triângulo de potência.....	16
Figura 5. Tetraedro de Potência.....	17
Figura 6 Circuito ressonante série .....	18
Figura 7 Circuito ressonante paralelo.....	19
Figura 8 Exemplo de circuito passa baixa e sua resposta em frequência [3]. .....	22
Figura 9 Exemplo de circuito passa altas e sua resposta em frequência [3].....	22
Figura 10 Exemplo de circuito passa faixa e sua resposta em frequência [3].....	23
Figura 11 Exemplo de circuito rejeita faixa e sua resposta em frequência [3].....	23
Figura 12 Princípio de funcionamento de filtro ativo de potência [24] .....	25
Figura 13 Exemplo representativo de filtro ativo paralelo de potência [24].....	26
Figura 14 Filtro APF “shunt” [10].....	26
Figura 15 Diagrama unifilar de rede pressuposta.....	27
Figura 16 Equivalente por fase de injeção de harmônicos .....	28
Figura 17 Equivalente monofásico do transformador (adaptado de [26]).....	30
Figura 18 Equivalente monofásico, total e simplificado do transformador (adaptado de [26]).....	31
Figura 19 Placa característica do transformador da ESA1 .....	35
Figura 20 Representação do analisador UMG 604 [27].....	36
Figura 21 Localização dos analisadores de energia .....	36
Figura 22 Visão externa do banco de condensadores [28] e da placa característica....	37
Figura 23 Interface do PCRL 5/7 [30].....	38
Figura 24 Informações do PCRL 5/7, adaptado de [30].....	38
Figura 25 Característica da rede deslocada. ....	43
Figura 26 Detalhe da mudança de comportamento da rede .....	43
Figura 27 Visualização diária da mudança de comportamento.....	44



# Lista de Acrônimos

APF	<i>Parallel active power filter</i>
AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão
FP	Fator de Potência
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IHM	Interface Homem Máquina
IPB	Instituto Politécnico de Bragança
PCRL5/7	Modelo do IHM utilizado na bateria de condensadores
Profibus	<i>Comunicação Process Field Bus</i>
RLC	Circuito com resistência, indutância e capacitância
TLR4017.5	Modelo da bateria de condensadores utilizada no trabalho
UMG 604	Modelo do analisador de energia utilizado no trabalho
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

# Capítulo 1

## 1 Introdução

O presente trabalho permeia o tema da ressonância elétrica entre uma bateria de condensadores utilizada para a correção de fator de potência e a indutância da rede elétrica a ser corrigida, no âmbito de monitorização da eficiência energética em edifícios do Instituto Politécnico de Bragança.

### 1.1 Motivação

Com o competitivo comércio de energia atual, os requisitos de qualidade exigidos pelos consumidores se tornam cada vez mais rigorosos e sistemáticos. Visto que a qualidade de energia é um grandeza complexa de se definir, sendo controlado por meio de normas, o indicativo de sua falta pode causar grandes complicações para consumidores de grande potência [1]. O termo qualidade de energia, propriamente dito, se tornou prolífico no setor de energia ao final da década de 1980, sendo um conceito que engloba todos os tipos de distúrbios no sistema elétrico [2].

Dentro deste contexto, o estudo e controle de harmônicos se torna essencial, uma vez que embora as quedas de tensão possam ser, até certo ponto, controladas pela concessionária, as flutuações harmônicas não podem, por serem resultado de emissões dos próprios clientes [1]. O principal motivo para se corrigir problemas quanto à qualidade de energia é o valor econômico, pois a má qualidade pode gerar impactos diretos em consumidores industriais, de forma a comprometer processos sensíveis a flutuações de energia [2].

A correção mais usual utilizada para aumentar a qualidade de energia é a correção do fator de potência, o qual deve se manter em um valor mínimo estabelecido por legislação. Visto que a rede elétrica, em sua maior parte, é indutiva devido aos equipamentos associados à

mesma, uma forma de corrigir o fator de potência reduzido pelos equipamentos é a partir da utilização de uma bateria de condensadores [3].

A utilização de baterias de condensadores para correção de fator de potência é uma estratégia comum e amplamente utilizada para a correção do fator de potência. Entretanto, tendo em vista que em muitas redes elétricas são acopladas cargas não lineares, e estas possuem um alto grau de geração de frequências harmônicas, essas baterias podem conferir ressonância entre os equipamentos associados à rede e as capacidades da bateria de condensadores.

## **1.2 Descrição do estudo de caso**

O estudo de caso se dá em uma seção da rede do Instituto Politécnico de Bragança, cujo posto de transformação é denominado ESA1, que se encontra localizado na Escola Superior Agrária. Nele se encontra conectada uma bateria de condensadores para compensação de fator de potência. A partir desta bateria e dos dados de dois analisadores de energia, é elaborada uma metodologia sobre a distorção harmônica e a ressonância elétrica.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral do presente trabalho consiste em desenvolver um estudo investigativo sobre a distorção harmônica e a ressonância elétrica, de forma a desenvolver uma análise de risco em uma seção da rede elétrica do IPB utilizando os dados de analisadores de energia. E ainda ponderar quais as consequências na rede interna após a instalação de uma bateria de condensadores.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

No que tange os objetivos específicos, têm-se:

- (a) A construção de um embasamento teórico a partir de um estado da arte quanto ao tema de harmônicos e suas normas regulatórias.
- (b) Tratamento dos dados coletados a partir dos analisadores de energia.

- (c) Estimativa da frequência de ressonância da rede.
- (d) Elaboração da análise de risco de ressonância nos equipamentos próximos ao ponto de acoplamento comum.

## **1.4 Justificativa**

O projeto se dá no âmbito do Programa de Dupla Diplomação entre o Instituto Politécnico de Bragança (IPB) e a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) e promove a cooperação entre estas duas instituições de ensino e entre os países Portugal e Brasil.

O trabalho tem importância direta para as instalações do IPB, mas também pode ser extrapolado para o meio industrial em que baterias de condensadores são comumente utilizadas para a correção de fator de potência.

## **1.5 Procedimentos metodológicos**

Inicialmente, a metodologia consiste no estudo do Estado da Arte e das referências disponíveis para assimilação do tema, assim como a compreensão da utilização dos analisadores de energia disponíveis no IPB.

Desta forma, uma segunda fase é a captação de dados dos analisadores para então realizar o cálculo da frequência de ressonância da rede, extraindo os dados pelo software *GridVis*® e fazendo o pós-tratamento destes com o *Microsoft Excel*.

Por conseguinte, em uma terceira fase consiste na análise de risco de ressonância e proposta de prevenção, sendo este trabalho referência para tal.

## **1.6 Estrutura do trabalho**

A presente monografia está disposta em cinco capítulos, sendo estabelecidos após a secção introdutória de forma:

Capítulo 2: estado da arte e fundamentação teórica necessária para o domínio investigativo do tema e dos subtemas necessários para o desenvolvimento do trabalho.

Capítulo 3: delimitação do ambiente de estudo, tratamento de dados e determinação da frequência de ressonância da rede estudada.

Capítulo 4: apresentação da análise de risco.

Capítulo 5: discussões e conclusões acerca dos resultados obtidos durante o projeto assim como sugestão de trabalhos futuros.

# Capítulo 2

## 2 Estado da arte

Este capítulo aborda o que já é conhecido sobre tema a fim de orientar a atual pesquisa. Discorre-se inicialmente da distorção harmônica, salientando suas causas, consequências, métricas e principais normalizações. Seguidamente é tratada a correção de fator de potência e como esta pode ser influenciada pela distorção harmônica.

### 2.1 Fundamentos dos harmônicos

O sinal periódico que alimenta todos os equipamentos elétricos pode ser analisado a partir de dois domínios, sendo eles domínios do tempo e da frequência. Os sinais elétricos analisados no domínio do tempo são caracterizados por funções periódicas senoidais, as quais possuem como principal variável o tempo. Por outro lado, a análise pelo domínio da frequência se dá a partir de pulsos periódicos múltiplos da frequência fundamental do sistema, e possuem amplitudes relacionadas à sua ordem e fonte de geração. Essa dualidade é melhor observada na Figura 1, onde pode ser vista como é definida graficamente nos domínios do tempo e da frequência [1], [2], [4].

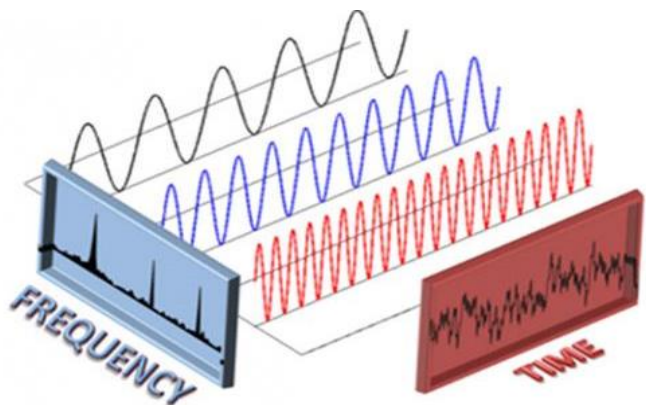


Figura 1 Domínios do tempo e da frequência [4]

A partir da representação do domínio da frequência é possível caracterizar o conceito de harmônicos os quais são, por definição, sinais de tensão ou corrente com frequência múltiplas da frequência fundamental do sistema [2]. Os harmônicos podem ser classificados quanto à sua ordem, frequência e sequência [5], conforme a Tabela 1:

Tabela 1 Ordem, frequência e sequência de harmônicos (adaptado de [5]).

Ordem	Fundamental	2	3	4	5	6	7	8	...
Frequência (Hz)	50	100	150	200	250	300	350	400	...
Sequência	+	-	0	+	-	0	+	-	...

O sequenciamento representado na Tabela 1 diz respeito à ordem do sistema trifásico equilibrado, sendo então positiva (direta), negativa (inversa) e nula (homopolar), como é estabelecido na Figura 2.

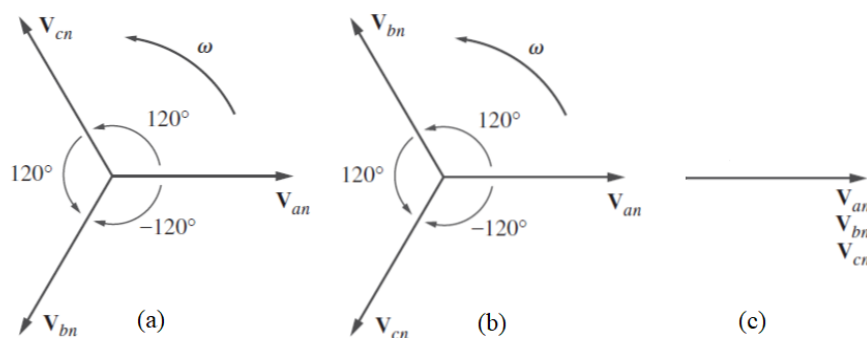


Figura 2 Sequências de fase (adaptado de [3]).

- (a) Sequência positiva: rotação de fases A-B-C ( $0^\circ, -120^\circ, 120^\circ$ ).
- (b) Sequência negativa: rotação de fases A-C-B ( $0^\circ, 120^\circ, -120^\circ$ ).
- (c) Sequência nula: sinais senoidais em fase entre si ( $0^\circ, 0^\circ, 0^\circ$ ).

Considerando estas sequências, a sequência de um harmônico é determinada multiplicando a ordem “h” deste pela sequência positiva [2]:

- (a) Para  $h=2$ , tem-se  $2 \times (0, -120^\circ, 120^\circ) = (0^\circ, 120^\circ, -120^\circ)$  o que é uma sequência negativa.
- (b) Para  $h=3$ , tem-se  $3 \times (0, -120^\circ, 120^\circ) = (0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$  o que é uma sequência nula.
- (c) Para  $h=4$ , tem-se  $4 \times (0, -120^\circ, 120^\circ) = (0^\circ, -120^\circ, +120^\circ)$  o que é uma sequência positiva.

E assim sucessivamente para as ordens seguintes.

## 2.2 Distorção harmônica

A ocorrência de uma distorção harmônica se dá quando a corrente não é proporcional à tensão aplicada, ou seja, é causada por dispositivos ou cargas não lineares conectados ao sistema de energia [2]. A corrente solicitada por estes tipos de carga, quando na presença da impedância do sistema, ocasiona uma distorção de tensão nos terminais da carga, esta distorção é exemplificada na Figura 3, onde é possível observar o resultado do somatório das frequências múltiplas a partir da distorção onda, tornando-a não senoidal [1].

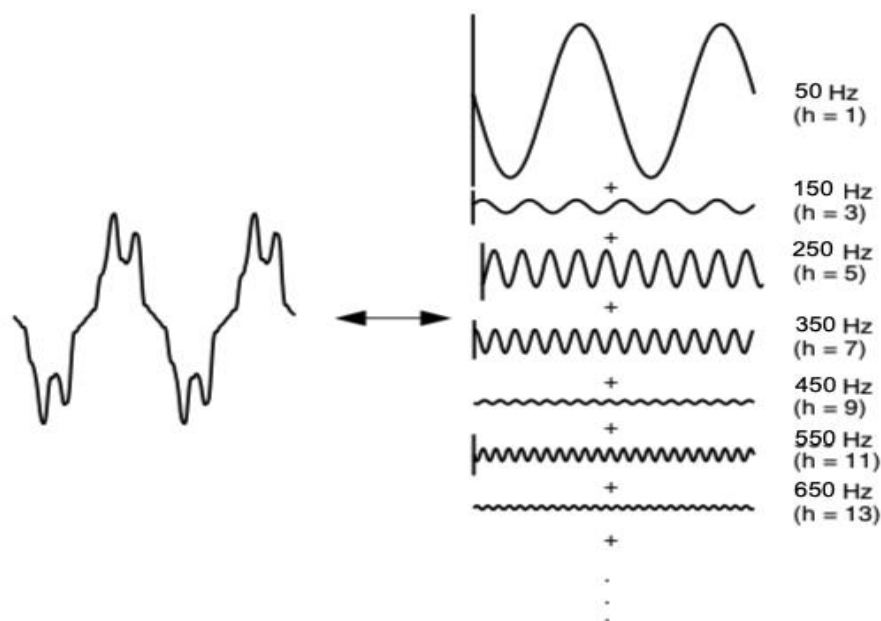


Figura 3 Somatório de ondas exemplificando a Série de Fourier (adaptado de [2])

Matematicamente, o resultado da distorção do sinal de alimentação é definido pela Série de Fourier, representada pela Equação 2.1 [1], [2], [7]. A descrição deste fenômeno se dá pela distorção das formas de onda de tensão ou corrente, observado em regime estacionário e não deve ser confundido com ocorrências de períodos transitórios como os *spikes* [8].

$$x(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos(2\pi fnt) + B_n \sin(2\pi fnt)) \quad 2.1$$

Na equação 2.1  $A_0$  representa o valor da componente DC associada ao sinal,  $A_n$  e  $B_n$  são componentes cartesianas dos harmônicos de  $n$  ordens,  $f$  a frequência de alimentação e  $t$  o tempo [1].

É importante ressaltar que quando os semicírculos da senoide, positivos e negativos, possuem formas idênticas, uma consequência é o surgimento apenas de harmônicos de ordem ímpar, o que propicia uma simplificação nas análises de sistemas elétricos de potência. Em verdade, tem-se que o surgimento de harmônicos de ordem par indicam avarias, com exceção dos retificadores de meia onda e fornos a arco [2].

### 2.3 Principais causas da distorção harmônica

No final dos anos de 1970, quando os conversores eletrônicos se popularizaram na rede elétrica pela primeira vez, tornaram-se uma grande preocupação por serem a principal fonte de harmônicos, pois não era conhecida a capacidade da rede de suportar a distorção harmônica ocasionada por estes equipamentos [2].

São associados aos conversores, principalmente, harmônicos de terceira ordem, os quais são problemáticos pelo seu comportamento homopolar (em fase nas 3 fases), culminando para o neutro em uma resultante com o triplo da amplitude do harmônico de cada fase [1]. A identificação da ordem dos harmônicos gerados por conversores trifásicos é definida pela relação de um número inteiro ( $k$ ) e do número de pulsos do conversor ( $p$ ) [9], como identificado na Equação 2.2:

$$h = kp \pm 1 \quad 2.2$$

Usualmente, harmônicos de ordem superior a 25 são desprezíveis para a análise do sistema de potência, pois mesmo que possam interferir em dispositivos eletrônicos de baixa potência, não causam danos a rede elétrica [2].

Previamente aos conversores, nas décadas de 1930 e 1940, as fontes primárias de harmônicos estavam associadas aos transformadores e ao problema de interferência indutiva em sistemas telefônicos. Além disso, como os conversores, a iluminação a arco também foi motivo de preocupação quanto a sua consequência à rede elétrica, devido a sua alta taxa de harmônicos [2].

A principal análise de harmônicos associada a transformadores trifásicos está relacionada com a corrente de magnetização, quando os efeitos de saturação e histerese são considerados, pois neste caso, a corrente no ramo de magnetização não é senoidal e nem simétrica em relação ao seu pico. A distorção relacionada a este efeito é causada tipicamente por harmônicos de tripla ordem, em especial o terceiro. Uma forma de solucionar a questão de harmônicos múltiplos de três em transformadores trifásicos, e manter o sinal de tensão senoidal, é a partir da conexão dos terminais dos enrolamentos em delta, a fim de fornecer um caminho para as correntes harmônicas de sequência nula. Entretanto, essa solução só é totalmente eficaz quando as tensões de alimentação estão perfeitamente equilibradas[1].

Contudo, apesar das diversas fontes de harmônicos associadas a equipamentos e cargas conectadas à rede elétrica, quando esta é projetada para lidar com as demandas dos carregamentos, a probabilidade de os harmônicos causarem grandes problemas ao sistema elétrico é baixa, embora, ainda sejam uma questão para as telecomunicações. Em sistemas industriais, os maiores problemas relacionados a harmônicos são quanto a ressonância entre equipamentos e a rede[1], fato este que pauta os objetivos e análises propostos nesta dissertação.

## 2.4 Taxas de harmônicos

A distorção harmônica total (THD) refere-se ao valor efetivo dos componentes harmônicos associados ao sinal em análise, ou seja, na forma de onda distorcida. Este índice é definido pela raiz quadrada média, do conteúdo harmônico também referida como valor eficaz (RMS) da grandeza fundamental, como é verificado na Equação 2.3 para o caso da tensão

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} V_{rms,h}^2}}{V_{rms,1}} \quad 2.3$$

onde,  $V_{rms,h}$  é o valor eficaz de tensão da harmônica de ordem h, e  $V_{rms,1}$  é o valor eficaz da tensão associada à frequência fundamental. Assim, a taxa THD refere-se a um percentual em relação à frequência fundamental, o que pode fornecer uma boa margem quanto ao calor extra dissipado por cargas resistivas devido a tensões distorcidas ou ainda perdas adicionais causadas pela corrente que atravessa um condutor. Contudo, no que se refere a análise de capacitores, o THD não é um indicador recomendado, uma vez que a perturbação da tensão deste dispositivo está associada ao pico da tensão e não a seu valor de aquecimento [1], [2], [7].

No caso de análise de correntes, o índice THD também pode ser utilizado, entretanto, como está associado diretamente ao valor eficaz da frequência fundamental pode trazer ambiguidade para a situação de corrente de carga muito baixa, como é o caso de cargas leves. Isso ocorre pois, mesmo que a amplitude da corrente harmônica seja baixa, seu percentual em relação à fundamental é muito alta, o que não é necessariamente uma preocupação no ponto de vista da rede elétrica. Para evitar essa ambivalência, para a análise de correntes, a taxa de harmônicos é expressa em relação a corrente nominal ou máxima, nomeadamente assim como taxa de distorção de demanda total, e é expresso pela Equação 2.4:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} I_h^2}}{I_L} \quad 2.4$$

$I_L$  é a corrente máxima da demanda de carga, na frequência fundamental, medida no ponto de acoplamento comum e  $I_h$  o pico da corrente harmônica [1], [2]. A distorção de demanda total é utilizada como base para os requisitos estabelecidos pela norma IEEE 519-2014.

## 2.5 Legislação

Em razão dos impactos causados pela distorção harmônica e considerando suas métricas, têm-se legislações regulatórias de níveis aceitáveis. A regularização das taxas de distorção harmônica na rede se dá por normas estabelecidas pela Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC), a qual define uma série de normas denominados padrões de compatibilidade eletromagnética (EMC) para lidar com a qualidade de energia. Outra norma amplamente difundida é o documento IEEE 519, que também fornece diretrizes sobre harmônicos.

O desenvolvimento de uma norma referenciada a harmônicos é estabelecida a partir de algumas definições[1]:

- (a) Caracterização do fenômeno.
- (b) Principais fontes de harmônicos.
- (c) Impactos no sistema de abastecimento de energia e em outros equipamentos.
- (d) Descrição matemática do fenômeno.
- (e) Técnicas e padrões de medição.
- (f) Limites de emissão para diferentes classes de equipamentos.
- (g) Métodos de teste e procedimentos para o respeito aos limites estabelecidos.

(h) Diretrizes de mitigação.

### 2.5.1 IEC 61000

A norma IEC 61000 2-2 estabelece níveis de compatibilidade de distorção harmônica de tensão em sistemas públicos da indústria de baixa tensão, enquanto que a IEC 61000 2-4 determinam, respectivamente, níveis de compatibilidade harmônica para instalações industriais de baixa e média tensão, a baixa frequência [1].

Já para o caso da análise de correntes harmônicas injetadas na rede elétrica pública, a IEC 61000-3-2 estabelece limitações e está associada a equipamentos elétricos e eletrônicos que tenham uma corrente de entrada menor que 16A por fase, com frequência de 50 ou 60Hz, com tensão fase-neutro de 240V ou 220V [10]–[13].

A classificação de equipamentos definida pela IEC 61000-3-2 é definida por alguns critérios avaliados pelo comitê IEC, sendo estes [11], [14]:

- (a) Número de equipamentos em uso pelos consumidores.
- (b) Duração de uso (número de horas).
- (c) Simultaneidade de uso.
- (d) Consumo de energia.
- (e) Espectro harmônico, associado a quão distorcida é a corrente solicitada pelo equipamento.

A partir dos critérios acima mencionados a classificação entre A, B, C e D dos equipamentos é estabelecida, e os limites para cada uma das classes é indicada na Tabela 2:

#### **Classe A:**

- Equipamentos trifásicos equilibrados.
- Eletrodomésticos, excluindo os enquadrados pela classe D.
- Ferramentas não portáteis.
- Equipamentos de áudio.
- Tudo o que não seja classificado como B, C ou D.

#### **Classe B**

- Ferramentas portáteis.
- Equipamentos de soldagem a arco não profissionais.

### Classe C

- Equipamento de iluminação.

### Classe D

- Computadores pessoais.
- Monitores de computadores pessoais.
- Aparelhos de televisão.
- Observação: Os equipamentos enquadrados nesta classe devem ter uma potência entre 75W e 600W.

Tabela 2. Limites para harmônicos de corrente para IEC 61000-3-2 [11]

Harmônicos	Classe A	Classe B	Classe C	Classe C
	$I_{\max}$ [A]	$I_{\max}$ [A]	(>25W) % da $f_1$	(>75W, <600W) [mA/W]
<b>Harmônicos de ordem ímpar</b>				
3	2,3	3,45	30FP	3,4
5	1,14	1,71	10	1,9
7	0,77	1,155	7	1,0
9	0,4	0,60	5	0,5
11	0,33	0,495	3	0,35
13	0,21	0,315	3	0,296
$15 \leq h \leq 39$	$0,15 \times 15/h$	$0,225 \times 15/h$	3	$3,85/n$
<b>Harmônicos de ordem par</b>				
2	1,08	1,62	2	-
4	0,43	0,645	-	-
6	0,3	0,45	-	-
$8 \leq h \leq 40$	$0,23 \times 8/h$	$0,345 \times 8/h$	-	-

Na IEC 61000-3-4, para equipamentos em que a potência aparente seja menor ou igual a 30 vezes a potência de curto-circuito da instalação [15], têm-se os limites de corrente indicados na Tabela 3.

Tabela 3. Limites gerais para harmônicos de corrente para IEC 61000-3-4 [15]

<b>Harmônicos de ordem n</b>	<b>Limite máximo <math>I_n/I_1</math> [%]</b>
<b>3</b>	21,6
<b>5</b>	10,7
<b>7</b>	7,2
<b>9</b>	3,8
<b>11</b>	3,1
<b>13</b>	2
<b>15</b>	0,7
<b>17</b>	1,2
<b>19</b>	1,1
<b>21</b>	0,6
<b>23</b>	0,9
<b>25</b>	0,6
<b>27</b>	0,7
<b>29</b>	0,7
<b>31</b>	0,7
<b>33</b>	0,6
<b>Geral</b>	0,6 ou $8/n$

Entretanto, podem ser aplicados novos limites se o equipamento analisado ultrapassar os limites da Tabela 3. Se for um equipamento monofásico ou trifásico desbalanceado, aplicam-se os limites da Tabela 4; se for um equipamento trifásico equilibrado, aplicam-se os limites da Tabela 5 [15]. Para tal, faz-se necessário, também, observar a potência de curto-circuito  $R_{scc}$ , pois os limites são variáveis conforme este parâmetro. Define-se potência de curto-circuito ( $R_{scc}$ ) como a relação entre a tensão nominal ao quadrado e a impedância de curto-circuito [15].

Tabela 4. Limites para harmônicos de corrente para IEC 61000-3-4, para equipamento monofásico ou trifásico desbalanceado [15]

<b>R<sub>sce</sub> (mínimo)</b>	<b>Limites máximos individuais I<sub>n</sub>/I<sub>1</sub> [%]</b>					
	<b>I<sub>3</sub></b>	<b>I<sub>5</sub></b>	<b>I<sub>7</sub></b>	<b>I<sub>9</sub></b>	<b>I<sub>11</sub></b>	<b>I<sub>13</sub></b>
<b>66</b>	23	11	8	6	5	4
<b>120</b>	25	12	10	7	6	5
<b>175</b>	29	14	11	8	7	6
<b>250</b>	34	18	12	10	8	7
<b>350</b>	40	24	15	12	9	8
<b>450</b>	40	30	20	14	12	10
<b>600</b>	40	30	20	14	12	10

Tabela 5. Limites para harmônicos de corrente para IEC 61000-3-4, para equipamento trifásico equilibrado [15]

<b>R<sub>sce</sub> (mínimo)</b>	<b>Limites máximos individuais I<sub>n</sub>/I<sub>1</sub> [%]</b>			
	<b>I<sub>5</sub></b>	<b>I<sub>7</sub></b>	<b>I<sub>11</sub></b>	<b>I<sub>13</sub></b>
<b>66</b>	14	11	10	8
<b>120</b>	16	12	11	8
<b>175</b>	20	14	12	8
<b>250</b>	30	18	13	8
<b>350</b>	40	25	15	10
<b>450</b>	50	35	20	15
<b>600</b>	60	40	25	18

### 2.5.2 IEEE 519 2014.

A IEEE 519 fornece orientações para limitar a tensão harmônica e a distorção de corrente no ponto de acoplamento comum (PAC) entre o fornecedor de energia elétrica e o usuário, de forma que este último tem responsabilidade pela geração de harmônicas causada por suas cargas [10].

Habitualmente, em aplicações industriais em que existe um transformador dedicado, o PAC é o lado de alta tensão do transformador de entrada; entretanto, para aplicações comerciais

em que há alimentação por transformadores comuns de serviço, o PAC é o lado de baixa tensão do transformador [6], [16] .

No que se refere aos limites definidos pelo IEEE para a análise de distorção harmônica de corrente, estes estão associados diretamente ao consumidor dentro da faixa de 120V a 69kV, como observado na Tabela 6 [16], [17].

Tabela 6. Limites de distorção de corrente para IEEE 519 2014, para sistemas classificados de 120 V a 69 kV [16]

<b>Ordem harmônica individual - ímpar</b>						
<b><math>I_{cc}/I_L^*</math></b>	<b><math>3 \leq h \leq 11</math></b>	<b><math>11 \leq h \leq 17</math></b>	<b><math>17 \leq h \leq 23</math></b>	<b><math>23 \leq h \leq 35</math></b>	<b><math>35 \leq h \leq 50</math></b>	<b>TDD</b>
< 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	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100 < 1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
> 1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

\*  $I_{cc}$ : corrente de curto-circuito/  $I_L$ : corrente de carregamento.

## 2.6 Correção de fator de potência

A representação gráfica dos vectores de potência a partir do triângulo de potência, Figura 4, considera apenas potências ativa ( $P$ ), reativa ( $Q$ ), e aparente ( $S$ ), é uma prática comum para a análise e estudo de correção de FP, quando se trata apenas da frequência fundamental. O fator de potência,  $FP_1$ , calculado pela equação 2.5, é por definição a relação entre  $P$  e  $S$  e indica a eficiência com a qual a energia está sendo usada para abastecer os equipamentos ou consumidores, e  $\theta_v$  e  $\theta_i$  os ângulos da tensão e corrente associadas, respectivamente [2], [3], [18], [19].

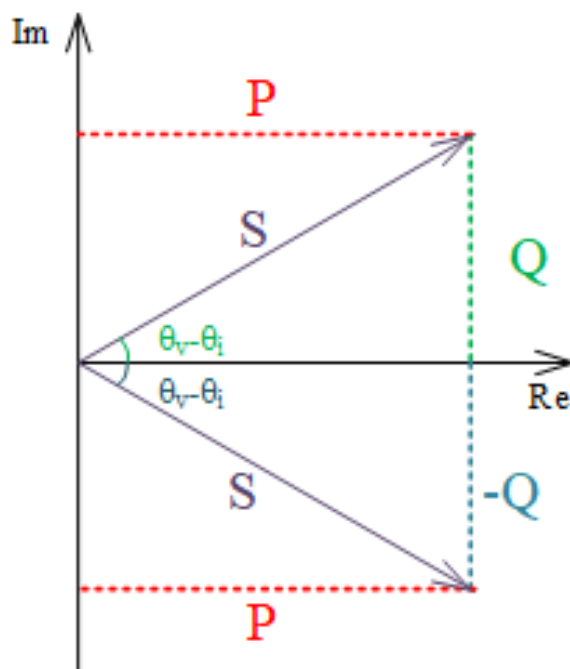


Figura 4. Triângulo de potência

$$FP_1 = \cos(\theta_v - \theta_i) = \frac{P}{S} \quad 2.5$$

O valor de FP é definido por norma, como é o caso da IEEE, e deve ser respeitado pelas concessionárias de energia. Em contra partida, a regulação estabelecida pela IEC, estabelecida na União Europeia, define limites de injeção de harmônicos na rede por equipamentos [11], [16].

Um exemplo de regulação de equipamentos é o regulamento 2016/631 da EU para a conexão de geradores diretamente à rede [18]. Geradores de indução são equipamentos que requerem um percentual de energia reativa (indutiva) para seu funcionamento (na etapa de magnetização do material ferromagnético). A necessidade de energia reativa requerida por equipamentos como máquinas elétricas (motores e/ou geradores de indução) pode causar complicações quanto à qualidade de energia, como a redução do fator de potência, sendo necessária a utilização de equipamentos de compensação, como é o caso de bancos de condensadores.

Os condensadores são equipamentos que obtêm sua alta potência reativa, capacitiva, por unidade de volume, de forma a terem baixas perdas quando operando a altas tensões [1]. Como grande parte das cargas domésticas e industriais são indutivas e tendem a operar a baixos fatores de potência, a utilização de condensadores para a correção do Fator de Potência (FP) destas cargas é uma prática comum. No caso da rede elétrica, os bancos de condensadores são uma

alternativa para manter a qualidade da energia e reduzir perdas por efeito Joule devido a altas correntes e limitar as quedas de tensão [3].

Contudo, visto que as cargas associadas à rede elétrica não são unicamente lineares senoidais, a representação gráfica do triângulo de potência fica incompleta, uma vez que não apresenta a porção de harmônicos associados à potência aparente total. Neste contexto, a representação pelo tetraedro de potência, Figura 5, se mostra mais eficaz e completo, sendo o cálculo da potência aparente total definido pela Equação 2.6, onde  $P_h$  define a potência associado aos harmônicos.

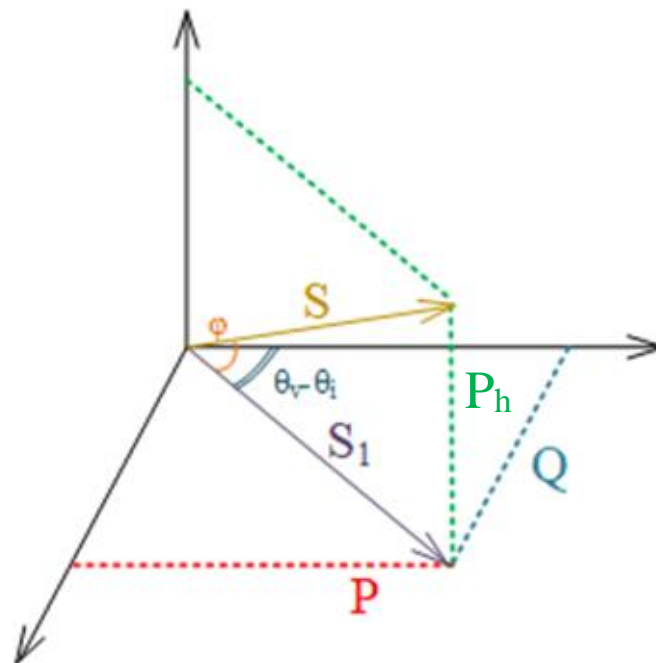


Figura 5. Tetraedro de Potência

$$S^2 = P^2 + Q^2 + P_h^2 \quad 2.6$$

Desta forma, a correção do fator de potência com condensadores pode ocasionar um problema consequente às frequências harmônicas do sistema denominado ressonância, que é definido na secção que se segue.

## 2.7 Ressonância

Ressonância é uma condição que pode ocorrer em qualquer circuito composto por indutâncias e capacitâncias. Em um circuito RLC série, quando as reatâncias capacitivas e indutivas são iguais em módulo, tem-se uma resultante puramente resistiva [3].

Considerando o circuito ressonante série de resistor, capacitor e indutor, da Figura 6, a impedância total do referido circuito é dada na equação 2.7.

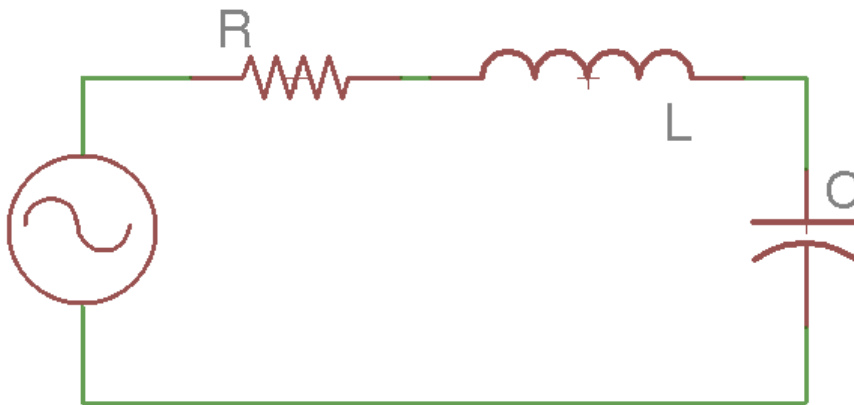


Figura 6 Circuito ressonante série

$$Z = R + X_L + X_C \quad 2.7$$

No domínio da frequência  $\omega$  é dada pela equação 2.8, sendo a componente imaginária remanejada de forma a resultar na equação 2.9:

$$Z = H(\omega) = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} \quad 2.8$$

$$Z = H(\omega) = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad 2.9$$

Quando as reatâncias indutivas e capacitivas são iguais em módulo, isso resulta em a parte imaginária da impedância do circuito ser igual a zero, configurando o estado de ressonância, conforme a equação 2.10:

$$Im(Z) = \omega L - \frac{1}{\omega C} = 0 \quad 2.10$$

A frequência em que isso ocorre é chamada de frequência de ressonância  $\omega_0$  [3], em que, isolando a frequência tem-se a equação 2.11:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad 2.11$$

Adicionalmente, analisando o circuito da Figura 5 como ressonante paralelo:

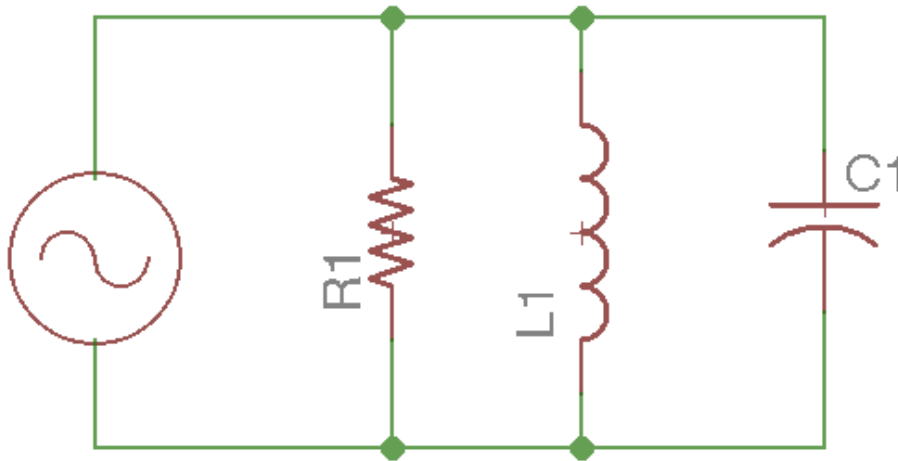


Figura 7 Circuito ressonante paralelo

A admitância total do referido circuito no domínio da frequência  $\omega$ :

$$Y = H(\omega) = \frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L} + j\omega C \quad 2.12$$

$$Y = H(\omega) = R + j\left(\frac{1}{\omega L} - \omega C\right) \quad 2.13$$

Quando as reatâncias indutivas e capacitivas são iguais em módulo, isso resulta em a parte imaginária da admitância do circuito ser igual a zero, configurando o estado de ressonância:

$$Im(Z) = \omega L - \frac{1}{\omega C} = 0 \quad 2.14$$

Assim, a frequência de ressonância é configurada da mesma forma que o circuito RLC série, analogamente à equação 2.11.

## 2.8 Correção de fator de potência e ressonância

Visto que em todo sistema com condensadores existe uma frequência em que ocorre a ressonância em paralelo [21], quando é feita uma compensação de fator de potência utilizando baterias de condensadores, é possível que ocorra ressonância devido à presença de harmônicos na rede, resultando em níveis elevados de tensão harmônica e de distorção de corrente [16].

Cada harmônica é injetada no sistema e defronta-se com as reatâncias do transformador, da bateria de condensadores utilizada para correção do fator de potência e da rede, tipicamente indutiva, esta última resultante da combinação da fonte e de cargas conectadas [10]. Portanto, o resultante paralelo da bateria de condensadores com a reatância da rede tem uma frequência sintonizada, e, se esta é próxima a uma frequência harmônica dominante no circuito, a ressonância causará altos níveis de harmônicas tanto em tensão como corrente [10].

Em um estudo de caso feito por [8] sobre a norma 519 do IEEE de 1992, que foi atualizada em 2014, é afirmado que quando a ressonância acontece, é possível que fusíveis de capacitores explodam, que ocorram falhas prematuras de equipamentos e que aconteça superaquecimento de transformadores e motores.

Na rede, como consequência das cargas do sistema, toma-se atenção para as componentes indutiva e a resistiva, sendo que a indutiva é responsável por aumentar a frequência de ressonância do sistema, e a resistiva é responsável por baixar o pico de ressonância [8].

Usualmente, a ressonância harmônica é um fenômeno de estado estacionário ocasionado por uma mudança na fonte harmônica ou no tamanho do condensador, resulta em um comportamento semelhante a ligar e desligar o condensador em etapas [22], [23]. Desta forma, a utilização de um banco de condensadores deve ocorrer após um estudo prévio das componentes associadas à rede com o intuito de prever qual a possível frequência de ressonância e qual a probabilidade desta ocorrer dentro deste sistema.

## 2.9 Filtros

Filtros são circuitos seletivos de frequência, que podem permitir que um sinal elétrico seja transmitido e atenuar outro, consoante à frequência [3]. O propósito ideal do projeto de um filtro é a extinção de todos os efeitos prejudiciais causados pela distorção de formas de onda no contexto de harmônicos. Entretanto, devido à dificuldade de previsão de tais distorções, uma abordagem mais realística é projetá-los para que o problema seja reduzido para um nível aceitável [1], conforme as normas supracitadas na seção 2.5.

### 2.9.1 Filtros passivos

O circuito dito filtro passivo é assim nomeado porque é composto apenas de elementos passivos, resistores, indutores e capacitores, de forma que a seleção de frequência é dada pela resposta dos dois últimos. Sendo a função de transferência  $\mathbf{H}(\omega)$  a razão entre a resposta de saída  $\mathbf{Y}(\omega)$  e a excitação de entrada  $\mathbf{X}(\omega)$ ; e sendo a resposta em frequência a variação da função de transferência com a frequência. Podem ser citados quatro exemplos [3]:

- Filtro passa baixa: transmite a frequência abaixo de um limite escolhido, e atenua o que está acima deste. Sendo a função de transferência dada pela equação 2.15 e a frequência de corte dada pela equação 2.16, um exemplo de filtro passa baixa é dado na Figura 8.

$$\mathbf{H}(\omega) = \frac{1}{1 + j\omega RC} \quad 2.15$$

$$\omega_c = \frac{1}{RC} \quad 2.16$$

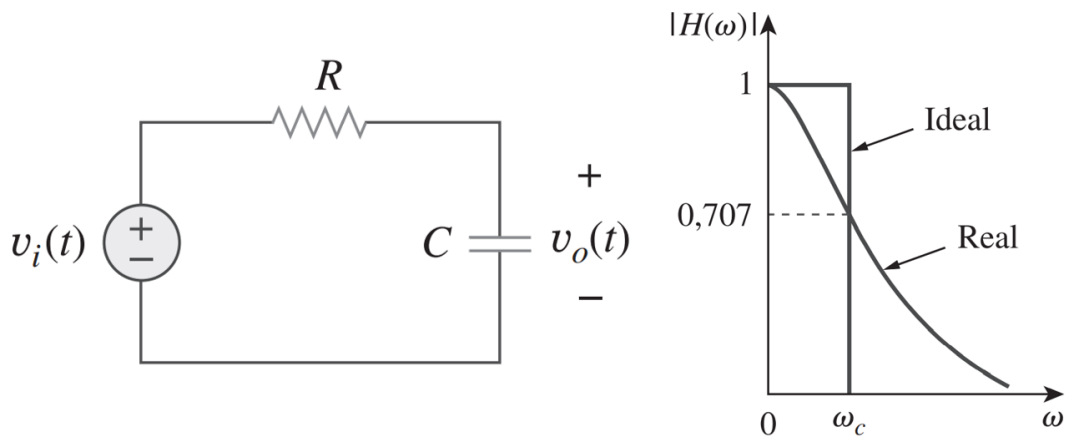


Figura 8 Exemplo de circuito passa baixa e sua resposta em frequência [3].

- Filtro passa alta: transmite a frequência acima de um limite escolhido, e atenua o que está abaixo deste. A função de transferência é dada pela equação 2.17 e a frequência de corte também dada pela equação 2.16. Um exemplo de filtro passa alta é dado na Figura 9.

$$H(\omega) = \frac{jR\omega C}{1 + j\omega RC} \quad 2.17$$

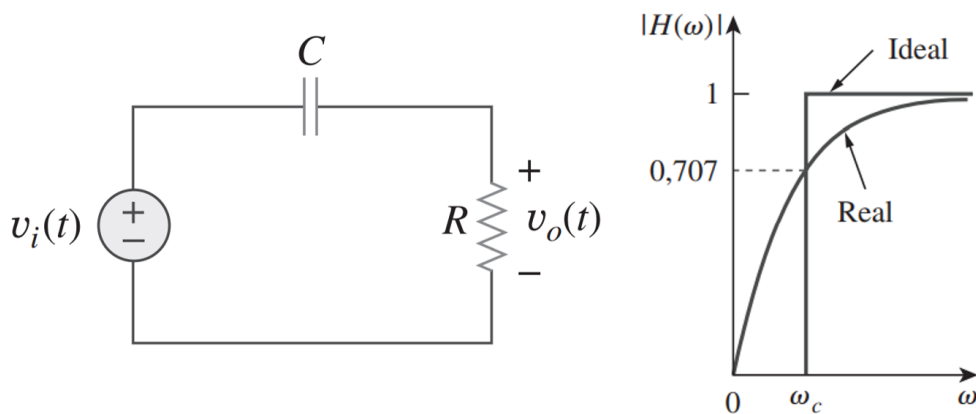


Figura 9 Exemplo de circuito passa altas e sua resposta em frequência [3].

- Filtro passa-banda: transmite a frequência dentro de uma faixa de frequências escolhida, e atenua o que está abaixo do limite inferior e acima do limite superior. A função de transferência dada pela equação 2.18, e sendo a faixa  $\omega_1 < \omega_0 < \omega_2$  centralizada em na frequência central dada pela equação 2.19, um exemplo de filtro passa faixa é dado na Figura 10.

$$H(\omega) = \frac{R}{R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})} \quad 2.18$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad 2.19$$

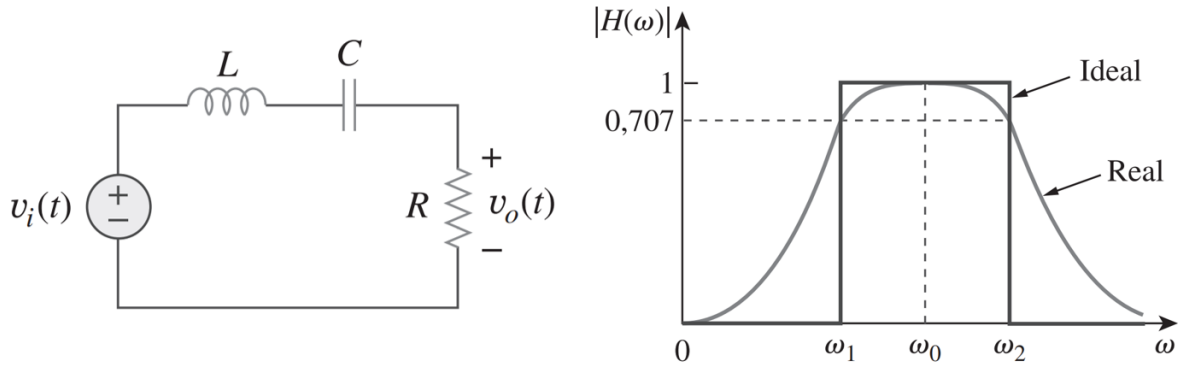


Figura 10 Exemplo de circuito passa faixa e sua resposta em frequência [3]

- Filtro rejeita banda: atenua a frequência dentro de uma faixa de frequências escolhida, e transmite o que está abaixo do limite inferior e acima do limite superior. A função de transferência é dada pela equação 2.20, e a faixa  $\omega_1 < \omega_0 < \omega_2$  centralizada na frequência central é dada pela equação 2.19. Um exemplo de filtro rejeita faixa é dado na Figura 11.

$$H(\omega) = \frac{j(\omega L - \frac{1}{\omega C})}{R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})} \quad 2.20$$

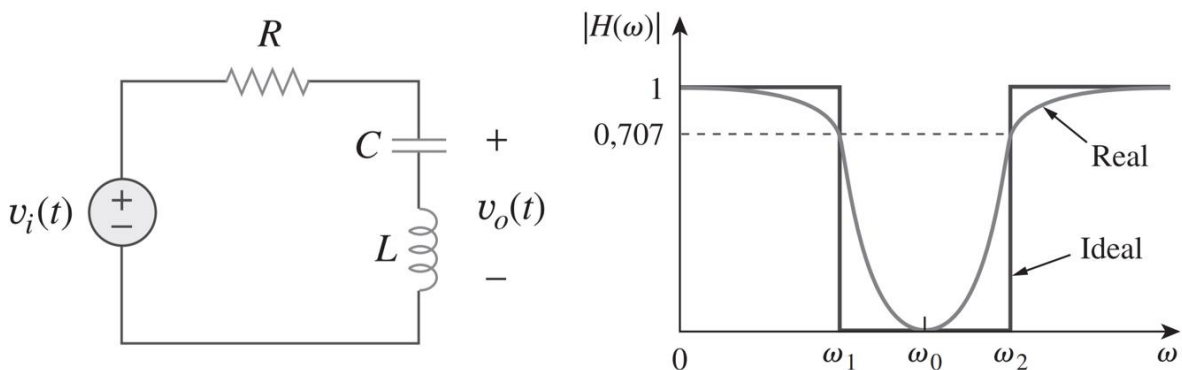


Figura 11 Exemplo de circuito rejeita faixa e sua resposta em frequência [3]

Para todos os casos exemplificados, a frequência de corte é tal que a função de transferência cai em módulo para 70,71% da amplitude total, e também é a frequência em que

a potência dissipada em um circuito é a metade da potência de seu valor máximo [3]. Nos dois primeiros casos supracitados, a frequência de corte é  $\omega_c$  e nos dois últimos, têm-se duas frequências de corte,  $\omega_1$  e  $\omega_2$ .

## 2.9.2 Filtros ativos

O circuito dito filtro ativo é assim nomeado porque é composto também de elementos ativos, como por exemplo transistores e amplificadores operacionais. Os filtros ativos podem resolver três limitações principais dos filtros passivos, que não podem gerar ganho ou acrescentar energia ao circuito, podem ter a necessidades de grandes indutores gerando alto custo e, também, têm um baixo desempenho abaixo do intervalo da audiodiferência, sendo considerados mais úteis para frequências elevadas. Em contrapartida os filtros ativos têm um limite prático de 100 kHz [3].

Além disso, quando um filtro passivo está sincronizado acima da frequência harmônica predominante, eles próprios podem agravar o problema de ressonância com a rede, pois a típica reatância indutiva da rede desloca a frequência de ressonância para baixo, aproximando-se, assim das harmônicas predominantes. Esta situação acontece principalmente quando o sistema possui alta impedância, um transformador de potência relativamente baixa ou gerador de alta impedância [10].

Entretanto, a mitigação ativa de harmônicos possui desvantagens, como por exemplo a alta complexidade de seu sistema de controle, perdas decorrentes do chaveamento e injeção de ruído causado problemas de compatibilidade eletromagnética. Neste último caso, faz-se necessário o acoplamento de um filtro passivo passa baixa [10].

Para este trabalho, é interessante estudar o caso paralelo de filtro ativo de potência.

### 2.9.2.1 Filtros ativos paralelos de potência

Os filtros ativos de potência são uma alternativa eficiente para a correção da taxa de harmônicos em tensões e correntes da rede. Dentre as suas vantagens, encontram-se a compensação de potência reativa, regulação de tensão em sistemas trifásicos, balanceamento de tensões e correntes, redução da corrente de neutro, bem como a eliminação de *flickers* de tensão [24].

A classificação destes equipamentos se dá pela sua topologia, número de fases e tipo de conversor utilizado. Quanto à topologia, estes filtros podem ser definidos como paralelo, série, híbrido ou condicionador unificado de qualidade de energia [24].

O filtro ativo paralelo é composto por um inversor de tensão e seu controle, e funciona com uma malha de controle a qual tem a função de injetar correntes negativas às correntes harmônicas, de forma a anular essas componentes geradas pela carga [24], [25]. A priori, o conceito deste tipo de filtro é curto circuitar as correntes harmônicas da carga, o que resulta em alterações nas partes oscilantes das potências [25].

O princípio de funcionamento deste tipo de filtro é demonstrado na Figura 12, onde a partir da Lei de Kirchhoff tem-se a anulação da corrente demandada da rede elétrica. Na Figura 12 tem-se que  $-i_h$  é a corrente do ramo do inversor que busca anular a corrente harmônica  $i_h$ , de forma que a corrente resultante totalmente senoidal  $i_s$  assim como originada pela fonte  $v_s$ .

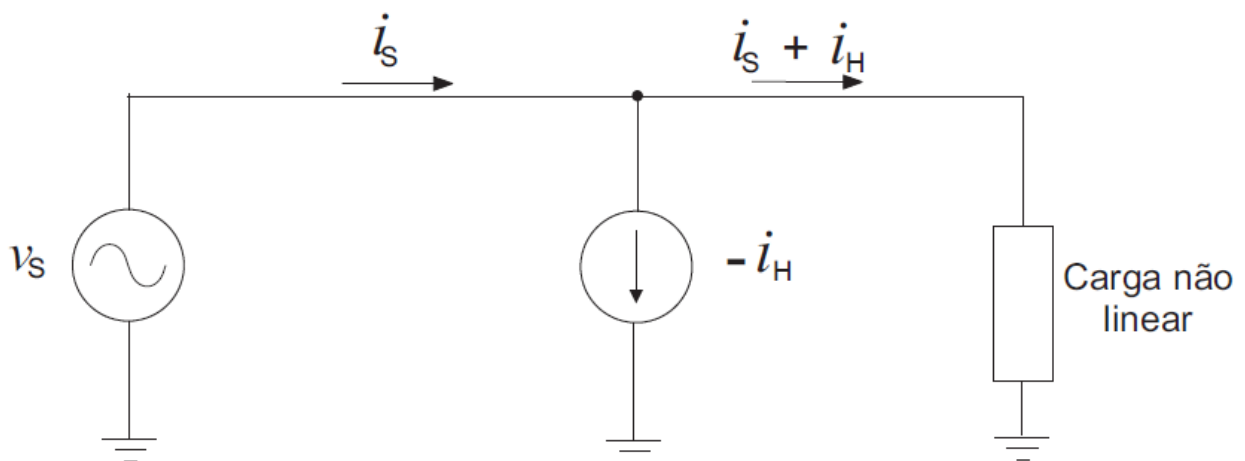


Figura 12 Princípio de funcionamento de filtro ativo de potência [24]

Vale ressaltar que mesmo em sistemas sem harmônicas esse filtro tem sua função, na qual é utilizado para a compensação de reativos da rede, aumentando assim o FP do sistema no qual está conectado [25]. Na Figura 13 tem-se um exemplo de filtro ativo paralelo.

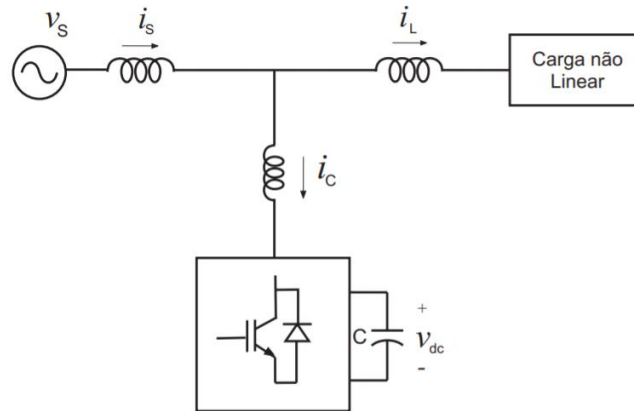


Figura 13 Exemplo representativo de filtro ativo paralelo de potência [24]

O tipo de filtro paralelo mais utilizado é o APF (*parallel active power filter*) tipo “shunt”, que usa um inversor de tensão PWM (modulado por largura de pulso), que é conectado paralelamente à fonte, injetando uma corrente que compensa a corrente harmônica requerida pela carga, à partir do controle feito por transistores de potência, aprimorando a qualidade da energia [10].

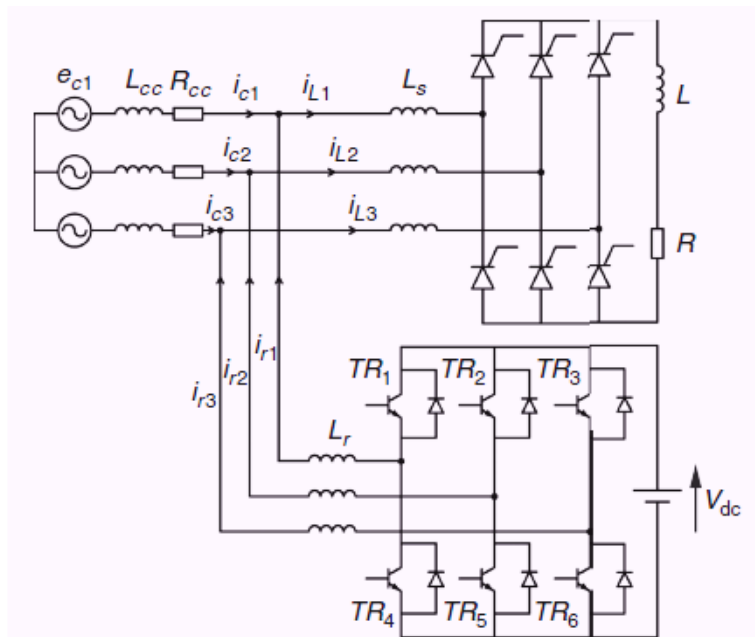


Figura 14 Filtro APF “shunt” [10]

Com o Estado da Arte finalizado e utilizado como embasamento teórico, será apresentado no capítulo a seguir a avaliação da frequência de ressonância entre uma rede e uma bateria de condensadores hipotéticas.

# Capítulo 3

## 3 Avaliação da frequência de ressonância

Este capítulo aborda a metodologia de previsão da frequência de ressonância a partir de estimativa da indutância da rede de BT, da capacitância da bateria de condensadores e do transformador de entrada.

### 3.1 Representação unifilar e esquemático da rede

Para estimar a frequência de ressonância de uma instalação elétrica em BT, considere-se uma rede modelizada no diagrama unifilar na Figura 15, composta por um Posto de Transformação, cargas acopladas geradoras de harmônicos, outras cargas, supostas lineares, e uma bateria de condensadores para correção de fator de potência.

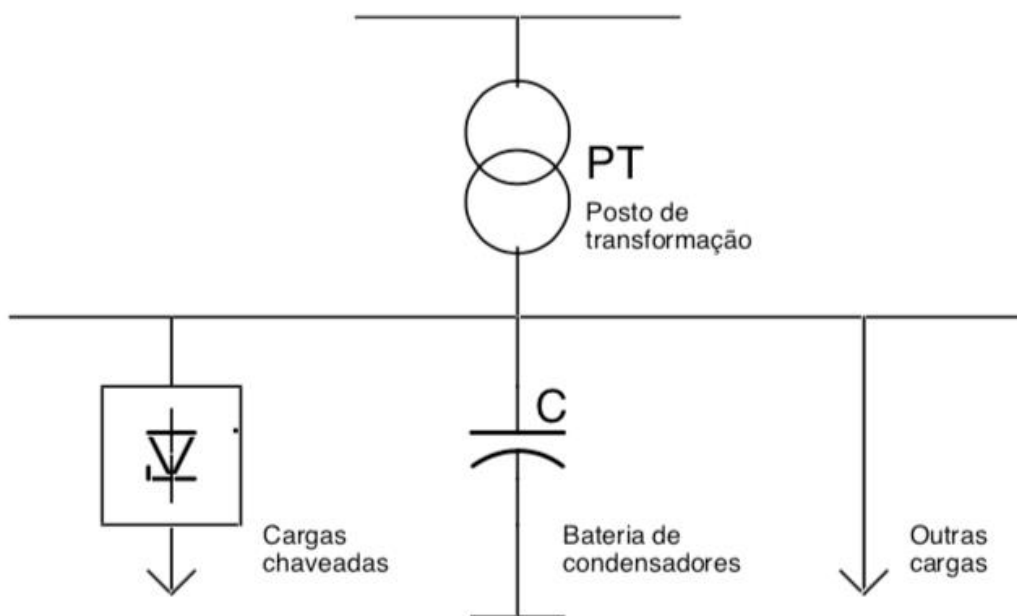


Figura 15 Diagrama unifilar de rede pressuposta.

Tomando atenção às cargas não lineares injetoras de harmônicos, para o estudo da admitância da rede é necessário o equivalente por fase representado na Figura 16 considerando uma situação usual [3] de rede indutiva.

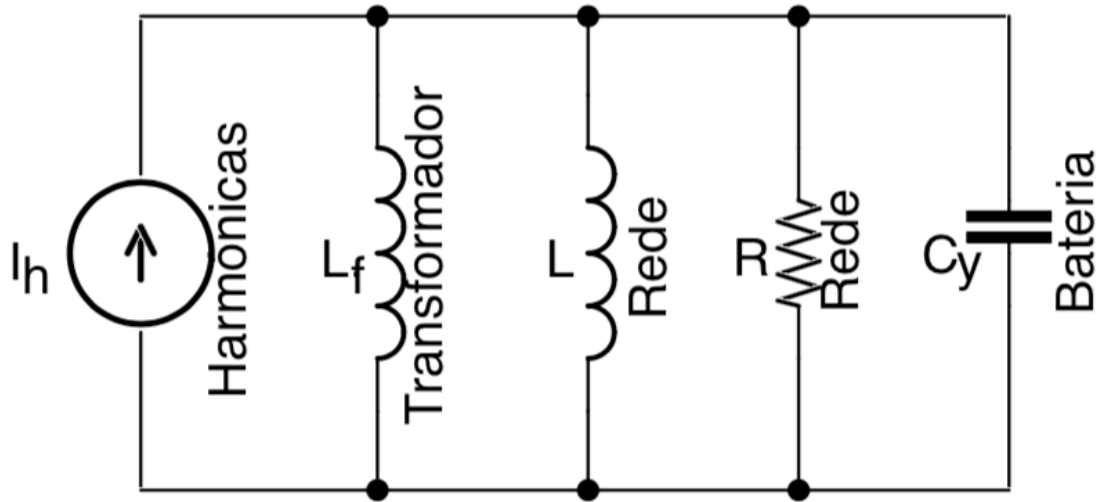


Figura 16 Equivalente por fase de injeção de harmônicos

Na Figura 16, têm-se a injeção de correntes harmônicas ( $I_h$ ), a indutância do transformador ( $L_f$ ), a indutância da rede ( $L$ ), a resistência da rede ( $R$ ) e a capacitância por fase da bateria de condensadores ( $C_y$ )

### 3.2 Admitância da rede e suas componentes

Assim, pelo equivalente paralelo da Figura 16 pode-se obter uma representação da admitância por fase da rede conforme as equações 3.1 e 3.2.

$$Y = \frac{1}{j\omega L_f} + \frac{1}{j\omega L} + \frac{1}{R} + j\omega C_y \quad 3.1$$

$$Y = \frac{1}{R} + j \left( \omega C_y - \frac{1}{\omega L_f} - \frac{1}{\omega L} \right) \quad 3.2$$

Onde a variável  $\omega$  é a frequência angular, dada pela equação 3.3:

$$\omega = 2\pi f \quad 3.3$$

Entretanto, visto por outra forma, a impedância é o inverso da admitância, esta última composta pela sua representação real dita condutância,  $G$ , e a representação imaginária dita susceptância, podendo escrever-se sucessivamente:

$$\mathbf{Z} = Z \angle \varphi \quad 3.4$$

$$\mathbf{Y} = Y \angle -\varphi \quad 3.5$$

$$\mathbf{Y} = Y \cos(-\varphi) + jY \sin(-\varphi) \quad 3.6$$

$$\mathbf{Y} = Y \cos(\varphi) + j(-Y \sin(\varphi)) \quad 3.7$$

$$\mathbf{Y} = G + jB \quad 3.8$$

A manipulação foi feita para representar que o sinal da susceptância,  $B$ , na representação da equação 3.8 é negativo.

A admitância, se avaliada à frequência fundamental da rede, tem um módulo que coincide com a razão entre o módulo da corrente eficaz da componente fundamental injetada pelo módulo da tensão eficaz da fundamental, ou seja, para a ordem harmônica  $h=1$ . Estes valores devem ser aferidos experimentalmente para a obtenção da equação 3.9.

$$Y = \frac{I_{ef\_h=1}}{V_{ef\_h=1}} \quad 3.9$$

Também deve-se considerar outra representação da fase  $\varphi$ , visto que este, além de representar já visto desfasamento entre a corrente e tensão injetados na fase, ele também pode ser obtido pelo arco cosseno do cosseno de  $\varphi$  (equação 3.10) que também deve ser medido.

$$\varphi = \cos^{-1}(\cos \varphi) \quad 3.10$$

Portanto, tem-se outra representação polar da admitância (equação 3.11) relacionando as fórmulas 3.5 e 3.9:

$$\mathbf{Y} = \left( \frac{I_{ef\_h=1}}{V_{ef\_h=1}} \right) \angle -\varphi \quad 3.11$$

E, igualando as equações 3.2 e 3.11, tem-se a equação 3.12.

$$\left(\frac{I_{ef_{h=1}}}{V_{ef_{h=1}}}\right) \angle -\varphi = \frac{1}{R} + j\left(\omega C_y - \frac{1}{\omega L_f} - \frac{1}{\omega L}\right) \quad 3.12$$

Ao examinar conjuntamente as equações 3.8 e 3.12, tem-se a equivalência nas equações 3.13 e 3.14.

$$G = \frac{1}{R} \quad 3.13$$

$$B = \left(\omega C_y - \frac{1}{\omega L_f} - \frac{1}{\omega L}\right) \quad 3.14$$

### 3.3 Estimativa da indutância do transformador do PT

Pode-se estimar a indutância do transformador  $L_f$  através do parâmetro associado à tensão de curto circuito [26], presente na chapa de características do transformador; este valor é apresentado da forma da tensão percentual, relativamente à(s) tensão(ões) nominal(ais) do transformador.. Para tal, é utilizado o equivalente por fase do transformador, referido ao lado de baixa tensão (Figura 17):

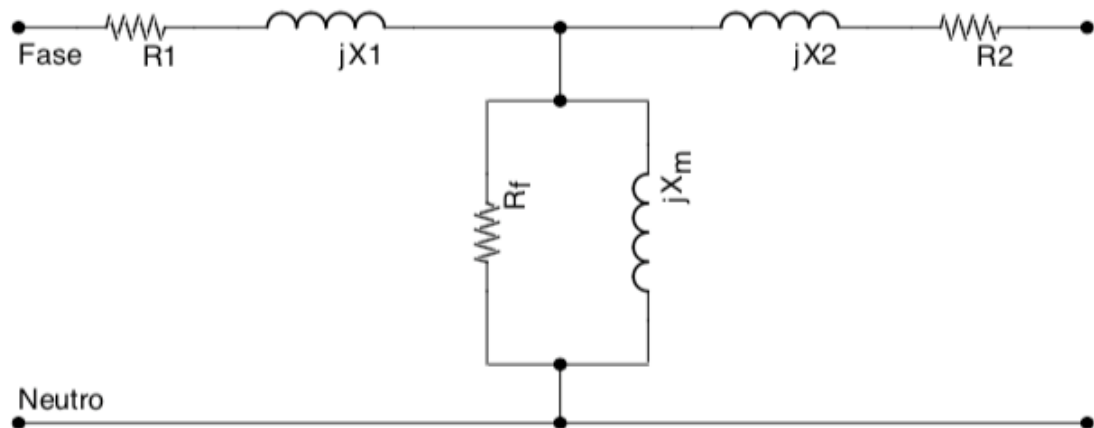


Figura 17 Equivalente monofásico do transformador (adaptado de [26])

No modelo representado na Figura 17  $R_1$  e  $R_2$  são as resistências elétricas, do enrolamento primário (1) e secundário (2)

$R_f$  corresponde à resistência elétrica que causa a mesma perda no núcleo (histerese e correntes parasitas).

$X_1$  e  $X_2$  são as reatâncias equivalentes referentes ao fluxo dispersos nas bobinas do transformador, do enrolamento primário (1) e secundário (2).

$X_m$  é a reatância de magnetização, concernente ao fluxo resultante no núcleo fundamental para o funcionamento habitual do transformador.

Para efeito da análise da tensão de curto circuito a corrente de derivação, que flui para o curto circuito é muito grande em relação à que flui para a magnetização do núcleo, sendo esta última desprezada [26], sendo então a Figura 18 o circuito equivalente:

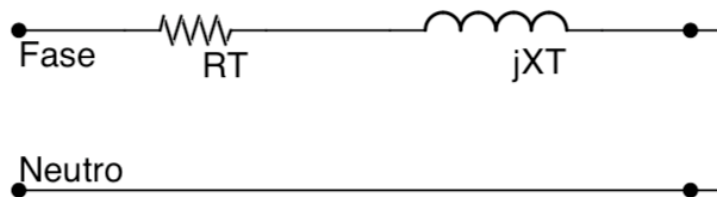


Figura 18 Equivalente monofásico, total e simplificado do transformador (adaptado de [26]).

Na Figura 18,  $R_T$  é a resistência total e  $X_T$  é a reatância total, calculadas, respectivamente, pelas equações 3.15 e 3.16.

$$R_T = R_1 + R_2 \quad 3.15$$

$$X_T = X_1 + X_2 \quad 3.16$$

Como a corrente é limitada praticamente apenas pela reatância [26] a resistência pode ser desconsiderada neste caso. Portanto, dispondo da corrente nominal do secundário com a tensão de curto-circuito referida ao secundário, ambos dados de placa do transformador, obtém-se a reatância do mesmo na equação 3.18.

$$V_{cc} = V_{cc\%} * V_{2nom} \quad 3.17$$

$$X_T = \frac{V_{cc}}{I_{2nom}} \quad 3.18$$

Nas quais:

$V_{cc}$ : tensão de curto-circuito.

$V_{cc\%}$ : tensão de curto-circuito percentual.

$V_{2nom}$ : tensão nominal referida ao secundário.

$I_{2nom}$ : corrente nominal referida ao secundário.

$X_T$ : reatância total do transformador.

Por fim, com a reatância total e a frequência de operação da rede, estima-se a indutância do transformador a partir da equação 3.19.

$$L_f = \frac{X_T}{\omega} \quad 3.19$$

Na qual:

$L_f$ : indutância estimada do transformador.

$X_T$ : reatância total do transformador.

### 3.3.1 Cálculo da capacitância da bateria

Partindo de uma bateria de condensadores que é aplicada para a correção de fator de potência e trabalha a partir de aplicações sucessivas de escalões conforme a necessidade da rede; são necessárias algumas medições, por fase, para cálculo da capacitância no tempo:

(a) A tensão simples efetiva, por fase,  $V_{sc}$ .

(b) A potência reativa fundamental, por fase,  $Q$ .

Desta forma, o valor da capacitância  $C_y$ , ou seja, por fase, é dada pela equação 3.20.

$$C_y = \frac{Q}{3 * \omega V_{sc}^2} \quad 3.20$$

### 3.3.2 Cálculo da indutância da rede

Fundamentado na comparação estabelecida da equação 3.12 e na susceptância obtida na equação 3.14, obtém-se a indutância da rede  $L$ , conforme a equação 3.21.

$$L = \left( \omega^2 C_y - \omega B - \frac{1}{L_f} \right)^{-1} \quad 3.21$$

Na qual:

$L$ : indutância da rede.

$C_y$ : capacitância por fase da bateria de condensadores.

$B$ : susceptância da rede.

$L_f$ : indutância estimada do transformador.

### 3.3.3 Cálculo da frequência de ressonância

Primeiramente, faz-se necessário analisar o ponto de acoplamento comum da Figura 15. A capacitância da bateria de condensadores encontra-se em paralelo com a indutância calculada da rede e a indutância do transformador, estas duas últimas também em paralelo, conforme representado também na Figura 16. De forma que se tem uma análise de ressonância em paralelo com a indutância resultante da Equação 3.22:

$$L_R = \frac{L_f L}{L_f + L} \quad 3.22$$

Em que:

$L_R$ : indutância resultante no PAC.

$L_f$ : indutância do transformador.

$L$ : indutância calculada da rede.

Dada a frequência de ressonância pela equação 2.11, a indutância da rede variável no tempo, a capacitância por fase da bateria de condensadores e a metodologia explicitada, tem-se a frequência em que ocorre a ressonância supracitada, na Equação 3.23:

$$f_0 = \sqrt{\frac{1}{L_R C_y}} / 2\pi \quad 3.23$$

Na qual:

$f_0$ : frequência de ressonância.

$L_R$ : indutância resultante no PAC.

$C_y$ : capacitância por fase da bateria de condensadores.

Com a Metodologia finalizada, ela pode ser aplicada nos dados aferidos no caso de estudo do próximo capítulo.

# Capítulo 4

## 4 Caso de estudo

Este capítulo permeia a caracterização de uma rede de Baixa Tensão localizada no Instituto Politécnico de Bragança, alimentada por um transformador MT/BT; o Posto de Transformação denominado ESA1, localizado na Escola Superior Agrária do IPB. Nesta instalação, encontram-se uma bateria de condensadores utilizada para correção de fator de potência e um analisador de energia, ambos serão explicitados neste presente capítulo. Seguidamente, serão mostrados os resultados obtidos através da metodologia proposta.

### 4.1 Transformador

O transformador trifásico do Posto de transformação é da marca ABB, com frequência nominal de 50Hz, de refrigeração natural e de tipo 400/36 B2, conforme a chapa de características apresentada na Figura 19. Ao selecionar as informações relevantes para aplicação da metodologia anteriormente explicitada, obtém-se a Tabela 7:

Tabela 7 Dados resumidos da chapa de características do transformador da ESA1

Potência nominal (kVA)	400,0
Tensão AT (kV)	30,0
Tensão BT (V)	400
Corrente nominal AT (A)	7,7
Corrente nominal BT (A)	577,4
Tensão de curto-circuito percentual	4,52%

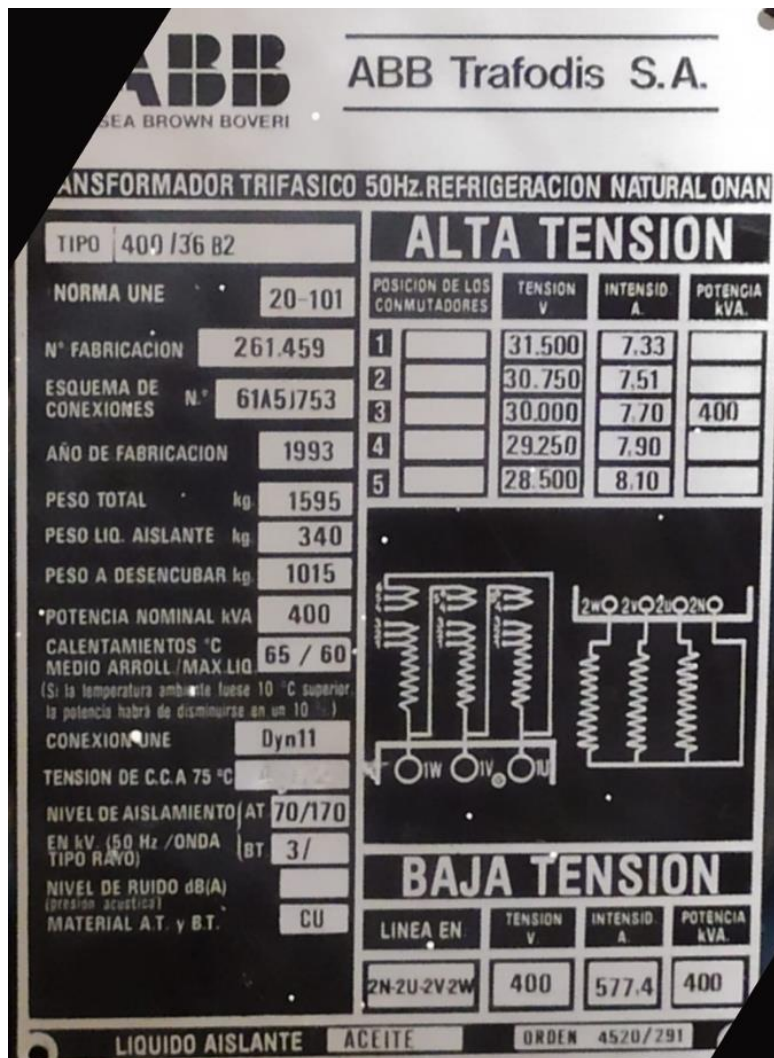


Figura 19 Placa característica do transformador da ESA1

## 4.2 Analisador de energia e *software*

Foram utilizados dois analisadores de energia da marca Janitza, do modelo UMG 604, representado na Figura 20, com conexão Ethernet e o *software* referente ao mesmo é o *GridVis*®, do qual foram exportados os dados para realização de um pós-tratamento.

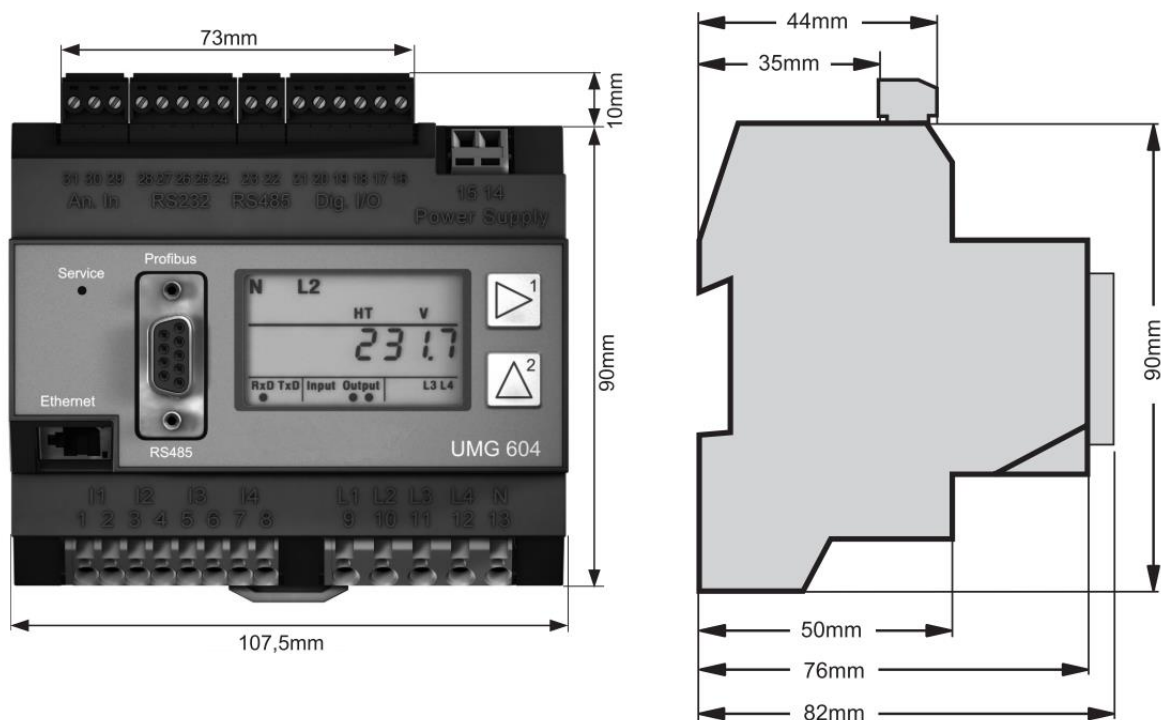


Figura 20 Representação do analisador UMG 604 [27]

Foram utilizados dois analisadores, chamados de Analisador 1 e Analisador 2 neste trabalho, para obter separadamente os dados da rede e os dados da bateria de condensadores. O Analisador 1 já estava instalado e o Analisador 2 foi montado de forma móvel pelo pessoal técnico responsável sendo colocado na instalação da bateria de condensadores no dia 08 de outubro de 2020. A representação da localização destes analisadores está representada na Figura 21:

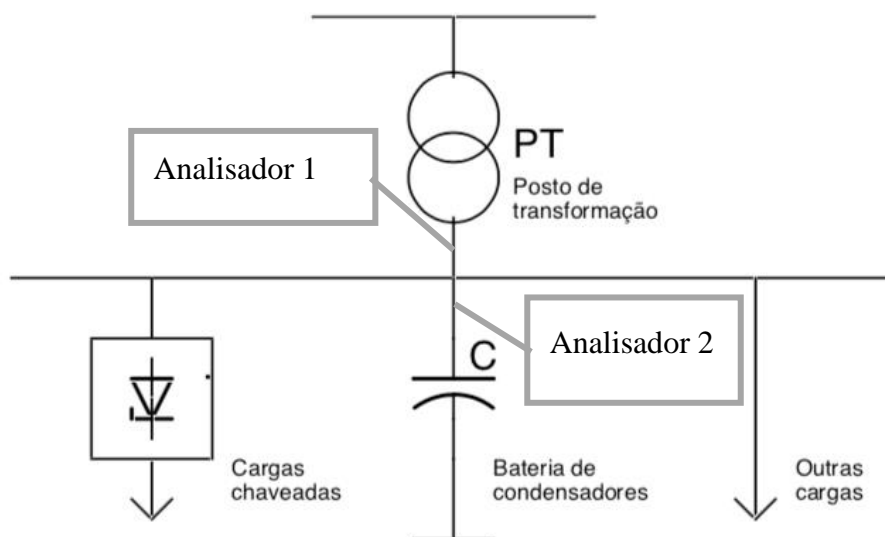


Figura 21 Localização dos analisadores de energia

### 4.3 Bateria de condensadores

A bateria de condensadores da Telegroup, modelo TLR4017.5, que pode ser visualizada na Figura 22, possui três escalões e uma potência total de 17,5 kvar [28], estas podem ser combinadas de oito formas, conforme a Tabela 8:

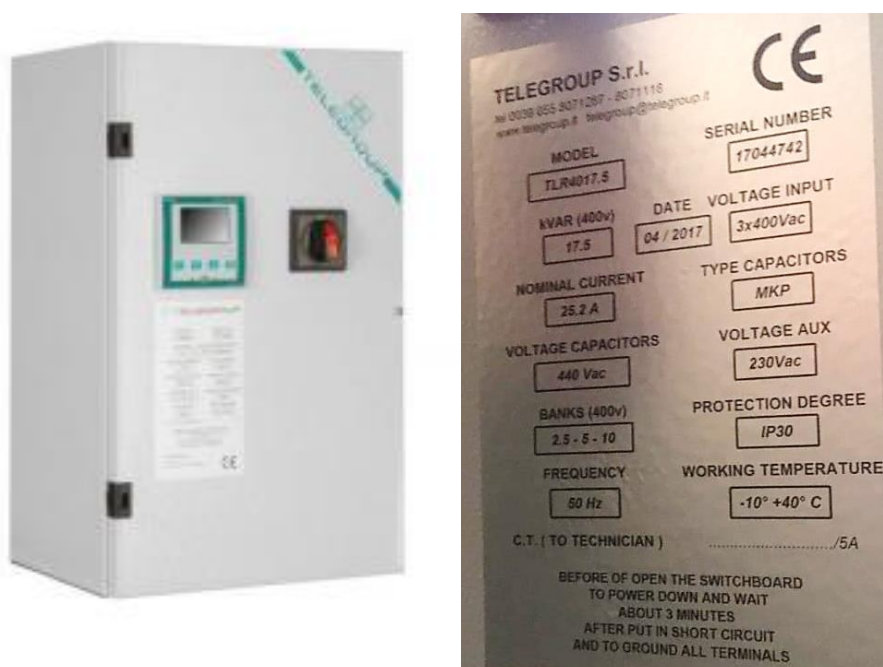


Figura 22 Visão externa do banco de condensadores [28] e da placa característica

Tabela 8 Combinações possíveis dos escalões de potência [29]

Combinações	Escalões			Total (kVA)
	2,5kVA	5kVA	10kVA	
1				0
2	■			2,5
3		■		5
4	■	■		7,5
5			■	10
6	■		■	12,5
7		■	■	15
8	■	■	■	17,5

Esta bateria possui um controlador, o PCRL 5/7, que tem a interface conforme a Figura 23, e traz as informações da Figura 24.

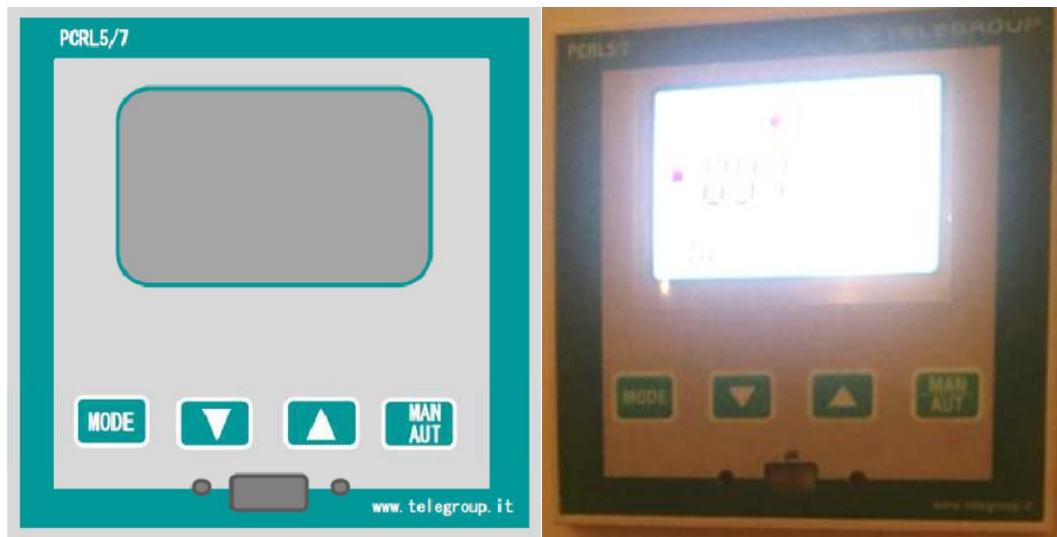


Figura 23 Interface do PCRL 5/7 [30]

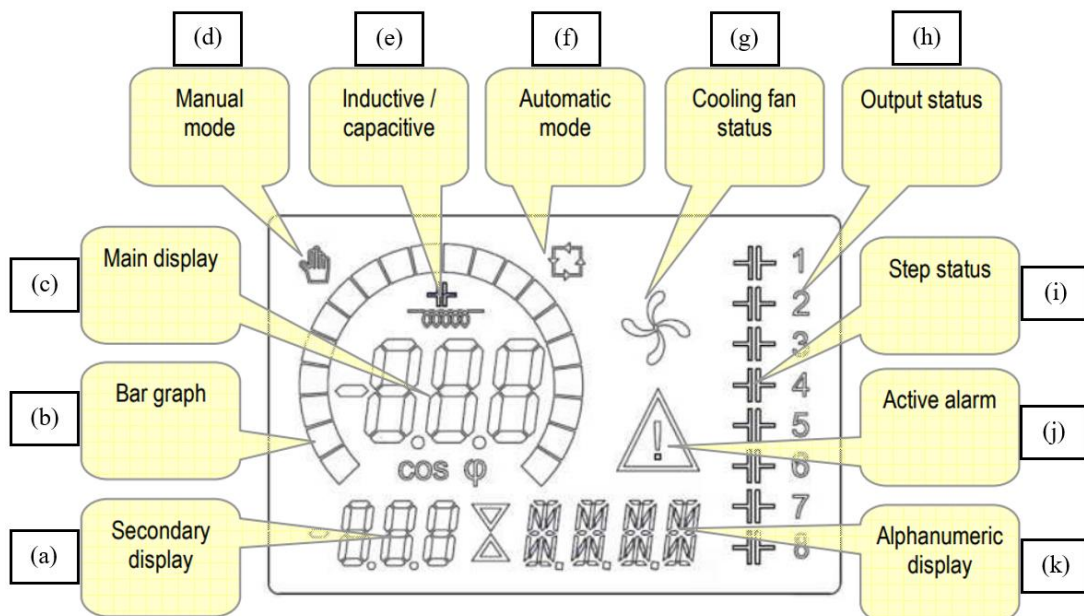


Figura 24 Informações do PCRL 5/7, adaptado de [30]

As informações fornecidas pelo PCRL5/7 [30], da figura 25 são:

- (a) Display secundário, em que são indicados, por exemplo, códigos de erro e senha.
- (b) Gráfico de barra onde tem-se a quantidade de potência reativa inserida pela bateria.

- (c) Display principal que indica o fator de potência resultante, após a inserção da potência reativa no sistema.
- (d) O modo manual permite que as combinações de escalões sejam inseridas manualmente. Isso pode ser interessante para executar testes.
- (e) A indicação gráfica de que o fator de potência resultante é indutivo ou capacitivo.
- (f) O modo automático mostra que a seleção dos escalões da bateria se dá de forma automática.
- (g) O status da ventoinha aponta se a ventoinha de arrefecimento está ligada ou desligada.
- (h) O status de saída mostra quantas combinações de escalões são possíveis.
- (i) O status de passos mostra qual combinação de escalões está ativa.
- (j) O sinal de alarme indica quando há algum alarme ativo.
- (k) O display alfanumérico traz mais algumas informações, afinal os displays primário e secundário são apenas numéricos; como por exemplo unidades de medida, a indicação de modo manual e opções dentro do menu.

## 4.4 Dados obtidos

Os dados relevantes para o presente estudo são os obtidos a partir da data da instalação do Analisador 2, pois a metodologia proposta precisa de todas as variáveis já descritas para ser aplicada.

Portanto, obtiveram-se os dados a cada 15 minutos, por fase, como propõe a metodologia, das seguintes variáveis, para uma fase, sendo valores médios:

- (a) Data e hora.
- (b) Tensão efetiva para a fase 1 do Analisador 1.
- (c) Corrente efetiva para a fase 1 do Analisador 1.
- (d) Corrente harmônica para  $h=1$ , ou seja, fundamental, do Analisador 1.
- (e) Tensão harmônica para  $h=1$ , ou seja, fundamental, do Analisador 1.
- (f) Potência reativa do Analisador 1.
- (g) Potência aparente do Analisador 1.

- (h) Potência ativa do Analisador 1.
- (i) Cosseno de  $\varphi$  do Analisador 1.
- (j) Tensão efetiva do Analisador 2.
- (k) Potência reativa do Analisador 2.

Como citado na seção 4.2, o *software* utilizado foi o *GridVis*®, de forma que os dados são obtidos em formato “.csv” que podem ser exportados para o *Excel*. Entretanto, faz-se necessário um pós-tratamento de dados devido ao grande volume destes: existem inúmeras possibilidades de medições em que são algumas são necessárias para este estudo e os dados são obtidos a cada 15 minutos, que devem ser filtrados para o espaço de tempo pretendido.

Após esta organização tem-se a configuração da Tabela 9, de forma que os valores obtidos possam ser aplicados nas equações 3.9, 3.10, 3.11, 3.13, 3.14, 3.17, 3.18, 3.19, 3.20, 3.21, 3.22 e 3.23.

$$Y = \frac{I_{ef\_h=1}}{V_{ef\_h=1}} \quad 3.9$$

$$\varphi = \cos^{-1}(\cos \varphi) \quad 3.10$$

$$Y = \left( \frac{I_{ef\_h=1}}{V_{ef\_h=1}} \right) \angle - \varphi \quad 3.11$$

$$G = \frac{1}{R} \quad 3.13$$

$$B = \left( \omega C_y - \frac{1}{\omega L_f} - \frac{1}{\omega L} \right) \quad 3.14$$

$$V_{cc} = V_{cc\%} * V_{2nom} \quad 3.17$$

$$X_T = \frac{V_{cc}}{I_{2nom}} \quad 3.18$$

$$L_f = \frac{X_T}{\omega} \quad 3.19$$

$$C_y = \frac{Q}{3 * \omega V_{sc}^2} \quad 3.20$$

$$L = \left( \omega^2 C_y - \omega B - \frac{1}{L_f} \right)^{-1} \quad 3.21$$

$$L_R = \frac{L_f L}{L_f + L} \quad 3.22$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_R C_y}}$$

3.23

Tabela 9. Exemplo de dados obtidos pelos analisadores de energia

Data e hora	ESA1 Analisador 1						Bateria de condensadores Analisador 2			
	Tensão efectiva L1 (15m) [PT- ESA1]- avg[V]	Corrente efectiva L1 (15m) [PT- ESA1]- avg[A]	Corrente Harmônica L1 (15m) [PT- ESA1]- avg[A]	Tensão Harmônica L1 (15m) [PT- ESA1]- avg[V]	Potência Reactiva L1 (15m) [PT- ESA1]- avg[var]	Potência Aparente L1 (15m) [PT- ESA1]- avg[VA]	Potência Activa L1 (15m) [PT- ESA1]- avg[W]	cos phi(mat) L1 (1m) [PT- ESA1]- avg[]	Tensão efectiva L1 (1m) [Bateria de condensador es]-avg[V]	Potência Reactiva L1 (1m) [Bateria de condensa dores]- avg[var]
08/10/2020 15:00	230,051	45,444	60,543	229,805	-1685,948	10454,424	10189,69	0,991	230,137	0
08/10/2020 15:15	229,959	51,068	53,432	229,997	-1003,202	11742,878	11589,338	0,998	229,477	0
08/10/2020 15:30	230,714	47,933	49,086	230,474	-1395,477	11058,354	10839,827	0,985	177,716	0
08/10/2020 15:45	230,601	50,187	40,362	230,922	-461,002	11572,694	11451,363	0,992	230,424	-106,103

Os dados da Tabela 9 são do sistema analisado no Instituto Politécnico de Bragança. Com estes dados, poderia ser aplicada a metodologia proposta se a rede dispusesse de uma característica indutiva. Entretanto, pode ser notado na Tabela 9, no campo de potência reativa por fase, do Analisador 1, que a rede possui um caráter predominantemente capacitivo, questão esta que se repete por todos os dados obtidos, conforme o gráfico da Figura 25, obtida diretamente no *GridVis*®. Nesta figura pode-se observar que, repentinamente, a característica da rede foi deslocada de majoritariamente indutiva para majoritariamente capacitiva.

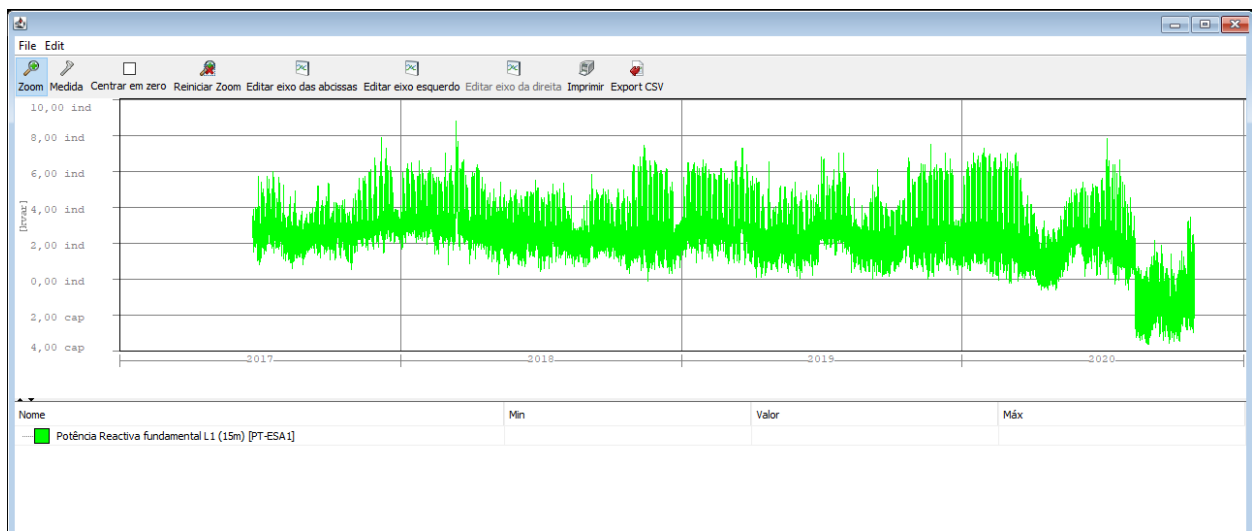


Figura 25 Característica da rede deslocada.

Na Figura 26 verifica-se este comportamento de forma mais detalhada.

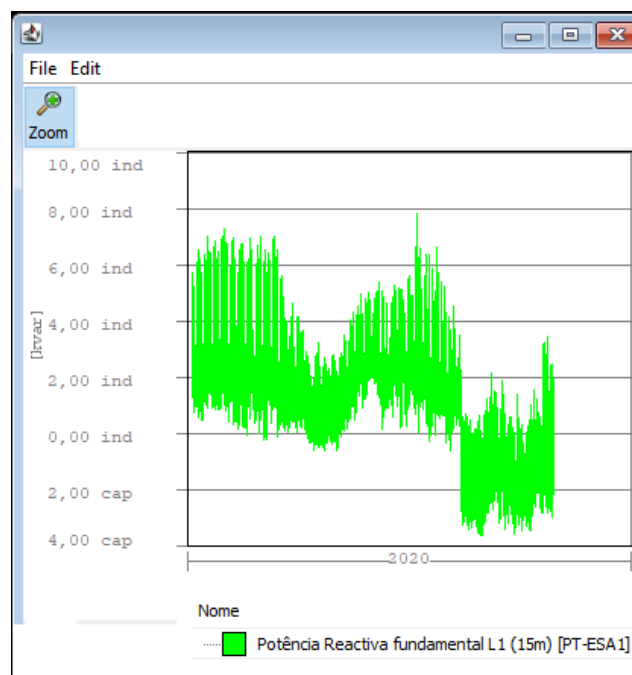


Figura 26 Detalhe da mudança de comportamento da rede

Após a exportação e pós-tratamento dos dados, utilizando o *Microsoft Excel*, estes podem ser vistos diariamente na Figura 27, assim como o dia de inversão da característica da potência reativa.

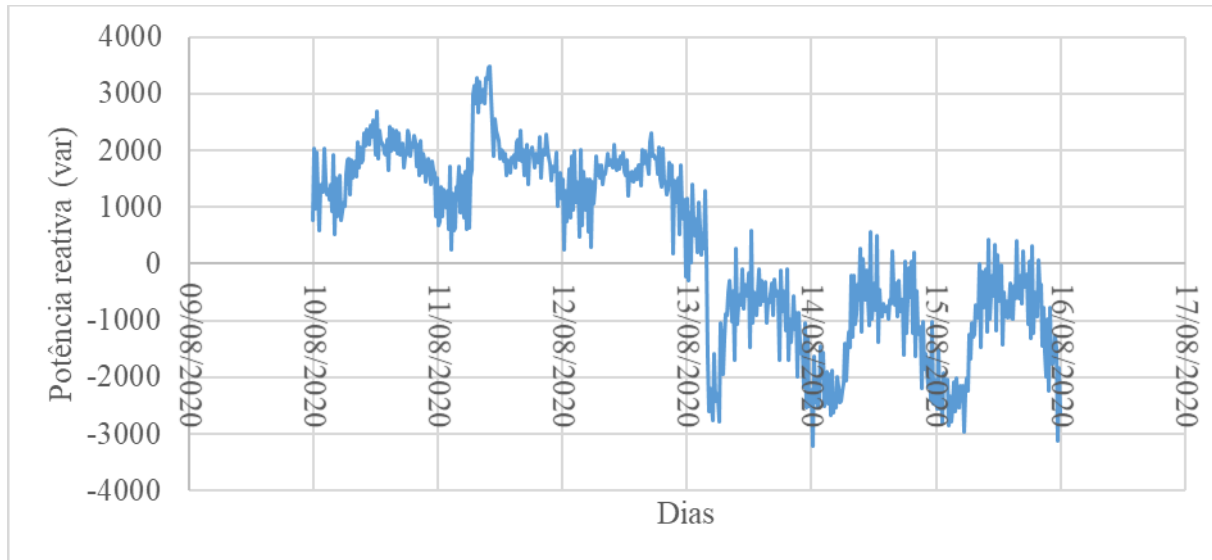


Figura 27 Visualização diária da mudança de comportamento.

#### 4.4.1 Estimativas de potência

A partir do comportamento de mudança abrupta da potência reativa demonstrada na Figura 27 verifica-se diferentes estágios de funcionamento da rede a partir do regime de funcionamento do campus do IPB. Foram analisados três períodos distintos, sendo eles o início do 1º Semestre de 2020/2021 até o dia 28 de outubro, funcionamento parcial das escolas, considerando serviços centrais e centros de pesquisa, bem como as férias de verão, onde as escolas ficam completamente fechadas durante a segunda e terceira semana de agosto.

As médias de potências ativa, reativa e aparente são apresentadas na Tabela 10, onde é possível notar a demanda de potência, bem como a redução do FP durante os estágios de fechamento das escolas. Como os dados apresentados na tabela são referentes as médias, não se verifica de forma clara a alteração da rede de indutiva para a capacitiva no dia 13 de agosto, visto na Figura 27.

Tabela 10 Variação de potência e FP durante o fechamento das escolas

	<b>Potência Aparente [W]</b>	<b>Potência Reativa [var]</b>	<b>Potência Aparente [VA]</b>	<b>FP</b>
<b>Verão 2020 10/08/2020 a 24/08/2020</b>	5628,49	-704,83	6140,61	0,9121
<b>Serviços Centrais e Centros de Pesquisa 25/08/2020 a 26/09/2020</b>	7473,60	-1177,19	7930,23	0,9303
<b>1º Semestre 2020/2021 27/09/2020 a 28/10/2020</b>	9128,83	-1186,51	9516,23	0,9463

Considerando como funcionamento nominal do instituto o período de início do 1º semestre de 2021, o percentual de redução de potências é visto na Tabela 11.

Tabela 11 Variação percentual de potências

	<b>Potência Ativa</b>	<b>Potência Reativa</b>	<b>Potência Aparente</b>
<b>Verão 2020 10/08/2020 a 24/08/2020</b>	59,40%	61,66%	64,53%
<b>Serviços Centrais e Centros de Pesquisa 25/08/2020 a 26/09/2020</b>	99,21%	81,87%	83,33%
<b>1º Semestre 2020/2021 27/09/2020 a 28/10/2020</b>	100,00%	100,00%	100,00%

É importante ressaltar que os dados fornecidos pelo analisador são referentes a um período de pandemia, no qual houve uma considerável redução no número de alunos que frequentam o campus. Essa redução reflete não apenas as aulas em regime mista (presencial e online) como também a redução de estudantes em salas de estudo e centros de pesquisa.

Tais mudanças de comportamento podem ter tido influência direta no comportamento da rede, de forma a torná-la capacitiva a partir do período do verão. Para uma análise mais completa, faz-se necessário em trabalhos futuros a reinterpretação dos valores apresentados

pelo medidor considerando como comportamento nominal da rede o IPB a operar em 100% da capacidade de pessoal.

Não foi possível avaliar exatamente o motivo da alteração do comportamento da instalação de indutivo para capacitivo, para o qual seria necessária uma auditoria às cargas a jusante do quadro elétrico. Desta forma, a metodologia proposta no escopo do trabalho não pôde ser aplicada e não foi simulado um filtro para tal, como era pretendido.

# Capítulo 5

## 5 Conclusão

A partir da data do dia 13 de agosto de 2020 a rede passou a ter um comportamento capacitivo, possivelmente pela instalação de algum equipamento com tal característica no IPB, de forma que a metodologia proposta não é aplicável. O Analisador 2 foi colocado na bateria de condensadores a partir do dia 8 de outubro de 2020, impossibilitando a aplicação da metodologia antes desta data e conseqüentemente antes do dia 13 de agosto também, que foi quando a rede estava com o comportamento esperado.

Para futuros trabalhos, sugere-se uma tratativa mais abrangente, para um caso capacitivo além do indutivo. Além disso seria interessante um pré-tratamento de dados utilizando programação diretamente em cima dos dados brutos, utilizando as possibilidades Profibus e Ethernet que o analisador de energia Janitza traz.

Por fim, apesar do trabalho não ter atingido o resultado esperado, conclui-se que ele continua a ter grande relevância para um ambiente que possui como entrada um transformador de alta tensão para baixa tensão e utilização de baterias de condensadores para mitigação do fator de potência fora dos limites exigidos, como foi o caso do IPB, mas também é uma característica industrial. De forma que também para trabalhos futuros a metodologia aqui explicitada pode ser testada e aplicada amplamente.

# Referências bibliográficas

- [1] J. Arrillaga e N. R. Watson, *Power system harmonics*, vol. 53, nº 9. 2013.
- [2] R. C. Dugan e M. F. Mc Granaghan, “Electrical Power Systems Quality”, 2004.
- [3] C. K. Alexander e M. N. Sadiku, “Fundamentos de Circuitos Elétricos”. 2003.
- [4] J. G. Amuchastegui, “Análise de Vibração – Tipos de Sinais, Transformada de Fourier e PSD”, 2016. <https://ens.us.com.br/analise-de-vibracao-tipos-de-sinais-transformada-de-fourier-e-psd/>.
- [5] P. J. de F. Correia, “O Impacto dos Problemas de Qualidade da Energia em Instalações Eléctricas O Caso Particular das Perturbações Harmónicas”, 2007.
- [6] Y. Rodrigues e M. Frigo, “HARMÔNICOS EM INSTALAÇÕES ELÉTRICAS: TEORIA, INDICADORES E NORMALIZAÇÃO”, 2017.
- [7] J. Arrillaga e N. R. Watson, “Power System Harmonics”. 2003.
- [8] E. G. Robert, “Harmonic: Analysis of Industrial Power Systems”, 1996, doi: 10.1109/28.536886.
- [9] I. Barbi, “Eletrônica de potência”. 2006.
- [10] A. Hoevenaars, M. Farbis, e M. McGraw, “Active Harmonic Mitigation: What the Manufacturers Don’t Tell You”, 2020.
- [11] S. Emv, A. G. Corporate, e H. Nordstrasse, “IEC 61000-3-2 Harmonics Standards Overview”, p. 1–5, 2005.
- [12] IEC, “IEC 61000-3-3”, 2013.
- [13] “Electromagnetic Compatibility ( EMC ) Low-Frequency Standards Standards on Low-Frequency Emission : IEC 61000-3-2 IEC 61000-3-2 : Measurement Circuit IEC 61000-3-2 Supply Source Requirements”, p. 1–17.
- [14] M. McGranaghan e G. Beaulieu, “Update on IEC 61000-3-6: Harmonic emission limits for customers connected to MV, HV, and EHV”, *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Transm. Distrib. Conf.*, p. 1158–1161, 2006, doi: 10.1109/TDC.2006.1668668.
- [15] J. Marafão, “Retificador trifásico com alto fator de potência utilizando comutação em baixa frequência”, p. 88, 2002.
- [16] IEEE, “IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems IEEE Power and Energy Society”, 2014.
- [17] A. Raizer, J. V.D. Silva, e M. P. Fonseca, “Analysis of harmonic current emissions in voltages below the presented by the standard IEC 61000-3-2”, *2017 IEEE 3rd Glob. Electromagn. Compat. Conf. GEMCCON 2017*, p. 1–4, 2018, doi:

- 10.1109/GEMCCON.2017.8400661.
- [18] J. B. S. Filho, “Potência Ativa, Reativa e Fator de potência em situações senoidais e não-senoidais”.
- [19] E. Watanabe e R. Stephan, “Potência Ativa e Reativa Instantâneas em Sistemas Elétricos com Fontes e Cargas Genéricas”, *Rev. da SBA Control. e Automação*, vol. 3, nº 1, p. 1461–1470, 1991.
- [20] Comissão Europeia, “REGULAMENTO (UE) 2016/ 631 DA COMISSÃO - de 14 de abril de 2016 - que estabelece um código de rede relativo a requisitos da ligação de geradores de eletricidade à rede”, nº 2, 2016.
- [21] D. J. Carnovale, “Power Factor Correction and Harmonic Resonance: A Volatile Mix”. *EC&M Magazine*, 2003.
- [22] G. Kindermann, “Curto-circuito / Geraldo Kindermann”. 1997.
- [23] T. M. Blooming e D. J. Carnovale, “Capacitor application issues”, 2007, doi: 10.1109/PAPCON.2007.4286298.
- [24] L. R. Limongi, “Filtros Ativos de Potência para Compensação de Harmônicos de Corrente e Potência Reativa”, *UFPE, Diss. Mestr.*, 2006.
- [25] R. F. Silveira, “Filtro ativo de potência: conceito e ferramentas matemáticas”, *IFGJ*, 2013.
- [26] G. Kindermann, “Curto-circuito”. 1997.
- [27] Janitza, “Operating manual and technical data - UMG 604”, 2021.
- [28] Telegroup, “Datasheet: Automatic Power Factor Correction System 17.5 kVAr”, vol. 06, nº 09, p. 2395–0056, 2019.
- [29] A. Abreu e L. Variz, “Ressonância em instalações elétricas com baterias de condensadores”, 2017.
- [30] Telegroup, “User Manual Automatic PFC systems all Series”, 2018.