

UNIVERSIDADE SÃO FRANCISCO
Curso de Engenharia Elétrica

STANLEY CÉSAR DE OLIVEIRA

INFLUÊNCIA DE HARMÔNICOS NO FATOR DE POTÊNCIA

Itatiba

2011

STANLEY CÉSAR DE OLIVEIRA – R.A.002200700680

INFLUÊNCIA DE HARMÔNICOS NO FATOR DE POTÊNCIA

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade São Francisco, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Geraldo Peres Caixeta.

Itatiba

2011

Oliveira, Stanley César.

Influência de harmônicos no fator de potência/Stanley César de Oliveira – Itatiba, 2011.

67 p.

Monografia apresentada à banca para obtenção de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientação : Prof Dr. Geraldo Peres Caixeta

1.Fator de potência, 2.Distorção harmônica, 3.Qualidade de energia.

STANLEY CÉSAR DE OLIVEIRA

INFLUÊNCIA DE HARMÔNICOS NO FATOR DE POTÊNCIA

Monografia aprovada pela Banca Examinadora em 03/12/2011 do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade São Francisco, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Data de aprovação: ____/____/____

Banca examinadora:

Prof. Dr. Geraldo Peres Caixeta (Orientador)

Prof. João Alex Franciscon Vaz (Examinador)

Eng° Júlio César Certo (Examinador)

Para minha mãe,
Rosa Conceição de Moraes

AGRADECIMENTOS

A DEUS pela minha existência, por ter me dado saúde e capacidade pra ter chegado até aqui.

Aos meus pais, Maximino José de Oliveira (in memorian) e Rosa Conceição de Morais Oliveira, pela educação a mim ofertada e por sempre ter me incentivado nos estudos.

A todas minhas irmãs, sobrinhos e cunhados, principalmente Sérgio Sidnei Riso (in memorian), que sempre me auxiliou no que precisei.

A minha namorada Andréia Azevedo Pasternak, pelo apoio, motivação, contribuição e compreensão pelo tempo de dedicação.

Ao PROUNI (Programa Universidade Para Todos do Governo Federal), por ter me dado a oportunidade de estudar.

A todos que direta e indiretamente contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos e parceiros de estudo.

Ao meu Orientador/Professor Dr. Geraldo Peres Caixeta.

A todos os professores, mestres e doutores que participaram da minha formação escolar ao longo da minha vida.

Aos colaboradores e funcionários da Universidade São Francisco – Campus de Itatiba-SP.

“MUITO OBRIGADO A TODOS...”

“... Se você conhece o inimigo e conhece a si mesmo, não precisa temer o resultado de cem batalhas. Se você se conhece, mas não conhece o inimigo, para cada vitória ganha sofrerá também uma derrota. Se você não conhece nem o inimigo nem a si mesmo, perderá todas as batalhas...”

Fonte: Provérbio Chinês – Arte da Guerra, Sun Tzu, pg.51.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS.....	xi
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	xii
RESUMO	xiii
1. INTRODUÇÃO	15
1.1. Metodologias	16
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1. Fator de potência.....	17
2.2. Baixo fator de potência e suas causas	17
2.2.1. Conseqüências dos níveis de tensão acima do padrão nominal.....	17
2.2.2. Motores superdimensionados ou operando sem carga	18
2.2.3. Transformadores operando em vazio e ou com pequenas cargas	21
2.3. Correção do fator de potência e os benefícios	21
2.4. Energia aparente, ativa e reativa.....	22
2.4.1. Energia reativa.....	26
2.5. Correção do fator de potência	27
2.6. Estudo da correção do fator de potência	32
3. QUALIDADE DE ENERGIA	35
3.1. Normas relacionadas com qualidade de energia.....	35
3.2. Definições dos itens de qualidade	36
3.2.1. Transitórios	38
3.2.2. Interrupções e Sags.....	40
3.2.3. Sobretensões	41
3.2.4. Desequilíbrios de tensão	43
3.2.5. Distorções na forma de onda	44
3.2.6. Distorções harmônicas	45
3.2.7. Oscilações ou flutuações de tensão	48
3.2.8. Sistema elétrico e suas variações na frequência.....	49

4. HARMÔNICOS DE CORRENTE E TENSÃO	50
4.1. Harmônicos	50
4.2. Como detectar as harmônicas.....	51
4.2.1. Fator de Potência	51
4.2.2. Fator Crista	52
4.2.3. Distorção Harmônica Total (THD).....	53
4.2.4. Fator de Distorção (DF)	53
4.3. Impactos econômicos.....	54
4.3.2. Custo adicional da contratação de serviço	54
4.3.3. Sobredimensionamento dos materiais.....	54
4.3.4. Redução da vida dos materiais	55
4.3.5. Disparos intempestivos e parada da instalação.....	55
4.3.6. Exemplos	55
4.4. Normas para emissão de harmônicas na rede.....	56
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
5.1. Resultados.....	57
5.1.1. Indutância	57
5.1.2. Filtro passivo LC.....	58
5.1.3. Filtros Ativos(condicionadores)	61
5.1.4. Transformadores de separação para 3ª harmônica e suas múltiplas	62
5.1.5. Transformadores de separação para 5ª e 7ª harmônica e suas múltiplas	63
5.1.6. Cálculo do custo dos filtros passivos	64
5.2. Conclusão	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Triângulo das potências [2].....	15
Figura 2: Potência média [2].....	23
Figura 3: Diagrama fasorial das tensões [2].....	24
Figura 4: Triângulo das Potências com carga Indutiva [2]	24
Figura 5: Triângulo das potências (Indutivo) [2].....	25
Figura 6: Triângulo das potências (Capacitivo) [2]	26
Figura 7: Gráfico da corrente transitória impulsiva oriunda de uma descarga atmosférica [3].....	37
Figura 8: Forma de onda dos itens de qualidade de energia [3].....	37
Figura 9: Forma de onda do transitório causado por chaveamento de um banco de capacitores [5]	38
Figura 10: Forma de onda da sobre-tensão decorrente da eliminação de uma falha [3]	39
Figura 11: Forma de onda do SAG causado por curto fase-terra [3]	40
Figura 12: Forma de onda da sobre-tensão de curta duração [3]	41
Figura 13: SWELL causado por uma falta fase-terra, Curva CBEMA [6]	42
Figura 14: Resposta do conjugado do motor à alimentação desequilibrada [11]	43
Figura 15: Onda deformada e suas componentes harmônicas[6].	46
Figura 16: Onda fundamental com sua harmônica n=5 abaixo [7].....	50
Figura 17: Onda resultante da soma da onda da tensão e da harmônica n=5 [7]	51
Figura 18: Figura do paralelepípedo das potências [9]	52
Figura 19: Aumento das perdas devido à redução do fator de potência [7].....	52
Figura 20: Aplicação de indutância para atenuar todas as harmônicas[6].....	57
Figura 21: Emprego de filtro de harmônicas Passivo LC combinado com indutância para atenuação de uma harmônica específica(exemplo 5ª harmônica)[6]	59
Figura 22: Emprego de filtro de harmônicas Passivo LC compensado, para atenuação de harmônica específica[6]	60
Figura 23: Ligação de um filtro ativo de harmônicas[6]	61
Figura 24: Atuação de um filtro ativo em um exemplo real[6].....	62
Figura 25: Transformador empregado no isolamento da 3ª harmônica e suas componentes múltiplas[6]	63
Figura 26: Transformador empregado no isolamento da 5ª e 7ª harmônicas[6].....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: influência da variação da tensão no fator de potência [2]	18
Tabela 2 : capacitores para motores de baixa tensão [2]	19
Tabela 3: capacitores para motores de média tensão [2]	20
Tabela 4: solicitação de reativos de transformadores em vazio [2]	21
Tabela 5: multiplicadores para determinação dos kVAr necessários para a correção do fator de potência [2]	30
Tabela 6: tangentes trigonométricas correspondentes aos vários valores de fator de potência [2].....	31
Tabela 7: tangentes trigonométricas correspondentes aos vários valores de fator de potência (cont.) [2]	32
Tabela 8: resultado do gráfico da figura 15[8]	46

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANEEL = Agência Nacional de Energia Elétrica

CA = Corrente alternada

CBEMA = *Computer & Business Equipment Manufacturers Association*

CC = Corrente contínua

Cos ϕ = Relação entre potência ativa e potência aparente

EUA = Estados Unidos da América

HP = *Horse Power* (potência equivalente a 746W)

Hz = Hertz (unidade de frequência)

IEC = *International Electrotechnical Commission* (Comissão Internacional de Eletrotécnica)

IEEE = *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos)

I_{ef} = Corrente eficaz

I_p = Corrente de pico

kHz = kilo Hertz

kVA = kilo Volt Ampère

kVA_r = kilo Volt Ampère reativo

kVA_{rh} = kilo Volt Ampère reativo hora

kW = kilo Watts

kWh = kilo Watts hora

RPM = Rotação por minuto

TC's = Transformadores de corrente

TP's = Transformadores de potencial

UPS = *Uninterruptible Power Supply* (fonte de alimentação ininterrupta)

VA = Volt Ampère (unidade de potência aparente)

VA_r = Volt Ampère reativo (unidade de potência reativa)

V_{ef} = Tensão eficaz

V_{nom} = Tensão nominal

V_p = Tensão de pico

W = Watts (unidade de potência ativa)

RESUMO

As cargas reativas indutivas (motores AC, transformadores, indutores e reatores) são as maiores responsáveis pela defasagem entre tensão e corrente, conseqüentemente, causam o chamado fator de potência ($\cos\phi$), que além de poluírem as redes de energia elétrica, causam prejuízos para os consumidores de energia, para as concessionárias e prejuízos para o meio ambiente. Devido o avanço da eletrônica de potência, circuitos chaveados têm sido cada vez mais utilizados, como exemplo, em inversores de frequência, estes por sua vez, geram as chamadas distorções harmônicas, que interferem diretamente no fator de potência final, devido há uma potência de distorção harmônica, que se somam as potências reativas provenientes de cargas indutivas, por exemplo, contribuindo assim para o aumento desta. Atualmente, muito tem se falado em qualidade de energia, pois, não é diferente de outros produtos e bens de consumo. No entanto, órgãos estão regulamentando esses índices no que diz respeito à qualidade, que os consumidores em geral, terão que se adequar ao longo do tempo. Essas adequações afetam diretamente as instalações, quer seja alterando-a, quer seja no momento do projeto. Fica explícito, que sua adequação às normas se dá bem antes da implementação, isso já na etapa de projeto. Já devem ser previstos problemas como: aquecimento de condutores, sobre-carregamento de estações e sub-estações, uma maior disponibilidade de energia limpa, ou seja, sem interferências, ruídos e distorções, para que os equipamentos não sejam danificados em situações normais de trabalho. De acordo com o descrito acima, esse trabalho tem por objetivo fazer o estudo da influência de ruídos (distorções harmônicas nas formas de onda) no fator de potência, relacionando qualidade de energia, suas conseqüências e possíveis soluções para o problema.

Palavras-chave: fator de potência, distorção harmônica, qualidade de energia.

ABSTRACT

The inductive reactive loads (AC motors, transformers, inductors and reactors) are mainly responsible for the gap between current and voltage, thus causing the so-called power factor ($\cos \varphi$), which not only pollute the electric power grids, causing damage to energy consumers to utilities and damage to the environment. With the advancement of power electronics, circuit switched have been increasingly used as an example of frequency inverters, these in turn, generate the so-called harmonic distortion, which directly affect the final power factor, because there is a power harmonics, that add to the reactive power from inductive loads such as contributing to this increase. Currently, much has been said about, power quality, therefore, is no different from other products and consumer goods. However, agencies are regulating these indices with respect to quality, that consumers in general will have to adapt over time. These adjustments directly affect the facility, either by changing it, either at design time. It is explicit that its regulatory compliance occurs well before the implementation, this is already in the design stage. It should be provided for problems such as heating conductors, overloading of stations and substations, a greater availability of clean energy, i.e., without interference, noise and distortion, so that the equipment are not damaged in normal work. According to the above, this paper aims to study the influence of noise (harmonic distortion in the waveform) power factor, power quality related, consequences and possible solutions to the problem.

Key words: power factor, harmonic distortion, power quality.

1. INTRODUÇÃO

Fica evidente que a principal forma de energia utilizada nas indústrias hoje é a energia elétrica, devido à facilidade de obtenção, uma vez que, nos centros industriais, a energia elétrica é fornecida pelas concessionárias mediante contrato de serviços e insumos, dispensando grandes investimentos com a implantação de sistemas de geração própria.

Determinados equipamentos, tais como motores elétricos, fornos a arco, transformadores etc., necessitam para a sua operação de certa quantidade de energia reativa que pode ser suprida por diversas fontes ligadas ao sistema elétrico funcionando individual ou simultaneamente. Estas fontes são [1]:

- Geradores;
- Motores síncronos;
- Capacitores.

A potência aparente total (kVA) é transmitida e gerada às cargas através dos circuitos elétricos, e é composta pela soma vetorial da potência ativa (kW) e da potência reativa (kVAr), conforme figura abaixo:

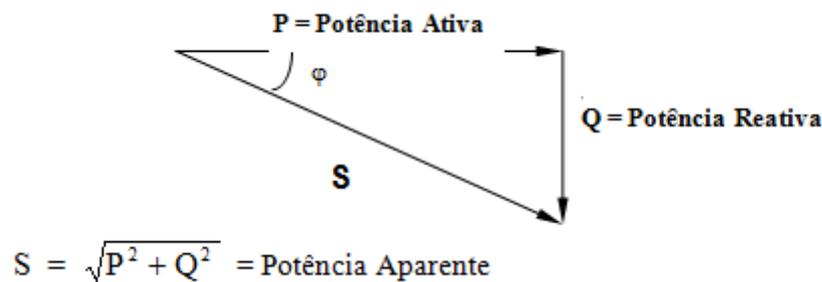


Figura 1: Triângulo das potências [2]

A potência ativa é a única que é transformada em trabalho útil (energia mecânica, produção de movimento, energia térmica, luz e etc.). A potência reativa é uma parcela da potência aparente total que não pode ser transformada em trabalho, que está sempre presente nos circuitos elétricos, associada à criação e manutenção de campos eletromagnéticos nas cargas indutivas e em diversos componentes do sistema, tais como, transformadores, motores, condutores, reatores de lâmpadas de descarga, etc.

A energia reativa (kVAR) que transita pelos sistemas elétricos, desde as usinas geradoras até as instalações consumidoras, exige o aumento da potência dos geradores e transformadores, reduzindo a capacidade de condução de corrente dos sistemas de transmissão e de distribuição [2].

1.1. Metodologias

- Estudo das cargas, para verificação, quanto ao consumo reativo (indutivo ou capacitivo);
- Pesquisar os principais causadores de harmônicos nas redes de energia elétrica;
- Verificar a viabilidade da correção do Fator de Potência, como: custo, espaço físico, qualidade das instalações, etc.;
- Utilizar-se de recursos tecnológicos para a solução do problema.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Fator de potência

O “fator de potência” é o número que expressa, a cada instante, a relação entre a potência efetivamente útil (potência ativa em kW) e a potência total requerida (potência aparente em kVA). A potência total requerida, por sua vez, é igual à soma vetorial da potência ativa (kW) com a potência reativa (kVAr) [2]:

$$\text{FATOR DE POTÊNCIA} = \frac{\text{POTÊNCIA REALMENTE UTILIZADA}}{\text{POTÊNCIA TOTAL REQUERIDA}} = \frac{(kW)}{(kVA)}$$

2.2. Baixo fator de potência e suas causas

Para realizar a correção do fator de potência de uma instalação, devem-se identificar as causas da sua geração, uma vez que a solução das mesmas pode resultar na correção, ao menos parcial, do fator de potência e verificar a viabilidade da mesma. São apresentados a seguir, os principais problemas que dão origem a um baixo fator de potência.

2.2.1. Consequências dos níveis de tensão acima do padrão nominal

O nível de tensão tem influência negativa sobre o fator de potência das instalações, pois como se sabe a potência reativa (kVAr) é, aproximadamente, proporcional ao quadrado da tensão [2]. Assim, no caso dos motores, que são responsáveis por mais de 50% do consumo de energia elétrica na indústria, a potência ativa só depende da carga dele solicitada, e quanto maior for a tensão aplicada nos seus terminais, maior será a quantidade de reativos absorvida, e, conseqüentemente, menor o fator de potência da instalação.

Neste caso, devem ser conduzidos estudos específicos para melhorar os níveis de tensão, através da utilização de uma relação mais adequada de taps dos transformadores ou da tensão nominal dos equipamentos.

A tabela 1 mostra a influência percentual da tensão aplicada aos motores em relação ao fator de potência [2]:

Tabela 1: influência no fator de potência da variação da tensão [2]

Tensão Aplicada (% de V_{nom} do Motor)	Carga nos Motores (Em relação à Nominal)		
	50%	75%	100%
120%	Decresce de 15% a 40%	Decresce de 10% a 30%	Decresce de 5% a 15%
115%	Decresce de 8% a 20%	Decresce de 6% a 15%	Decresce de 4% a 9%
110%	Decresce de 5% a 6%	Decresce de 4%	Decresce de 3%
100%	-	-	-
90%	Cresce de 4% a 5%	Cresce de 2% a 3%	Cresce de 1%

2.2.2. Motores superdimensionados ou operando sem carga

A energia reativa consumida pelos motores elétricos de indução é praticamente a mesma quando operando em vazio ou a plena carga [2]. A potência reativa consumida pelos motores classe B, são aproximadamente iguais às potências dos capacitores indicadas nas Tabelas 2 e 3, ou seja, para motores operando com cargas abaixo de 50% de sua potência nominal o fator de potência cai bruscamente. Nestes casos deve-se verificar a possibilidade, por exemplo, de se substituir os motores por outros de menor potência, com torque de partida mais elevado e mais eficiente.

Tabela 2: capacitores para motores de baixa tensão [2]

POTÊNCIA DO MOTOR (HP)	VELOCIDADE SÍNCRONA (RPM) / NÚMERO DE PÓLOS DO MOTOR											
	3600 2		1800 4		1200 6		900 8		720 10		600 12	
	kVAr ⁽¹⁾	%I ⁽²⁾	kVAr	%I	kVAr	%I	kVAr	%I	kVAr	%I	kVAr	%I
3	1,5	14	1,5	15	1,5	20	2	27	2,5	35	3,5	41
5	2	12	2	13	2	17	3	25	4	32	4,5	37
7,5	2,5	11	2,5	12	3	15	4	22	5,5	30	6	34
10	3	10	3	11	3,5	14	5	21	6,5	27	7,5	31
15	4	9	4	10	5	13	6,5	18	8	23	9,5	27
20	5	9	5	10	6,5	12	7,5	16	9	21	12	25
25	6	9	6	10	7,5	11	9	15	11	20	14	23
30	7	8	7	9	9	11	10	14	12	18	16	22
40	9	8	9	9	11	10	12	13	15	16	20	20
50	12	8	11	9	13	10	15	12	19	15	24	19
60	14	8	14	8	15	10	18	11	22	15	27	19
75	17	8	16	8	18	10	21	10	26	14	32,5	18
100	22	8	21	8	25	9	27	10	32,5	13	40	17
125	27	8	26	8	30	9	32,5	10	40	13	47,5	16
150	32,5	8	30	8	35	9	37,5	10	47,5	12	52,5	15
200	40	8	37,5	8	42,5	9	47,5	10	60	12	65	14
250	50	8	45	7	52,5	8	57,5	9	70	11	77,5	13
300	57,5	8	52,5	7	60	8	65	9	80	11	87,5	12
350	65	8	60	7	67,5	8	75	9	87,5	10	95	11
400	70	8	65	6	75	8	85	9	95	10	105	11
450	75	8	67,5	6	80	8	92,5	9	100	9	110	11
500	77,5	8	72,5	6	82,5	8	97,5	9	107,5	9	115	10

⁽¹⁾ Máxima potência capacitiva recomendada.⁽²⁾ Redução percentual de corrente da linha, após a instalação dos capacitores recomendados.

Tabela 3: capacitores para motores de tensão média [2]

POTÊNCIA DO MOTOR	VELOCIDADE SÍNCRONA (RPM) / NÚMERO DE PÓLOS DO MOTOR											
	3600 2		1800 4		1200 6		900 8		720 10		600 12	
(HP)	kVAr ⁽¹⁾	%I ⁽²⁾	kVAr	%I	kVAr	%I	kVAr	%I	kVAr	%I	kVAr	%I
100	20	7	25	10	25	11	25	11	30	12	45	17
125	30	7	30	9	30	10	30	10	30	11	45	15
150	30	7	30	8	30	8	30	9	30	11	60	15
200	30	7	30	6	45	8	60	9	60	10	75	14
250	45	7	45	5	60	8	60	9	75	10	90	14
300	45	7	45	5	75	8	75	9	75	9	90	12
350	45	6	45	5	75	8	75	9	75	9	90	11
400	60	5	60	5	60	6	90	9	90	9	90	10
450	75	5	60	5	75	6	90	8	90	8	90	8
500	75	5	75	5	90	6	120	8	120	8	120	8
600	75	5	90	5	90	5	120	7	120	8	135	8
700	90	5	90	5	90	5	135	7	150	8	150	8
800	90	5	120	5	120	5	150	7	150	8	150	8

⁽¹⁾ Máxima potência capacitiva recomendada.

⁽²⁾ Redução percentual de corrente da linha, após a instalação dos capacitores recomendados.

2.2.3. Transformadores operando em vazio e ou com pequenas cargas

É comum encontrar transformadores operando em vazio ou alimentando poucas cargas. Nestas condições, ou quando superdimensionados, poderão consumir uma elevada quantidade de energia reativa.

O consumo desta energia por parte dos transformadores pode ser obtido através de medidores (analisadores de energia) ou, determinado por cálculos, neste caso, é necessário obter dos fabricantes (manuais) os valores da potência reativa média de transformadores a vazio.

Desta forma, a energia reativa absorvida por um transformador operando em vazio ou com baixa carga pode ser obtida multiplicando-se o valor indicado na Tabela 4, da carga reativa, pelo número de horas do período em que se utiliza esta operação em vazio [2].

Para reduzir este efeito ou eliminá-lo, deve-se verificar na prática, a possibilidade de se desenergizar os transformadores, ou a utilização de um transformador específico (de menor potência) para alimentação das cargas de baixo consumo [2].

Tabela 4: transformadores em vazio e sua solicitação de reativos [2]

POTÊNCIA DO TRANSFORMADOR (kVA)	CARGA REATIVA MÉDIA EM VAZIO DO TRANSFORMADOR (kVAr)
10	1,0
15	1,5
30	2,0
45	3,0
75	4,0
112,5	5,0
150	6,0
225	7,5
300	8,0
500	12,0
750	17,0
1.000	19,5

2.3. Correção do fator de potência e os benefícios

A correção do fator de potência apresenta algumas vantagens:

- eliminação do pagamento pelo fornecimento de energia reativa (multas) excedente nas contas de energia elétrica;

- redução das perdas de energia, uma vez que as mesmas variam com o quadrado da corrente elétrica total;
- maior liberação da capacidade dos sistemas de geração própria (caso exista), transformadores e da rede de distribuição interna, possibilitando a conexão de novas cargas sem custo adicional;
- menor custo na manutenção em dispositivos de proteção e manobra gerando economia a longo prazo e aumento da vida útil dos equipamentos;
- aumento do nível de tensão nas cargas, em função da redução da queda de tensão nos alimentadores, obtida devido à redução do fluxo de corrente reativa.

2.4. Energia aparente, ativa e reativa

Quando uma resistência tem uma tensão senoidal aplicada a ela, a corrente é senoidal e em fase com a tensão. Assim, a potência dissipada nesse caso, é igual ao produto dos valores eficazes de tensão e corrente. No caso de um elemento reativo puro, a corrente e a tensão estão defasadas em exatamente 90° , e o produto dos valores eficazes de tensão e corrente é igual à potência reativa que alternadamente é armazenada e devolvida. O que ocorre é que, se um circuito possui tanto resistências como reatâncias, temos potência reativa e potência dissipada [2].

Considere um circuito genérico monofásico com uma tensão $v = V_m \text{sen} \omega t$ aplicada. O resultado é uma corrente $i = I_m \text{sen}(\omega t + \varphi)$ atrasada para um circuito capacitivo, φ positivo, e adiantada para caso de um circuito indutivo, isto é, φ negativo. A potência instantânea é:

$$p = vi = V_m I_m \text{sen}(\omega t + \varphi)$$

Usando identidades trigonométricas:

$$\text{sen} \alpha \text{sen} \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)]$$

na expressão de potência:

$$p = \frac{V_m I_m}{2} [\cos(\omega t - \omega t - \varphi) - \cos(\omega t + \omega t + \varphi)] = \frac{V_m I_m}{\sqrt{2}} [\cos(-\varphi) - \cos(2\omega t + \varphi)]$$

por que:

$$V = V_m / \sqrt{2}, I = I_m / \sqrt{2}, e \cos \varphi = \cos (-\varphi)$$

$$p = V I \cos \varphi - V I \cos(2\omega t + \varphi) \quad [\text{Eq. 1}]$$

O segundo termo da eq. 1 representa uma onda cossenoidal negativa com o dobro da frequência da tensão aplicada; já que o valor médio de uma onda cossenoidal é zero, esse termo não contribui na potência média. Todavia, o primeiro termo é de particular importância porque os termos V , I , e $\cos \varphi$ são constantes e não mudam ao longo do tempo. De fato, pode-se perceber no gráfico da Equação 1,

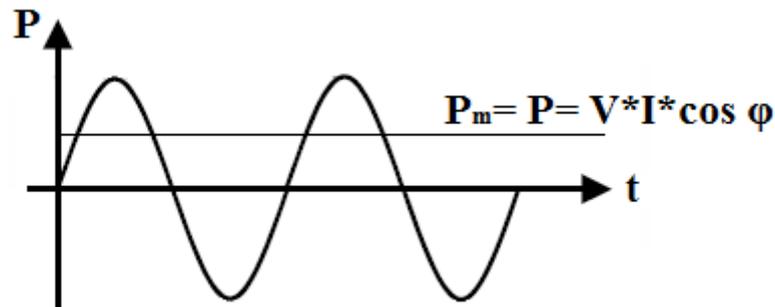


Figura 2: Potência média [2]

que o termo constante $V I \cos \varphi$ é o valor médio da potência instantânea. Assim, o valor médio da potência, P , é dado por:

$$P = VI \cos \varphi \quad [\text{Eq. 2}]$$

onde V e I são os valores eficazes de tensão e corrente e φ é o ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente. Sendo que o ângulo de defasagem de um circuito está sempre entre $\pm 90^\circ$, então $\cos \varphi \geq 0$ e $P \geq 0$.

Em casos especiais de somente resistências ou somente reatância, a eq. 2, se reduz a $P = V I$ e $P = 0$.

O termo $\cos \varphi$ é chamado de fator de potência do circuito, e o ângulo é às vezes conhecido como ângulo do fator de potência. Em um circuito indutivo, onde a corrente está atrasada da tensão, o fator de potência é descrito como um fator de potência atrasado. Em um

circuito capacitivo, onde a corrente está adiantada da tensão, o fator de potência é dito fator de potência adiantado [2].

Com o produto VI na eq. 2 não representa qualquer potência média em watts ou potência reativa em Var's, ele é definido por um novo termo, potência aparente. O produto VI , chamado potência aparente, tem como unidade volt-ampère (VA) e é indicado pela letra-símbolo S . Assim:

$$P = S \cos \varphi \quad [\text{Eq. 3}]$$

A eq. 3 sugere uma relação de Pitágoras entre a potência ativa e a potência aparente. Lembrando de que o circuito RL série possui um diagrama fasorial de tensão que forma um triângulo retângulo, como mostra a figura 3:

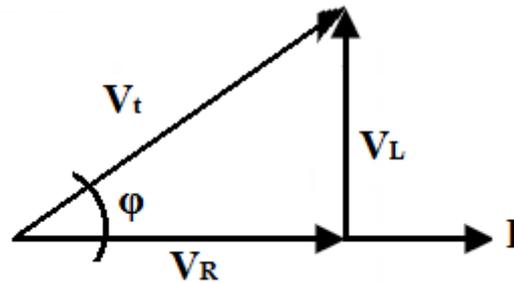


Figura 3: Diagrama fasorial das tensões [2]

Multiplicando cada lado pelo módulo de uma corrente I , encontra-se um triângulo similar, onde a potência ativa se encontra ao longo do eixo horizontal, potência reativa ao longo do eixo vertical e a potência aparente é a hipotenusa. Um triângulo como este mostrado na figura 4:

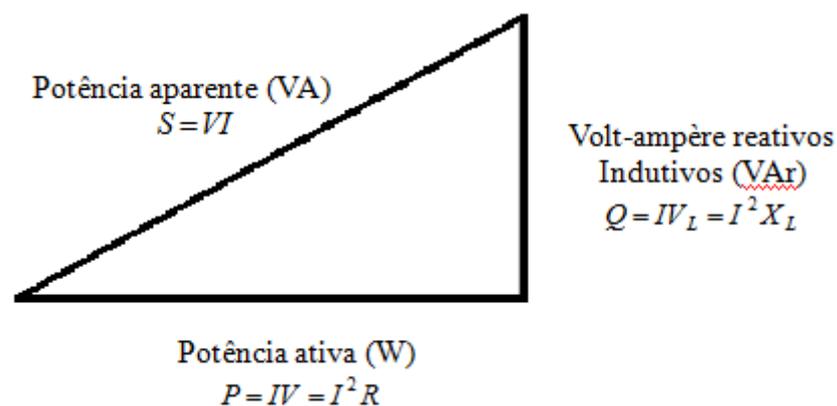


Figura 4: Triângulo das Potências com carga Indutiva [2]

É chamado triângulo de potências. Então:

$$Q = S \operatorname{sen} \varphi$$

e

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Observa-se que o triângulo de potência é semelhante ao triângulo das impedâncias para uma impedância RL série; isto é, o triângulo é formado abaixo do eixo horizontal. Se existir ainda um circuito paralelo RL e formar um triângulo de potência semelhante ao triângulo de admitância, o qual se situa abaixo do eixo horizontal, teremos o triângulo de potência da figura 5:

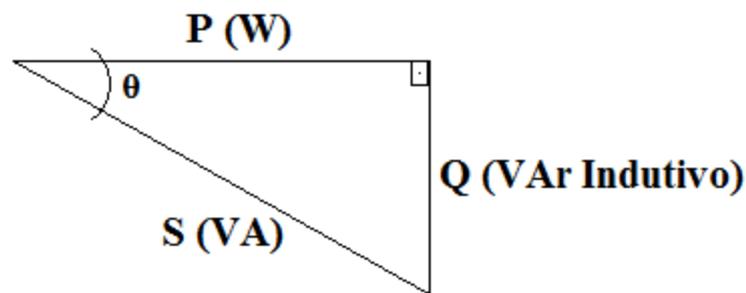


Figura 5: Triângulo das potências (Indutivo) [2]

A diferença que surge é que o triângulo de potência é baseado no diagrama fasorial, onde a corrente é a referência, e o triângulo de potência semelhante é baseado no diagrama fasorial, onde a tensão é a referência. Ambos os triângulos estão corretos, embora seja adotado um tipo para ser utilizado para ambos os circuitos RL série e paralelo, e o outro seja usado para ambos os circuitos RC série e paralelo [2].

Em acordo com a afirmação que o circuito indutivo gera um atraso no fator de potência, triângulo de potência baseado será utilizado apenas para caso indutivo. Então o triângulo será usado para o caso capacitivo, que adianta o fator de potência, θ . (figura 6).

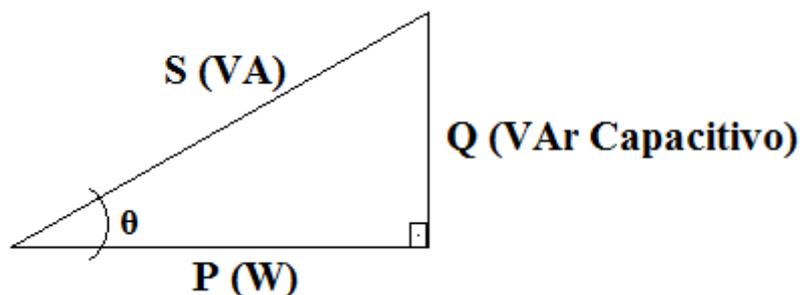


Figura 6: Triângulo das potências (Capacitivo) [2]

Se um circuito possui tanto indutâncias quanto capacitâncias, a potência reativa total Q_T , é a diferença entre a potência reativa capacitiva e a potência reativa indutiva. Neste caso a capacitância devolve energia do circuito enquanto a indutância simultaneamente toma energia para o circuito. Certa parte da potência reativa é assim trocada ou retornada e assim por diante entre a capacitância e a indutância.

Obviamente, quando duas ou mais resistências estão em um circuito CA, a potência média total, P_T , é igual à soma das potências individuais [2].

2.4.1. Energia reativa

A potência elétrica aparente (kVA), gerada e transmitida às cargas através dos circuitos elétricos, é composta pela soma vetorial da potência ativa (kW) e da potência reativa (kVAr).

A potência ativa é a única que é transformada em trabalho útil (produção de movimento, calor, luz e etc.).

A potência reativa é parte da potência aparente, e que não pode ser transformada em trabalho, mas que está sempre presente nos circuitos elétricos, associada à criação e manutenção de campos eletromagnéticos em diversos componentes do sistema, tais como nos transformadores, motores, condutores, reatores de lâmpadas de descarga e etc.

A energia reativa (kVArh) que circula pelos sistemas elétricos, das usinas geradoras até as instalações consumidoras, faz com que haja um aumento da potência dos geradores e transformadores e reduz a capacidade de condução de corrente dos sistemas de transmissão e de distribuição [2].

A energia reativa não é tarifada pelas concessionárias, uma vez que a utilização de energia é avaliada apenas pela energia ativa (kWh) e demanda de potência ativa (kW), no entanto, se a energia reativa consumida pela instalação consumidora não se mantiver dentro do limite de referência do fator de potência estabelecidos nas “Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica”, Portaria Nº 456 de 29/11/2000 editada pela ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, o consumidor pagará valores adicionais denominados como “excedentes” de consumo reativo e de demanda de potência reativa [2].

“Potência reativa de um circuito percorrido por uma corrente alternada senoidal com valor eficaz de 1 ampère, sob uma tensão elétrica com valor eficaz de 1 volt, defasada de $\pi/2$ radianos em relação à corrente” [2].

No geral, a maioria das cargas de uma instalação elétrica são indutivas, ou seja, são consumidoras de energia reativa, estas cargas consomem energia reativa porque precisam de um campo eletromagnético para funcionar, ou seja, elas são responsáveis pela magnetização dos enrolamentos dos motores, transformadores, reatores, entre outros que são equipamentos que necessitam de “energia magnetizante” para transformar parte da energia recebida em trabalho útil, ou seja, em energia mecânica. Esta parcela de energia trocada entre o gerador e o receptor, que não é propriamente consumida como energia, é a energia reativa [4].

Como visto anteriormente, esta energia reativa impõe um atraso de corrente em relação à tensão ou adiantamento em relação à tensão. Esta é a principal razão de corrigir o fator de potência.

Para [4], a correção do fator de potência feita através, principalmente, da instalação de capacitores tem sido alvo de muita atenção das áreas de projeto, manutenção e finanças de empresas interessadas em racionalizar o consumo de seus equipamentos elétricos. Objetivando otimizar o uso da energia elétrica gerada no país, atualmente a ANEEL, através do decreto Nº 479 de 20 de março de 1992 estabeleceu que o fator de potência mínimo devesse ser de, no mínimo, 0,92.

Com o avanço da tecnologia e com o aumento das cargas não lineares nas instalações elétricas, a correção do fator de potência passa a exigir alguns cuidados especiais [2].

2.5. Correção do fator de potência

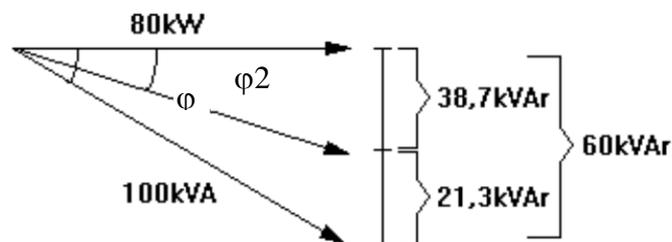
Para se fazer a correção do fator de potência de uma instalação não existe uma regra geral, cada caso é feito uma análise criteriosa da utilização da demanda e energia reativas e das condições operacionais.

Assim, as recomendações e considerações feitas neste capítulo têm por objetivo orientar os técnicos e engenheiros sobre algumas das práticas usuais empregadas, nos cálculos de correção do fator de potência [2].

Em uma ilustração de como se corrige o fator de potência, num caso simples, consideremos uma instalação de 80kW, que tenha um fator de potência médio igual a 80% e queira corrigir para 90%. Pede-se, a determinação da potência reativa a ser inserida nesta instalação para se obter o resultado desejado [2].

Solução:

Para um melhor entendimento utilizaremos o método de resolução feito através do triângulo de potências:



Com um $\cos\phi_1 = 0,80$ tem-se;

$$kW = 80$$

$$kVA = \frac{80}{0,8} = 100$$

$$kVAr = \sqrt{(100)^2 - (80)^2} = 60$$

Com um $\cos\phi_2 = 0,90$ tem-se;

$$kW = 80$$

$$kVA = \frac{80}{0,9} = 88,9$$

$$kVAr = \sqrt{(88,9)^2 - (80)^2} = 38,7$$

Assim:

$$kVAr \text{ necessários} = 60 - 38,7 = 21,3$$

Na prática, metodologias mais simples são utilizadas, como exemplo, tabelas que determinam multiplicadores, permite a determinação dos kVAr necessários a partir do valor em kW pela aplicação da fórmula:

$$\text{kVAr}(\text{necessários}) = \text{kW} \cdot (\text{tg}\varphi_1 - \text{tg}\varphi_2)$$

Onde os valores de $\text{tg}\varphi_1 - \text{tg}\varphi_2$ são tabelados conforme tabela 6.

Ilustrando o uso da tabela 5, o exercício acima seria resolvido da seguinte maneira:

Da tabela 5, obtém-se o valor 0,266 para o multiplicador, que devemos aplicar sobre a potência ativa (kW) da instalação, para obter a correção de 0,80 para 0,90.

$$\text{kVAr necessário} = 0,266 \times 80 = 21,3$$

Os valores de $\text{tg}\varphi_1$ e de $\text{tg}\varphi_2$ podem ser obtidos também através da tabela 6 que ilustra as tangentes trigonométricas para vários valores de fator de potência, contendo até algarismos dos milésimos do fator de potência, que permitem maior precisão na determinação dos kVAr necessários.

Um exemplo pode-se determinar os kVAr necessários para corrigir o fator de potência de uma carga de 100kW, de 0,836 para 0,932, a partir da tabela 7:

$$\text{kVAr}(\text{necessários}) = \text{kW} \cdot (\text{tg}\varphi_1 - \text{tg}\varphi_2)$$

$$\text{tg}\varphi_1 = \text{tangente correspondente ao fator de potência } 0,836 = 0,656$$

$$\text{tg}\varphi_2 = \text{tangente correspondente ao fator de potência } 0,932 = 0,389$$

$$\text{kVAr} = 100 \times (0,656 - 0,389) = 100 \times 0,267 = 26,7 \text{ kVAr}$$

Tabela 6: tangentes trigonométricas correspondentes aos vários valores de fator de potência

[2]

FATOR DE POTÊNCIA	TANGENTES TRIGONOMÉTRICAS									
	ALGARISMOS DOS MILÉSIMOS NO FATOR DE POTÊNCIA									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,99	0,143	0,135	0,127	0,119	0,110	0,100	0,090	0,078	0,063	0,045
0,98	0,203	0,198	0,192	0,187	0,181	0,175	0,169	0,163	0,156	0,150
0,97	0,251	0,246	0,242	0,237	0,233	0,228	0,223	0,218	0,213	0,208
0,96	0,292	0,288	0,284	0,280	0,276	0,272	0,268	0,264	0,259	0,255
0,95	0,329	0,325	0,322	0,318	0,314	0,310	0,307	0,303	0,299	0,296
0,94	0,363	0,360	0,356	0,353	0,350	0,346	0,343	0,339	0,339	0,332
0,93	0,395	0,392	0,389	0,386	0,383	0,379	0,376	0,373	0,370	0,366
0,92	0,426	0,423	0,420	0,417	0,414	0,411	0,408	0,405	0,402	0,398
0,91	0,456	0,453	0,450	0,447	0,444	0,441	0,438	0,435	0,432	0,429
0,90	0,484	0,482	0,479	0,476	0,473	0,470	0,467	0,464	0,461	0,459
0,89	0,512	0,510	0,507	0,504	0,501	0,498	0,495	0,493	0,490	0,487
0,88	0,440	0,537	0,534	0,532	0,529	0,526	0,523	0,521	0,518	0,515
0,87	0,567	0,564	0,561	0,559	0,556	0,553	0,551	0,548	0,545	0,543
0,86	0,593	0,591	0,588	0,585	0,583	0,580	0,577	0,575	0,572	0,569
0,85	0,620	0,617	0,615	0,612	0,609	0,607	0,604	0,601	0,599	0,596
0,84	0,646	0,643	0,641	0,638	0,636	0,633	0,630	0,628	0,625	0,622
0,83	0,672	0,669	0,667	0,664	0,662	0,659	0,656	0,654	0,651	0,649
0,82	0,698	0,695	0,693	0,690	0,688	0,685	0,682	0,680	0,677	0,675
0,81	0,724	0,721	0,719	0,716	0,714	0,711	0,708	0,706	0,703	0,701
0,80	0,750	0,747	0,745	0,742	0,740	0,737	0,734	0,732	0,729	0,727
0,79	0,776	0,774	0,771	0,768	0,766	0,763	0,760	0,758	0,755	0,753
0,78	0,802	0,800	0,797	0,794	0,792	0,789	0,787	0,784	0,781	0,779
0,77	0,829	0,826	0,823	0,821	0,818	0,815	0,813	0,810	0,808	0,805
0,76	0,855	0,853	0,850	0,847	0,845	0,842	0,839	0,837	0,834	0,831
0,75	0,882	0,879	0,877	0,874	0,871	0,869	0,866	0,863	0,861	0,858
0,74	0,909	0,906	0,904	0,901	0,898	0,895	0,893	0,890	0,887	0,885
0,73	0,936	0,934	0,931	0,928	0,925	0,923	0,920	0,917	0,914	0,912
0,72	0,964	0,961	0,958	0,956	0,953	0,950	0,947	0,945	0,942	0,939
0,71	0,992	0,989	0,986	0,983	0,981	0,978	0,975	0,972	0,970	0,967
0,70	1,020	1,017	1,015	1,012	1,009	1,006	1,003	1,000	0,997	0,995
0,69	1,049	1,046	1,043	1,040	1,037	1,035	1,032	1,029	1,026	1,023
0,68	1,078	1,075	1,072	1,069	1,067	1,064	1,061	1,058	1,055	1,052
0,67	1,108	1,105	1,102	1,099	1,096	1,093	1,090	1,087	1,084	1,081
0,66	1,138	1,135	1,132	1,129	1,126	1,123	1,120	1,117	1,114	1,111
0,65	1,169	1,166	1,163	1,160	1,157	1,154	1,151	1,148	1,144	1,141
0,64	1,201	1,197	1,194	1,191	1,188	1,185	1,182	1,179	1,175	1,172
0,63	1,233	1,230	1,226	1,223	1,220	1,217	1,213	1,210	1,207	1,204
0,62	1,266	1,262	1,259	1,256	1,252	1,249	1,246	1,243	1,239	1,236
0,61	1,299	1,296	1,292	1,289	1,286	1,282	1,279	1,275	1,272	1,269

Tabela 7: tangentes trigonométricas correspondentes aos vários valores de fator de potência (cont.) [2]

FATOR DE POTÊNCIA	TANGENTES TRIGONOMÉTRICAS									
	ALGARISMOS DOS MILÉSIMOS NO FATOR DE POTÊNCIA									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,60	1,333	1,330	1,326	1,323	1,320	1,316	1,313	1,309	1,306	1,302
0,59	1,369	1,365	1,361	1,358	1,254	1,351	1,347	1,344	1,340	1,337
0,58	1,405	1,401	1,397	1,394	1,390	1,386	1,383	1,379	1,376	1,372
0,57	1,442	1,438	1,434	1,430	1,427	1,423	1,419	1,416	1,412	1,408
0,56	1,480	1,476	1,472	1,468	1,464	1,460	1,457	1,453	1,449	1,445
0,55	1,519	1,515	1,511	1,507	1,503	1,499	1,495	1,491	1,487	1,483
0,54	1,559	1,555	1,551	1,547	1,542	1,538	1,534	1,530	1,526	1,523
0,53	1,600	1,596	1,592	1,588	1,583	1,579	1,575	1,571	1,567	1,563
0,52	1,643	1,638	1,634	1,630	1,626	1,621	1,617	1,613	1,608	1,604
0,51	1,687	1,682	1,677	1,673	1,669	1,665	1,660	1,656	1,651	1,647
0,50	1,732	1,727	1,723	1,718	1,714	1,709	1,705	1,700	1,696	1,691
0,49	1,779	1,774	1,770	1,765	1,760	1,755	1,751	1,746	1,741	1,737
0,48	1,828	1,823	1,818	1,813	1,808	1,803	1,798	1,794	1,789	1,784
0,47	1,878	1,873	1,868	1,863	1,858	1,853	1,848	1,843	1,838	1,833
0,46	1,930	1,925	1,920	1,914	1,909	1,904	1,899	1,894	1,888	1,883
0,45	1,985	1,979	1,974	1,968	1,963	1,957	1,952	1,946	1,941	1,936
0,44	2,041	2,035	2,030	2,024	2,018	2,012	2,007	2,001	1,996	1,990
0,43	2,100	2,094	2,088	2,082	2,076	2,070	2,064	2,058	2,052	2,047
0,42	2,161	2,155	2,148	2,142	2,136	2,130	2,124	2,118	2,112	2,106
0,41	2,225	2,218	2,212	2,205	2,199	2,192	2,186	2,180	2,173	2,167
0,40	2,291	2,185	2,278	2,271	2,264	2,258	2,251	2,244	2,238	2,231
0,39	2,361	2,354	2,347	2,340	2,333	2,326	2,319	2,312	2,305	2,298
0,38	2,434	2,427	2,419	2,412	2,405	2,397	2,390	2,383	2,375	2,368
0,37	2,511	2,503	2,495	2,488	2,480	2,472	2,464	2,457	2,449	2,442
0,36	2,592	2,583	2,575	2,567	2,559	2,551	2,543	2,535	2,527	2,519
0,35	2,676	2,668	2,659	2,651	2,642	2,633	2,625	2,617	2,608	2,600
0,34	2,766	2,757	2,748	2,739	2,730	2,721	2,712	2,703	2,694	2,685
0,33	2,861	2,851	2,841	2,832	2,822	2,813	2,803	2,794	2,784	2,775
0,32	2,961	2,950	2,940	2,930	2,920	2,910	2,900	2,890	2,880	2,870
0,31	3,067	3,056	3,045	3,034	3,024	3,013	3,002	2,992	2,981	2,971
0,30	3,180	3,168	3,157	3,145	3,134	3,122	3,111	3,100	3,089	3,078
0,29	3,300	3,288	3,275	3,263	3,251	3,239	3,227	3,215	3,203	3,191
0,28	3,429	3,415	3,402	3,398	3,376	3,363	3,351	3,338	3,325	3,313
0,27	3,566	3,552	3,538	3,524	3,510	3,496	3,483	3,469	3,455	3,442
0,26	3,714	3,699	3,683	3,668	3,653	3,639	3,624	3,610	3,595	3,580
0,25	3,873	3,857	3,840	3,824	3,808	3,792	3,776	3,761	3,745	3,729
0,24	4,045	4,027	4,009	3,992	3,975	3,957	3,940	3,923	3,906	3,890
0,23	4,231	4,212	4,193	4,174	4,155	4,136	4,118	4,099	4,081	4,063
0,22	4,434	4,413	4,392	4,372	4,351	4,330	4,310	4,291	4,270	4,251
0,21	4,656	4,632	4,610	4,587	4,565	4,542	4,520	4,499	4,477	4,456
0,20	4,899	4,873	4,848	4,824	4,799	4,775	4,750	4,726	4,703	4,679

2.6. Estudo da correção do fator de potência

A correção do fator de potência tem por objetivo, visar o dimensionamento de capacitores, compreendendo a definição de sua potência e tensão nominais, a sua localização física e a sua característica de atuação (modo fixo ou automático) e deve ser elaborado a partir da disponibilidade das seguintes informações principais [2]:

- Realização das medições de demanda e fator de potência nos locais de interesse (por exemplo: secundário do transformador abaixador da instalação consumidora) em intervalos de 1 hora, em conformidade com os critérios estabelecidos pela

regulamentação da ANEEL, durante um período representativo da operação do sistema, contemplando a variação da carga em seus níveis máximo e mínimo;

- Medições nos capacitores existentes de tensão e corrente, para verificar se os mesmos operam dentro das suas condições normais de trabalho;
- Análise das contas de energia por um período mínimo de 12 meses (consumo e demanda ativa e reativa, fator de potência, fator de carga, tarifas de ultrapassagem da demanda contratada; adequação do tipo de tarifação adotado: convencional ou horo-sazonal azul ou verde) [2];
- Diagrama elétrico unifilar do sistema;
- Levantamento das características operativas do sistema, turnos de trabalho, previsão de inclusão ou exclusão de cargas significativas, planos de expansão e etc.[2];
- Levantamento no local, da disponibilidade de espaço físico para instalação dos capacitores;
- Plantas de arranjo físico da subestação principal e subestações de distribuição internas, caso existentes;
- Identificação das cargas de maior porte (regime de operação, características elétricas e localização);
- Identificação de medidas corretivas a serem adotadas para a melhoria do fator de potência, que não dependam da instalação de bancos de capacitores (por exemplo: substituição de motores super ou subdimensionados, substituição de reatores de lâmpadas de descarga por reatores de alto fator de potência, desligamento de transformadores operando em vazio, remanejamento da operação de determinadas cargas para outros períodos do dia e etc.).

Coletadas as informações, dá-se início ao estudo com as análises das causas, para em seguida se proceder a um diagnóstico que as identifique e indique as melhores soluções.

É bom salientar, que a correção do fator de potência, pode ser feita, até certo ponto, corrigindo-se as causas, o que levará à utilização de equipamentos de correção com menor potência.

Posteriormente, deverão ser feitas avaliações, sobre a melhor localização dos equipamentos de correção, levando-se em conta, os aspectos econômicos.

Finalmente, os resultados dos cálculos são analisados em conjunto, para que através de uma avaliação econômica das alternativas levantadas, se façam as recomendações finais.

Ainda é oportuno observar que para as instalações de grande porte, o Estudo de Fluxo de Carga, que faz uso de programa computacional específico, pode se apresentar como ferramenta auxiliar poderosa na pesquisa das causas e na análise das medidas a serem recomendadas para a correção do fator de potência [2].

3. QUALIDADE DE ENERGIA

Para [3], o conceito de Qualidade de Energia está relacionado a um conjunto de alterações que podem ocorrer no sistema elétrico. Uma boa definição para o que diz respeito ao problema de qualidade de energia é: "Qualquer problema de energia manifestado na tensão, corrente ou nas variações de frequência que resulte em falha ou má operação de equipamentos de consumidores". Essas alterações podem ocorrer em várias partes do sistema de energia, seja nas instalações de consumidores ou no sistema supridor da concessionária.

Estes problemas tem se agravado muito rapidamente em todo o mundo por diversas razões, das quais destacamos duas:

- Instalação cada vez maior de cargas não-lineares, devido ao crescente interesse pela racionalização e conservação da energia elétrica, tem aumentado o uso de equipamentos que, em muitos casos, aumentam os níveis de distorções harmônicas e podem levar o sistema a condições de ressonância.
- Maior sensibilidade dos equipamentos instalados aos efeitos dos fenômenos (distúrbios) de qualidade de energia. Para [3], em alguns ramos de atividade, como as indústrias têxtil, siderúrgica e petroquímica, os impactos econômicos da qualidade da energia são enormes. Nestes setores, uma interrupção elétrica de até 1 minuto pode ocasionar prejuízos de até US\$ 500 mil. E diante deste potencial de prejuízos possíveis, fica evidente a importância de uma análise e diagnóstico da qualidade da energia elétrica, no intuito de determinar as causas e as conseqüências dos distúrbios no sistema, além de apresentar medidas técnicas e economicamente viáveis para solucionar o problema.

3.1. Normas relacionadas com qualidade de energia

A Europa é a região do planeta mais avançada no quesito normas de qualidade de energia, uma vez que a norma EN50160 foi oficialmente adotada por vários países. Nos EUA, muita concessionária tem usado normas como a IEEE 519 apenas como referência, raramente incluindo cláusulas sobre este assunto nos contratos com clientes [3].

Entretanto, o clima de desregulamentação pode significar que contratos com cláusulas de qualidade de energia possam vir a ser comuns no futuro.

Segue lista de normas e entidades conforme [3]:

- EN50160: é uma nova norma que cobre flicker, interharmônicas, desvios e ou

variações de tensão, e muito mais.

- IEC 61000-4-15: é uma norma de medição de flicker que inclui especificações para medidores.
- IEC 61000-4-7: descreve uma técnica de medição padrão para harmônicas.
- IEEE 519 (1992): é uma prática recomendada pela IEEE, utilizada principalmente por concessionárias de energia nos EUA. Descreve níveis aceitáveis de harmônicas para o ponto de entrega de energia pela concessionária.
- IEEE 1159 (1995): é uma prática recomendada pela IEEE para monitoração e interpretação apropriada dos fenômenos que causam problemas de qualidade de energia.
- CBEMA: Computer and Business Equipment Manufacturers Association. A CBEMA virou ITI em 1994. A curva CBEMA (figura13) define os níveis de suportabilidade de equipamentos, em função da magnitude da tensão e da duração do distúrbio. Distúrbios que caem fora da curva podem causar danos aos equipamentos.
- ITI: Information Technology Industry Council. Esse grupo trabalha para defender os interesses da indústria de informática.

3.2. Definições dos itens de qualidade

Segundo [3], na ótica do consumidor, talvez seja mais simples e adequado utilizarmos simplesmente a palavra "distúrbios" para englobar todos os fenômenos que afetam a qualidade da energia elétrica.

Estes "distúrbios" podem se originar na energia elétrica entregue pela concessionária de energia, ou na rede interna de distribuição (incluindo equipamentos ali instalados) do próprio consumidor.

Para [3], os acadêmicos e especialistas, no entanto, classificam os itens de qualidade ("distúrbios") conforme segue:

- Transitórios, dos tipos impulsivos ou oscilatórios.
- Variações de tensão de curta duração, que podem ser instantâneas, momentâneas ou temporárias.
- Variações de tensão de longa duração, que podem ser de três tipos: interrupções, subtensões ou sobretensões sustentadas.
- Desequilíbrios de tensão, causados por má distribuição de cargas monofásicas, e que fazem surgir no circuito tensões de sequência negativa.

- Distorções da forma de onda, que podem ser classificadas em cinco tipos: nível cc, harmônicos, interharmônicos, "notching" e ruídos.
- Oscilações de tensão, que são variações sistemáticas dos valores eficazes da tensão de suprimento (dentro da faixa compreendida entre 0,95 e 1,05 pu), e que podem ser aleatórias, repetitivas ou esporádicas.
- Variações da frequência do sistema, que são definidas como sendo desvios no valor da frequência fundamental deste sistema (50 ou 60Hz).

As figuras a seguir mostram as formas de onda da corrente transitória proveniente de descargas atmosféricas (Figura7) e as formas típicas dos itens de qualidade mais comuns (Figura 8) [3]:

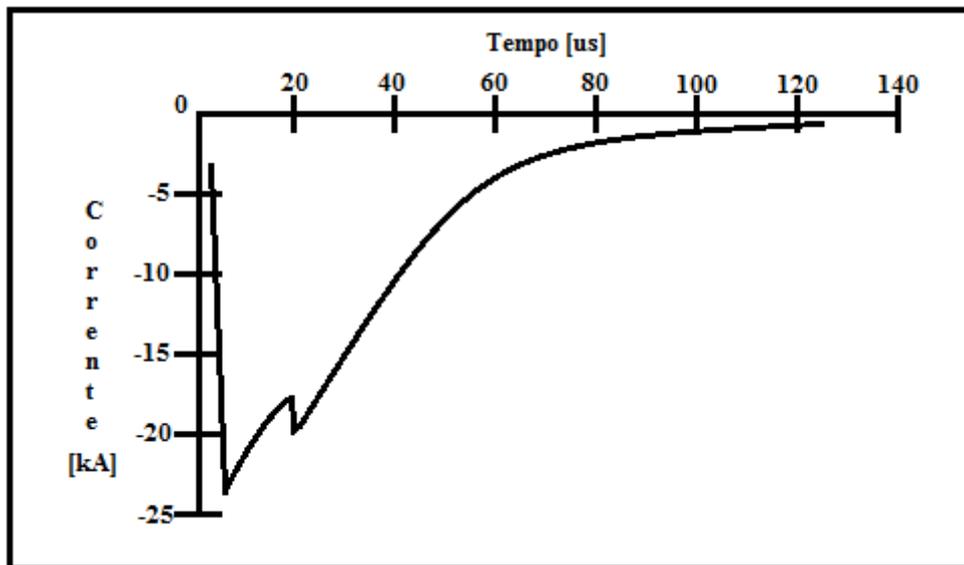


Figura 7: Gráfico da corrente transitória impulsiva oriunda de uma descarga atmosférica [3]

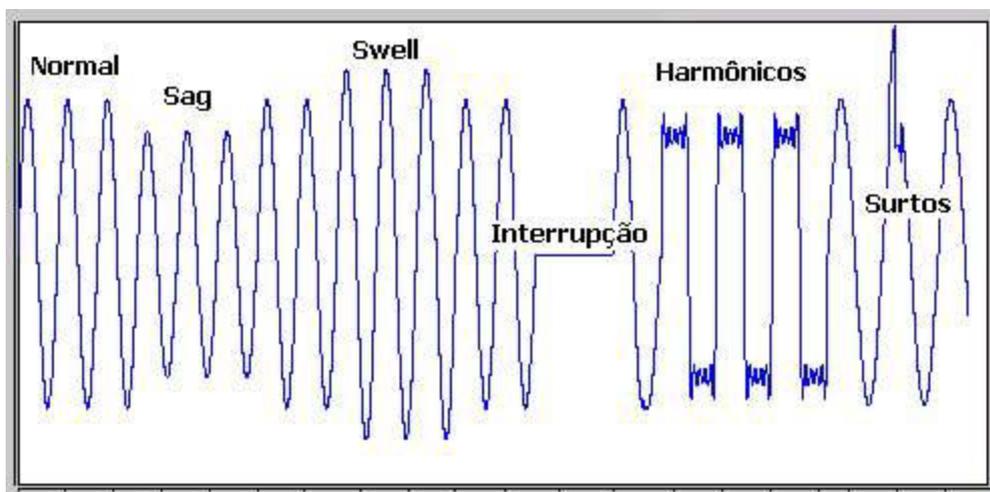


Figura 8: Forma de onda dos itens de qualidade de energia [3]

3.2.1. Transitórios

Os transitórios são fenômenos eletromagnéticos oriundos de modificações e alterações súbitas nas condições normais de operação de um sistema de energia elétrica [3]. Na prática, a duração de um transitório é muito pequena, mas de grande importância, uma vez que submetem equipamentos, a grandes solicitações de tensão e ou corrente. Existem dois tipos de transitórios: os impulsivos, causados por descargas atmosféricas, e os oscilatórios, causados por chaveamentos.

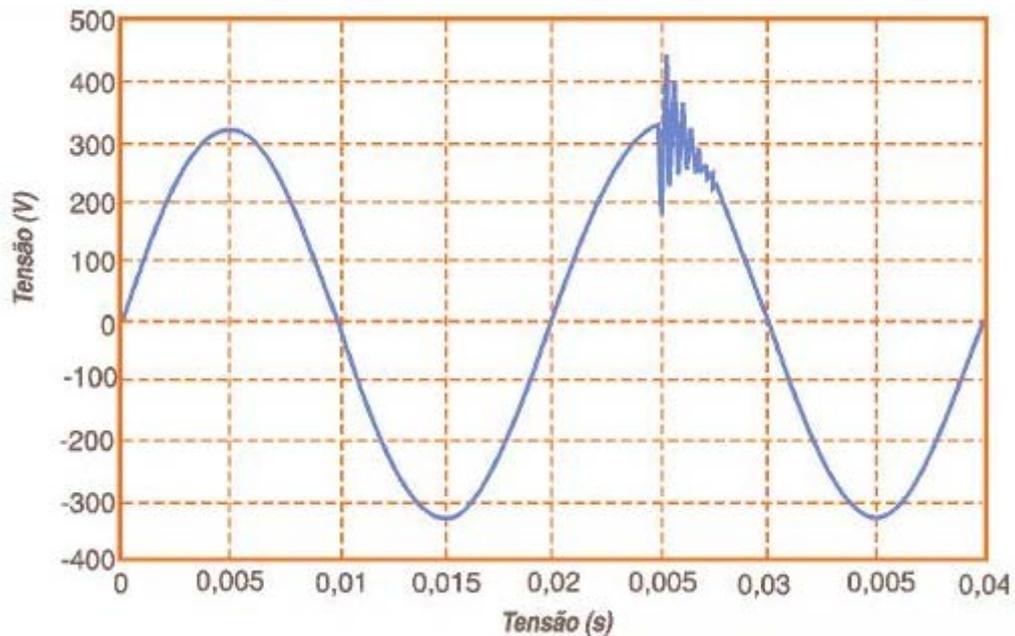


Figura 9: Forma de onda do transitório causado por chaveamento de um banco de capacitores [5]

Um transitório impulsivo [3], (normalmente causado por descargas atmosféricas) pode ser definido como uma alteração repentina nas condições de regime permanente da tensão, corrente ou ambas, caracterizando-se por apresentar impulsos unidirecionais em polaridade (positivo ou negativo) e com frequência bastante diferente daquela da rede elétrica.

Em sistemas de distribuição, as descargas atmosféricas procuram o caminho mais provável, que é através de um condutor fase, no primário ou no secundário, causando altas sobretensões no sistema. Uma descarga diretamente na fase, pode gerar também subtensões de curta duração ("sag") e interrupções. Altas sobretensões transitórias podem também ser geradas por descargas que fluem ao longo do condutor terra, causando os seguintes problemas [3]:

- Elevação do potencial do terra ali instalado, em relação a outros terras, em vários kV.

Equipamentos eletrônicos conectados entre duas referências de terra, tais como computadores conectados a modems, podem ser danificados quando submetidos a altos níveis de tensão.

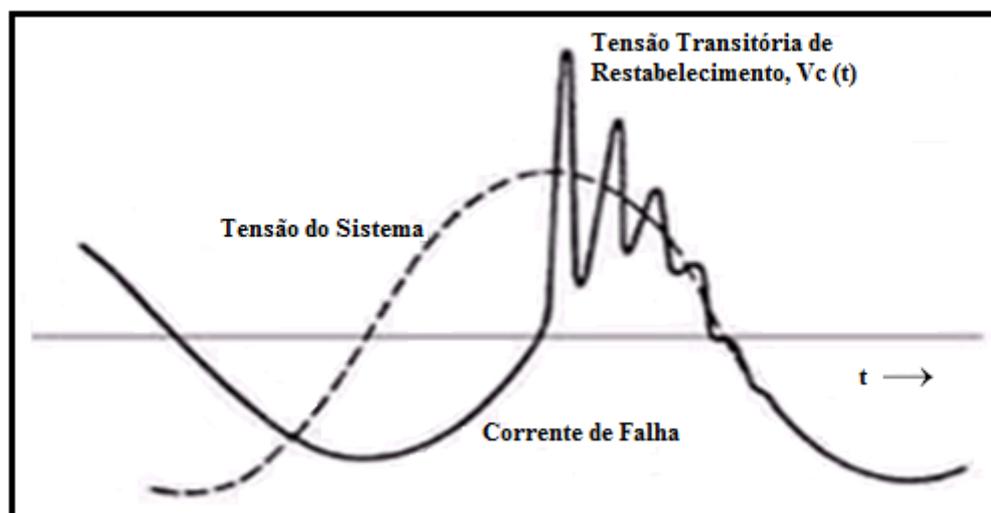


Figura 10: Forma de onda da sobre-tensão decorrente da eliminação de uma falha [3]

- Quando as correntes passam pelos cabos a caminho do terra causam uma alta indução nos condutores fase. Um transitório oscilatório se caracteriza por uma mutação imediata nas condições de regime permanente da tensão e ou corrente possuindo valores de polaridade positiva e negativa. Estes transitórios normalmente são decorrentes de energização de linhas, corte de corrente indutiva, eliminação de faltas, chaveamento de bancos de capacitores e transformadores, etc. Os transitórios oscilatórios de média frequência podem ser causados por: energização de capacitor "back-to-back" (resultando em correntes transitórias de dezenas de kHz), chaveamento de disjuntores para eliminação de faltas e também como resposta do sistema a um transitório impulsivo [3].

As variações de tensão de curta duração podem ser caracterizadas por alterações instantâneas, momentâneas ou temporárias. Tais variações de tensão são, geralmente, causadas pela energização de grandes cargas que requerem altas correntes de partida, ou por intermitentes falhas nas conexões dos cabos de sistema. Dependendo das condições do sistema e do local da falha, o resultado pode ser uma queda de tensão temporária ("sag"), uma elevação de tensão ("swell"), ou mesmo uma interrupção completa do sistema elétrico.

Chama-se interrupção de curta duração quando a tensão de suprimento cai para um valor menor que 0,1 pu por um período de tempo não superior a 1 minuto, o que geralmente

ocorre por faltas no sistema de energia, falhas de equipamentos e mau funcionamento de sistemas de controle [3].

Algumas interrupções podem ser precedidas por um "sag" quando estas são devidas a faltas no sistema supridor. O "sag" ocorre no período de tempo entre o início de uma falta e a operação do dispositivo de proteção do sistema [3].

3.2.2. Interrupções e Sag's

Analisando, por exemplo, o caso de um curto-circuito no sistema supridor da concessionária. Assim, que o dispositivo de proteção detecta a corrente de curto-circuito, ele inicia a desenergização da linha com o objetivo de eliminar a corrente de falta. Então, somente após um curto intervalo de tempo, o religamento automático do disjuntor ou religador é efetuado [3].

Entretanto, pode ocorrer que, após o religamento, o curto persista e uma seqüência de religamentos pode ser efetuada com o intuito de eliminar a falta. A figura abaixo ilustra uma seqüência de religamentos com valores típicos de ajustes do atraso. Sendo a falta de caráter temporário, o equipamento de proteção não completará a seqüência de operações programadas e o fornecimento de energia não é interrompido. Assim, a maior parte dos consumidores (principalmente os residenciais) não sentirá os efeitos da interrupção [3].

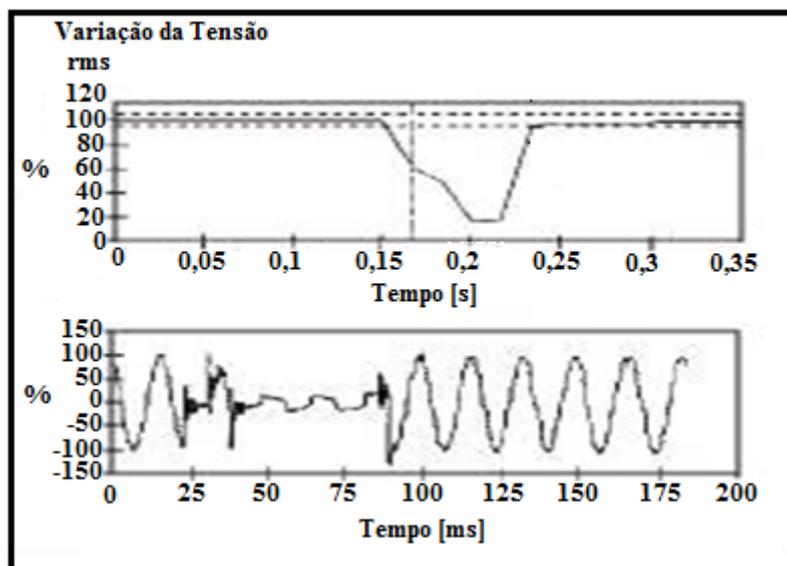


Figura 11: Forma de onda do SAG causado por curto fase-terra [3]

Porém, algumas cargas mais sensíveis (ex: computadores e outras cargas eletrônicas) estarão sujeitas a tais efeitos, a menos que a instalação seja dotada de unidades UPS (no-

breaks), que evitarão maiores consequências na operação destes equipamentos [3].

Dados estatísticos revelam que 75% das faltas em redes aéreas são de natureza temporária [3].

No passado, este percentual não era considerado preocupante. Entretanto, com o crescente emprego de cargas eletrônicas, como inversores, computadores, etc., este número passou a ser relevante nos estudos de otimização do sistema, pois é, agora, tido como responsável pela saída de operação de diversos equipamentos, interrompendo o processo produtivo, e causando enormes prejuízos às indústrias. Uma queda de tensão de curta duração, também chamada de "sag", é caracterizada por uma redução no valor eficaz da tensão, entre 0,1 e 0,9 pu, na frequência fundamental, com duração entre 0,5 ciclos e 1 minuto. A figura 11 ilustra uma subtensão de curta duração típica, causada por uma falta fase-terra. Observa-se um decréscimo de 80% na tensão por um período de aproximadamente 3 ciclos, até que o equipamento de proteção da subestação opere e elimine a corrente de falta [3].

3.2.3. Sobretensões

"SWELL" ou uma sobretensão de curta duração, é definida como um aumento entre 1,1 e 1,8 pu na tensão eficaz, na frequência da rede, com duração entre 0,5 ciclo a 1 minuto.

Os "swells" estão geralmente associados com condições de falta no sistema [3].

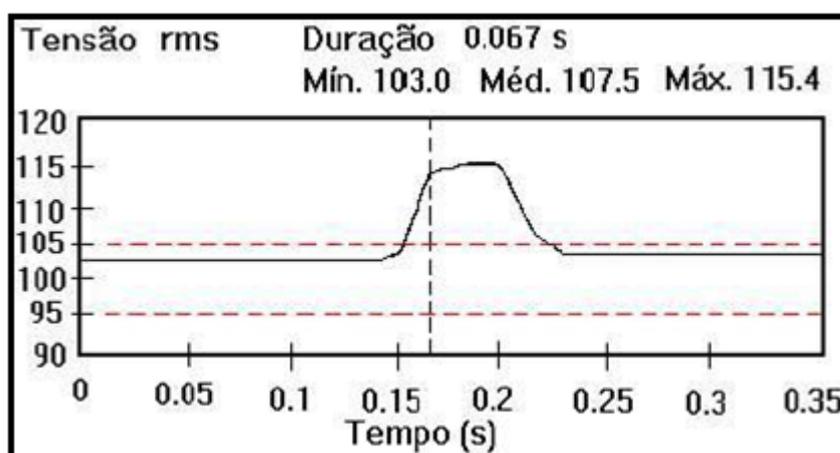


Figura 12: Forma de onda da sobre-tensão de curta duração [3]

A figura 13, ilustra um "swell" causado por uma falta fase-terra. Para [3], este fenômeno pode também estar associado à saída de grandes blocos de cargas ou à energização de grandes bancos de capacitores, porém, com uma incidência pequena se comparada com as

sobretensões provenientes de faltas fase-terra nas redes de transmissão e distribuição.

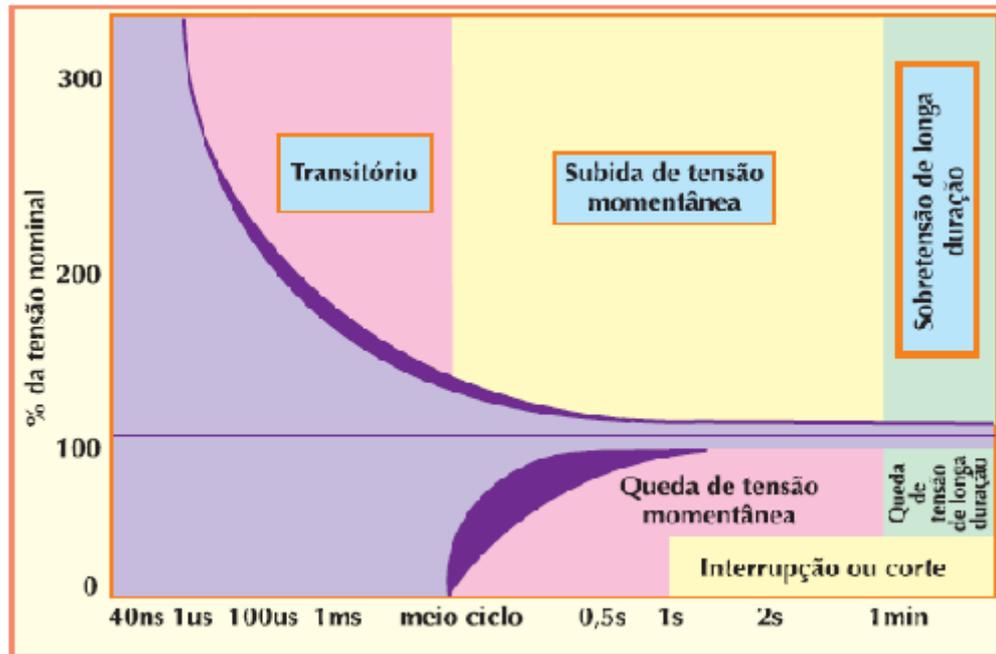


Figura 13: SWELL causado por uma falta fase-terra, Curva CBEMA [6]

As sobretensões de curta duração, se caracterizam pelas suas magnitudes (valores eficazes) e seu tempo de duração. A severidade de um "swell" durante uma condição de falta é função do local da falta, da impedância do sistema e do aterramento[3].

Sua duração está intimamente ligada aos ajustes dos dispositivos de proteção, à natureza da falta (permanente ou temporária) e à sua localização na rede elétrica. Como consequência das sobretensões de curta duração em equipamentos, pode-se citar falhas dos componentes, dependendo da frequência de ocorrência do distúrbio. Dispositivos eletrônicos incluindo ASD's, computadores e controladores eletrônicos, podem apresentar falhas imediatas durante estas condições. Transformadores, cabos, barramentos, dispositivos de chaveamento, TPs, TCs e máquinas rotativas podem ter a vida útil reduzida. Um aumento de curta duração na tensão em alguns relés pode resultar em má operação, enquanto outros podem não ser afetados. Um "swell" em um banco de capacitores pode, freqüentemente, causar danos no equipamento[3].

A preocupação principal recai sobre os equipamentos eletrônicos, uma vez que estas sobretensões podem vir danificar os componentes internos destes equipamentos, conduzindo-os às más operações, ou em casos extremos, à sua total inutilização. Vale ressaltar mais uma vez que, a suportabilidade de um equipamento não depende apenas da magnitude da

sobretensão, mas também do seu período de duração, conforme ilustra a figura 13, que mostra as tolerâncias típicas de microcomputadores às variações de tensão (curva CBEMA). Diante de tais problemas causados por sobretensões de curta duração, este item de qualidade sugere que seja mantida uma atenção por parte de consumidores, fabricantes e concessionárias, no intuito de eliminar ou reduzir as conseqüências oriundas deste fenômeno [3].

3.2.4. Desequilíbrios de tensão

Os desequilíbrios são definidos em [3], como o desvio máximo da média das correntes ou tensões trifásicas, dividido pela média das correntes ou tensões trifásicas, expressado em percentual. As origens destes desequilíbrios se dão nos sistemas de distribuição, os quais possuem cargas monofásicas desequilibradas e ou distribuídas inadequadamente, fazendo surgir no circuito tensões de sequência negativa. Este problema se agrava quando consumidores alimentados de forma trifásica possuem uma má distribuição de carga em seus circuitos internos, impondo correntes desequilibradas no circuito da concessionária.

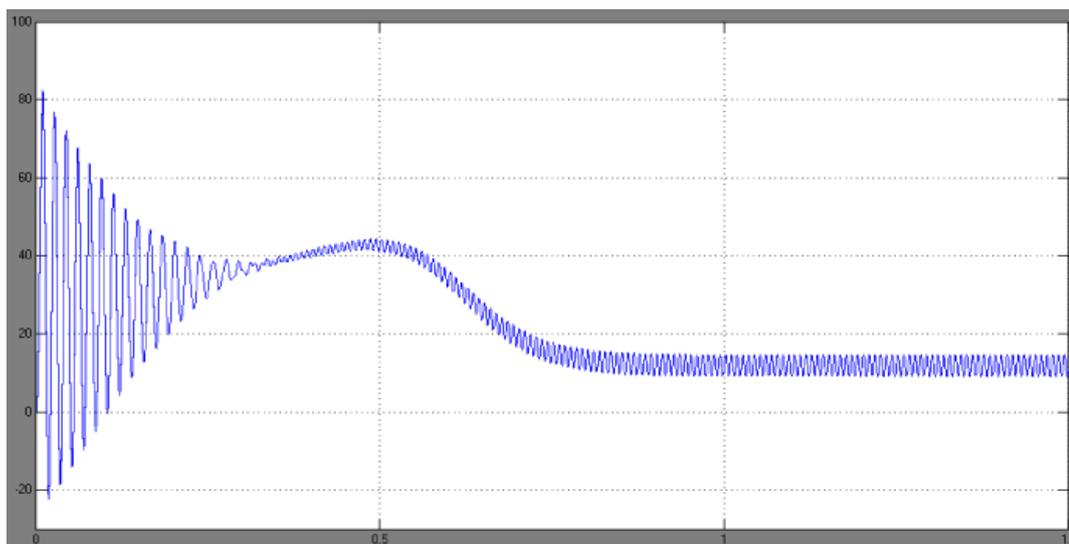


Figura 14: Resposta do conjugado do motor à alimentação desequilibrada [11]

Tais fatores fazem com que a qualidade de energia seja prejudicada no fornecimento, e alguns consumidores tenham em suas alimentações um desequilíbrio de tensão. Estes desequilíbrios de tensão podem apresentar problemas indesejáveis na operação de equipamentos, dentre os quais se destacam [3]:

- **Motores de Indução:** Para as análises dos efeitos de tensões desequilibradas aplicadas a um motor de indução, consideram-se somente os efeitos produzidos pelas tensões de

sequência negativa, que somados aos resultados da tensão de sequência positiva, resultam num conjugado pulsante no eixo da máquina, e no sobreaquecimento da máquina. Como consequência direta desta elevação de temperatura tem-se a redução da expectativa de vida útil dos motores, visto que o material isolante sofre uma deterioração mais acentuada na presença de elevadas temperaturas nos enrolamentos.

- **Máquinas síncronas:** Como no caso anterior, a corrente de sequência negativa fluindo através do estator de uma máquina síncrona, cria um campo magnético girante com velocidade igual à do rotor, porém, no sentido contrário ao de rotação definido pela sequência positiva. Consequentemente, as tensões e correntes induzidas nos enrolamentos de campo, de amortecimento e na superfície do ferro do rotor, terão uma frequência igual a duas vezes à da rede, aumentando significativamente as perdas no rotor.
- **Retificadores:** Uma ponte retificadora CA-CC, controlada ou não, injeta na rede CA, quando esta opera sob condições nominais, correntes harmônicas características (de ordem 5^a, 7^a, 11^a, 13^a, etc.). Entretanto, quando o sistema supridor encontra-se desequilibrado, os retificadores passam a gerar, além das correntes harmônicas características, o terceiro harmônico e seus múltiplos. A presença do terceiro harmônico e seus múltiplos no sistema elétrico é extremamente indesejável, pois possibilita manifestação de ressonâncias não previstas, causando danos a uma série de equipamentos.

3.2.5. Distorções na forma de onda

A distorção da forma de onda é definida como um desvio, em regime permanente, da forma de onda puramente senoidal, na frequência fundamental, e é caracterizada principalmente pelo seu conteúdo espectral. Existem cinco tipos principais de distorções da forma de onda [3]:

- **Harmônicos:** tensões ou correntes senoidais de frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental (50 ou 60 Hz) na qual operam o sistema de energia elétrica. Estes harmônicos distorcem as formas de onda da tensão e corrente, e são oriundos de equipamentos e cargas com características não-lineares instalados na rede de energia.
- **Interharmônicos:** componentes de frequência, em tensão ou corrente, que não são múltiplos inteiros da frequência fundamental do sistema supridor (50 ou 60Hz). Elas

podem aparecer como frequências discretas ou como uma larga faixa espectral. Os interharmônicos podem ser encontrados em redes de diferentes classes de tensão. As suas principais fontes são conversores estáticos de potência, cicloconversores, motores de indução e equipamentos a arco. Sinais "carrier" em linhas de potência também podem ser considerados como interharmônicos. Os efeitos deste fenômeno não são bem conhecidos, mas admitem-se que os mesmos podem afetar a transmissão de sinais "carrier" e induzir "flicker" visual no display de equipamentos como tubos de raios catódicos.

- **Nível CC:** a presença de tensão ou corrente CC em um sistema elétrico CA é denominado "DC offset". Este fenômeno pode ocorrer como o resultado da operação ideal de retificadores de meia-onda. O nível CC em redes de corrente alternada pode levar à saturação de transformadores, resultando em perdas adicionais e redução da vida útil. **"Notching":** distúrbio de tensão causado pela operação normal de equipamentos de eletrônica de potência quando a corrente é comutada de uma fase para outra. Este fenômeno pode ser detectado através do conteúdo harmônico da tensão afetada. As componentes de frequência associadas com os "notchings" são de alto valor e, desta forma, não podem ser medidas pelos equipamentos normalmente utilizados para análise harmônica. **Ruídos:** é definido como um sinal elétrico indesejado, contendo uma larga faixa espectral com frequências menores que 200 kHz, as quais são superpostas às tensões ou correntes de fase, ou encontradas em condutores de neutro. Os ruídos em sistemas de potência podem ser causados por equipamentos eletrônicos de potência, circuitos de controle, equipamentos a arco, retificadores a estado sólido e fontes chaveadas e, normalmente estão relacionados com aterramentos impróprios.

3.2.6. Distorções harmônicas

Tecnicamente, uma harmônica é a componente de uma onda periódica cuja frequência é um múltiplo inteiro da frequência fundamental (no caso da energia elétrica, de 60 Hz) [3]. A melhor maneira de explicar isto é com a ilustração da figura 15. Nesta figura, vemos três curvas: uma onda senoidal normal "1", representando uma corrente e energia "limpa", uma harmônica também senoidal "5" e a soma das duas "T" [6].

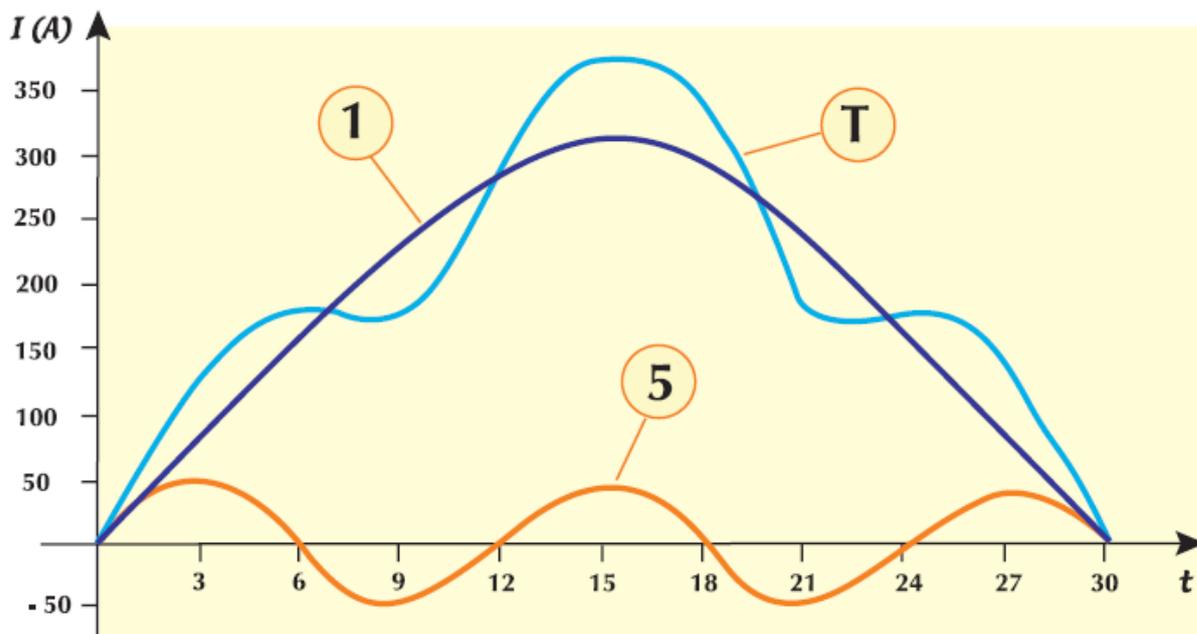


Figura 15: Onda deformada e suas componentes harmônicas[6].

Esta curva resultante mostra bem a distorção harmônica da curva de tensão, na presença de harmônicas [6]. As distorções harmônicas [3] vêm contra os objetivos da qualidade do suprimento promovido por uma concessionária de energia elétrica, a qual deve fornecer aos seus consumidores uma tensão puramente senoidal, com amplitude e frequência constantes.

Tabela 8: Resultado do gráfico da figura 15 [8]

Sinal	$I_p(A)$	$I_{ef}(A)$	FC	Obs.:
1	310	219,2	1,41	Senóide
5	50	35,4	1,41	Senóide
T	360	222	1,62	Distorcida

Entretanto, os fornecimentos de energia a determinados consumidores que causam deformações no sistema supridor prejudicam não apenas o consumidor responsável pelo distúrbio, mas também outros conectados à mesma rede elétrica.

No passado não havia maiores preocupações com harmônicos. Cargas com características não lineares eram pouco utilizadas e os equipamentos eram mais resistentes aos

efeitos provocados por harmônicas. Entretanto, ultimamente, com o rápido desenvolvimento da eletrônica de potência, e a utilização de métodos que buscam o uso mais racional da energia elétrica, o conteúdo harmônico presente nos sistemas tem-se elevado, causando uma série de efeitos indesejáveis em diversos equipamentos, comprometendo a qualidade e o próprio uso racional da energia elétrica. Assim, é de grande importância citar aqui os vários tipos de cargas elétricas com características não lineares, que têm sido implantadas em grande quantidade no sistema elétrico brasileiro [3]:

- circuitos de iluminação com lâmpadas de descarga;
- fornos a arco;
- compensadores estáticos tipo reator saturado, etc.
- motores de corrente contínua controlados por retificadores;
- motores de indução controlados por inversores com comutação forçada;
- processos de eletrólise através de retificadores não-controlados;
- motores síncronos controlados por cicloconversores;
- fornos de indução de alta frequência, etc.
- fornos de indução controlados por reatores saturados;
- cargas de aquecimento controladas por tiristores;
- velocidade dos motores CA controlados por tensão de estator;
- reguladores de tensão a núcleo saturado;
- computadores;
- eletrodomésticos com fontes chaveadas, etc.

As distorções harmônicas causam diversos prejuízos às plantas industriais. De maior importância, são as perdas de produtividade e de vendas, devido às paradas de produção causadas por inesperadas falhas em motores, acionamentos, fontes ou simplesmente "repicar" de contadoras [3]. Outros problemas são apresentados à seguir:

- Capacitores: queima de fusíveis, e redução da vida útil.
- Motores: redução da vida útil, e impossibilidade de atingir potência máxima.
- Fusíveis-Disjuntores: operação falsa-errônea, e componentes danificados.
- Transformadores: aumento de perdas, causando redução de capacidade e diminuição da vida útil.

- Medidores: possibilidade de medições errôneas e de maiores contas.
- Telefones: interferências.
- Máquinas Síncronas: sobreaquecimento das sapatas polares, causado pela circulação de correntes harmônicas nos enrolamentos amortecedores.
- Acionamentos/Fontes: operações errôneas devido a múltiplas passagens por zero, e falha na comutação de circuitos.
- Carregamento exagerado do circuito de neutro, principalmente em instalações que agregam muitos aparelhos eletrônicos e possuem malhas de terra mal projetadas.

Segue relação mais detalhada destes prejuízos [3]:

- Um dos principais problemas causados por harmônicos, se dão junto a bancos de capacitores, que originam condições de ressonância, proporcionando uma sobretensão nos terminais das unidades capacitivas.
- Como decorrência desta sobretensão, ocorre uma degradação do isolamento das unidades capacitivas, e em casos extremos, uma completa danificação dos capacitores. Além disso, consumidores conectados no mesmo ponto ficam submetidos a tensões perigosas, mesmo não sendo portadores de cargas poluidoras em sua instalação. Um capacitor é sempre um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas mesmo sem uma condição de ressonância, e sempre vulnerável à sobrecargas e sobreaquecimentos excessivos.

3.2.7. Oscilações ou flutuações de tensão

As flutuações de tensão correspondem a variações sistemáticas dos valores eficazes da tensão de suprimento dentro da faixa compreendida entre 0,95 e 1,05 pu. Tais flutuações são geralmente causadas por cargas industriais e manifestam-se de diferentes formas, a destacar [3]:

- **Flutuações Aleatórias:** causadas por fornos a arco, onde as amplitudes das oscilações dependem do estado de fusão do material e do nível de curto-circuito da instalação.
- **Flutuações Repetitivas:** causadas por máquinas de solda, laminadores, elevadores de minas e ferrovias.

- **Flutuações Esporádicas:** causadas pela partida direta de grandes motores. Os principais efeitos nos sistemas elétricos, resultados das oscilações causadas pelos equipamentos mencionados anteriormente são oscilações de potência e torque das máquinas elétricas, queda de rendimento dos equipamentos elétricos, interferência nos sistemas de proteção, e efeito "flicker" ou cintilação luminosa.

3.2.8. Sistema elétrico e suas variações na frequência

As variações na frequência de um sistema elétrico são definidas como sendo desvios no valor da frequência fundamental deste sistema (50 ou 60Hz). A frequência do sistema de potência está diretamente associada à velocidade de rotação dos geradores que suprem o sistema. Pequenas variações de frequência podem ser observadas como resultado do balanço dinâmico entre carga e geração no caso de alguma alteração (variações na faixa de $60 \pm 0,5\text{Hz}$). As faltas causam variações de frequência que ultrapassam os limites para operação normal em regime permanente em sistemas de transmissão, saída de um grande bloco de carga ou pela saída de operação de uma grande fonte de geração. Em sistemas isolados, como é o caso da geração própria nas indústrias, na eventualidade de um distúrbio, a magnitude e o tempo de permanência das máquinas operando fora da velocidade, resultam em desvios da frequência em proporções mais significativas [3].

4. HARMÔNICOS DE CORRENTE E TENSÃO

Com o avanço tecnológico, uma gama cada vez maior de aparelhos mais compactos e com componentes variados é lançada no mercado. Com isso, problemas que antes eram desconhecidos apareceram, como exemplo, podemos citar harmônicos de corrente que foram notadas após a implementação de componentes não-lineares nos circuitos dos equipamentos e a interferência eletromagnética proveniente da redução das dimensões das placas de circuito impresso e aproximação dos dispositivos. Nos EUA, estima-se que num período de 10 anos as cargas eletrônicas foram duplicadas, com uma previsão de atingir 90% no ano de 2010 [7].

4.1. Harmônicos

Os harmônicos de corrente surgem com a presença de cargas não-lineares na rede distribuição. Essas cargas não possuem uma relação linear entre tensão e a corrente como cargas resistivas, capacitivas e indutivas. Estas podem ser geradas por equipamentos elétricos e eletrônicos que possuem componentes não-lineares tais como: diodos, transistores, chaves manuais entre outros [7].

As cargas não-lineares absorvem uma corrente diferente da forma de onda da tensão que a alimenta, gerando uma perturbação na onda da corrente.

A harmônica é uma componente adicional, segundo [7] que possui frequência múltipla da onda senoidal fundamental. Na figura 15 está ilustrada, a componente fundamental da tensão e sua quinta harmônica. Na figura 16 é apresentada a forma de onda da tensão resultante, que neste caso é a soma das duas componentes apresentadas na figura 15.

As harmônicas que causam maior distorção na onda da corrente são geralmente as de ordem ímpar e quanto menor sua frequência, maior será a distorção [7].

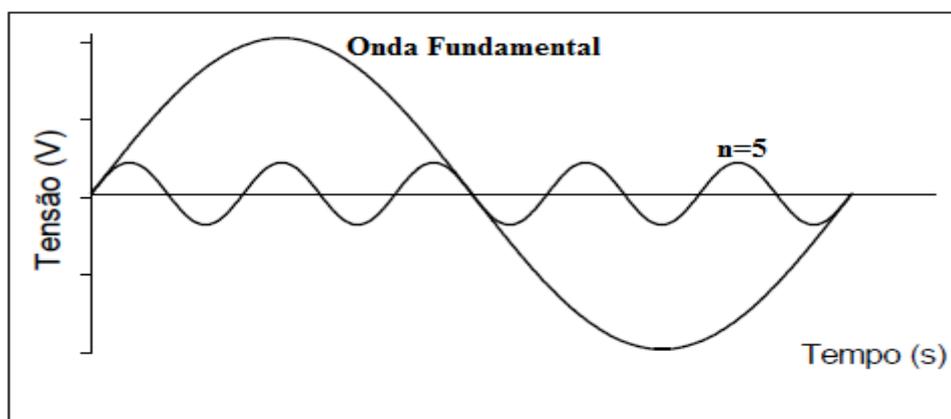


Figura 16: Onda fundamental com sua harmônica $n=5$ abaixo [7]

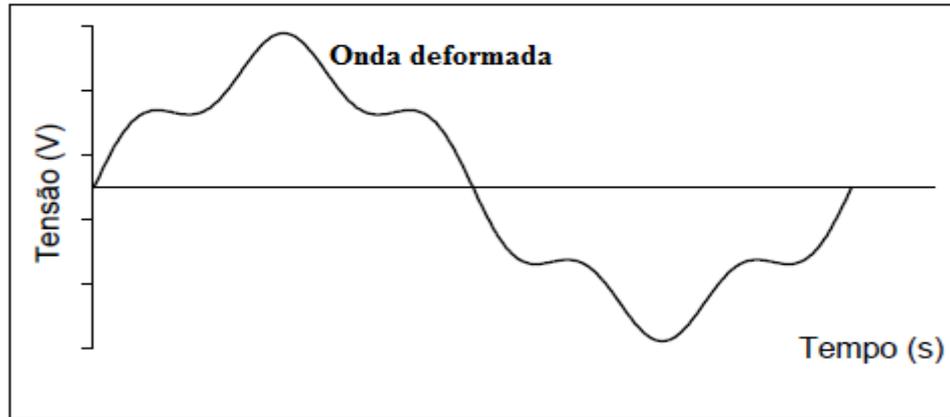


Figura 17: Onda resultante da soma da onda da tensão e da harmônica $n=5$ [7]

A distorção harmônica das tensões nos pontos de conexões depende fundamentalmente das harmônicas de corrente injetada ou drenada e da impedância da rede neste ponto [7].

4.2. Como detectar as harmônicas

Há vários métodos que permitem analisar e quantificar as distorções na forma das ondas. Podem-se destacar quatro deles que serão apresentados a seguir:

4.2.1. Fator de Potência

O fator de potência é a relação entre a potência ativa (P) e a aparente (S), que possuem uma relação:

$$FP = \frac{\text{Potência Ativa}(P)}{\text{Potência Aparente}(S)}$$

Eq.[4]

Atualmente as normas técnicas brasileiras regulamentam o fator de potência mínimo de uma instalação elétrica em 92% e em algumas classes de equipamentos este limite chega a 97% [7].

Em consequência, na presença de harmônicas, a relação $S^2 = P^2 + Q^2$ não é válida. Definida a potência de distorção D tal que: $S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$, seja [8]:

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}$$

Eq.[5]

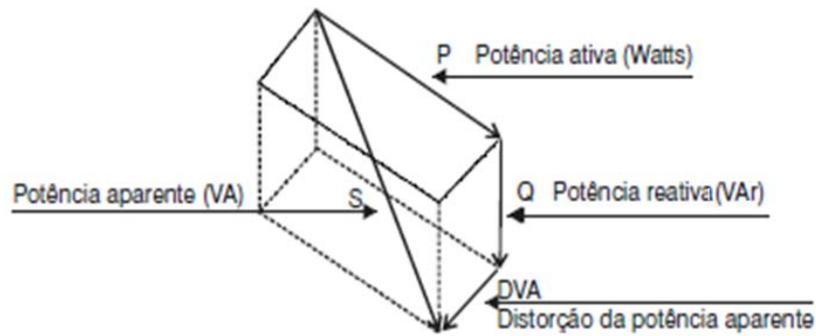


Figura 18: Figura do paralelepípedo das potências [9]

O fator de potencia real leva em consideração a defasagem entre a corrente e a tensão, os ângulos de defasagem de cada harmônica e a potência reativa para produzi-las. Seu valor é sempre menor que o fator de potência de deslocamento sendo que a correção deverá ser feita pelo fator de potencia real. A figura 18 exemplifica esses ângulos, em forma de um paralelepípedo das potências [9].

As perdas de transmissão de energia elétrica são proporcionais ao quadrado da corrente eficaz que circula pelos condutores. Assim, para uma dada potência ativa, quanto menor for o FP, maior será a potência reativa e, conseqüentemente, a corrente pelos condutores. A figura 19 mostra o aumento das perdas em função da redução do FP [7].



Figura 19: Aumento das perdas devido à redução do fator de potência [7]

4.2.2. Fator Crista

O fator crista [7] é encontrado através da razão entre o valor da corrente de pico (I_p) ou tensão de pico (V_p), e a corrente eficaz (I_{ef}) ou tensão eficaz (V_{ef}), equações 5 e 6.

$$k = \frac{I_p}{I_{ef}}$$

Eq.[6]

$$k = \frac{V_p}{V_{ef}}$$

Eq.[7]

De acordo com [7], o fator de crista típico das correntes absorvidas pelas cargas não-lineares pode tomar valores entre 1,5 a 2, chegando até 5 nos casos críticos.

O valor de crista nos equipamentos eletrônicos tem relação direta com o disparo de diodos e outros componentes. Observando o gráfico da figura 15, somente com o sinal 1, o disparo de um diodo ocorreria em um tempo igual a 15 e com o sinal T (com harmônicas), o disparo ocorreria em um tempo igual a 13 [8].

4.2.3. Distorção Harmônica Total (THD)

É a medida da perturbação do sinal na saída, após este passar por todo equipamento, em relação ao sinal aplicado na entrada do aparelho. A distorção do sinal é gerada pelo acréscimo de frequências múltiplas do sinal fundamental que surgem devido a não-linearidade de alguns componentes presentes no circuito [7].

O THD é definido como:

$$THD = \frac{1}{V_1} \left(\sum_{n=2,3,\dots}^{\infty} V_n^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

Eq.[8]

Onde V_1 é a tensão fundamental e V_n é a tensão harmônica de ordem n.

4.2.4. Fator de Distorção (DF)

O fator de distorção indica que a quantidade de distorção harmônica que remanesce em uma forma de onda particular após suas harmônicas ser sujeitas a uma atenuação de segunda ordem (filtro LC).

Assim, o DF é uma medida eficaz que reduz harmônicas não desejadas, sem ter que especificar os valores de um filtro da carga de segunda ordem [7]. Podemos encontrar o DF através da fórmula:

$$DF = \frac{1}{V_1} \left[\sum_{n=2,3}^{\infty} \left(\frac{V_n}{n^2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Eq.[9]

4.3. Impactos econômicos

As harmônicas de corrente acarretam perdas elevadas de energia, causando danos aos componentes da instalação, até a parada do equipamento. A seguir estão algumas consequências da circulação dessas distorções por equipamentos e na rede [8]:

4.3.1. Perdas energéticas

As perdas por efeito joule induzidas pelas correntes harmônicas nos condutores e equipamentos tem origem de perdas energéticas suplementares.

4.3.2. Custo adicional da contratação de serviço

Com a presença de corrente harmônica há a necessidade de aumentar o nível de potência, e, conseqüentemente elevará o custo adicional da contratação dos serviços. Os distribuidores de energia terão cada vez mais tendência a penalizar os produtores de harmônicas.

4.3.3. Sobre dimensionamento dos materiais

Para [8], o desclassificamento das fontes de energia (geradores, transformadores e no-breaks) necessita de seu sobredimensionamento; os condutores devem ser dimensionados de maneira a permitir a circulação das correntes harmônicas: como as frequências dessas harmônicas são mais elevadas que da fundamental, as impedâncias vistas por estas correntes são mais elevadas; para evitar perdas por efeito joule importantes, é necessário sobredimensionar os condutores e a circulação de harmônicas em condutor de neutro necessita seu sobredimensionamento.

4.3.4. Redução da vida dos materiais

Quando a tensão da alimentação apresenta uma taxa de distorção próximo de 10%, a duração da vida dos aparelhos é reduzido de maneira sensível. Seguindo o tipo de aparelho, foi estimado conforme [8] a redução da vida em:

- 32,5% para as máquinas trifásicas,
- 18% para as máquinas trifásicas,
- 5% para os transformadores.

Conservar a duração da vida correspondendo a carga nominal implica sobredimensionar estes aparelhos.

4.3.5. Disparos intempestivos e parada da instalação

As correntes causadas por harmônicas causam uma submissão nos disjuntores de uma instalação.

Estes pontos de correntes provocam disparos intempestivos, e induzem perdas de produções assim como custos ligados ao tempo de parada na reposição em funcionamento da instalação [8].

4.3.6. Exemplos

Para [8] os casos de instalações citados abaixo, visto as consequências econômicas, terá de recorrer a utilização de filtros de harmônicas.

- Centro de cálculo de uma companhia de segurança:

Neste centro de cálculo, o disparo intempestivo de um disjuntor ocasionará uma perda estimada em R\$ 17 000 por hora de interrupção.

- Laboratório farmacêutico:

As harmônicas tem provocado o enfraquecimento de um grupo eletrogêneo, e interrupção de uma fase de teste de longa duração sobre um novo medicamento: a consequência é uma perda estimada à R\$ 2 500 000.

- Usina metalúrgica:

Forno à indução tem provocado a sobrecarga e a destruição de 3 transformadores de 1500 e 2500 kVA em um ano e custos de parada de produção estimados em R\$ 2 000 por hora.

- Fabricação de móvel de jardim:

O enfraquecimento de inversores tem provocado paradas de produção no total de R\$1000 por hora.

4.4. Normas para emissão de harmônicas na rede

As correntes distorcidas podem afetar na operação de outros equipamentos também ligados à rede elétrica, e causar outros problemas que afetam a qualidade da energia elétrica fornecida aos consumidores. Dessa forma, o sistema elétrico como um todo, fica prejudicado devido à soma de diversos equipamentos “poluindo” a rede pública [7]

Para controlar essas correntes, foram estabelecidas normas limitando a emissão de harmônicas por equipamentos elétricos e eletrônicos encontrados em todos os setores.

Há várias normas que englobam harmônicas, visando diminuir sua expansão. Pode-se citar como exemplo a norma IEC 61000-3-2 que limita a emissão de harmônicas por equipamentos elétricos e eletrônicos com corrente de entrada menor que 16A por fase [8].

As harmônicas geradas por um equipamento, não podem ultrapassar os níveis mínimos especificados, e devem funcionar normalmente na presença das perturbações dentro desses limites pré estabelecidos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Resultados

As cargas não-lineares, como exemplo, inversores de frequência, circuitos de disparo tiristorizados, fontes chaveadas, etc., são as que apresentam as maiores distorções harmônicas, no entanto existem soluções para estes equipamentos, que serão listados à seguir:

5.1.1. Indutância

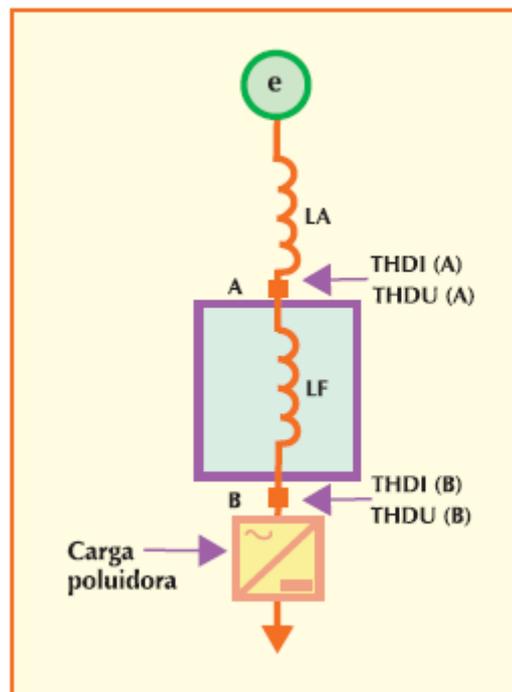


Figura 20: Aplicação de indutância para atenuar todas as harmônicas[6]

De acordo com [6] a aplicação de uma indutância (L_F) em série entre a fonte (L_S) de energia e a carga poluidora, trata-se de uma solução paliativa, que atenua todas as harmônicas presentes na instalação.

Neste caso, essa indutância (L_F) soma-se com a indutância (L_S) da fonte (transformadores ou geradores), e também à dos condutores, tendo uma atenuação significativa no valor:

$$R = \frac{L_S}{L_S + L_F}$$

Eq.[10]

resultando em :

$$THDU(A) = THDU(B) \times R$$

Eq.[11]

A instalação de indutâncias em série com a fonte poluidora é comumente utilizada internamente em equipamentos como UPS (Uninterruptible Power Supply), as mesmas já vem instaladas ao circuito de fábrica [6].

As vantagens do emprego da indutância são:

- Baixo custo;
- Uma simples solução e confiável;

E as desvantagens são:

- Eficiência limitada;
- Grandes dimensões físicas;
- Proporciona uma queda de tensão na linha.

5.1.2. Filtro passivo LC

Nesse caso, a solução consiste na instalação de um filtro LC em paralelo com a fonte geradora de harmônicas [6]. A figura 21 mostra uma ligação típica dessa aplicação, onde pode-se observar a adição de uma indutância (L_F) para amortecimento das harmônicas.

Com isso, a indutância L_P e a capacitância C_P , são determinadas de forma que a impedância do filtro se anule para a frequência que se deseja eliminar e seja bem pequena para as frequências próximas dessa:

$$X_L = \omega L$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

$$X_C = X_L$$

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}$$

$$L_p \times C_p \times \omega^2 = 1$$

Eq.[12]

Desejando eliminar a 5ª harmônica, temos por exemplo:

$$L_p \times C_p \times (2 \times \pi \times 5 \times 60)^2 = 1$$

$$L_p \times C_p = 0,281 \times 10^{-6}$$

Neste exemplo, com o produto $L_p \times C_p$ calculado, para [6] obtém-se:

- Para a harmônica de 5ª ordem(300Hz), a impedância em paralelo(L_p+C_p) é igual a zero e a corrente nessa frequência flui apenas entre a fonte poluidora e os componentes L_p+C_p , não afetando assim as eventuais cargas a montante do filtro;
- Para a harmônica de 7ª ordem, se ela existir, a impedância do filtro ainda é baixa e parte da corrente em 420Hz é atenuada.
- Para as harmônicas superiores à 7 ordem, prevalece o valor da reatância indutiva de L_p (a reatância capacitiva de C_p tende a zero, pois $X_c = \frac{1}{2\pi f C}$).

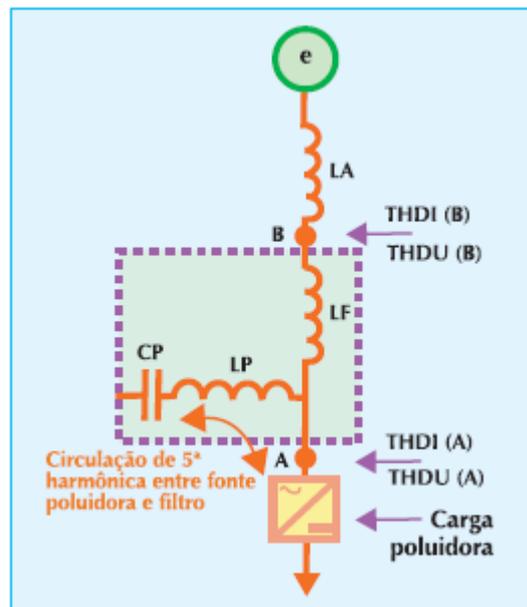


Figura 21: Emprego de filtro de harmônicas Passivo LC combinado com indutância para atenuação de uma harmônica específica(exemplo 5ª harmônica)[6]

Esse tipo de filtro passivo LC, é também chamado de filtro não compensado, no

entanto há genericamente outro tipo de filtro passivo, denominado filtro de harmônicas compensado, figura 22, sendo esse recomendado em instalações onde se utilizam fontes de energia substitutas, como por exemplo, grupos geradores.

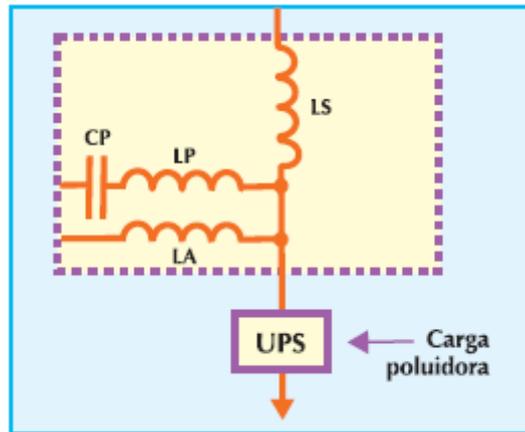


Figura 22: Emprego de filtro de harmônicas Passivo LC compensado, para atenuação de harmônica específica [6]

As principais vantagens dos filtros de harmônicas passivos LC são:

- Singelos e confiáveis;
- A indutância L_A pode ser inserida no circuito em qualquer momento;
- Desempenho satisfatório somente na frequência à que se destina, obtendo $THDI \leq 5\%$;
- Compensação de parte da energia reativa, aumentando assim o fator de potência da instalação devido a introdução do capacitor (C_P).

Por sua vez os filtros de harmônicas passivos LC, apresentam desvantagens, como:

- Limite no espectro de atenuação, ou seja, é dedicado apenas no sinal harmônico específico ou sintonizado, somente atenuará harmônicas próximas dessa, tornando-o ineficaz para uma banda mais larga de frequências;
- Depende totalmente da fonte de alimentação, pois seu uso é obrigatório em grupos geradores;
- Seu funcionamento é adequado desde que não haja aumento da carga instalada, tornando-o limitado em determinadas aplicações.

5.1.3. Filtros Ativos (condicionadores)

Sua ligação ocorre em paralelo entre a fonte e a carga geradora de ruídos, conforme figura 23.

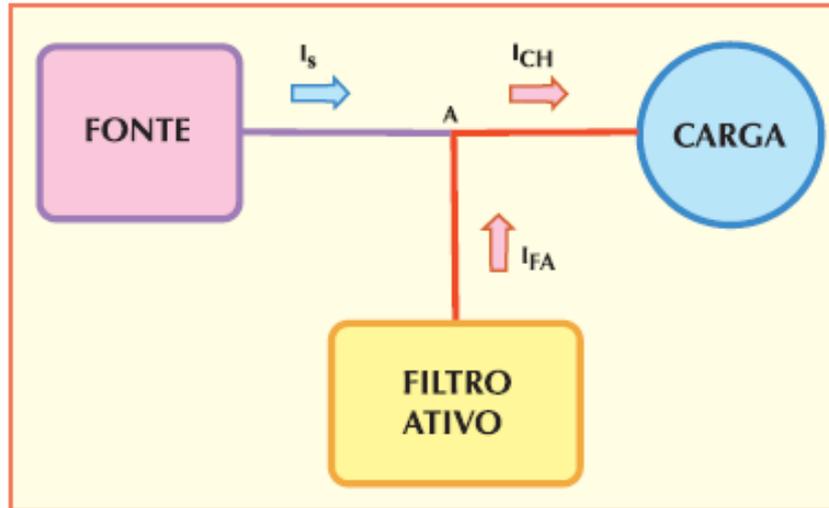


Figura 23: Ligação de um filtro ativo de harmônicas[6]

Esse tipo de filtro faz análise individual de cada fase, em tempo real, de forma contínua, monitorando a corrente de carga I_{CH} . Através dessa análise, consegue-se o sinal harmônico, sendo a indicação da presença da frequência fundamental e todas as demais componentes harmônicas.

O filtro envia um sinal de corrente (I_{FA}) que é idêntico à diferença entre as correntes total da carga (I_{CH}) e a fundamental (I_{CH1}). A corrente do filtro ativo (I_{FA}), que é a soma das correntes provenientes das harmônicas defasadas em 180° , é inserida na carga de forma que a resultante à jusante do filtro seja senoidal semelhante à frequência fundamental da fonte em forma e intensidade. Desse modo não existirá circulação de correntes harmônicas no trecho compreendido entre a fonte e o ponto A (nó) da figura 23, garantindo assim, que outros dispositivos conectados nesse trecho não sofrerão pela presença de cargas harmônicas.

Os filtros ativos, empregam transistores IGBT (transistor bipolar de porta isolada-insulated gate bipolar transistor) na etapa de potência, sendo projetados para cobrir uma faixa do espectro harmônico (H2 a H25 – 2ª à 25ª harmônicas). Sua instalação é simples, podendo ser conectados em qualquer local da instalação, atendendo a compensação de harmônicas geradas por uma ou várias cargas não lineares [6].

Esses filtros podem ser instalados próximo das cargas em que se têm maiores incidências de harmônicas, nos quadros de distribuição, atenuando parcialmente as harmônicas, ou no quadro geral, atendendo de forma abrangente toda a instalação comprometida pelas harmônicas. No entanto, o local melhor para sua instalação requer um estudo mais complexo da necessidade em relação aos níveis de harmônicas, visando custo/benefício, e viabilidades técnico-econômicas.

Para uma melhor visão do funcionamento de um filtro ativo, a figura 24, mostra as formas de onda reais obtidas na aplicação do equipamento.

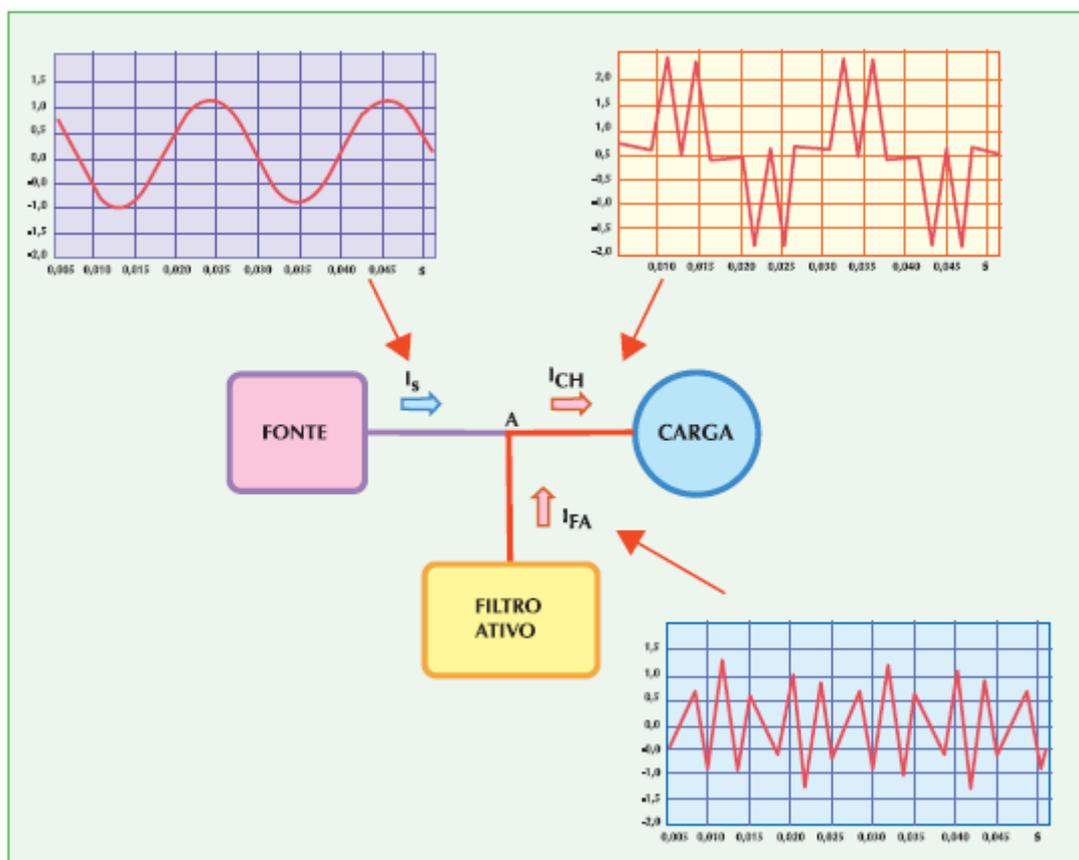


Figura 24: Atuação de um filtro ativo em um exemplo real[6]

5.1.4. Transformadores de separação para 3ª harmônica e suas múltiplas

Ligando-se transformadores em triângulo-estrela, esse por sua vez, isolará a terceira harmônica e suas componentes múltiplas inteiras, tornando uma solução vantajosa, visto que a 3ª harmônica e suas múltiplas não irão contaminar a instalação a montante do ponto da instalação do mesmo.

Com isso, os equipamentos instalados antes do transformador, podem ser dimensionados sem preocupação extra em relação às harmônicas, incluindo o condutor neutro [6].

Recomenda-se a utilização desse tipo de configuração de transformadores em cargas que serão alimentadas por quadros de tensão monofásica, tais como: eletrodomésticos, copiadoras, computadores, máquinas de fax, etc., conforme é mostrado na figura 25.

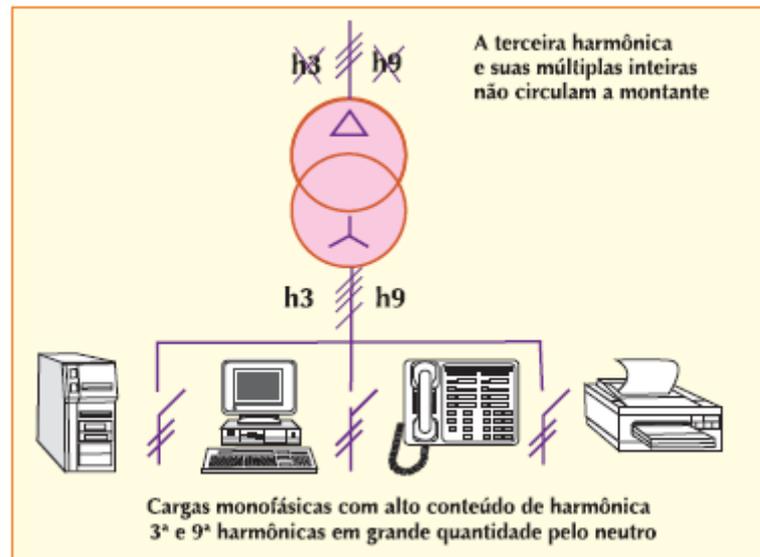


Figura 25: Transformador empregado no isolamento da 3ª harmônica e suas componentes múltiplas [6]

5.1.5. Transformadores de separação para 5ª e 7ª harmônica e suas múltiplas

No caso de cargas predominantemente trifásicas, as harmônicas que ali se alojam são as de ordem 5ª e 7ª. No entanto, uma solução para esse tipo de problema é a utilização de transformadores de duplo enrolamento secundário, onde é realizado um defasamento angular de 30° entre os mesmos. Outra solução consiste na aplicação de dois transformadores com ligações distintas, de forma que se obtenha um defasamento agora entre as tensões, conforme é visto na figura 26 [6].

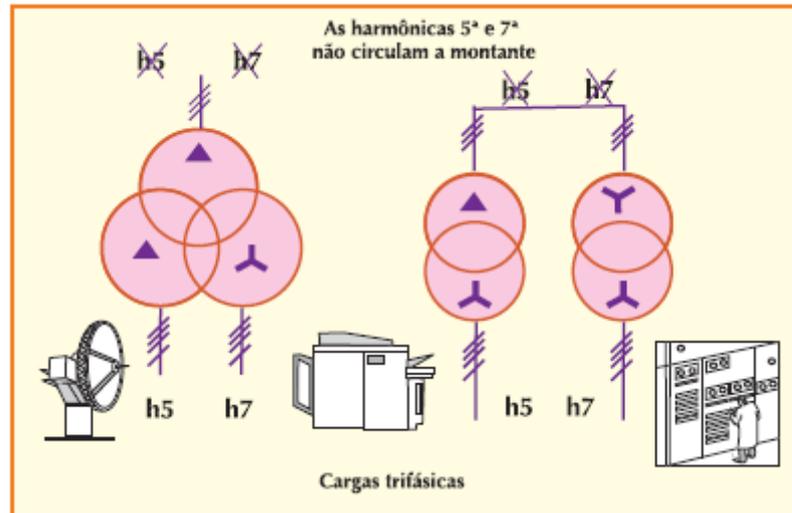


Figura 26: Transformador empregado no isolamento da 5ª e 7ª harmônicas [6]

Devido à essa defasagem entre os secundários, as correntes dos conjuntos de cargas estão defasadas e à montante (no primário) se somam, obtendo como resultado uma redução na taxa de distorção da corrente (THDI), e nas harmônicas de 5ª e 7ª ordem, isso porque essas harmônicas de um dos enrolamentos estão em fases opostas em relação às mesmas ordens das harmônicas do outro enrolamento. Ocorrendo o mesmo com as harmônicas de ordem 17ª e 19ª, podendo aparecer as harmônicas de ordem 11ª e 13ª se utilizada essa configuração [6].

Esperando resultados satisfatórios, esses transformadores devem unicamente alimentar cargas trifásicas em ambos os secundários, garantindo assim, que essas cargas devam apresentar características parecidas, nas duas distribuições e nos carregamentos dos dois transformadores para que a resultante das correntes do primário seja bem próxima de zero.

Esse tipo de configuração é recomendada para alimentar quadros, cuja, aplicação atendam cargas não-lineares como, retificadores trifásicos, variadores de velocidade, etc.

5.1.6. Cálculo do custo dos filtros passivos

Em [10], o cálculo do custo de filtros passivos pode variar em função de diversas características, como exemplo, material utilizado pelo fabricante, condições da instalação (abrigado ou ao ar livre), dos níveis de distorção harmônica previstos (que são traduzidos em folgas de tensão e de corrente considerados durante a confecção do equipamento) e da sua potência reativa. O custo dos componentes dos filtros passivos sintonizados nas frequências de 5ª, 7ª, 11ª e 13ª ordens na tensão 13,8 kV, instalados ao ar livre, podem ser aproximados

pela seguinte equação linear:

$$Custo_C = K_C + U_C S_C \quad \text{Eq. [13]}$$

$$Custo_L = K_L + U_L S_L \quad \text{Eq. [14]}$$

onde:

$Custo_C$: custo do capacitor do filtro, em \$.

$Custo_L$: custo do indutor do filtro, em \$.

K_C, K_L : constantes de custo dos componentes capacitivo e indutivo, respectivamente, em \$.

U_C, U_L : custo unitário do capacitor e do indutor, respectivamente, em \$/kVA.

Considerando-se o custo total do filtro (C_T) igual à soma do custo do capacitor e do custo do indutor, de acordo com informações recebidas de fabricantes nacionais, o custo dos reatores representa entre 35% e 40% do custo total dos filtros, pode-se fazer:

$$C_T = Custo_C + 0,35(Custo_C) = 1,35(Custo_C) \quad \text{Eq. [15]}$$

Em [10], os valores utilizados para K_C e U_C foram determinados em função do custo fornecido pelos fabricantes consultados, para filtros de várias potências sintonizados em 5ª ou 7ª ordem em sistemas de 13,8kV, levando em conta que os filtros operam com 30% de DHT₁% (Distorção Harmônica Total de Corrente).

Em virtude dos dados obtidos terem sido fornecidos em função da potência reativa, em kVAr, a equação final para cálculo do custo total dos filtros foi:

$$C_T = 1,35(K_C + U_C Q_I) \quad \text{Eq. [16]}$$

5.2. Conclusão

Fica evidente que, com o avanço dos dispositivos de eletrônica de potência e de sistemas cada vez mais automatizados, os equipamentos necessitam de uma maior atenção no que diz respeito à emissão de distorções harmônicas. Anteriormente se dava uma atenção maior para os baixos fatores de potência, causados por cargas reativas, no entanto, o atual

momento, solicita uma atenção maior, de que não só o baixo fator de potência é prejudicial às instalações, e sim as distorções harmônicas e suas componentes.

Através desse estudo ficou evidenciado que as distorções harmônicas, contribuem de forma direta no baixo fator de potência, e ainda é uma das maiores preocupações nas indústrias atuais. Isso sem dizer em qualidade de energia, problemas com aquecimentos de condutores, e, indisponibilidade de energia.

No entanto, sua resolução, requer, além de conhecimentos técnicos, uma dedicação e adaptação nas instalações, no consumo de energia elétrica, respeitando sempre as normas vigentes, e os limites pré-estabelecidos por elas.

No caso da correção do fator de potência, o investimento inicial é elevado, no entanto, evita-se o pagamento de multas, equivalendo-se do custo-benefício futuros.

Devido à grande quantidade de adaptações que devem ser feitas nas instalações, esse custo/benefício se dará à longo prazo, porque à partir do momento, que não se pagarão mais as multas por consumo reativo, o retorno é evidente, diminuindo consideravelmente as contas de energia elétrica, e recuperando todo o investimento inicial.

Já no caso das harmônicas, os prejuízos são maiores ainda, principalmente no aquecimento de condutores, o repicar de disjuntores, provocando perdas de produção, quedas inesperadas de energia e por fim a degradação da qualidade de energia.

Para solucionar as distorções harmônicas existem diversas formas, no caso, há a necessidade de estudos específicos, para cada situação, visto que as componentes harmônicas se diferem para as mais variadas cargas.

Uma dessas soluções seria a implementação de filtros, ficando por conta do engenheiro eletricista definir o qual atende a situação, levando em conta o custo, local de instalação e criticidade do caso estudado.

Sugestão para futuros estudos, seria a da viabilidade ou não da instalação de equipamentos e filtros que atendam e eliminam as distorções harmônicas, visto que será quase impossível conviver sem elas, devido à grande necessidade de cada vez mais se utilizar equipamentos chaveados, de disparo à tiristores, para controles em geral.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **FILHO**, João Mamede. **Instalações Elétricas Industriais**. 8ª. ed. Rio de Janeiro : Livros Técnicos e Científicos. Editora LTC, 2010; 666 pg.
- [2] **CARDOSO**, Fábio Lamothe. **Correção do Fator de Potência. Eletro-Estudos Engenharia**. UERJ. 2007.
- [3] Disponível em <http://www.alltechenergia.com.br/files/harmonicas_nocoos.pdf>, acessado em 27 de Outubro de 2011.
- [4] Disponível em <<http://www.grupozug.com.br/ENGEL/IFP1.htm>>, acessado em 15 de abril de 2011.
- [5] Disponível em <<http://www.sabereletronica.com.br/secoes/leitura/417>>, acessado em 13 de novembro de 2011.
- [6] **MORENO**, Hilton. **PROCOBRE** – Instituto Brasileiro do Cobre. **Manual de Harmônicas nas Instalações Elétricas – Causas, Efeitos e Soluções**. Disponível em <<http://www.procobre.org/pt/biblioteca/?did=19>>, acessado em 13 de novembro de 2011.
- [7] **MAIA**, Juliana Avena; **PINHEIRO**, José Renes. **Harmônicos de Corrente e Tensão**, XXI Congresso de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia e VI Feira de Protótipos. UFSM, Santa Maria-RS, 2006.
- [8] **SCHNEIDER ELECTRIC**. Workshop – Instalações Elétricas de Baixa Tensão. **Qualidade de Energia – Harmônicas**. Disponível em <<http://www.schneider-electric.com.br/documents/cadernos-tecnicos/harmon.pdf>>, acessado em 05 de novembro de 2011.
- [9] **WEG Automação S.A.** **Manual para correção do Fator de Potência**. Disponível em <www.weg.net>, acessado em 17 de novembro de 2011.
- [10] **V SBQEE**. Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica. **Estratégias ótimas para projetos de filtros harmônicos utilizando algoritmos genéticos**. Disponível em <http://www.sbqee.com.br/cbqee_2003_pdfs/135.pdf>, acessado em 18 de novembro de 2011.
- [11] Disponível em <www.proceedings.scielo.br/img/eventos/agrener/n6v1/049f04.gif>, acessado em 06 de dezembro de 2011.