

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

REBECA NEVES SACRAMENTO

**ESTUDO DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA
DE UM TRANSFORMADOR TRIFÁSICO EM UM
SISTEMA ELÉTRICO INDUSTRIAL**

**VIÇOSA
2010**

REBECA NEVES SACRAMENTO

**ESTUDO DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA
DE UM TRANSFORMADOR TRIFÁSICO EM UM
SISTEMA ELÉTRICO INDUSTRIAL**

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

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

VIÇOSA
2010

REBECA NEVES SACRAMENTO

**ESTUDO DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA DE UM
TRANSFORMADOR TRIFÁSICO EM UM SISTEMA ELÉTRICO
INDUSTRIAL**

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

Aprovada em 03 de Dezembro de 2010.

COMISSÃO EXAMINADORA

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

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

Prof. Dr. Marco Aurélio de A. Castro - Membro
Universidade Federal de Viçosa

Dedico este trabalho aos meus queridos pais por todo o apoio e incentivo nessa difícil caminhada, sem eles não teria conseguido.

Agradecimentos

Agradeço ao Departamento de Engenharia Elétrica por ceder toda estrutura necessária para realização do projeto. Aos professores, por todo conhecimento passado, pois sem esse não seria possível a conclusão deste trabalho.

Aos meus pais, por me ensinar a sempre buscar meus objetivos e por sempre me apoiarem, mesmo nas horas mais difíceis.

E a turma de Engenharia Elétrica 2006 por todo companheirismo não só durante a realização deste trabalho, mas por todo caminho percorrido que me fez chegar até aqui.

“Não sabendo que era impossível, foi lá e fez”

Jean Cocteau

Resumo

Qualidade de Energia Elétrica representa hoje uma importante prioridade das indústrias, concessionárias de energia, fabricantes de equipamentos e consumidores. Este termo refere-se à qualidade da tensão nas instalações elétricas, e é de extrema importância que qualquer processo, opere com o mínimo de distúrbios possíveis. Entre os problemas de qualidade de energia, comumente encontrados podemos citar os transitórios (impulsivos, oscilatórios), variações de curta duração (interrupção, afundamento/sag, elevação/swell), variações de longa duração (interrupção permanente, subtensão, sobretensão), desequilíbrio de tensão, distorção da forma de onda (harmônicas, ruído, recortes de comutação, eventuais níveis cc, interharmônicas), flutuação de tensão e variações de frequência da rede. Este trabalho apresenta uma análise de ensaios feitos no Laboratório de Engenharia Elétrica onde se procurou traçar o perfil do comportamento das diversas cargas e conhecer a natureza de cada equipamento que integra o sistema elétrico industrial. Os ensaios foram divididos em duas partes. Inicialmente foram feitos somente com transformador e cargas (equilibradas e desequilibradas) de forma a obter as características do mesmo. Após isso foi montado um sistema com motores e geradores alimentando diferentes cargas de forma a simular situações extremas que podem ser observadas em ambientes industriais. Desta forma, é possível aliar estudos realizados dentro da Universidade com situações que ocorrem cotidianamente em outros ambientes mostrando que a solução dos problemas de Qualidade de Energia é alcançada com mais facilidade aliando a teoria e prática. Neste sentido, buscou-se implementar neste trabalho a classificação dos fenômenos de distorção, que podem ter origem tanto nas concessionárias de energia elétrica como nos equipamentos da indústria, podendo haver também casos oriundos da interação de ambas. Além disso, foram feitas simulações no software apropriado (MatLab/Simulink) de todas as situações realizadas durante os ensaios, de forma a compará-los com os resultados encontrados experimentalmente para posterior análise. Através desta avaliação e identificado as possíveis causas e os principais efeitos destes distúrbios.

Abstract

Power quality represents the most important industries priority, power utilities, equipments manufactures and consumers. This terms refers to the quality of voltage and current in electrical installations, and it's extremely important that any process, operate with minimum disturb possible. Among the problems commonly found on power quality we can include transient (impulsive and oscillatory), short duration variations (interruption, sag and swell), long duration variations (permanent interruption, under voltage, overvoltage), imbalance voltage, waveform distortion (harmonics, noise, switching clippings, eventual levels cc, inter harmonics), voltage fluctuation and network frequency variations. This project presents studies analysis done at the Electrical Engineering Laboratory, where we tried to profile various charge behaviors and know the equipment nature that integrates the power system industry. The tests were divided into two parts. Initially they were only made with a transformer and loads (balanced and unbalanced) to obtain the characteristics. After that, a motors and generators system was assembled feeding different loads to simulate extreme situations that can be observed in environments industries. Thus, it is possible to combine university studies with routinely situations in other settings showing that the solution of problems of power quality is easily achieved combining the theory with practice. In this sense, we tried to implement the classification of distortion phenomena, which may originate both in the electric utility industry as well as equipment and may also be cases from both interaction. In addition, simulations are made on appropriate program (Matlab / Simulink) of all situations during the tests performed in order to compare them with experimental results for later analysis. Eventually, through this assessment and identified the possible causes and the main effects of these disturbances will be drawn up a strategy for conservation and improvement of power quality.

Sumário

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

1	Introdução	12
1.1	Qualidade de Energia Elétrica	13
1.1.1	Introdução	13
1.1.2	Porque estudar Qualidade de Energia Elétrica?	13
1.2	Descrições dos principais distúrbios de QEE	14
1.2.1	Introdução	14
1.2.2	Transitórios	16
1.2.3	Variações de curta duração	16
1.2.4	Interrupção	17
1.2.5	Afundamentos de tensão(SAGS)	17
1.2.6	Elevações de tensão(SWELL)	18
1.2.7	Variações de longa duração	18
1.2.8	Desequilíbrio de tensão	19
1.2.9	Distorção da Forma de Onda	19
1.3	Princípios de Máquinas Elétricas	20
1.3.1	Motor de indução	20
1.3.2	Máquina síncrona	21
1.4	Objetivo Geral	22

2	Materiais e Métodos	24
2.1	Determinação de Parâmetros	24
2.1.1	Introdução	24
2.1.2	Transformador Trifásico	24
2.1.3	Motor de Indução Gaiola de Esquilo	27
2.1.4	Máquina Síncrona operando como gerador	29
2.1.5	Sistema Elétrico	32
2.1.6	Simulações dinâmicas em ambiente SIMULINK	33
3	Resultados e Discussões	34
3.1	Estudo de casos	34
3.1.1	Ensaio Experimentais	34
3.1.2	Simulações dinâmicas	40
3.1.3	Considerações finais	43
4	Conclusões	45
	Referências	46

Lista de Figuras

1	Estrutura básica de um motor de indução.	21
2	Estrutura básica de uma máquina síncrona.	22
3	Ensaio do transformador trifásico a vazio.	25
4	Circuito Equivalente por fase do transformador trifásico.	25
5	Ensaio do transformador trifásico em curto-circuito.	26
6	Circuito equivalente por fase do motor de indução trifásico	27
7	Curva característica obtida através do ensaio a vazio	30
8	Curva característica obtida através do ensaio em curto-circuito	32
9	Montagem utilizada para realização dos ensaios	33
10	Ligação entre o transformador, o motor de indução e a máquina síncrona na bancada	33
11	Diagram de blocos do 1º Caso	34
12	1º Caso - Formas de onda de tensão Fase A	35
13	1º Caso - Formas de onda de corrente fase A	35
14	Diagram de blocos do 1º Caso	35
15	2º Caso - Formas de onda de tensão fase A	36
16	2º Caso - Detalhe do pico da forma de onda de tensão fase A	36
17	2º Caso - Detalhe do pico da forma de onda de tensão fase B	37
18	2º Caso - Formas de onda de corrente fase A	37
19	Diagram de blocos do 1º Caso	37
20	3º Caso - Formas de onda de tensão fase A	38
21	3º Caso -Detalhe do pico da forma de onda de tensão fase A	38

22	3º Caso - Formas de onda de tensão fase B	38
23	3º Caso - Formas de onda de tensão fase C	39
24	3º Caso - Detalhe do pico da forma de onda de corrente fase A	39
25	4º Caso - Formas de onda de tensão fase A	39
26	4º Caso - Formas de onda de tensão fase B	40
27	4º Caso - Detalhe do pico da forma de onda de tensão fase B	40
28	1º Caso - Formas de onda de tensão	41
29	1º Caso - Formas de onda de corrente	41
30	2º Caso - Formas de onda de tensão	41
31	2º Caso - Formas de onda de corrente	42
32	3º Caso - Formas de onda de tensão Fase A	42
33	3º Caso -Formas de onda de corrente	42
34	4º Caso - Formas de onda de tensão	43
35	4º Caso - Formas de onda de corrente	43

Lista de Tabelas

1	Categorias e Características dos Fenômenos Eletromagnéticos em Sistema Elétrico	15
2	Dados adquiridos no ensaio a vazio do transformador trifásico	25
3	Dados adquiridos no ensaio de curto-circuito do transformador	26
4	Dados adquiridos no ensaio a vazio do motor de indução	28
5	Dados adquiridos no ensaio com rotor bloqueado do motor de indução . . .	28
6	Dados adquiridos no ensaio a vazio da máquina síncrona	30
7	Dados adquiridos no ensaio de curto-circuito da máquina síncrona	32

1 *Introdução*

Qualidade de Energia Elétrica é uma área de constante crescimento e é responsável por estudar os Sistemas de Energia Elétrica de maneira a abordar temas imprescindíveis para a Engenharia Elétrica. O termo Qualidade de Energia Elétrica(QEE) é vinculado diretamente a todo e qualquer estudo que visa a melhoria das condições de todo e qualquer fenômeno que afeta os Sistemas Elétricos de Energia(SEE).

Durante anos, diversos distúrbios e fenômenos nos SEE foram registrados porém, por não haver um estudo completo sobre sua influência e importância nos sistemas, estes eram analisados de forma dispersa e sem levar em conta a relação entre eles. No entanto, o estudo aprofundado e mais detalhado só vem sendo feito a algumas décadas de forma que, todo trabalho abordando essa temática tem suma importância na melhoria das condições de QEE. Para isso é necessário que haja um verdadeiro comprometimento entre todos os setores envolvidos neste processo desde a concessionária de energia elétrica, quanto os consumidores, bem como universidade e fabricantes de equipamentos a fim de que se alcance o maior entendimento possível sobre o assunto.

Outro desafio encontrado foi aliar todos os conceitos de forma a trabalhar com uma nomenclatura adequada. Até a criação de um órgão responsável por isso existia bastante dificuldade em abordar QEE em trabalhos e artigos oficiais tais como, conceituação apropriada, simbologia padronizada, definição de assuntos pertinentes.

Por fim, a conscientização sobre este assunto faz-se extremamente necessária já que o crescimento de pólos industriais, assim como os sistemas de distribuição, fabricantes de equipamentos e consumidores aumenta exponencialmente a medida que também tem aumentado a exigência quanto a qualidade do serviço prestado, principalmente se tratando de SEE.

1.1 Qualidade de Energia Elétrica

1.1.1 Introdução

Historicamente, o termo Qualidade de Energia foi inicialmente atribuído aos fenômenos de harmônicas, passando a ser o principal item abordado no cenário mundial da década de 60. Seus impactos nos sistemas de transmissão de corrente contínua e nos sistemas de potência de corrente alternada (HVDC) foram quase unanimidade nas publicações da primeira metade da década de 70; (A.G. Phadke 1968)[1],(Ainsworth 1967)[2], (A. Lacoste 1969)[3]. Trabalhos de pesquisadores brasileiros como (de Oliveira, 1978)[4], (Ribeiro, 1975)[5] também abordavam o assunto, fazendo com que o tema harmônicos em SEE deixasse de ser exclusividade dos sistemas HVDC. A partir daí outros distúrbios passaram a ser relacionados a Qualidade de Energia como por exemplo os afundamentos de tensão (Key 1979)[6].

Em 1984 foi realizado o 1st ICHPS(International Conferency on Harmonics in Power Systems) patrocinado pelo IEEE tornando-se o principal evento internacional especializado. No entanto, com o avanço dos estudos e das tecnologias computacionais, os problemas de qualidade passaram a ser muito maiores do que simplesmente harmônicas e mais uma vez houve a necessidade do crescimento de pesquisas e trabalhos no assunto. O termo QEE passou a englobar todos os possíveis distúrbios nos Sistemas de Energia Elétrica englobando agora, um vasto acervo de temas para serem enfocados em artigos e publicações.

1.1.2 Porque estudar Qualidade de Energia Elétrica?

O principal motivo para estudar QEE é seu valor econômico. Existem impactos econômicos nos serviços de utilidade, seus clientes e os fornecedores de equipamentos de carga. A qualidade de energia pode ter um impacto econômico direto em diversos consumidores industriais. Recentemente, existe uma grande preocupação em automatizar e modernizar os equipamentos no ambiente industrial. Isso normalmente significa , controladores eletrônicos e equipamentos de energia mais eficientes que são usualmente mais sensíveis aos distúrbios. Além das razões econômicas existem inúmeros custos indiretos associados aos problemas de energia elétrica. Clientes residenciais não sofrem diretamente com as perdas financeiras resultantes de problemas de QEE mas, quando estão fazendo uso de novas tecnologias , como por exemplo o uso de computadores, se tornam mais sensíveis a interrupções. Fornecedores de equipamentos de carga geralmente enfrentam um mer-

cado competitivo, então há sempre a busca por equipamentos com menor custos. Por isso há uma resistência econômica em adicionar recursos ao equipamento para reduzir distúrbios, através da utilização de filtros e outros componentes que inevitavelmente irão agregar novos custos ao produto. Muitos fabricantes também não estão cientes dos tipos de distúrbios que podem ocorrer em sistemas de potência.

Os efeitos produzidos pela má qualidade de energia nos equipamentos elétricos são variáveis, indo desde ligeiros aquecimentos até falha total. Cada tipo de equipamento sensível aos distúrbios, principalmente os eletrônicos, difere em seu comportamento em relação às quantidades e intensidades das variações das grandezas elétricas, antes que ocorra uma falha. Fatores importantes na ocorrência de uma falha de um equipamento[7] são:

- O tipo, magnitude e duração do distúrbio;
- A sensibilidade do equipamento em relação ao distúrbio;
- A localização no sistema de distribuição do consumidor, e
- A idade do equipamento.

1.2 **Descrições dos principais distúrbios de QEE**

1.2.1 **Introdução**

Os distúrbios aos quais o sistema elétrico está exposto podem ser caracterizados de diversas maneiras: em função da duração do evento (curta, média ou longa duração), da faixa de frequência envolvida (baixa, média, ou alta frequência), dos efeitos causados (aquecimento, vibrações, cintilação luminosa(flicker), erro de medidas, perda de eficiência, redução da vida útil) ou da intensidade do impacto (pequeno, médio ou grande impacto). Para uma boa caracterização é necessário conhecer melhor as características de cada tipo de distúrbio conforme pode-se observar através da tabela 1 [8].

Por outro lado, os níveis dos índices de desempenho quanto ao aspecto de conformidade das ondas da tensão e corrente também devem ser avaliados, sendo importante neste caso, a implantação de sistema de monitoramento. No entanto, apesar de se tentar atingir este objetivo, devido à presença de cargas produtoras de distorções nos sistemas de energia elétrica, torna-se impossível conseguí-lo. A constante tentativa de se conseguir este objetivo representa hoje uma das mais importantes prioridades do setor elétrico.

Atualmente, problemas envolvendo a qualidade de energia ocorrem com significativa frequência, em função da sensibilidade dos modernos equipamentos utilizados na automação industrial e necessidade permanente de otimização da produção. Desta forma, inúmeros são os relatos de casos que mostram falhas e operações inadequadas dos modernos acionamentos de máquinas dos mais variados processos industriais, decorrentes de variações na qualidade do fornecimento de energia elétrica, principalmente devido aos afundamentos de tensão.

Categorias	Espectro	Duração	Tensão
1:1 Transitórios Impulsivos			
1:1:1 Nanosegundos	5 ns pico	<50 ns	
1:1:2 Microsegundos	1 μ s pico	50 ns-1 ms	
1:1:3 Milisegundos	0,1 ms pico	>1ms	
1:2 Transitórios Oscilatórios			
1:2:1 Baixa Frequência	< 5 kHz	0,3-50 ms	0 - 4pu
1:2:2 Media Frequência	5-500 kHz	20 μ s	0 - 8pu
1:2:3 Alta Frequência	0,5-5 MHz	5 μ s	0 - 4pu
2:0 Variações de curta duração			
2:1 Instântaneos			
2:1:1 Afundamento (Sag)		0,5 - 30 ciclos	0,1 - 0,9pu
2:1:2 Elevação (Swell)		0,5 - 30 ciclos	1,1 - 1,8pu
2:2 Momentâneo			
2:2:1 Interrupção		0,5 ciclos - 3s	<0,1pu
2:2:2 Afundamento (Sag)		30ciclos - 3s	0,1 - 0,9pu
2:2:3 Elevação (Swell)		30 ciclos - 3s	1,1 - 1,4pu
2:3 Temporário			
2:3:1 Interrupção		3s - 1min	<0,1pu
2:3:2 Afundamento (Sag)		3s - 1min	0,1 - 0,9pu
2:3:3 Elevação (Swell)		3s - 1min	1,1 - 1,2pu
3:0 Variações de Longa Duração			
3:1 Interrupção Permanente		>1 min	0,0pu
3:2 Subtensão		>1min	0,8 - 0,9pu
3:3 Sobretensão		>1min	1,1 - 1,2pu
4:0 Desequilíbrio de Tensão		est. perman.	0,5 - 2%
5:0 Distorção da Forma de Onda			
5:1 Compensação CC(DC off-set)		est. perman.	0 - 0,1%
5:2 Harmônicas	0-100thH	est. perman.	0 - 20%
5:3 Inter Harmônicas	0-6kHz	est. perman.	0 - 2%
5:4 Recortes de comutação(Notching)		est. perman.	
5:5 Ruído	banda larga	est. perman.	0 - 1%
6:0 Flutuação de Tensão	<25Hz	intermitente	0,1 - 7%
7:0 Variações de Frequência da Rede		<10s	

Tabela 1: Categorias e Características dos Fenômenos Eletromagnéticos em Sistema Elétrico

Aqui serão descritos com mais ênfase os fenômenos [8] que estão relacionados na tabela 1, procurando assimilar os termos propostos de forma a utilizá-los nas análises de curvas obtidas durante as medições em ambiente industrial.

1.2.2 Transitórios

O termo transitório tem sido usado para analisar variações no sistema de energia elétrica ao longo do tempo. Este nome imediatamente faz aparecer a idéia de um evento que pode ser indesejável mas que existe momentaneamente. A mais importante definição usa a expressão rápido e menciona as frequências até 3MHz quando define transitório dentro de um contexto de avaliação nos sistemas de cabos em subestações. A idéia de um transitório de oscilação amortecida devido a uma rede RLC é também mencionado.

Este é o tipo de fenômeno no qual a maioria dos engenheiros de potência pensam quando ouvem a expressão transitório. O tempo em que os sistemas passam nas condições transitórias é insignificante quando comparado com o tempo passado no regime permanente. Entretanto os períodos em que os sistemas passam em condições transitórias são extremamente importantes, pois é neste período que os componentes do sistema sofrem as maiores solicitações de corrente ou de tensão.

1.2.3 Variações de curta duração

As variações de curta duração da tensão são quase sempre causadas por condições de falta, de energização de grandes cargas que requerem altas correntes de partida ou a perda intermitente das conexões com o sistema elétrico. Dependendo da localização da falta e das condições do sistema, a falta pode causar aumentos temporários da tensão, afundamentos de tensão, ou uma completa perda de tensão(interrupção). A condição de falta pode estar perto ou longe do ponto de interesse. Em ambos os casos, o impacto sobre a tensão durante a condição de falta efetiva é uma variação de curta duração. As mudanças na corrente que caem dentro das categorias de duração e amplitude também estão incluídas na variação de curta duração.

A situação mais crítica associada com as interrupções, afundamentos e elevações é a paralização de equipamento. Em muitos ambientes industriais com um processo contínuo de fabricação, como exemplo pode-se citar as fábricas de papel, ainda que ocorra uma duração instantânea dos fenômenos pode causar uma paralização dos equipamentos cujo religamento pode acontecer por um período de horas, devido a complexidade deste

processo industrial. Portanto, desta forma pode-se considerar que o efeito provocado em determinados processos de fabricação é o mesmo, tanto para fenômenos de curta-duração como longa-duração.

1.2.4 Interrupção

Uma interrupção ocorre quando a alimentação da tensão ou a corrente de carga decresce para menos que $0,1pu$ em um período não superior a um minuto. Interrupções podem ser o resultado de faltas no sistema de energia elétrica, falhas em equipamentos e controle com funcionamento defeituoso. As interrupções podem ser medidas através de sua duração desde que a amplitude da tensão seja sempre menor que 10% da nominal. A duração de uma interrupção devido a uma falta no sistema utilitário é determinada pelo instrumento de proteção e pelo evento particular que está causando a falta. A duração de uma interrupção devido ao funcionamento defeituoso do equipamento ou perda da conexão pode ser irregular.

Algumas interrupções podem ser precedidas de um afundamento de tensão quando são ocasionadas por faltas no sistema de alimentação. O afundamento de tensão ocorre entre o tempo em que se inicia a falta e a operação do dispositivo de proteção. Com uma falha no alimentador, as cargas experimentarão um afundamento de tensão e logo após uma interrupção. A duração de uma interrupção dependerá da capacidade do instrumento de proteção refazer o fechamento. Refazer o fechamento instantâneo geralmente limitará a interrupção causada por uma falta não permanente por menos de 30 ciclos.

1.2.5 Afundamentos de tensão(SAGS)

Os afundamentos de tensão são usualmente associados com faltas no sistema mas também podem ser causados pelo chaveamento de cargas pesadas ou partida de grandes motores. O afundamento de tensão pode ser associado com uma falha monofásica da linha para terra (SLG-single line-to-ground). Da mesma forma, uma falta em um circuito alimentador paralelo resultará em uma queda de tensão no barramento da subestação que afetará todos os outros alimentadores até que a falta seja eliminada. Uma falta típica, será eliminada em um tempo que varia de 3 a 30 ciclos, dependendo da amplitude da corrente de falta, da operação da proteção de sobrecorrente e das consequências da interrupção.

Afundamentos de tensão podem também ser causados pela entrada de uma carga, de porte significativo em relação ao nível de curto-circuito local ou a partida de motor.

Um motor de indução provocará uma corrente de 6 a 10 vezes a corrente de plena carga durante a partida. Durante este período a corrente ocasiona uma queda da tensão através da impedância do sistema. Se a amplitude da corrente for alta em relação à corrente de falta admissível pelo sistema, o afundamento de tensão resultante pode ser significativo.

1.2.6 Elevações de tensão(SWELL)

Do mesmo modo que os afundamentos, as elevações são usualmente associadas com as condições de faltas do sistema, mas elas são muito menos comuns que os afundamentos de tensão. A elevação pode ocorrer em razão de uma falta monofásica entre linha e terra(fase), resultando em um aumento temporário da tensão nas fases sem defeito. Elevações podem também ser causadas pelo desligamento de uma grande carga ou a conexão de um grande banco de capacitor.

As elevações são caracterizadas pela sua amplitude e duração. A severidade da elevação de tensão durante uma condição de falta depende da localização da falta, impedância do sistema e do aterramento [8]. O tipo de falta mais comum que aparece em um sistema é o curto-circuito monofásico, sendo que o bifásico e o trifásico, envolvendo ou não a presença da terra, muito menos frequentes. A ocorrência da falta fase-terra em um determinado ponto acarreta uma elevação da tensão nas outras duas fases, cujo o valor depende principalmente do grau de aterramento do sistema no ponto em questão. Esta condição de aterramento é expressa através do fator de falta para terra. Seu valor é independente do valor real da tensão de operação no local considerado, sendo calculado a partir das impedâncias de sequência de fase. Ele traduz a relação entre o valor máximo eficaz de tensão fase-terra à frequência industrial de uma fase não afetada durante a falta e o valor da tensão fase-terra à frequência industrial no mesmo ponto, com a falta removida [9].

1.2.7 Variações de longa duração

As variações de longa duração abrangem desvios dos valores eficazes em tempos maiores do que 1 minuto. Consultando a tabela 1 pode-se verificar as amplitudes para cada caso (interrupção permanente, subtensão, sobretensão). As variações de longa duração são consideradas existentes quando os limites são excedidos por mais que 1 minuto. Variações de longa duração podem ser sobretensões ou subtensões, dependendo da causa da variação. Sobretensões e subtensões, geralmente não são resultado de faltas no sistema. Elas são causadas por variações de carga e operações de chaveamentos no sistema.

1.2.8 Desequilíbrio de tensão

Desequilíbrio são variações desiguais em amplitudes e fases das tensões trifásicas, são causadas pela conexão desigual de cargas mono ou bifásicas em sistemas trifásicos, por cargas trifásicas não lineares importantes que podem produzir desequilíbrio como os fornos de arco elétrico.

O grau de desequilíbrio de tensão é definido como a razão da componente de sequência negativa ou sequência zero em relação a componente de sequência positiva. As tensões de sequência negativa ou zero em um sistema de energia elétrica geralmente são consequência de um desequilíbrio de cargas que causam um fluxo de correntes de sequência negativa ou zero. O desequilíbrio pode ser estimado como o desvio máximo da média das tensões ou correntes nas três fases, dividido pela média das tensões ou correntes nas três fases, expresso em porcentagem [10], onde:

$$t_d = \frac{100 \times m_{dt}}{t_m} \% \quad (1.1)$$

onde:

t_d = tensão de desequilíbrio

m_{dt} = máximo desvio de tensão média

t_m = tensão média

1.2.9 Distorção da Forma de Onda

A distorção da forma de onda é um desvio no estado permanente de uma onda senoidal ideal na frequência da rede caracterizada principalmente pelo conteúdo espectral do desvio. Há cinco tipos principais de distorção da forma de onda: Nível Contínuo(DC Off-set), harmônicas, interharmônicas, recortes(notching), Ruído(Noise), sendo a principal delas a qual terá enfoque neste trabalho as distorções harmônicas.

Harmônicos

Os harmônicos são tensões ou correntes senoidais com frequências que são múltiplos inteiros da frequência na qual o sistema de alimentação está projetado para operar (chamada de frequência fundamental; geralmente 50Hz ou 60Hz). Os harmônicos combinam-se com a tensão ou corrente fundamental, e produzem distorção na forma de onda [8][11].

A distorção harmônica existe devido às características não lineares dos dispositivos e cargas no sistema de energia elétrica. Estes dispositivos podem ser modelados como fontes de corrente que injetam correntes harmônicas no sistema de energia elétrica. A distorção da tensão ocorre quando estas correntes causam quedas não lineares nas impedâncias do circuito. A distorção harmônica é uma preocupação crescente para muitos consumidores e para todo o sistema de energia elétrica devido ao aumento da aplicação de equipamentos eletrônicos de potência.

Um problema de grande destaque é o da ampliação das ondas distorcidas devido ao fenômeno da ressonância. De fato, existem duas formas de ressonância e ambas devem ser consideradas: a ressonância série e a ressonância paralela.

Os níveis de distorção harmônica podem ser caracterizados pelo espectro harmônico completo com amplitudes e ângulo de fase de cada componente harmônico individual. É também comum usar um único valor, a distorção harmônica total *DHT* dado pela equação , como uma medida da amplitude da distorção harmônica [12].

$$DHT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \times 100\% \quad (1.2)$$

onde:

DHT = Distorção Harmônica Total

V_h = amplitude dos componentes harmônicos individuais(valores eficazes)[V]

h = ordem da harmônica

V_1 = Valor eficaz da tensão fundamental[V]

1.3 Princípios de Máquinas Elétricas

1.3.1 Motor de indução

Um motor de indução é uma máquina onde uma corrente alternada é fornecida ao estator diretamente e para o rotor por indução ou por uma ação transformadora do estator. Quando excitado por uma fonte trifásica balanceada de tensão senoidal e produzindo um campo magnético girante no entreferro que gira na velocidade síncrona, determinado pelo número de pólos do estator e a da frequência aplicada ao estator f_e . [13]

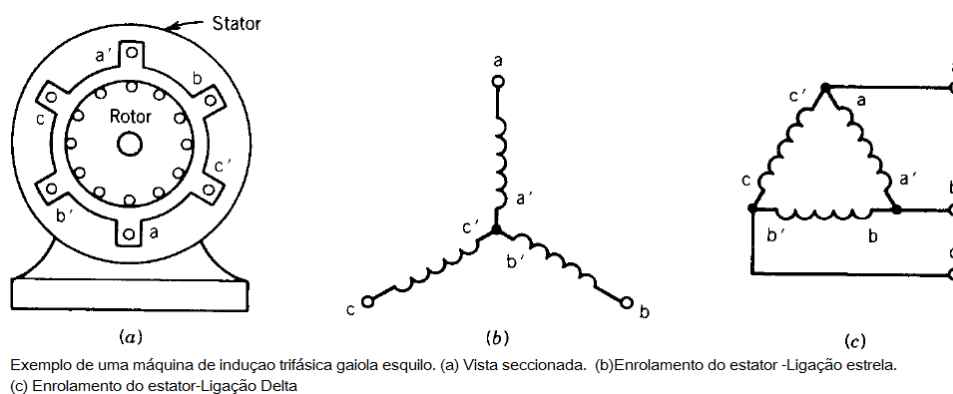


Figura 1: Estrutura básica de um motor de indução.

O rotor de máquinas de indução polifásicas pode ser de dois tipos: de rotor bobinado e de gaiola de esquilo. Um rotor bobinado é construído com um enrolamento trifásico similar ao estator e com o mesmo número de pólos. O rotor gaiola de esquilo, ilustrado na figura 1 consiste de barras de alumínio ou de cobre encaixadas nas ranhuras de ferro do rotor e curto-circuitadas nas duas extremidades por meio de anéis terminais de alumínio ou de cobre. Os terminais do enrolamento do rotor são conectados por anéis isolados montados no eixo. Usando escovas estacionárias pressionando os anéis, os terminais do enrolamento do rotor pode ser conectada à um circuito externo. De fato, uma resistência externa pode ser conectada com o intuito de realizar o controle de velocidade do motor de indução.[14]

1.3.2 Máquina síncrona

A máquina síncrona (MS) tem como característica principal a produção de um campo eletromagnético por uma corrente contínua, assim como uma máquina CC, bem como outro campo magnético provido das correntes do estator. Uma máquina síncrona gira sempre na velocidade constante em seu estado de regime permanente. Ao contrário das máquinas de indução, o campo girante de entre-ferro e o rotor na máquina síncrona giram na mesma velocidade chamada velocidade síncrona.

As máquinas síncronas, assim como as demais máquinas, podem ser utilizadas tanto como motores como geradores. Devido a razões construtivas e ao seu maior custo em relação às máquinas de indução, elas são, entretanto mais utilizadas como geradores para potências acima de 50HP. Como motores eles são em geral utilizados em altas potências (acima de 60 CV), onde apresentam vantagens importantes em relação aos motores indução, como controle do fator de potência[14].

A máquina síncrona é composta de um estator, onde são alojados os enrolamentos e

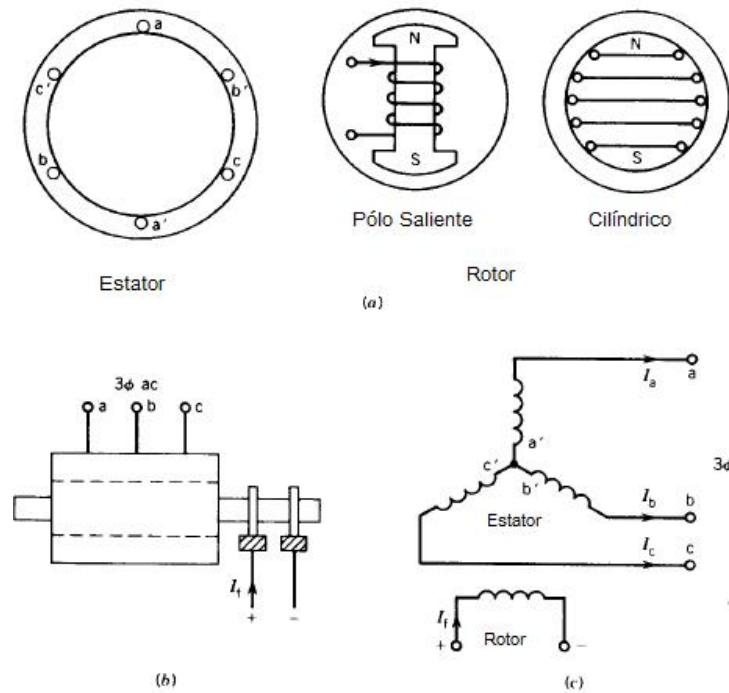


Figura 2: Estrutura básica de uma máquina síncrona.

onde é induzida uma tensão pelo movimento do rotor, excitação em tensão contínua. Esta tensão é alternada, a qual produz uma corrente, quando o mesmo se encontra sob carga. o rotor contém um enrolamento que é alimentado com corrente contínua e que serve para criar o campo magnético na máquina.

O estator de uma máquina síncrona trifásica tem um enrolamento trifásico distribuído similar ao de uma máquina de indução trifásica. O rotor tem um enrolamento chamado enrolamento de campo. O enrolamento de campo na estrutura móvel é normalmente alimentado por uma fonte externa através de anéis coletores e escovas. A estrutura básica de uma máquina síncrona é ilustrado na figura 2.

1.4 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo monitorar certos distúrbios comuns que ocorrem transformadores trifásicos empregados em sistemas elétricos industriais de forma que após realizar uma análise e estudo , seja possível propor estratégias e soluções a serem aplicadas nestes sistemas. Dado o objetivo geral, têm-se como objetivos específicos:

- Estudar de forma simplificada os componentes desses sistemas (motores, geradores, cargas);

- Identificar as características de tensão e corrente sob o transformador;
- Simular no MatLab(SIMULINK) os casos estudados experimentalmente para comprovações teórico-experimentais;
- Realizar discussões sobre as possíveis causas destes distúrbios

2 Materiais e Métodos

2.1 Determinação de Parâmetros

2.1.1 Introdução

Em sistemas industriais os principais problemas relacionados a QEE estão ligados ao funcionamento dos transformadores. Diversas cargas são conectadas a este componente de forma que o funcionamento do sistema depende de suas características e de seu desempenho diante das situações de variações de carga.

Para analisar o comportamento do transformador trifásico inicialmente foram feitas simulações dinâmicas de um sistema elétrico industrial e para que fosse possível realizar simulações deste sistema foi necessário fazer o levantamento dos parâmetros e das características de cada componente do sistema. O transformador, o motor de indução gaiola de esquilo, e o gerador síncrono foram ensaiados no laboratório.

2.1.2 Transformador Trifásico

De acordo com [13], algumas características apresentadas para um transformador ideal não são válidas para um transformador real. Por exemplo, os enrolamentos apresentam resistências, nem todas as ligações dos enrolamentos tem o mesmo fluxo, a permeabilidade do material de ferromagnético não é infinita e ocorrem perdas de ferro devido a histerese e correntes de Foucault e parasitas. Para determinar os parâmetros do transformador foram feitos os ensaios tradicionais em vazio e de curto-circuito.

Dados nominais do Transformador

Os dados nominais da máquina são imprescindíveis para realização dos ensaios acima citados.

Composto por 3 transformadores monofásicos

Potência nominal- 3 KVA

Tensão primário - 110 – 220 – 440 V

Frequência - 60 Hz

Ensaio a vazio

Deste ensaio determina-se, as perdas no ferro e os parâmetros do ramo magnetizante. Daí, calcula-se os valores R_p (resistência de perdas no ferro e de X_m (reatância de magnetização). O esquema é apresentado na figura 3.

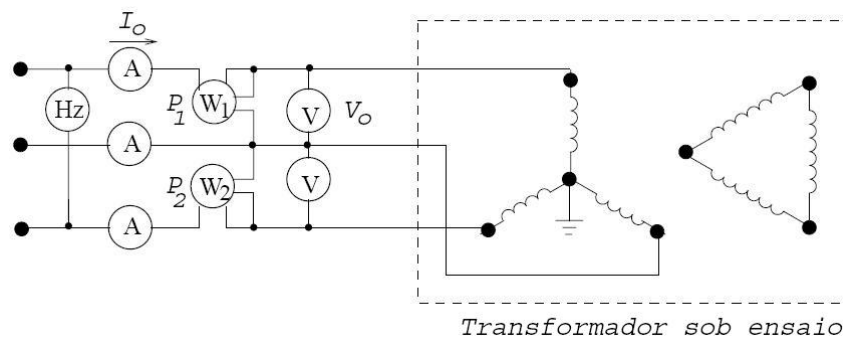


Figura 3: Ensaio do transformador trifásico a vazio.

V_o	I_a	I_b	I_c	$\frac{I_a+I_b+I_c}{3} = I_o$	$P1 + P2 = P_o$
220 V	1,58 A	1,47 A	1,66 A	1,57 A	170 W

Tabela 2: Dados adquiridos no ensaio a vazio do transformador trifásico

Com os dados da tabela 2 pode-se determinar os parâmetros do ramo magnetizante considerando o circuito equivalente da figura 4:

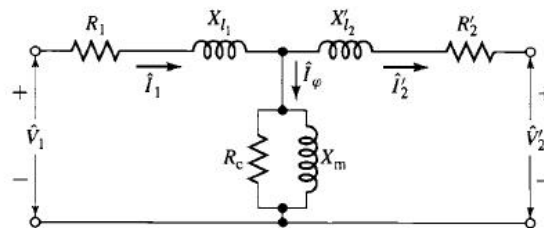


Figura 4: Circuito Equivalente por fase do transformador trifásico.

Decompondo a corrente I_o teremos:

$$\cos(\phi) = \frac{P_o}{3 \frac{V_o}{\sqrt{3}} I_o} = \frac{170}{3 \times \frac{220}{\sqrt{3}} \times 1,57} = 0,284 \quad (2.1)$$

$$\phi = 73,49^\circ \quad (2.2)$$

$$I_p = I_o \times \cos(\phi) = 1,57 \times \cos(80,55) = 0,446A \quad (2.3)$$

$$I_q = I_o \times \sin(\phi) = 1,57 \times \sin(80,55) = 1,505A \quad (2.4)$$

$$R_c = \frac{127^2}{\frac{170}{3}} = 284,63\Omega \quad (2.5)$$

De 2.4 temos I_q que representa a porcentagem da corrente sob a reatância X_m [15]:

$$X_m = \frac{V_o}{\frac{\sqrt{3}}{I_q}} = \frac{220}{\frac{\sqrt{3}}{1,505}} = 84,37\Omega \quad (2.6)$$

Ensaio de Curto-circuito

Quando realizado no transformador, como visto na figura 5 submetido a corrente e frequências nominais este ensaio fornece diretamente o valor de suas perdas no cobre P_{cc} correspondentes as condições de plena carga [16]. Fornece, também dados suficientes para o cálculo da impedância equivalente Z_{eq} referida ao lado primário.

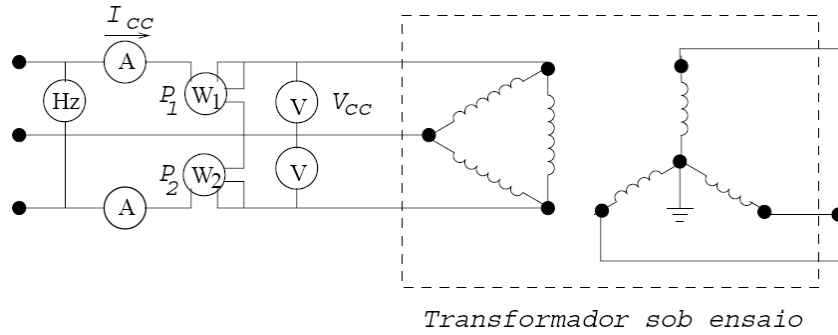


Figura 5: Ensaio do transformador trifásico em curto-circuito.

V_{cc}	I_{cc}	P_{cc}
90 V	7,9 A	430 W

Tabela 3: Dados adquiridos no ensaio de curto-circuito do transformador

Com os dados da tabela 3 e para o lado secundário referido ao primário e obedecendo a relação

$$a = \frac{V_1}{V_2} = \frac{1}{\sqrt{3}}$$

$$Z_{eq} = Z_1 = \frac{V_{cc}}{I_{cc}} = \frac{90}{7,9} = 11,39\Omega$$

$$R_{eq} = R_1 = \frac{P_{cc}}{3I_{cc}^2} = \frac{430}{3 \times 7,9^2} = 2,29\Omega$$

$$X_{eq} = \sqrt{Z_1^2 - R_1^2} = \sqrt{11,39^2 - 2,29^2} = 11,15\Omega$$

$$R_1 = a^2 R_2$$

$$X_1 = a^2 X_2$$

2.1.3 Motor de Indução Gaiola de Esquilo

Para obtenção das características magnéticas, a máquina é operada na velocidade síncrona, o enrolamento do estator é ligado em estrela e alimentado por uma fonte senoidal de tensões trifásicas balanceadas. Os parâmetros da máquina referem-se àqueles do seu circuito equivalente, de acordo com a figura 6, e são obtidos pelos métodos tradicionais: medição de resistência do estator, ensaios a vazio e rotor bloqueado.

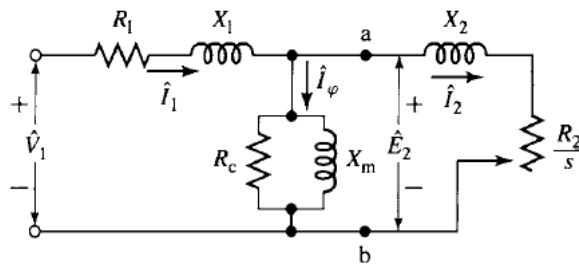


Figura 6: Circuito equivalente por fase do motor de indução trifásico

Onde:

R_1 = Resistência do enrolamento do estator

X_1 = Reatância do estator

X_m = Reatância magnetizante

R_2 = Resistência referida do rotor

X_2 = Reatância referida do rotor

Dados nominais do Motor de Indução

Tensão Nominal - 220 V

Potência nominal - 1 KVA

Número de pólos - 4

Rotação- 1750 RPM

Medição da resistência do enrolamento do estator por fase:

$$R_1 = 11\Omega$$

Ensaio a vazio

Assim como teste a vazio do transformador, o ensaio a vazio do motor de indução dá informações a respeito da corrente de excitação e das perdas a vazio. Este teste é realizado na frequência nominal e com tensão trifásica aplicadas aos terminais do estator.

V_o	I_o	P_o
220 V	0,9 A	180 W

Tabela 4: Dados adquiridos no ensaio a vazio do motor de indução

Com os dados da tabela 4:

$$R_o = \frac{P_o}{3I_o^2} = \frac{180}{3 \times 0,9^2} = 74,07\Omega \quad (2.7)$$

$$Z_o = \frac{\frac{V_o}{\sqrt{3}}}{I_o} = \frac{\frac{220}{\sqrt{3}}}{0,9} = 141,13\Omega \quad (2.8)$$

De 2.8 e 2.7:

$$X_o = \sqrt{Z_o^2 - R_o^2} = \sqrt{141,13^2 - 74,07^2} = 120,13\Omega \quad (2.9)$$

Analisando o circuito equivalente da figura 6 para o ensaio a vazio[14],

$$X_o = X_1 + X_m \quad (2.10)$$

Ensaio com rotor bloqueado

V_{RB}	I_{RB}	P_{RB}	F_{RB}
185 V	2,95 A	500 W	60 Hz

Tabela 5: Dados adquiridos no ensaio com rotor bloqueado do motor de indução

$$R_{BL} = \frac{P_{RB}}{3I_{RB}^2} = \frac{500}{3 \times 2,95^2} = 19,15\Omega \quad (2.11)$$

$$Q_{BL} = \sqrt{S_{BL}^2 - P_{BL}^2} = \sqrt{\left(3 \times \frac{185}{\sqrt{3}} \times 2,95\right)^2 - 500^2} = 802,02 \text{ V Ar} \quad (2.12)$$

$$X_{BL} = \frac{Q_{BL}}{3I_{RB}^2} = \frac{802,02}{3 \times 2,95^2} = 30,727 \Omega \quad (2.13)$$

Após a obtenção desses parâmetros, uma expressão para a impedância de entrada do estator pode ser obtida assumindo que as retâncias são os valores equivalentes a frequência nominal e também que $R_2 \ll X_m$ [13].

$$R_{BL} = R_1 + R_2 \left(\frac{X_m}{X_2 + X_m} \right)^2 \quad (2.14)$$

$$X_{BL} = X_1 + X_2 \left(\frac{X_m}{X_2 + X_m} \right) \quad (2.15)$$

De 2.15 e 2.14 e 2.10, aproximando $X_1 = X_2$ [14] e $R_1 = 11 \Omega$ temos que:

$$X_m = 68,16 \Omega$$

$$X_1 = X_2 = 51,97 \Omega$$

$$R_2 = 25,31 \Omega$$

Com isso, todos os parâmetros para o motor de indução foram determinados.

2.1.4 Máquina Síncrona operando como gerador

As características fundamentais podem ser determinadas por ensaios [13], assim como os realizados no transformador. O primeiro é feito com os terminais da armadura(estator) em aberto e o segundo, com os terminais de armadura curto-circuitados. Com isso é possível levantar os parâmetros necessários do motor para serem utilizados nas simulações.

Dados nominais da Máquina Síncrona

Tensão nominal - 220-380V

Potência nominal- 1 KVA

Número de pólos - 4

Rotação síncrona - 1800 RPM

Ensaio a vazio

A tabela 6 possui os valores da tensão de saída de linha do gerador V_L em função da corrente de campo I_f . Com esse valores é possível determinar a curva para o ensaio a vazio.

$I_f(A)$	$V_L(V)$	$I_f(A)$	$V_L(V)$
0	24	0.63	208
0.06	47	0.69	212
0.1	77	0.72	215
0.16	107	0.75	217
0.2	126	0.8	220
0.24	139	0.86	223
0.28	155	0.9	225
0.33	167	0.94	228
0.35	173	0.98	231
0.38	179	1.04	233
0.4	183	1.07	235
0.42	186	1.10	235
0.44	191	1.14	238
0.48	194	1.18	239
0.5	196	1.2	241
0.56	202	1.3	242

Tabela 6: Dados adquiridos no ensaio a vazio da máquina síncrona

O curva característica do ensaio a vazio representa a relação entre a componente espaço-fundamental do fluxo de entreferro e a F_{mm} agindo no circuito magnético quando os enrolamentos de campo constituem a única fonte de F_{mm}

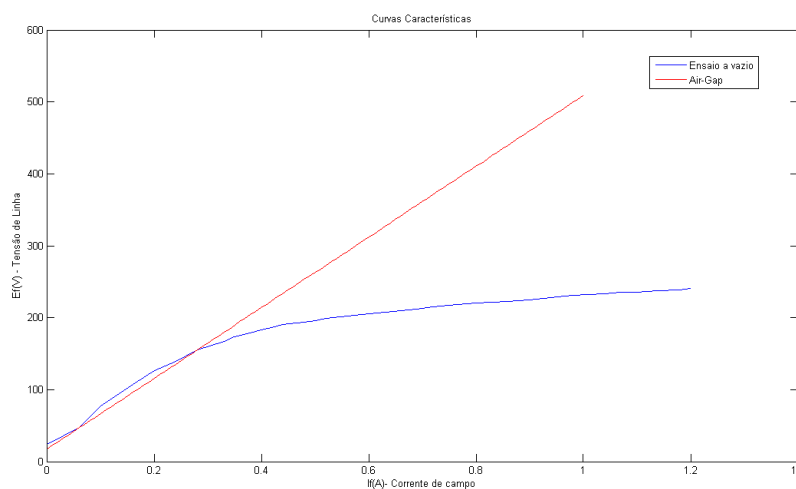


Figura 7: Curva característica obtida através do ensaio a vazio

A curva característica a vazio, ilustrada na figura 7 representa a relação entre a tensão de saída e a corrente de campo. Como pode ser visto na mesma figura, inicialmente a curva é linear com o aumento da corrente de campo I_f . Esse intervalo da curva corresponde a linha de entreferro que representa o intervalo correspondendo a operação linear. Como os enrolamentos de armadura da máquina estão abertos a tensão terminal é igual a tensão gerada E_{af} . Portanto é possível medir a indutância mútua campo-armadura. A equação que descreve a linha de entreferro foi levantada levando em conta o intervalo que obedece uma linearidade correspondendo ao intervalo insaturado da curva característica a vazio.

Cálculo da curva:

$$\frac{\Delta Y}{\Delta X} = \frac{(155 - 47)}{(0,28 - 0,06)} = 491 = a \quad (2.16)$$

Onde a= coeficiente angular da reta

$$V_L = 491I_f + b \quad (2.17)$$

b= coeficiente linear da reta

Calculando b a partir de um do ponto (0.06, 47) temos:

$$b = 17,55$$

Analisando o curva na figura 7 a vazio vemos que a corrente de campo I_f correspondente a tensão nominal V_L é:

$$I_f = 0,8A$$

Com este valor de corrente de campo obtemos a tensão equivalente para este valor na linha do entreferro.

$$V_{ef} = 410,4V$$

Ensaio Curto-Circuito

A característica de curto-circuito é obtida curto-circuitando os terminais do estator. Com a máquina acionada na velocidade síncrona, a corrente de campo é variada e portanto uma curva da corrente de armadura I_a em função da corrente de campo I_f é obtida. Essa relação é chamada de Característica de curto-circuito. A tabela 7 mostra a característica de curto-circuito da máquina.

A figura 8 foi levantada a partir dos dados da tabela 7 e ilustra a corrente de armadura

I_{cc}	I_f	I_{cc}	I_f
0.26	0.02	1.57	0.22
0.55	0.07	1.77	0.25
0.80	0.11	2.02	0.29
0.93	0.13	2.22	0.32
1.14	0.16	2.54	0.36
1.37	0.19	2.72	0.39

Tabela 7: Dados adquiridos no ensaio de curto-circuito da máquina síncrona

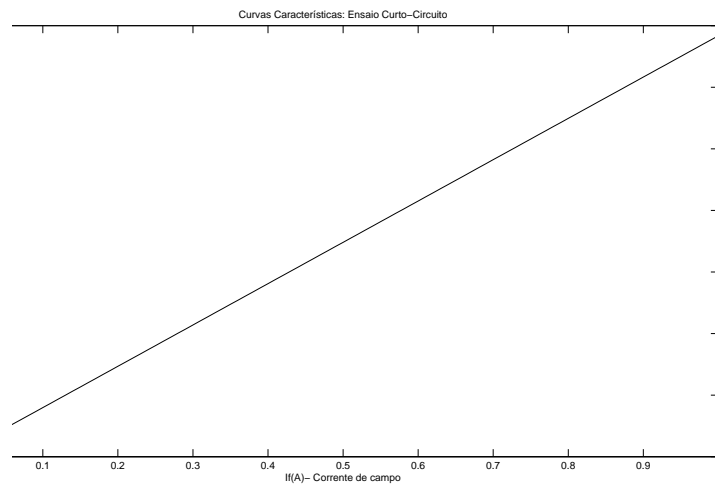


Figura 8: Curva característica obtida através do ensaio em curto-circuito

I_a em função da corrente de campo I_f .

Escolhendo dois conjuntos de pontos da tabela 7 foi levantada a equação da curva característica pelo mesmo método utilizado no levantamento da curva característica da linha de entreferro representada pela figura 8.

Com as curvas 7 e 8 são calculadas as retâncias insaturadas e saturadas:

$$Z_{insat} = \frac{410,14}{\sqrt{3}} = 43,16\Omega$$

$$Z_{sat} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 23,13\Omega$$

2.1.5 Sistema Elétrico

A figura 9 ilustra o sistema montado e utilizado no laboratório do Departamento de Engenharia Elétrica para realizar os ensaios e as medições.

A figura 10 mostra, mais detalhadamente, o sistema montado, com o transformador, o motor de indução e a máquina síncrona.

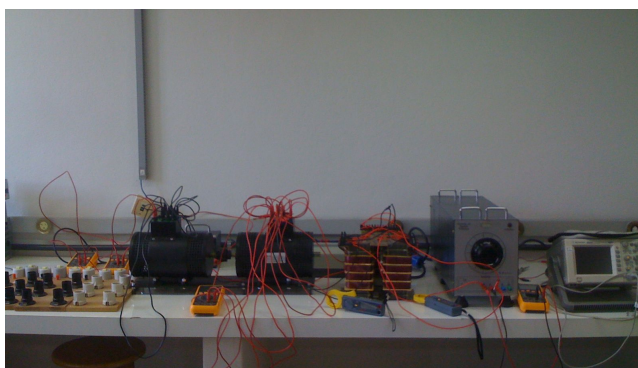


Figura 9: Montagem utilizada para realização dos ensaios

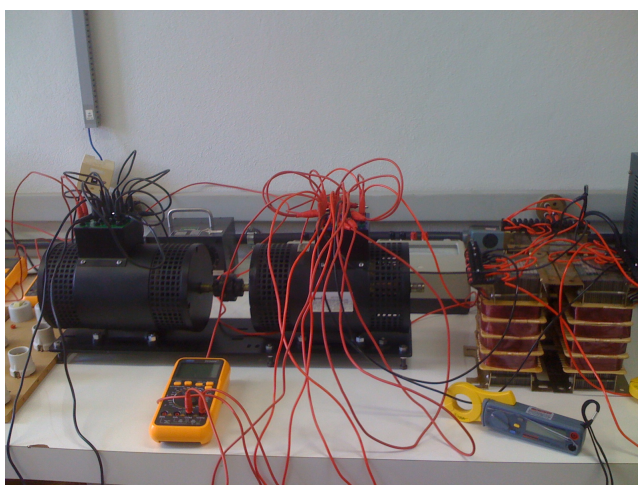


Figura 10: Ligação entre o transformador, o motor de indução e a máquina síncrona na bancada

Além das máquinas já citadas neste capítulo foram utilizados como auxílio: multímetros, amperímetros alicates, wattímetros e um osciloscópio digital responsável pela aquisição das formas de onda durante os ensaios.

2.1.6 Simulações dinâmicas em ambiente SIMULINK

Após o levantamento dos parâmetros e características das máquinas e equipamentos utilizados nos ensaios experimentais foram feitas simulações em ambiente SIMULINK. Estas simulações são de extrema importância para se obter as grandezas de fase, tensão e corrente que serão utilizadas para comprovações teórico-experimentais. Foram determinados 4 casos a serem analisados neste sistema elétrico. Para cada caso simulado, o sistema também é testado experimentalmente de forma a validar os resultados encontrados nas simulações e identificar as causas e consequências das possíveis discrepâncias entre os resultados encontrados.

3 *Resultados e Discussões*

3.1 Estudo de casos

Nos casos abaixo descritos, o sistema elétrico é formado pelas máquinas descritas no Capítulo 2. As ligações em cada componente foi feitas da seguinte forma:

Transformador trifásico: Ligação $\Delta - Y$

Motor de indução: Ligação $\Delta\Delta$

Gerador Síncrono: Ligação $\Delta\Delta$

Carga resistiva: Ligação Δ

Essas ligações foram feitas de forma a otimizar o sistema ensaiado e de acordo com o manual de cada máquina. As formas de onda aqui ilustradas e comentadas foram medidas com o osciloscópio digital no lado secundário do transformador.

3.1.1 Ensaio Experimentais

1º Caso: Transformador alimentando Motor de Indução a vazio

O diagrama que ilustra as ligações entre os componentes neste ensaio está representado na figura 11. O monitoramento das curvas foi feita com o osciloscópio digital.

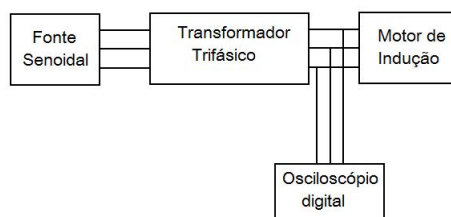


Figura 11: Diagram de blocos do 1º Caso

Neste primeiro caso as formas de onda de tensão e corrente das 3 fases apresentam similaridade caracterizando uma situação próxima ao equilíbrio e por isso, somente uma

das fases é ilustrada nas figuras 12 e 13 . No entanto, é possível notar outros tipos de distorções na forma de onda, já que estamos tratando de uma situação prática onde fatores, como temperatura, confiabilidade dos equipamentos influenciam nos resultados.. É válido ressaltar que a tensão apresenta uma maior distorção em relação a corrente podendo isso ser justificado pelo fato da variável, tensão, ser mais sensível as condições do transformador trifásico.

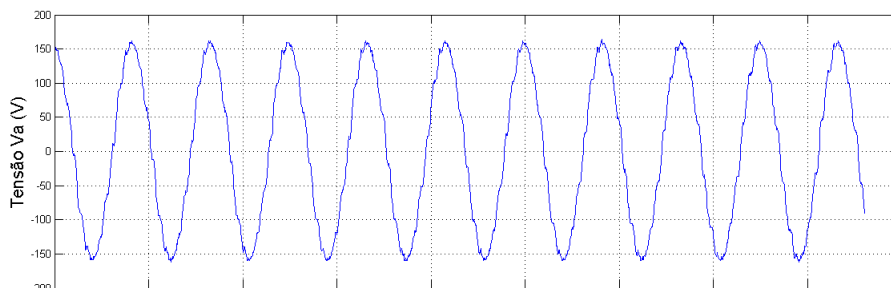


Figura 12: 1º Caso - Formas de onda de tensão Fase A

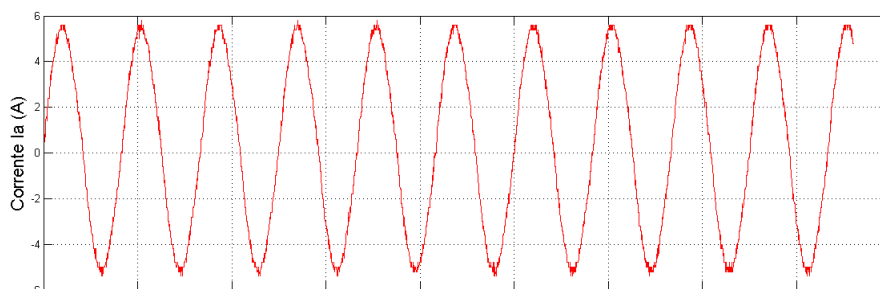


Figura 13: 1º Caso - Formas de onda de corrente fase A

2º Caso: Transformador alimentando Motor de Indução e Gerador Síncrono

Mais uma vez, o diagrama que ilustra as ligações entre os componentes neste ensaio está representado na figura 14. O gerador síncrono foi acoplado ao eixo do motor de indução, sendo o segundo responsável pela energia mecânica fornecida ao gerador.

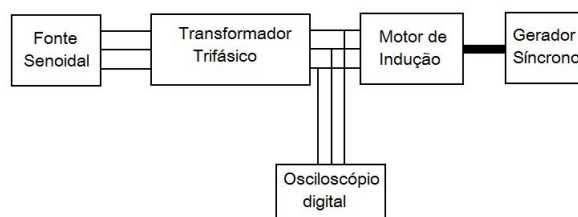


Figura 14: Diagram de blocos do 1º Caso

No segundo caso, nota-se uma grande distorção com a inserção do gerador síncrono. As fases A e C apresentam características próximas o que é ilustrado pela figura 15. Já a fase B, apresenta um afundamento de tensão no momento que o gerador é acionado, perpetuando essa situação durante todo o intervalo de tempo observado. Além disso, as distorções durante os picos de tensão são visíveis como pode ser visto na figura 16.

O sistema já mostra seus primeiros sinais de desequilíbrio. Mais uma vez as correntes das 3 fases não se distinguem tão intensamente pois, apesar de haverem possíveis distorções harmônicas estas não são tão visíveis. Isso pode ser justificado por exemplo, pela presença das cargas resistivas que atuam no amortecimento destas distorções de corrente.

Após algum tempo de operação o sistema composto pelo transformador, motor de indução e gerador síncrono passou a apresentar os primeiros sinais de sobrecarga, onde os equipamentos sobreaqueceram e portanto tiveram que ser desligados antes da execução do próximo caso.

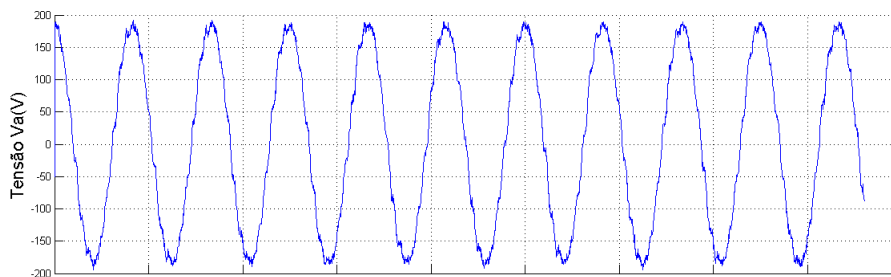


Figura 15: 2º Caso - Formas de onda de tensão fase A

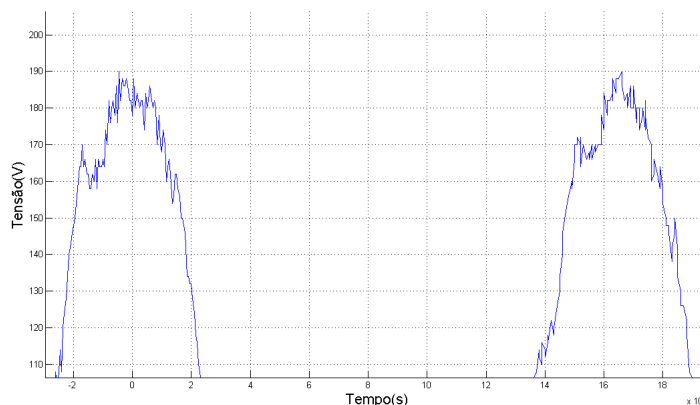


Figura 16: 2º Caso - Detalhe do pico da forma de onda de tensão fase A

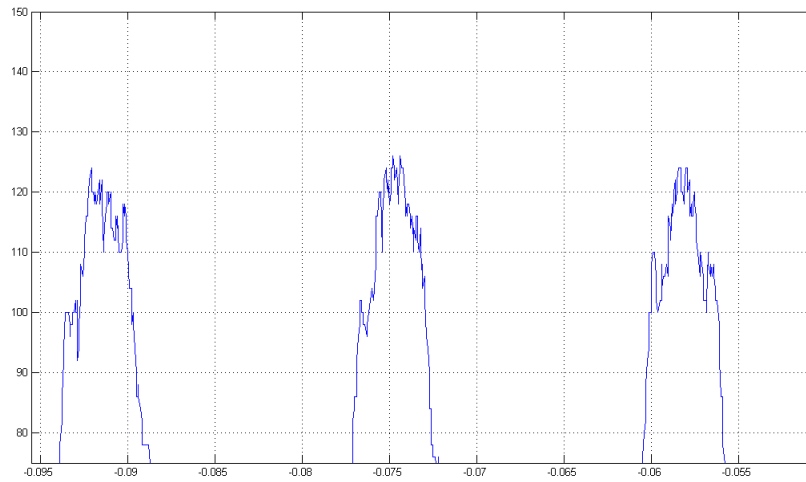


Figura 17: 2º Caso - Detalhe do pico da forma de onda de tensão fase B

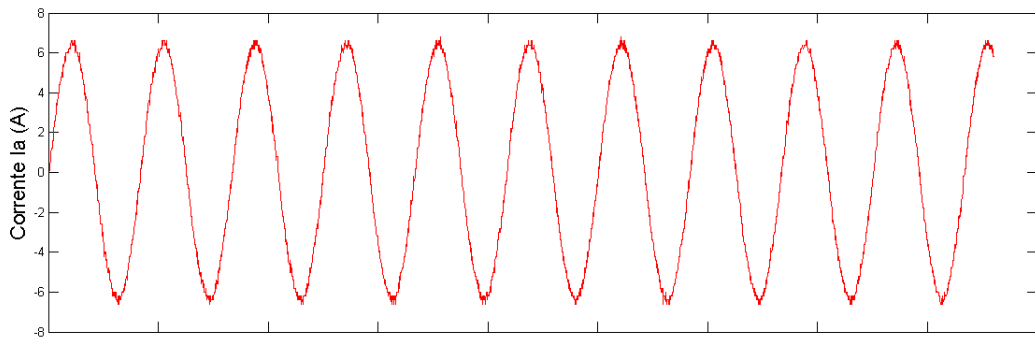


Figura 18: 2º Caso - Formas de onda de corrente fase A

3º Caso: Transformador alimentando Motor de Indução e Gerador Síncrono com Carga resistiva de 200 W equilibrada

O diagrama que ilustra as ligações entre os componentes neste ensaio está representado na figura 19. As cargas resistivas foram ligados em Δ na saída do gerador síncrono.

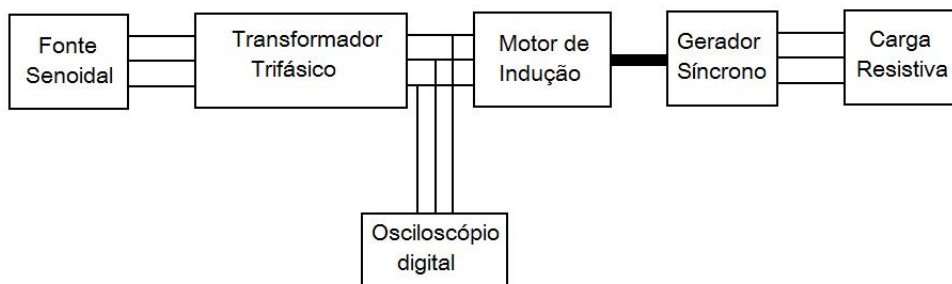


Figura 19: Diagram de blocos do 1º Caso

As tensões das 3 fases demonstram total desequilíbrio, e, o afundamento maior de tensão é mais uma vez observado na fase B como ilustra a 20. As correntes das 3 fases apresentam certo equilíbrio não sendo afetadas tão intensamente pelo inserção das cargas resistivas.

Mais uma vez é possível notar a presença das distorções harmônicas nas correntes como mostra a figura 24. Neste momento, notamos que no momento de inserção das cargas em cada fase, as formas de onda sofrem variações intensas e além disso, é necessário ajustar a corrente de campo para que a tensão na saída do gerador síncrono seja a mesma.

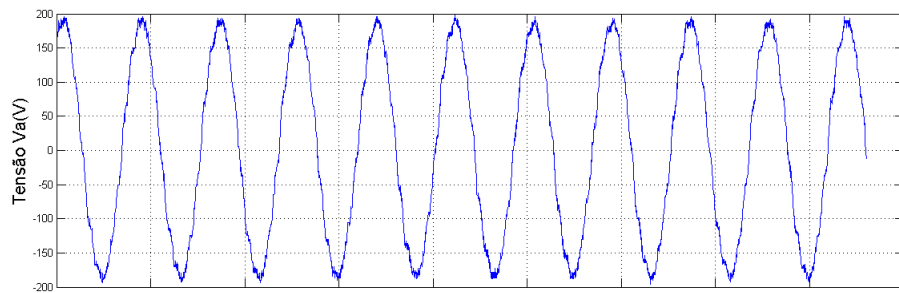


Figura 20: 3º Caso - Formas de onda de tensão fase A

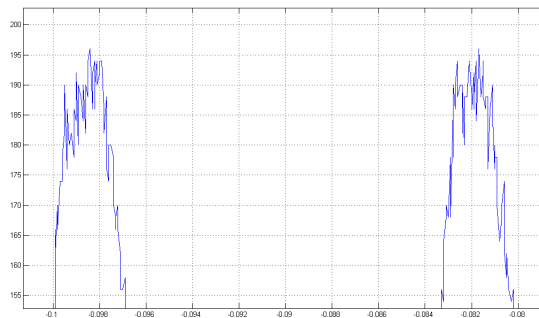


Figura 21: 3º Caso -Detalhe do pico da forma de onda de tensão fase A

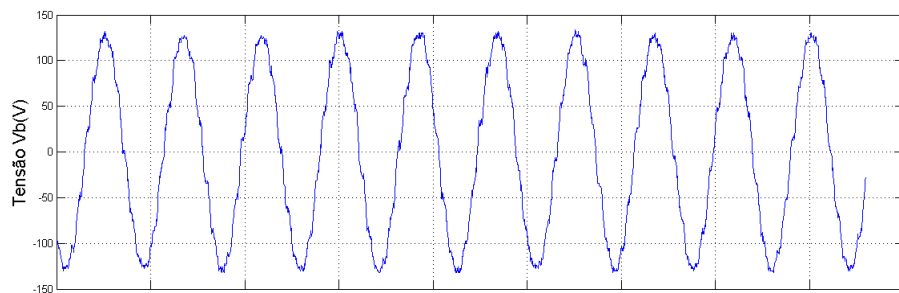


Figura 22: 3º Caso - Formas de onda de tensão fase B

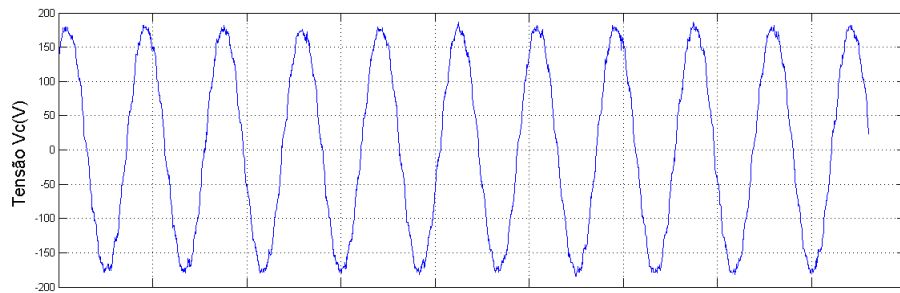


Figura 23: 3º Caso - Formas de onda de tensão fase C

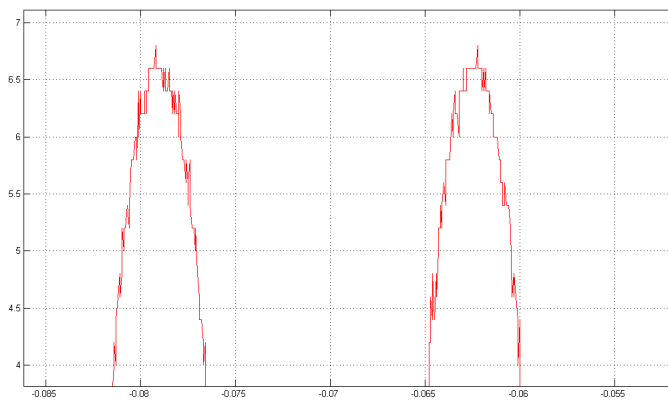


Figura 24: 3º Caso - Detalhe do pico da forma de onda de corrente fase A

4º Caso: Transformador alimentando Motor de Indução e Gerador Síncrono com carga resistiva de 200 W em uma das fases, sistema desequilibrado

Neste caso uma carga resistiva de 200 W foi introduzida em apenas uma das fases, sendo está a fase A de forma a simular um sistemas desequilibrado. As formas de onda das fases A e B que não possuem carga são ilustradas pela figura 25. No entanto, a fase B observado na figuras 26 e no detalhe da figura27 apresenta uma subtensão acentuada. O diagrama que ilustra essa última situação é o mesmo da figura 19.

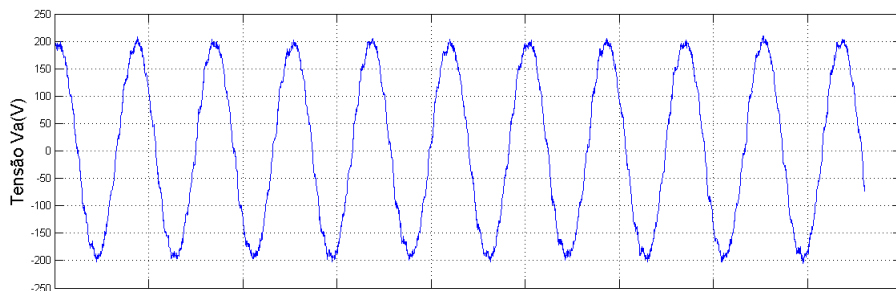


Figura 25: 4º Caso - Formas de onda de tensão fase A

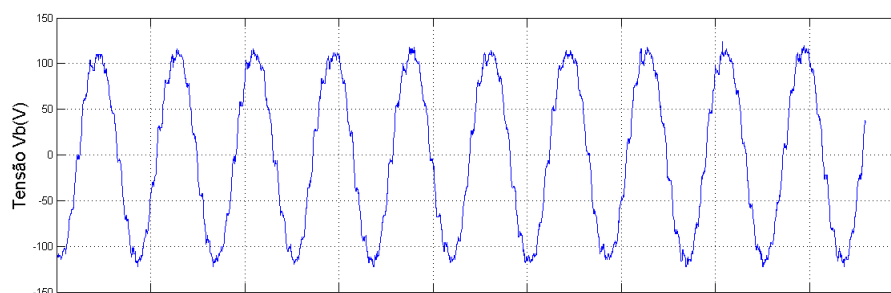


Figura 26: 4º Caso - Formas de onda de tensão fase B

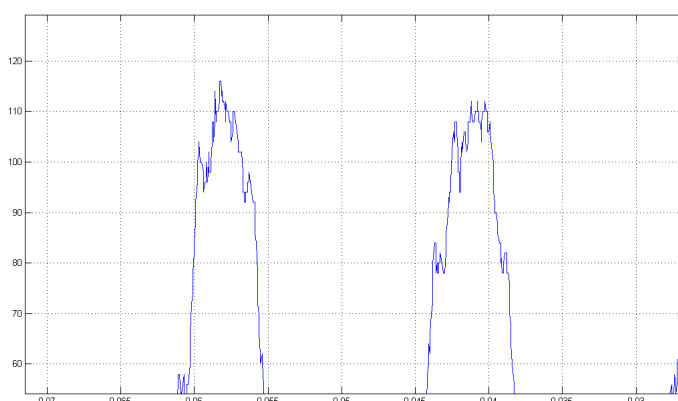


Figura 27: 4º Caso - Detalhe do pico da forma de onda de tensão fase B

Um 5º caso deveria ser realizado, para sistema em equilíbrio com mais carga resistiva. Porém, quando a carga de 500 W foi chaveada em cada chave o sistema instantaneamente apresentava sinais de supercarga e era interrompido.

3.1.2 Simulações dinâmicas

Com a intenção de validar os resultados encontrados experimentalmente foram feitas simulações dinâmicas no MatLab(SIMULINK) de todos 4 casos avaliados anteriormente. Os parâmetros de cada máquina foram levantados no Capítulo 2 e utilizados para simular o sistema da forma mais real possível. Os diagramas referentes às simulações são os mesmos dos utilizados nos ensaios experimentais, figuras 11, 14 e 19.

1º Caso: Transformador alimentando Motor de Indução a vazio

Nesta primeira simulação, pode-se observar tanto as tensões estão equilibradas. Em contrapartida, as correntes apresentam um leve desequilíbrio. É possível notar o transitório da corrente, que será observado em todos os casos devido ao momento de partida

do motor durante cada simulação. O valor da corrente difere bastante do encontrado na prática e isso pode ser justificado devido a algum problema da montagem ou em algum dos equipamentos utilizados.

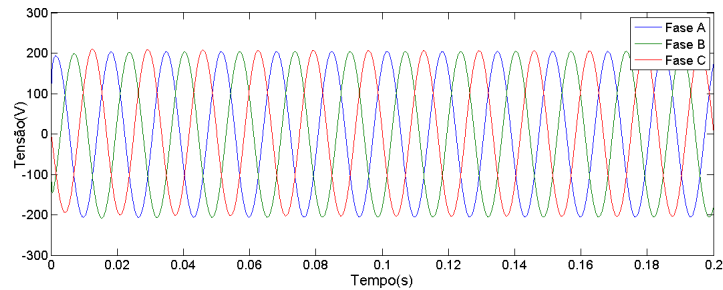


Figura 28: 1º Caso - Formas de onda de tensão

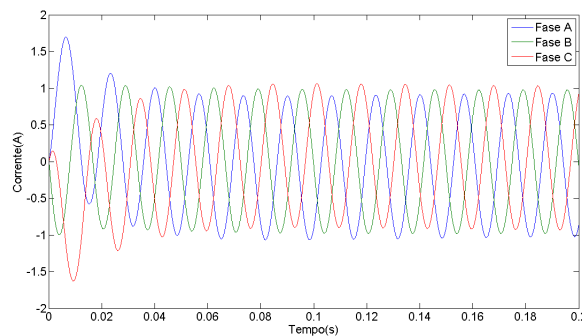


Figura 29: 1º Caso - Formas de onda de corrente

2º Caso: Transformador alimentando Motor de Indução e Gerador Síncrono

No segundo caso, a presença do gerador síncrono não impõe uma grande mudança no comportamento das tensões e correntes de cada fase, apresentando quase as mesmas curvas 30 e 31.

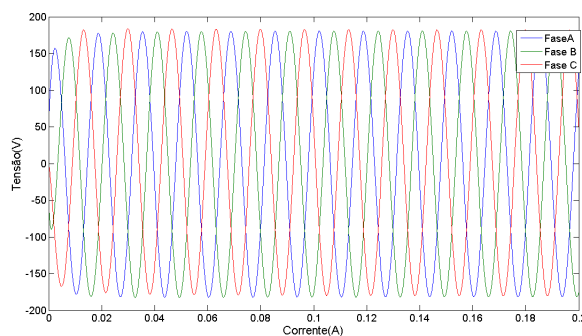


Figura 30: 2º Caso - Formas de onda de tensão

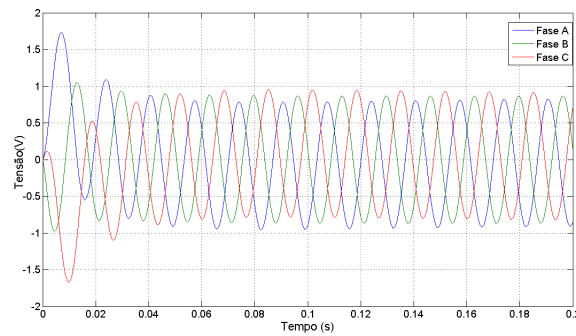


Figura 31: 2º Caso - Formas de onda de corrente

3º Caso: Transformador alimentando Motor de Indução e Gerador Síncrono com Carga resistiva de 200 W equilibrada

Com a inserção da carga resistiva a uma queda expressiva nas tensões e correntes das 3 fases Porém, mesmo com essa subtensão o sistema é caracterizado como equilibrado.

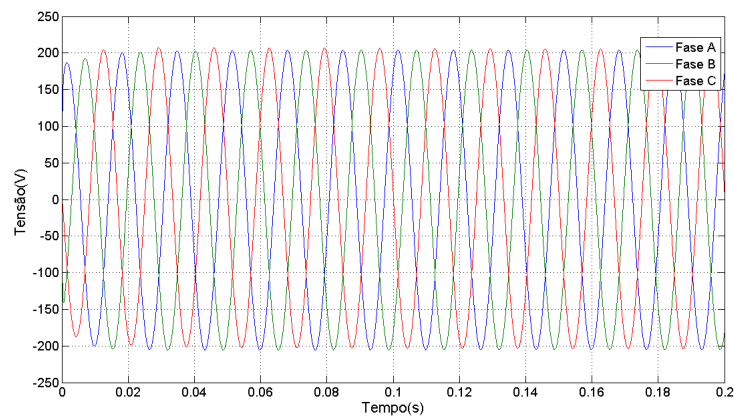


Figura 32: 3º Caso - Formas de onda de tensão Fase A

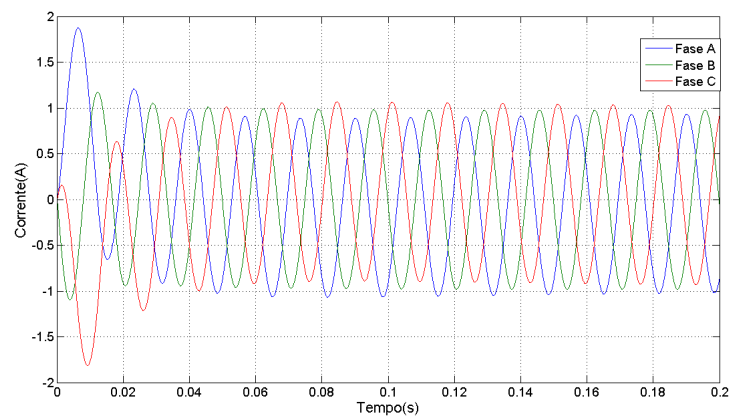


Figura 33: 3º Caso - Formas de onda de corrente

4º Caso: Transformador alimentando Motor de Indução e Gerador Síncrono com carga resistiva de 200 W em uma das fases(*sistema desequilibrado*)

Neste último caso, vemos que, com um sistema desequilibrado, as características das tensões se mostram igualmente desequilibradas, mesmo que de forma suave.

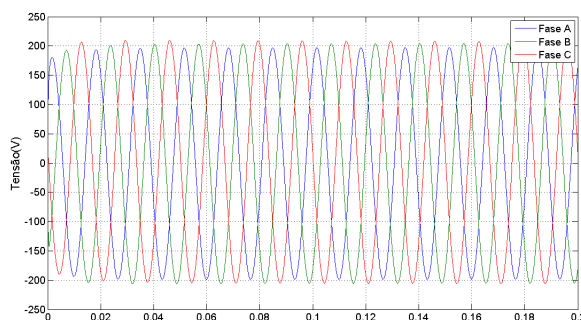


Figura 34: 4º Caso - Formas de onda de tensão

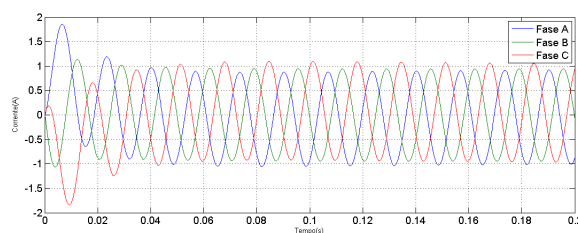


Figura 35: 4º Caso - Formas de onda de corrente

3.1.3 Considerações finais

Em condições normais, o transformador trifásico deveria obedecer a relação de transformação de $\frac{V_1}{V_2} = \frac{1}{\sqrt{3}}$, como foi observado durante um teste realizado no laboratório somente com cargas resistivas. No entanto, ao inserirmos o motor de indução trifásico, caracterizando portanto uma carga predominantemente indutiva, pode-se perceber que o transformador não obedecia a relação, ficando portanto sobrecarregado. Para se alcançar a tensão desejada no lado secundário, era necessário uma tensão muito maior, e principalmente uma corrente muito acima da nominal no lado primário do transformador. Portanto, nos 4 casos apresentados, o valor de corrente medido, está muito acima do esperado, como pode ser notado nas simulações dinâmicas. Essa situação, não é desejável pois altas correntes podem levar a diminuição do tempo de vida do equipamento, além de seu mau funcionamento.

Outro ponto importante que deve ser destacado é o fato de que apesar de não ser

possível a visualização, em todos os casos estudados apresenta possíveis distorções de 3^a, 5^a e 7^a harmônicas justamente pela presença dos motores no sistema. No entanto, para ter-se a certeza da presença destas distorções são necessários equipamentos para o domínio da frequência.

É válido ressaltar, que as simulações são apenas, um método de comparação e análise e não correspondem fielmente a situações observadas na prática, já que os equipamentos estão sujeitos à diversos outros fatores, como temperatura, regulação imprópria, desgaste devido ao uso intenso ou mau-uso, além de uma possível falha nos aspectos construtivos do transformador. É facilmente notado que as formas de onda das simulações apresentam poucas distorções, variando somente em relação a sua amplitude com inserção ou não de cargas.

Outro fator que deve ser discutido é o fato de que a tensão apresenta distorções mais intensas do que a corrente. Fenômenos como harmônicos e distúrbios não podem ser observados com muita clareza devido as limitações dos instrumentos de aquisição de dados e de medições disponíveis no laboratório.

4 *Conclusões*

Este trabalho teve como principal objetivo descrever os distúrbios em sistemas elétricos industriais. Aliando teoria e prática foi possível estudar a análise minuciosamente estes fenômenos ligados a Qualidade de Energia Elétrica.

As simulações realizadas são uma forma de tentar validar o sistema ensaiado na prática. No entanto, como pode ser observado, os valores reais dos ensaios diferem dos encontrados nas simulações. Como resultado disso, no que se refere à origem das distorções nas formas de onda de tensão e corrente foi verificado que o transformador trifásico era o principal causador destes distúrbios já que apresentava sérios problemas quanto a regulação e funcionamento.

Para trabalhos futuros, com os conhecimentos aqui adquiridos, é interessante verificar, por exemplo, quais são as causas destes problemas referentes ao transformador trifásico, além de incrementar o sistema ensaiado com banco de capacitores, inversores de frequência que são equipamentos muito sensíveis a qualquer distúrbio e grande causadores de harmônicos.

Referências

- [1] PHADKE, A. g.; H harlow J. *Generation of abnormal harmonics in high voltage ac/dc power systems. IEEE-PAS.* [S.l.], 1968.
- [2] AINSWORTH, J. *Harmonic instability between controlled static convertors and ac networks. Proc.IEE.* [S.l.], 1967.
- [3] LACOSTE, A.; ELECTR., R. gen. *Courants oscillatoires entretenus dans un reseau par un desequilibre particulier des angles de commande d'un convertisseur courant alternatif/ courant continu.* [S.l.], 1969.
- [4] OLIVEIRA, J. C. de. *Multiple Converter Calculations with Non-Ideal Conditions.* Tese (Doutorado) — Victoria University of Manchester, 1978.
- [5] RIBEIRO P. F., T. . I. S. . V. Y. . . Tese (Doutorado).
- [6] KEY, T. S. *Diagnosing power quality-related computer problems. IEEE Transactions on Industry Applications.* [S.l.], 1979.
- [7] SALEM, F.; SIMMON, R. *Power quality from a utility perspective. Conference on Harmonics and Quality of Power, University of Florida III, 874-881, YEAR = 2000,.* [S.l.].
- [8] IEEE1159. *IEEE Std 1159-1995, IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. The Institute of Electrical and Electronics Engineers,Inc.* [S.l.], 1995.
- [9] CAMPOS, J. C. da C. *Estratégias de Conservação e Qualidade de Energia Aplicadas na Indústria.* Tese (Doutorado) — Unicamp, Campinas, SP, 2001.
- [10] IEEE141. *IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants.* [S.l.], 1993.
- [11] IEEE1100. *Recommended Practice for Powering and Grounding Sensitive Electronic Equipment. The Institute of Electrical and Electronics Engineers,Inc.* [S.l.], 1992.
- [12] IEEE519. *IEEE Std 519-1996,IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Eletrical Power Systems. The Institute of Electrical and Electronics Engineers,Inc.* [S.l.], 1996.
- [13] FITZGERALD, A. E.; JR., C. K.; UMANS, S. D. *Electric Machinery.* [S.l.]: McGraw-Hill, 2003.
- [14] SEN, P. C. *Principles of Electric Machines and Power Electronicsgnitions.* [S.l.]: John Wiley e Sons, INC, 1997.

- [15] OLIVEIRA, J. C. R.; COGO, J. R.; ABREU, J. P. G. de. *Processamento Digital de Sinais, Projeto e Análise de Sistemas*. [S.l.]: Ed. Bookman, 2004.
- [16] JORDÃO, R. G. *Transformadores*. [S.l.]: Edngard Blucher LTDA, 2002.