

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

RAFAEL ASSIS DAMASCENO

**DESEQUILÍBRIOS DE TENSÕES E FALTAS FASE-TERRA EM UM  
MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO LIGADO EM ESTRELA NÃO  
ATERRADO**

VIÇOSA  
2015

RAFAEL ASSIS DAMASCENO

**DESEQUILÍBRIOS DE TENSÕES E FALTAS FASE-TERRA EM UM  
MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO LIGADO EM ESTRELA NÃO  
ATERRADO**

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 Tarcísio de Resende.

VIÇOSA  
2015



**RAFAEL ASSIS DAMASCENO**

**DESEQUILÍBRIOS DE TENSÕES E FALTAS FASE-TERRA EM UM  
MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO LIGADO EM ESTRELA NÃO  
ATERRADO**

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 julho de 2015.

COMISSÃO EXAMINADORA

---

**Prof. Dr. José Tarcísio de Resende - Orientador**  
Universidade Federal de Viçosa

---

**Prof. Dr. Mauro de Oliveira Prates - Membro**  
Universidade Federal de Viçosa

---

**Eng. Eletricista Ms. André Luis Carvalho Mendes - Membro**  
Universidade Federal de Viçosa

*“Quando penso que cheguei ao meu limite, descubro que tenho forças para ir além.”*

*(Ayrton Senna)*

*À memória de meu pai, Antônio, e à  
minha mãe, Helena, pelo incentivo e  
apoio.*

## *Agradecimentos*

À Deus pela minha vida e por conduzir todos os meus passos.

Ao orientador desta monografia, Prof. José Tarcísio de Resende, pela disponibilidade, paciência, apoio e incentivo durante o desenvolvimento do trabalho e pelas diversas sugestões e esclarecimentos para que pudesse concretizar este trabalho.

À banca examinadora escolhida para avaliar esta monografia por suas sugestões e ideias que enriqueceram este trabalho.

A todos professores do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Viçosa pelo meu desenvolvimento profissional e acadêmico adquirido durante a graduação.

A todos servidores do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Viçosa, em especial, Sirene e Cláudio, pela atenção, dedicação e apoio, e Lúcio e Michael, pelo auxílio durante os ensaios em laboratório.

A todos colegas do curso de graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Viçosa pela amizade e apoio.

Aos meus pais, Antônio, que me ajuda a conduzir meus passos, e Helena, pelo suporte, amor incondicional, carinho e dedicação contínua durante toda minha vida.

Aos meus irmãos, Carlos e Leila, pelo apoio e companheirismo.

## *Resumo*

Este trabalho estuda a aplicação de uma modelagem matemática da máquina de indução trifásica, incluindo a saturação magnética, para analisar desequilíbrios de tensões e falta fase-terra em um motor de indução trifásico com os terminais do estator ligados em estrela não aterrado. É um trabalho que dá a continuidade a outro desenvolvido, onde o mesmo trabalhou com desequilíbrios de tensões para o motor ligado em triângulo [15]. A diferença nesta monografia está na ligação estrela, onde o comportamento das tensões de fase diante de desequilíbrio de fase tomam outros rumos, além de que são verificados a análise das curvas de torque e velocidade, bem como a simulação de falta fase-terra em uma das fases do motor. Portanto, é feito nesta modelagem um estudo sobre o comportamento das tensões de fase, torque e velocidade, quando o motor é submetido a um desequilíbrio nas tensões de alimentação, além de verificar o comportamento das tensões, correntes, torque e velocidade durante a ocorrência de uma falta entre uma fase e terra, sem o acionamento de um dispositivo de proteção. As simulações foram confrontadas experimentalmente por meio de ensaios em laboratório ou justificadas conforme a literatura disponível. A justificativa é feita apenas para as curvas de torque e velocidade, por não ter equipamentos disponíveis no laboratório, e para simular na prática a falta fase-terra por questão de segurança.

### **Palavras-Chave**

Motor de indução trifásico; desequilíbrio de tensão; falta fase e terra



## *Abstract*

This work studies the application of a mathematical modeling of three-phase induction machine, including the magnetic saturation, to analyze imbalances and single line to ground fault in a three phase induction motor with stator terminals connected in star grounded. It's a job that gives continuity to another developed, where the same worked with imbalances of tensions to the engine running in triangle [15]. The difference in this monograph is in the star connection, where the behavior of the phase voltages on phase imbalance take other directions, beyond which are checked analysis of torque curves and speed, as well as the simulation of single line to ground fault in one of the phases of the motor. Therefore, it is done in this modeling study on the behavior of the phase voltages, torque and speed when the engine is subjected to an imbalance in the supply voltages, in addition to checking the behavior of voltages, currents, torque and speed during the occurrence of a fault between single line to ground fault, without the firing of a protection device. The simulations were confronted experimentally through lab tests or justified according to the available literature. The justification is made only to the torque and speed curves, for not having equipment available in the lab, and to simulate in practice the single line to ground fault for security reasons.

### **Keywords**

Three-phase induction motor; voltage unbalance; single line to ground fault

# *Sumário*

1	Introdução.....	15
1.1	Considerações Iniciais .....	15
1.2	Justificativa deste Trabalho .....	17
1.3	Objetivos deste Trabalho .....	18
1.4	Apresentação da Monografia.....	19
2	Referencial Teórico .....	20
2.1	Componentes Simétricas .....	20
2.1.1	Introdução.....	20
2.1.2	Operadores.....	21
2.1.3	Componentes simétricos de fasores assimétricos.....	22
2.1.4	Circuitos equivalentes de sequência positiva, negativa e zero de geradores.....	23
2.1.5	Impedâncias de sequência de elementos de circuito .....	25
2.2	Faltas Assimétricas .....	27
2.2.1	Introdução.....	27
2.2.2	Falta entre fase e terra.....	27
3	Materiais e Métodos .....	29
3.1	Introdução.....	29
3.2	Identificação do Motor de Indução Trifásico .....	30
3.2.1	Parâmetros do Circuito Equivalente do Motor .....	30
3.2.2	Curva de Magnetização .....	31
3.3	Simulação Computacional.....	32
3.4	Ensaio em Laboratório.....	34
4	Resultados e Discussões.....	37
4.1	Introdução.....	37
4.2	Desequilíbrio de Tensão .....	37
4.3	Falta entre uma fase e terra.....	49
5	Conclusões.....	54
	Referências Bibliográficas .....	56

## *Lista de Figuras*

Figura 1 – Disposição espacial das componentes simétricas da tensão para sequência positiva, negativa e zero (da direita para esquerda).....	21
Figura 2 - Diagrama do circuito de um gerador em vazio, aterrado por meio de uma reatância. ....	23
Figura 3 – Caminhos para corrente de cada sequência no gerador e as redes de sequência correspondentes.....	25
Figura 4 – Falta ocorrida entre a fase <i>a</i> e terra. ....	27
Figura 5 – Componente harmônica fundamental da curva de magnetização do motor. ....	31
Figura 6 – Componente harmônica de terceira ordem da curva de magnetização do motor. ..	32
Figura 7 – Esquema simplificado da alimentação do motor de indução. ....	34
Figura 8 – Esquema simplificado para ligação feita entre gerador síncrono e carga. ....	35
Figura 9 – Tensões de linha com fator de desequilíbrio igual a 0%.....	38
Figura 10 – Tensão de linha com fator de desequilíbrio igual a 5%. ....	38
Figura 11 – Tensão de linha com fator de desequilíbrio igual a 10%. ....	38
Figura 12 – Tensão de linha com fator de desequilíbrio igual a 15%. ....	38
Figura 13 – Tensões de fase com desequilíbrio de 0% aplicadas ao motor sem carga (simulação). ....	39
Figura 14 – Tensões de fase com desequilíbrio de 0% aplicadas ao motor sem carga (experimental). ....	39
Figura 15 – Tensões de fase com desequilíbrio de 5% aplicadas ao motor sem carga (simulação). ....	39
Figura 16 – Tensões de fase com desequilíbrio de 5% aplicadas ao motor sem carga (experimental). ....	39
Figura 17 – Tensões de fase com desequilíbrio de 10% aplicadas ao motor sem carga (simulação).....	39
Figura 18 – Tensões de fase com desequilíbrio de 10% aplicadas ao motor sem carga (experimental). ....	39
Figura 19 – Tensões de fase com desequilíbrio de 15% aplicadas ao motor sem carga (simulação).....	40
Figura 20 – Tensões de fase com desequilíbrio de 15% aplicadas ao motor sem carga (experimental). ....	40
Figura 21 – Tensões de fase com desequilíbrio de 0% aplicadas ao motor com carga nominal (simulação).....	40
Figura 22 – Tensões de fase com desequilíbrio de 0% aplicadas ao motor com carga nominal (experimental). ....	40
Figura 23 – Tensões de fase com desequilíbrio de 5% aplicadas ao motor com carga nominal (simulação).....	40

Figura 24 – Tensões de fase com desequilíbrio de 5% aplicadas ao motor com carga nominal (experimental).....	40
Figura 25 – Tensões de fase com desequilíbrio de 10% aplicadas ao motor com carga nominal (simulação).....	41
Figura 26 – Tensões de fase com desequilíbrio de 10% aplicadas ao motor com carga nominal (experimental).....	41
Figura 27 – Tensões de fase com desequilíbrio de 15% aplicadas ao motor com carga nominal (simulação).....	41
Figura 28 – Tensões de fase com desequilíbrio de 15% aplicadas ao motor com carga nominal (experimental).....	41
Figura 29 – Torque do motor sem carga com fator de desequilíbrio igual 0%.....	44
Figura 30 – Torque do motor sem carga com fator de desequilíbrio igual 5%.....	44
Figura 31 – Torque do motor sem carga com fator de desequilíbrio igual 10%.....	44
Figura 32 – Torque do motor sem carga com fator de desequilíbrio igual 15%.....	44
Figura 33 – Torque do motor acoplado a uma carga nominal com fator de desequilíbrio igual 0%.....	45
Figura 34 – Torque do motor acoplado a uma carga nominal com fator de desequilíbrio igual 5%.....	45
Figura 35 – Torque do motor acoplado a uma carga nominal com fator de desequilíbrio igual 10%.....	45
Figura 36 – Torque do motor acoplado a uma carga nominal com fator de desequilíbrio igual 15%.....	45
Figura 37 – Velocidade do motor sem carga com fator de desequilíbrio igual 0%.....	47
Figura 38 – Velocidade do motor sem carga com fator de desequilíbrio igual 5%.....	47
Figura 39 – Velocidade do motor sem carga com fator de desequilíbrio igual 10%.....	47
Figura 40 – Velocidade do motor sem carga com fator de desequilíbrio igual 15%.....	47
Figura 41 – Velocidade do motor acoplado a uma carga nominal com fator de desequilíbrio igual 0%.....	47
Figura 42 – Velocidade do motor acoplado a uma carga nominal com fator de desequilíbrio igual 5%.....	47
Figura 43 – Velocidade do motor acoplado a uma carga nominal com fator de desequilíbrio igual 10%.....	48
Figura 44 – Velocidade do motor acoplado a uma carga nominal com fator de desequilíbrio igual 15%.....	48
Figura 45 – Corrente em cada fase do motor de indução sem carga submetido a uma falta entre a fase <i>a</i> e terra.....	50
Figura 46 – Tensão em cada fase do motor de indução sem carga submetido a uma falta entre a fase <i>a</i> e terra.....	50
Figura 47 – Corrente em cada fase do motor de indução com carga nominal submetido a uma falta entre a fase <i>a</i> e terra.....	50

Figura 48 – Tensão em cada fase do motor de indução com carga nominal submetido a uma falta entre a fase <i>a</i> e terra. ....	50
Figura 49 – Torque desenvolvido pelo motor de indução sem carga submetido a uma falta entre a fase <i>a</i> e terra. ....	52
Figura 50 – Velocidade do motor de indução sem carga submetido a uma falta entre a fase <i>a</i> e terra. ....	52
Figura 51 – Torque desenvolvido pelo motor de indução com carga nominal submetido a uma falta entre a fase <i>a</i> e terra. ....	52
Figura 52 – Velocidade do motor de indução com carga nominal submetido a uma falta entre a fase <i>a</i> e terra. ....	52
Figura 53 – Torque desenvolvido pelo motor de indução com carga nominal e momento de inércia 10 vezes maior submetido a uma falta entre a fase <i>a</i> e terra. ....	53
Figura 54 – Velocidade do motor de indução com carga nominal e momento de inércia 10 vezes maior submetido a uma falta entre a fase <i>a</i> e terra. ....	53

## *Lista de Tabelas*

Tabela 1 – Dados de placa do motor de indução. ....	30
Tabela 2 – Parâmetros do circuito equivalente do motor. ....	30
Tabela 3 – Valores de tensão de linha (em rms) aplicadas ao motor de indução trifásico submetido ao ensaio. ....	35
Tabela 4 – Dados de placa do gerador síncrono. ....	36
Tabela 5 – Valor de pico (em V) das tensões de fase, conforme o fator de desequilíbrio, obtidas por meio da simulação e do ensaio em laboratório, para o motor de indução sem carga acoplada. ....	42
Tabela 6 – Valor de pico (em V) das tensões de fase, conforme o fator de desequilíbrio, obtidas por meio da simulação e do ensaio em laboratório, para o motor de indução com carga nominal. ....	42
Tabela 7 – Nível de terceiro harmônico (em %), conforme o fator de desequilíbrio, obtido por meio da simulação e do ensaio em laboratório, para o motor de indução sem carga acoplada. ....	43
Tabela 8 – Nível de terceiro harmônico (em %), conforme o fator de desequilíbrio, obtido por meio da simulação e do ensaio em laboratório, para o motor de indução com carga nominal. ....	43
Tabela 9 – Valores para torque (em N.m) do motor de indução conforme o fator de desequilíbrio e carga. ....	46
Tabela 10 – Valores para velocidade (em rpm) do motor de indução conforme o fator de desequilíbrio e carga. ....	49
Tabela 11 – Valores de pico das correntes e tensões durante a falta ocorrida entre a fase <i>a</i> e terra em um motor de indução conforme carga. ....	51

# ***1 Introdução***

## ***1.1 Considerações Iniciais***

O motor de indução trifásico (MIT), especialmente, o de gaiola de esquilo, é o motor elétrico mais utilizado atualmente em todos os setores. Isto se deve ao seu baixo custo de aquisição, robustez e exigir pouca manutenção. [1] [2] [3] O motor com rotor em gaiola de esquilo não possui contatos móveis, eliminando os riscos de centelhas, como o comutador e as escovas das máquinas de corrente contínua, ou os anéis deslizantes e as escovas dos motores síncronos e de indução de rotor bobinado. Desta forma, tais motores podem ser usados em ambientes com riscos de explosões. [4]

Segundo [5], a energia elétrica utilizada pelo setor industrial corresponde a 49% da energia elétrica gerada no Brasil. Dessa parcela, 51% é destinada ao acionamento de motores elétricos, isto é, aproximadamente 25% da energia total gerada no país. Como a rede de distribuição não é ideal, ou seja, tensões equilibradas e senoidais, é importante estudar sua influência nos equipamentos a ela ligados, como, neste caso, os motores de indução. [6]

De acordo com a carga acoplada ao eixo do motor de indução e das condições da rede de alimentação, o motor apresenta valores definidos de rendimento, fator de potência, corrente absorvida, velocidade, conjugado (torque) desenvolvido, perdas e elevação de temperatura. Dessa maneira, quando as tensões de alimentação apresentam desequilíbrios, seja em módulo ou em ângulo, ocorrem alterações nas características térmicas, elétricas e mecânicas dos motores de indução, afetando o seu desempenho e comprometendo a sua vida útil.

Segundo [7], vários estudos foram feitos desde a década de 1950 no sentido de explicar os efeitos que ocorrem internamente nos motores de indução. Em 1959, Williams provou que o motor apresenta redução de rendimento. Em 1959, Gafford avaliou a sobrelevação da temperatura e a diminuição da vida útil do motor. Em 1963, Berndt apresentou um método de avaliação do motor e em 1985 Cummings estudou métodos de proteção do motor contra desequilíbrios de tensão e assim estudos têm dado prosseguimento.

Ao alimentar o motor de indução com variações de tensões de linha, tanto em módulo quanto em ângulo de fase, o campo magnético girante sofre alterações, o que implica na produção de esforços mecânicos axiais e radiais sobre o eixo, com o aparecimento de vibrações, ruídos, batimento, desgaste e o aquecimento excessivo dos mancais. A deformação do campo magnético girante é resultado da composição dos campos de sequência positiva e negativa: a

de sequência positiva desempenha as mesmas funções do caso normal, tensões equilibradas e senoidais, e o de sequência negativa gera campo girante ao oposto ao de sequência positiva, produzindo desequilíbrio magnético no motor. Além disso, como as impedâncias de sequência negativa possuem valores muito pequenos, há o surgimento de desequilíbrio de corrente bastante elevado, levando a um sobreaquecimento no MIT. Como consequência direta desta elevação de temperatura, tem-se a redução da expectativa de vida útil do motor, visto que o material isolante sofre uma deterioração mais acentuada na presença de elevadas temperaturas nos enrolamentos. [8]

Frente a estas consequências, há, portanto, um impacto econômico decorrente dos efeitos dos desequilíbrios de tensões nos motores de indução, uma vez que se agregam às deficiências impostas na operação, os custos de manutenção preventiva e corretiva. Desse modo, o autor em [7] cita a referência [8], que investigou os efeitos de diferentes desequilíbrios de tensão com o mesmo fator de desequilíbrio de tensão no desempenho de um motor de indução e a influência destes no sistema de potência. Dentre os resultados obtidos nesse estudo merecem destaque:

- As piores situações em relação à sobrelevação de temperatura ocorrem para desequilíbrios trifásicos considerando diminuição das tensões;
- Uma vez que os desequilíbrios causam perdas excessivas e aumento no consumo, estes também influenciam a estabilidade do sistema de potência, sendo necessária a sua incorporação a estudos desta natureza.
- Os torques de rotor bloqueado e de frenagem diminuem;
- A velocidade nominal diminui ligeiramente;
- O desequilíbrio da corrente de rotor bloqueado será da mesma ordem que o desequilíbrio das tensões;
- Presença de ruído e vibração. [7]

Tais resultados apresentados se agravam com o nível de distorção harmônica da tensão de alimentação, normalmente associada com a crescente quantidade de acionamentos por conversores de frequência, fontes chaveadas e outros dispositivos eletrônicos. Tal distorção resulta, nos sistemas de potência, em um aumento das perdas na distribuição de energia elétrica. No caso do motor de indução verifica-se uma perda de rendimento e qualidade do serviço, devido ao surgimento de torques pulsantes. [10] O torque pulsante aumenta a vibração da máquina com conseqüente aumento na geração de ruído. Além disso, em motores de eixo curto



e pequeno entreferro, as vibrações podem provocar leve contato entre rotor e estator elevando a temperatura nos pontos de atrito. [9] [11]

Tendo ciência do impacto negativo que a alimentação desbalanceada pode causar em um motor de indução trifásica e da possível ocorrência de falta fase-terra neste tipo de motor, este trabalho será amparado por um método convencional para identificação de falhas aplicadas ao motor de indução trifásico: as componentes simétricas. [18]

Este método é baseado no teorema de Fortescue no qual permite resolver um sistema trifásico composto por três fasores desbalanceados por meio de três conjuntos de fasores balanceados. Com este método é possível analisar a falta fase-terra que pode ocorrer em um motor de indução.

As componentes simétricas permitem determinar as condições de desbalanceamento em um sistema trifásico, de modo que tal sistema se torne equilibrado, diminuindo, portanto, a complexidade na análise. Estas componentes são dadas em sequência positiva, negativa ou zero.

Nos motores de indução trifásico, as correntes das três sequências possuem diferenças. Na sequência positiva a corrente é a mesma da condição trifásica equilibrada, cujo campo girante é estacionário em relação ao estator. Já a corrente de sequência negativa gera um campo magnético girante oposto ao de sequência positivo, produzindo dentro do motor corrente de sequência negativa. Esta corrente aumenta significativamente as perdas no motor, além de produzir torque pulsante no eixo.

Quando circula corrente de sequência zero no enrolamento do estator, a corrente e força magnetomotriz de todas as fases alcançam o valor máximo simultaneamente. Apesar do fluxo resultante oriundo da soma das forças eletromotrizes ser baixo, ele permite existir uma reatância de sequência zero, além de gerar um fluxo magnético no entreferro. A corrente de sequência zero aparecerá no motor apenas se existir um retorno por terra, ou seja, se o neutro da estrela estiver aterrado. Como, por questões de segurança, não é comum aterrar o neutro da ligação estrela, esta componente de corrente é desconsiderada aqui. [20]

## **1.2 Justificativa deste Trabalho**

Diante do cenário abordado na seção anterior, vários estudos foram desenvolvidos no Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Viçosa. Em [12] foi verificado que, para um taxa de distorção maior que 10%, o motor de indução começa a perder muito na sua eficiência, e que há uma elevação dos níveis de vibração na máquina. Acrescenta que as oscilações de torque para uma taxa de distorção harmônica 20% podem, em longo prazo,

danificar a estrutura física do motor. Já na referência [13] destaca que a diferença nos níveis harmônicos entre as situações com e sem carga é mais perceptível na segunda situação, pois quando este motor não está conectado a uma carga opera com um baixo fator de potência, o que implica em menor eficiência do sistema. Para complementar, no trabalho [14] foi citado que a forma de onda da corrente de fase apresentou distorção conforme o aumento da tensão aplicada ao estator, o que levou o motor a operar mais na região de saturação da curva de magnetização. Por último, na monografia [15] foi verificado que há distorções na forma de onda das correntes de fase para o motor ligado em triângulo e operando na região de saturação magnética. Além disso, cita que os níveis apresentados referentes ao terceiro harmônico são maiores quando este motor opera sem carga.

Conforme o exposto e por recomendação de [15], este estudo é feito utilizando a mesma modelagem da máquina de indução trifásica, trabalhada por ele para estudar os efeitos de desequilíbrios de tensões e falta fase-terra quando o motor é ligado em estrela não aterrado.

### **1.3 Objetivos deste Trabalho**

O objetivo fundamental desta monografia é dar continuidade ao trabalho desenvolvido por [15], que estudou o comportamento do motor de indução trifásico quando alimentado com tensões desequilibradas, tendo os terminais do estator ligados em triângulo. Seguindo os mesmos procedimentos em que o autor utilizou a modelagem matemática desenvolvida por [16], este trabalho pretende estudar as curvas características de torque e velocidade, e as formas de onda das tensões, quando o motor é alimentado por tensões desequilibradas na tensão de alimentação, ou quando ocorrem faltas fase-terra, para os terminais do estator ligados em estrela não aterrado.

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

- Validar os resultados da simulação, comparando-os com os do ensaio em laboratório;
- Estudar a distorção harmônica do motor operando sem carga e com carga nominal;
- Identificar as componentes simétricas das correntes e tensões no ponto de ocorrência de falta.

## **1.4 Apresentação da Monografia**

Além desta seção introdutória, a redação da monografia é apresentada em mais 4 seções, descritas a seguir.

Na seção 2 está compilado todo o referencial teórico no qual se ampara este trabalho. Este referencial é dividido em duas subseções: Componentes Simétricas e Faltas Assimétricas. Na primeira subseção é discutido como um sistema trifásico de três fasores desequilibrados pode ser decomposto em três sistemas de fasores equilibrados. Na segunda subseção calcula-se a corrente de falta entre fase e terra incluindo a impedância do neutro e da falta.

Na seção 3 apresenta a metodologia adotada no desenvolvimento deste trabalho, a qual abrange o procedimento para calcular os parâmetros do motor de indução trifásico estudado. Além disso, mostra como é implementada a modelagem computacional que envolve o estudo deste motor na ocasião do desequilíbrio das tensões de alimentação ou da ocorrência de uma falta entre fase e terra. E, por fim, engloba o processo aplicado para verificar o comportamento real do motor por meio de ensaio em laboratório durante o estudo de desequilíbrio das tensões de alimentação.

Na seção 4 apresenta os resultados obtidos com a modelagem e os compara com os resultados do ensaio para que se possa avaliar o quanto a simulação consegue prever o comportamento do motor de indução trifásico submetido aos diferentes desequilíbrios de tensões conforme a carga. Os resultados coletados somente pela simulação são analisados conforme a literatura disponível. Para a falta ocorrida entre uma fase e terra, os resultados obtidos pela modelagem são também avaliados conforme a teoria.

Finalmente, na seção 5 apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 *Referencial Teórico*

### 2.1 *Componentes Simétricas*

#### 2.1.1 *Introdução*

O teorema de Fortescue prova que um sistema desbalanceado com  $n$  fasores pode ser dado por  $n$  sistemas de fasores balanceados, chamados como componentes simétricas dos fasores originais. Os  $n$  fasores de cada conjunto de componentes são iguais em magnitude, e os ângulos entre os fasores adjacentes são iguais. Apesar desse método ser aplicado a sistemas polifásicos, a explicação terá como foco os sistemas trifásicos.

De acordo com este teorema, os três fasores desbalanceados de um sistema trifásico podem ser resolvidos em três conjuntos de fasores balanceados. Um deles é a sequência positiva que consiste em três fasores iguais em comprimento, com diferença de fase entre si de  $120^\circ$  e apresenta a mesma sequência de fase dos fasores originais. Outro é a sequência negativa que possui características semelhantes à da positiva com exceção de que apresenta uma sequência de fase oposta a dos fasores originais. O terceiro conjunto é sequência zero que consiste de três fasores de mesmo comprimento e não apresenta diferença de fase entre esses fasores.

Quando se resolve um problema por componentes simétricos é comum designar as fases do sistema por  $a$ ,  $b$  e  $c$ , o que leva a sequência de fase do sistema ser denominada por  $abc$ . Desse modo, a sequência de fase dos componentes de sequência positiva dos fasores desequilibrados é  $abc$ , e a sequência de fase dos componentes de sequência negativa é  $acb$ . Além disso, cada conjunto de componente simétrica é designado por um índice, em que número 0 se atribui para a sequência zero, o número 1 para a sequência positiva e o 2 para a sequência negativa, respectivamente. Assim, os componentes de tensão de sequência positiva de  $V_a$ ,  $V_b$  e  $V_c$  são  $V_{a1}$ ,  $V_{b1}$  e  $V_{c1}$ , os de sequência negativa são  $V_{a2}$ ,  $V_{b2}$  e  $V_{c2}$  e os de sequência zero,  $V_{a0}$ ,  $V_{b0}$  e  $V_{c0}$ .

Sabendo que cada um dos fasores desequilibrados originais é dado pela soma de seus componentes, pode-se obter as equações (2.1), (2.2) e (2.3).

$$V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} \quad (2.1)$$

$$V_b = V_{b0} + V_{b1} + V_{b2} \quad (2.2)$$

$$V_c = V_{c0} + V_{c1} + V_{c2} \quad (2.3)$$

Pela Figura 1 é possível ver como são distribuídas espacialmente as componentes simétricas para sequência positiva, negativa e zero.

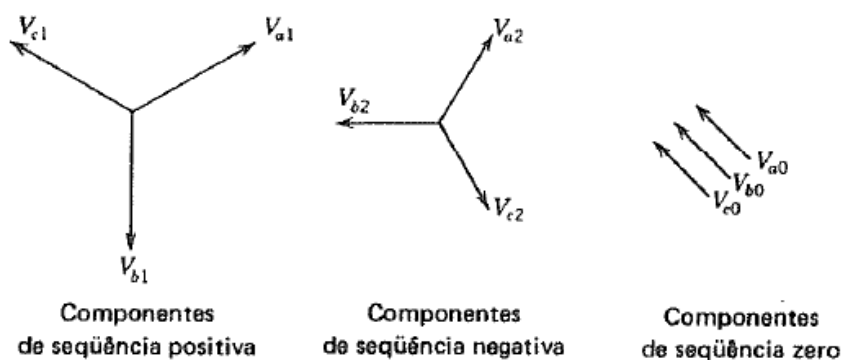


Figura 1 – Disposição espacial das componentes simétricas da tensão para sequência positiva, negativa e zero (da direita para esquerda).

### 2.1.2 Operadores

Como os componentes simétricos das tensões e corrente em um sistema trifásico apresentam uma defasagem entre si, é conveniente adotar um método para indicar a rotação do fasor de  $120^\circ$ .

A letra  $a$  é geralmente utilizada para designar o operador que causa uma rotação de  $120^\circ$  no sentido anti-horário. Tal operador é um número complexo unitário com ângulo de  $120^\circ$  definido por (2.4).

$$a = 1 \angle 120^\circ = -0,5 + j0,866 \quad (2.4)$$

### 2.1.3 Componentes simétricos de fasores assimétricos

Será examinado nesta seção como decompor três fasores assimétricos em seus componentes simétricos para tensão. Para corrente, o procedimento é análogo.

Pode-se verificar que o número de incógnitas pode ser reduzido quando se expressa cada componente de  $V_b$  e  $V_c$  pelo produto de uma função do operador  $a$  e uma componente de  $V_a$ . Tomando a Figura 1 como referência obtém-se estas relações em (2.5).

$$\begin{aligned} V_{b1} &= a^2 V_{a1} & V_{c1} &= a V_{a1} \\ V_{b2} &= a V_{a2} & V_{c2} &= a^2 V_{a2} \\ V_{b0} &= V_{a0} & V_{c0} &= V_{a0} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Substituindo o sistema (2.5) nas equações (2.2) e (2.3) pode-se obter (2.6)

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Com isso, pode-se mostrar como se decompõe três fasores assimétricos em seus componentes simétricos por meio de (2.7).

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

A equação (2.7) mostra como calcular as componentes simétricas da fase  $a$  de uma tensão trifásica desequilibrada.

Para obter  $V_{b0}$ ,  $V_{b1}$ ,  $V_{b2}$ ,  $V_{c0}$ ,  $V_{c1}$  e  $V_{c2}$  simplesmente deve-se aplicar os resultados de (2.7) no sistema (2.5).

### 2.1.4 Circuitos equivalentes de sequência positiva, negativa e zero de geradores

A queda de tensão em uma impedância pode variar conforme a sequência de fases da corrente que percorre tal impedância. Assim, a impedância de determinada seção de uma rede equilibrada para a corrente poderá ser diferente para a corrente de outra sequência.

Um gerador em vazio, aterrado por meio de um reator, é apresentado na Figura 2. Quando ocorrer uma falta nos terminais do gerador, as correntes  $I_a$ ,  $I_b$  e  $I_c$  circulam nas linhas. Se a falta envolve a terra, a corrente que circula pelo neutro do gerador é designada por  $I_n$ . Uma ou duas corrente de linha podem ser nulas, porém, as correntes podem ser decompostas em seus componentes simétricos independentemente do quanto estejam desequilibradas.

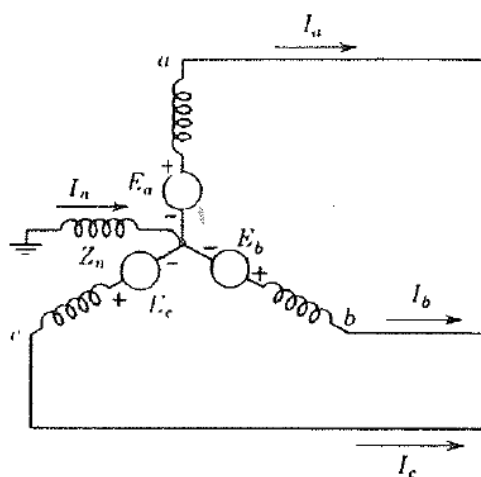


Figura 2 - Diagrama do circuito de um gerador em vazio, aterrado por meio de uma reatância.

As tensões geradas são de origem da sequência positiva, visto que o objetivo do gerador é fornecer tensões trifásicas equilibradas. Desta forma, a rede de sequência positiva consiste em uma força eletromotriz em série com a impedância de sequência positiva do gerador. Já nas redes de sequência negativa e de sequência zero não apresentam tais forças, apesar de incluírem as impedâncias do gerador para as correntes destas sequências.

As redes de sequência, mostradas na Figura 3, tratam-se de circuitos monofásicos equivalentes aos trifásicos equilibrados por onde circulam os componentes simétricos das correntes desequilibradas. A força eletromotriz gerada na rede de sequência positiva é a tensão nos terminais sem carga em relação ao neutro, sendo que esta tensão, também, é igual às tensões nas tensões transitória e subtransitória, já que não há carga conectada ao gerador. A reatância

na rede de sequência positiva é a reatância subtransitória, transitória ou de regime permanente. A barra de referência para as redes de sequência positiva e negativa é o neutro do gerador, o qual estará no potencial da terra caso haja conexão entre o neutro e a terra com impedância finita ou nula.

A corrente que circula na impedância  $Z_n$  é dada pela equação (2.8).

$$I_n = 3 I_{a0} \quad (2.8)$$

Considerando que na rede de sequência zero circule apenas corrente desta sequência e que, pela Figura 2, a queda de tensão de sequência zero do ponto  $a$  para terra  $V_a$  é dada por (2.9), logo a impedância  $Z_0$  pela qual circula  $I_{a0}$  é obtida por (2.10).

$$V_a = -3I_{a0}Z_n - I_{a0}Z_{g0} \quad (2.9)$$

$$Z_0 = 3Z_n + Z_{g0} \quad (2.10)$$

Os componentes da queda de tensão no ponto  $a$  para a barra de referência são obtidas pela Figura 2 e mostradas nas equações (2.11), (2.12) e (2.13), onde  $E_a$  é a tensão sem carga da sequência positiva em relação ao neutro,  $Z_1$  e  $Z_2$  são as impedâncias de sequência positiva e negativa do gerador e  $Z_0$  definida em (23).

$$V_{a1} = E_a - I_{a1}Z_1 \quad (2.11)$$

$$V_{a2} = -I_{a2}Z_2 \quad (2.12)$$

$$V_{a0} = -I_{a0}Z_0 \quad (2.13)$$



As equações (2.11), (2.12) e (2.13) são válidas para qualquer gerador que transporte correntes desequilibradas e aplicáveis para o caso do gerador com carga sob a condição de regime permanente.

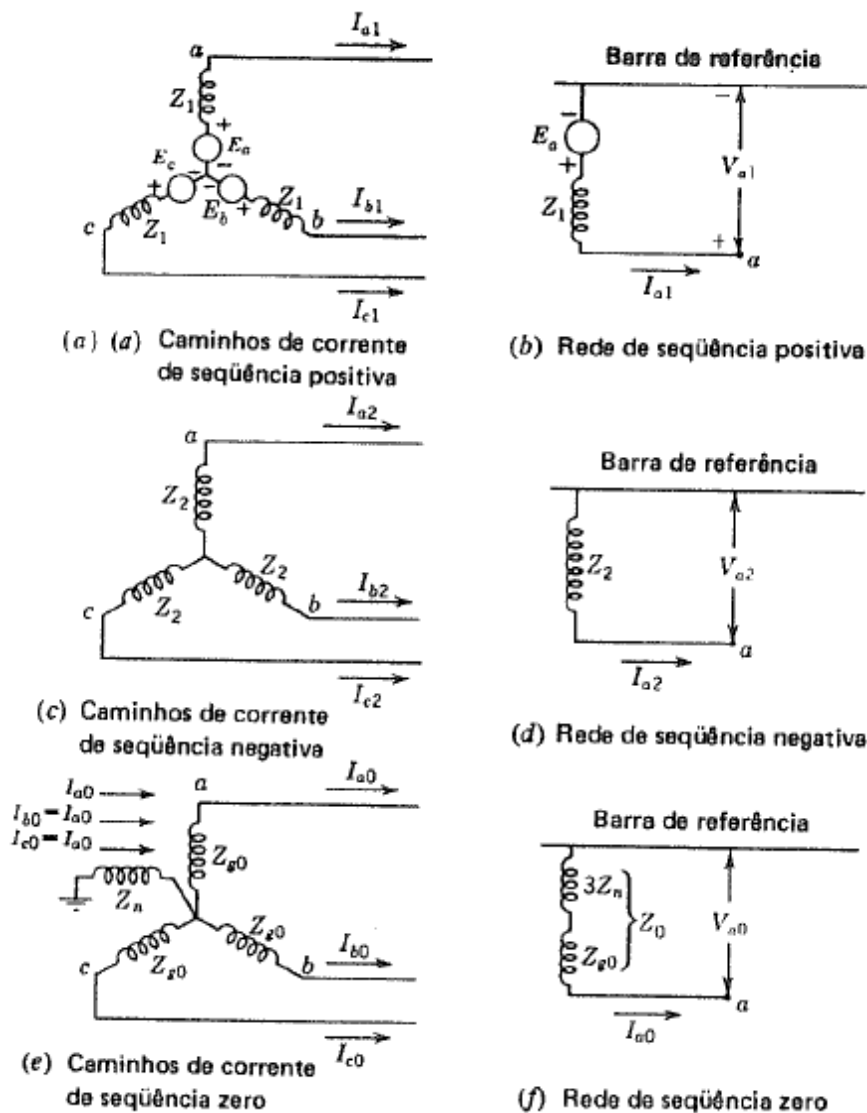


Figura 3 – Caminhos para corrente de cada seqüência no gerador e as redes de seqüência correspondentes.

### 2.1.5 Impedâncias de seqüência de elementos de circuito

Como as impedâncias de seqüência positiva e negativa de circuitos lineares, simétricos e estáticos são independentes da seqüência das fases, quando as tensões aplicadas são equilibradas, elas são idênticas entre si. Já na seqüência zero, a impedância desta seqüência difere da seqüência positiva e negativa.

Quando se trata de máquinas girantes, as impedâncias das três sequências são geralmente diferentes. Para explicar isso é necessário abordar o que ocorre nestas máquinas. O campo magnético gerado pela corrente de sequência negativa gira no sentido contrário ao do campo girante da máquina. Já o fluxo produzido pela corrente de sequência positiva é relativamente estacionário ao rotor e varre de forma mais lenta a face do rotor que o fluxo oriundo da corrente de sequência negativa. Como as correntes induzidas pelo fluxo da armadura nos enrolamentos de campo e amortecimento dificultam a penetração do fluxo da corrente de sequência negativa, o caminho deste fluxo é o mesmo quando se analisa a reatância subtransitória. Assim, na máquina de polos não salientes as reatâncias subtransitórias e de sequência negativa são iguais.

Caso no enrolamento de armadura de uma máquina trifásica circulasse somente a corrente de sequência zero, a corrente e a força eletromotriz de todas as três fases atingem um máximo no mesmo instante. A distribuição dos enrolamentos sobre a armadura possibilitam que o ponto onde a força eletromotriz é máxima em uma fase seja defasado de  $120^\circ$  graus para o ponto de máximo da força eletromotriz em outra fase. Tratando-se de uma distribuição espacial perfeitamente senoidal, a força eletromotriz produzida pela corrente de cada fase sobre a armadura seria composta por três curvas senoidais cuja soma seria zero em cada ponto. Além disso, não haveria produção de fluxo no entreferro e somente haveria a reatância de dispersão nas extremidades das bobinas em qualquer enrolamento de fase.

Em cargas equilibradas, a impedância de sequência zero é igual às impedâncias de sequência positiva e negativa.

Especificamente para o motor, as impedâncias são obtidas de forma análoga ao gerador. A diferença se dá que na rede de sequência positiva a tensão  $E_a$  é substituída pela tensão de alimentação. Além disso, a impedância de sequência positiva é igual a de sequência negativa quando as tensões de alimentação estão equilibradas. Somente há impedância de sequência zero caso o motor for aterrado. Como não é comum fazer o aterramento de um motor de indução ligado em estrela, utilizado neste trabalho, portanto, a impedância da sequência zero é nula.

## 2.2 Falhas Assimétricas

### 2.2.1 Introdução

A maioria das falhas em sistemas de potência é de origem assimétrica, que pode consistir em curto-circuitos, falhas assimétricas por meio de impedâncias, ou condutores em aberto. As falhas assimétricas podem ser classificadas como faltas entre fase e terra, faltas entre duas fases, ou faltas entre duas fases e terra. O caminho para a corrente de falta entre linhas ou entre linha e terra pode ou não conter uma impedância. Um ou dois condutores em aberto resultam em uma falta assimétrica, seja pelo rompimento de um ou dois condutores seja pela ação de fusíveis ou de outros dispositivos que podem não abrir as três fases simultaneamente.

O método de componentes simétricas se torna adequado na determinação das correntes e tensões do sistema após a ocorrência de uma falta, já que a falta assimétrica gera um fluxo de correntes desequilibradas no sistema. [17] [18]

### 2.2.2 Falta entre fase e terra

Na Figura 4 é apresentado um gerador trifásico com o neutro aterrado através da impedância  $Z_n$ .

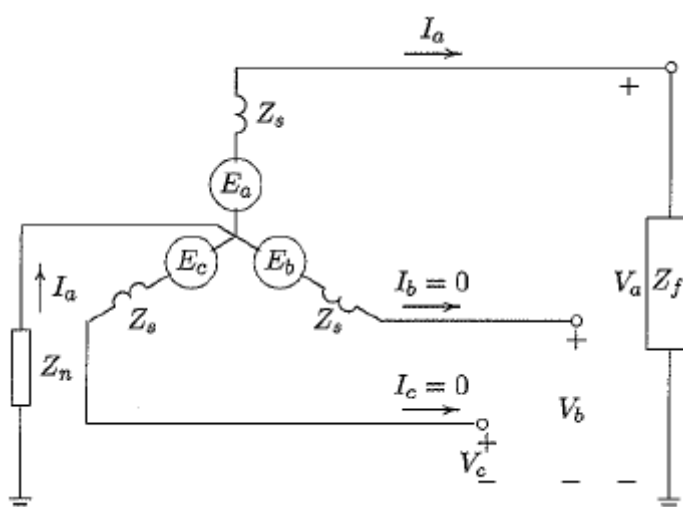


Figura 4 – Falta ocorrida entre a fase  $a$  e terra.

Suponha que a falta fase-terra ocorre sobre a fase  $a$  por meio da impedância  $Z_f$ . Assumindo que o gerador não esteja conectado a uma carga, as condições de fronteira no ponto da falta são dadas pelas equações (2.14) e (2.15).

$$V_a = Z_f I_a \quad (2.14)$$

$$I_b = I_c = 0 \quad (2.15)$$

Além disso, como neste caso as componentes de corrente estão em fase, a corrente  $I_a$  é dada por (2.16).

$$I_a = 3I_{a0} \quad (2.16)$$

A corrente de falta, portanto, é dada por (2.17).

$$I_a = \frac{3E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_f} \quad (2.17)$$

Substituindo (2.17) em (2.11), (2.12) e (2.13) pode-se calcular as componentes simétricas da tensão na fase  $a$ , além das três tensões de fase, no ponto de ocorrência da falta.[19]

## **3 *Materiais e Métodos***

### **3.1 *Introdução***

A metodologia aplicada no desenvolvimento do trabalho será explicada em três seções, descritas a seguir: ela abrange aspectos tradicionais de um trabalho científico como a obtenção de parâmetros do motor de indução trifásico a ser estudado; simulação computacional para que possa prever o funcionamento durante a ocorrência do desequilíbrio de tensão na alimentação ou de uma falta entre uma fase e terra; e a verificação do comportamento real do motor por meio de ensaio em laboratório a fim de validar a modelagem ou mesmo identificar possíveis desvios e causas, caso sejam encontradas divergências relevantes entre a modelagem e o ensaio.

A primeira seção se refere à identificação dos dados relevantes do motor por meio da consulta bibliográfica de [21] para que se possa fazer o levantamento dos parâmetros do circuito equivalente e da curva de magnetização do motor de indução trifásico a ser submetido ao ensaio. Estes dados são de suma importância, pois, constituem como parâmetros necessários para a simulação computacional.

A segunda se refere à simulação, baseada na referência [16], onde é implementado na modelagem o comportamento do motor de indução trifásico, quando alimentado por tensões desequilibradas, além da simulação de uma falta entre uma fase e terra.

A terceira seção apresenta o procedimento realizado no laboratório com o objetivo de fazer comparações teóricas e práticas.

É oportuno salientar que a avaliação dos efeitos da ocorrência de uma falta entre uma fase e terra, somente foi possível pela simulação computacional, por questões de segurança, uma vez que esta falta pode provocar problemas na rede de alimentação do motor, com a interrupção no fornecimento de energia elétrica, devido o acionamento do sistema de proteção e trazer problemas prejudiciais para o próprio motor.

Outro ponto importante é o fato de não poder trabalhar com o motor na região de saturação, devido à limitação da tensão de saída do varivolt, conforme será comentado na seção 3.4.

## 3.2 Identificação do Motor de Indução Trifásico

### 3.2.1 Parâmetros do Circuito Equivalente do Motor

Os dados de placa do motor de indução trifásico são dados na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados de placa do motor de indução.

Parâmetro	Valor
Marca	Equacional
Tipo	EA4 – 5A
Tipo de rotor	Bobinado
Potência Ativa	2,2 kW
Rotação nominal	1690 rpm
Frequência	60 Hz
Tensão $\Delta$ -Y	220 - 380 V
Corrente $\Delta$ -Y	9,0 - 5,2 A
Fator de potência	0,8

Conforme comentado por [21], para obter os parâmetros do circuito equivalente do motor de indução trifásico foram feitos os testes convencionais como o ensaio em vazio, o de rotor bloqueado e a medição direta da resistência do estator  $R_S$ .

De posse destes ensaios, obteve-se os parâmetros do motor, mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros do circuito equivalente do motor.

Parâmetro	Valor
Resistência do estator ( $R_S$ )	3,32 $\Omega$
Resistência do rotor, referida ao estator ( $R_R$ )	4,82 $\Omega$
Indutância de dispersão do estator ( $L_S$ )	16,6 mH
Indutância de dispersão do rotor, referida ao estator ( $L_R$ )	16,6 mH
Reatância de dispersão do estator ( $X_S$ )	6,26 $\Omega$
Reatância de dispersão do rotor, referida ao estator ( $X_R$ )	6,26 $\Omega$

### 3.2.2 Curva de Magnetização

A curva de magnetização é utilizada para a simulação em computador da modelagem matemática utilizada neste trabalho. Esta curva, obtida conforme a referência [21], relaciona a componente fundamental e de terceiro harmônico do fluxo magnetizante com a força magnetomotriz. É importante dizer que a componente de terceiro harmônico do fluxo magnetizante é que implementa a saturação magnética na modelagem.

As Figuras 5 e 6 mostram, respectivamente, os gráficos da componente fundamental e de terceiro harmônico do fluxo magnetizante em função da força magnetomotriz, gráficos estes obtidos na referência [21].

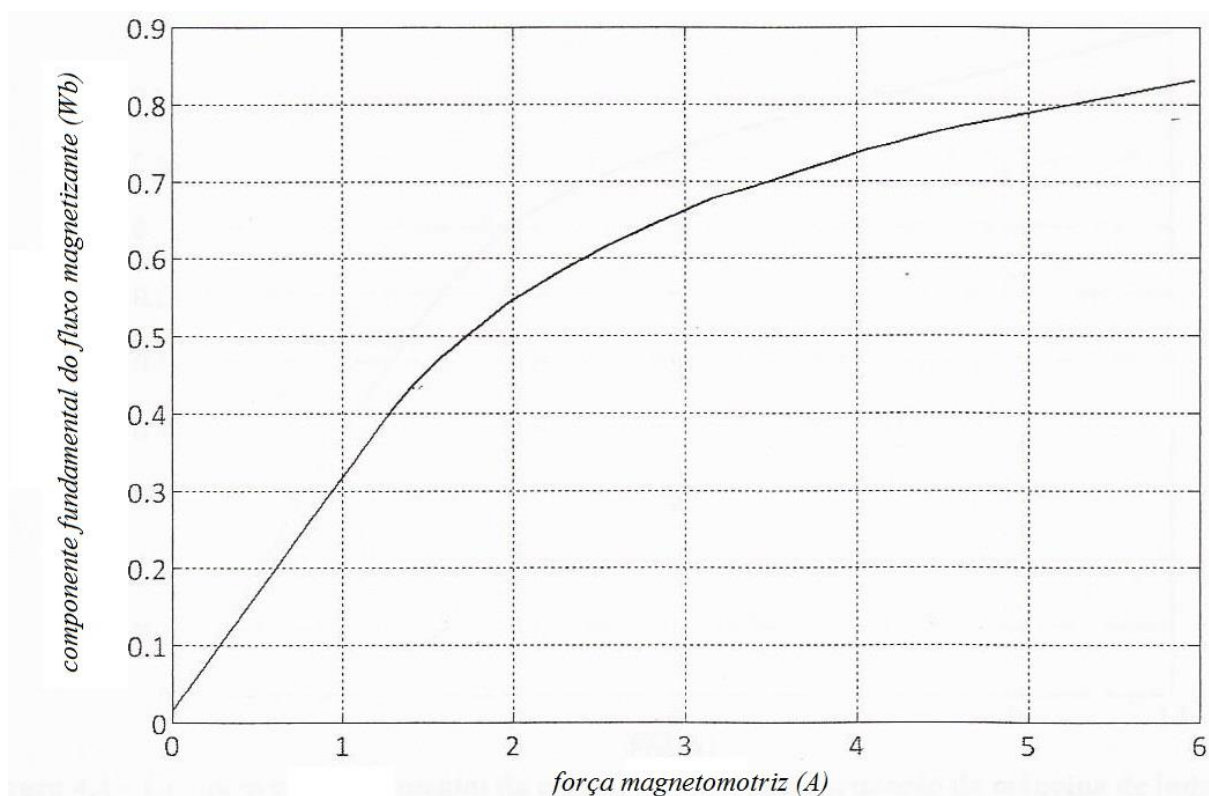


Figura 5 – Componente harmônica fundamental da curva de magnetização do motor.

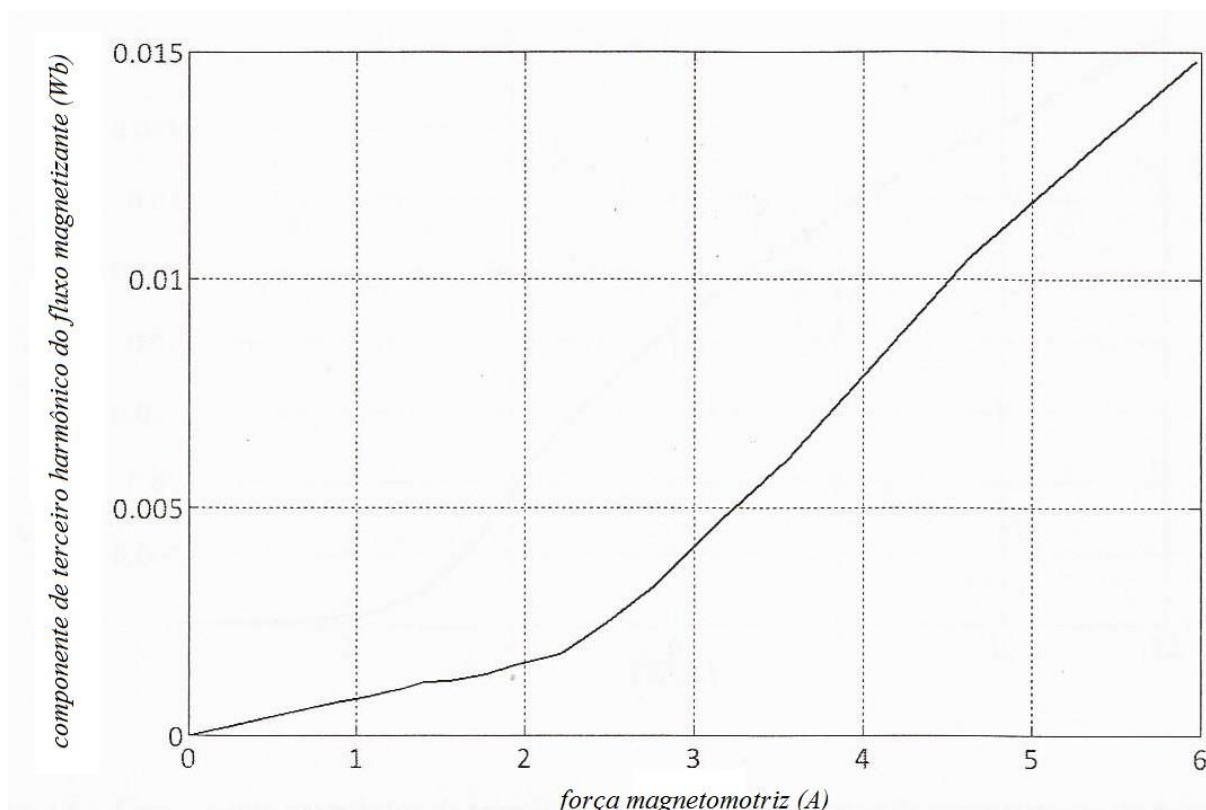


Figura 6 – Componente harmônica de terceira ordem da curva de magnetização do motor.

### 3.3 Simulação Computacional

A simulação proposta neste trabalho é feita de acordo com a modelagem desenvolvida por [16], para o motor de indução ligado em estrela. A contribuição aqui é a inclusão do desequilíbrio da tensão de alimentação, além da simulação de falta fase e terra no motor de indução trifásico.

De posse da modelagem desenvolvida na referência [16], para o motor com os terminais do estator ligados em estrela não aterrado, é feito o desequilíbrio das tensões de linha, seguindo o procedimento da IEEE, conforme a equação (3.1), onde  $K$  é o fator de desequilíbrio,  $V_{max}$  o maior módulo das tensões de linha e  $V_{min}$  o menor módulo das tensões de linha. [21]

$$K\% = \frac{3(V_{max} - V_{min})}{V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}} 100 \quad (3.1)$$



Para a falta fase e terra, a corrente entre a fase  $a$  e terra é dada por (2.34). Neste trabalho considerou a impedância de pré-falta  $Z_f$  como nula. Além disso, admitiu que a impedância de sequência zero  $Z_0$  fosse nula, uma vez que não foi implementado o aterramento do motor. A magnitude da impedância de sequência positiva  $Z_1$ , calculada pela equação (3.3), é igual a de sequência negativa  $Z_2$ . Por fim, para adaptar a equação (2.34) ao caso do motor, a tensão  $E_a$  é substituída pela tensão de fase  $V_a$ . Portanto, a corrente de falta na fase  $a$  pode ser reescrita pela equação (3.2).

$$I_a = \frac{3V_a}{2Z_1} \quad (3.2)$$

$$Z_1 = \sqrt{(R_R + R_S)^2 + (X_R + X_S)^2} \quad (3.3)$$

Como as correntes nas fases  $b$  e  $c$  são nulas durante a falta, as componentes de sequência positiva, negativa e zero da fase  $a$  são iguais entre si. Segundo a equação (2.31), a amplitude da corrente de falta é três vezes maior que a amplitude da componente de sequência zero da fase  $a$ .

A tensão de fase  $a$  é nula, já que a falta é feita nesta fase. Já as tensões das fases  $b$  e  $c$  são iguais às respectivas tensões de alimentação do motor.

Primeiramente, o motor é simulado com os terminais do estator ligados em estrela, de acordo com o fluxograma da referência [16], e no regime permanente é feito o desequilíbrio de tensões.

Para simular a ocorrência da falta fase-terra, a diferença está na implementação das correntes de fase e nas tensões de fase, sendo estas substituídas pelas correntes de falta e tensões de falta calculadas para cada fase do estator do motor. É oportuno enfatizar que a simulação de falta entre fase e terra é dada quando não há desequilíbrio nas tensões de alimentação do motor, uma vez que, em condições normais de operação, os motores de indução são alimentados por tensões aproximadamente equilibradas conforme sugere o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). [23]

### 3.4 Ensaio em Laboratório

O ensaio realizado em laboratório abrangeu somente os desequilíbrios das tensões de alimentação do motor de indução trifásico ligado em estrela não aterrado. Para a simulação falta fase-terra no laboratório, por razões de segurança, a mesma não foi feita também, por falta de equipamentos.

O torque também não foi obtido no laboratório.

O ensaio foi feito para o motor em vazio e com carga nominal. Para os dois casos, os desequilíbrios de tensões foram para os valores de  $K$  iguais a 0, 5, 10 e 15%.

Como mostra a Figura 7, para realização do ensaio utilizou-se dois autotransformadores trifásicos cuja variação de tensão na saída é 0 a 245 V. Um foi usado para alimentar tensão em uma fase do motor e o outro para alimentar as outras duas fases. Desse modo, para estabelecer o desequilíbrio de tensão, a tensão em duas fases foi mantida em 220 e na outra variou de acordo com o desequilíbrio. Por limitações de tensão, estabeleceu que a tensão de alimentação responsável pelo desequilíbrio apresentasse uma magnitude menor ou igual a 220 V. Da Tabela 3, verifica-se que o procedimento de desequilíbrio de tensão ocorre apenas em relação à magnitude das tensões. Desta forma, para efeito de validação, este procedimento também foi adotado na simulação.

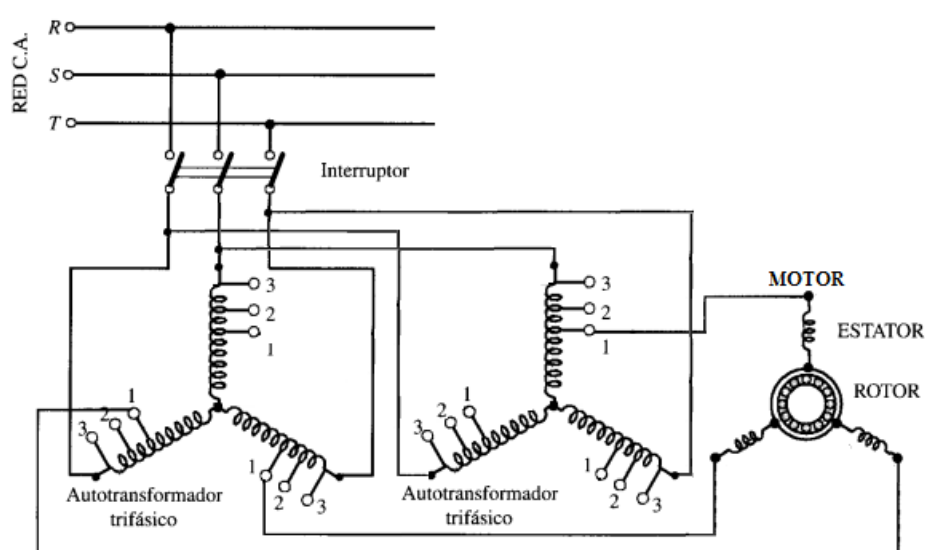


Figura 7 – Esquema simplificado da alimentação do motor de indução.

Devido às limitações de tensão impostas pelos autotransformadores, que é no máximo de 250 V, o motor de indução foi sempre alimentado em uma tensão igual ou menor a 220 V, abaixo da nominal, que é 380 V. Com isso o efeito de saturação não pode ser verificado na prática.

Tabela 3 – Valores de tensão de linha (em rms) aplicadas ao motor de indução trifásico submetido ao ensaio.

<b>K (%)</b>	<b>V<sub>ab</sub> (V<sub>RMS</sub>)</b>	<b>V<sub>bc</sub> (V<sub>RMS</sub>)</b>	<b>V<sub>ca</sub> (V<sub>RMS</sub>)</b>
<b>0</b>	220	220	220
<b>5</b>	209	220	220
<b>10</b>	199	220	220
<b>15</b>	190	220	200

Através de dois multímetros digitais, sendo um destinado para medição da tensão fornecida pelo autotransformador conectado apenas a uma fase do motor e o outro, para medição de outra fase do mesmo motor, deu-se a partida do motor. A tensão dos dois autotransformadores foi variada, na medida do possível, de forma sincronizada. Essa atitude é importante, pois não é possível partir o motor caso as tensões fossem consideravelmente desequilibradas entre si.

Para estudar o motor de indução com carga, o mesmo acionou o eixo de uma máquina síncrona, que neste caso está funcionando como gerador, cujos dados de placa são mostrados na Tabela 4. Esta máquina também foi ligada em estrela e na saída foram colocadas cargas equilibradas, ligadas também em estrela, como mostra a Figura 8.

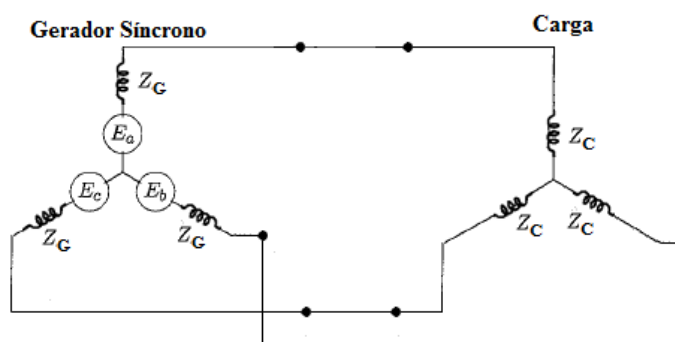


Figura 8 – Esquema simplificado para ligação feita entre gerador síncrono e carga.

Com a carga ligada nos terminais do gerador síncrono, o torque eletromagnético no eixo do motor de indução foi assim simulado.

Tabela 4 – Dados de placa do gerador síncrono.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Marca	Equacional
Tipo	EGT1 – 6A
Potência Ativa	1,6 kW
Potência Aparente	2,0 kVA
Rotação nominal	1800 rpm
Frequência	60 Hz
Tensão $\Delta$ -Y	133 - 230 V
Corrente $\Delta$ -Y	8,7 – 5,0 A
Fator de potência	0,8 indutivo

Mediu-se a velocidade do eixo do motor de indução por meio do tacômetro. Já os valores eficazes das tensões foram obtidas pelo Analisador de Qualidade de Potência Trifásica Fluke 435.

A componente de sequência negativa no motor com relação à velocidade é feita utilizando equação (3.4), onde define o escorregamento de sequência negativa  $s_2$ , sendo  $s$  o escorregamento de sequência positiva. Além disso, por meio da equação (3.5) é definida a velocidade do rotor produzida pela sequência negativa  $\omega_{r2}$ , onde  $\omega_s$  é a velocidade síncrona.[24]

$$s_2 = 2 - s \quad (3.4)$$

$$\omega_{r2} = \omega_s(s_2 + 1) \quad (3.5)$$

## **4 Resultados e Discussões**

### **4.1 Introdução**

Para melhor gerenciamento da análise, esta seção será dividida em duas: desequilíbrio de tensão de alimentação, e a falta fase-terra, neste caso, a fase *a* e terra.

No caso do desequilíbrio de tensão de alimentação do motor, são apresentados os resultados obtidos da simulação e os feitos no laboratório. Além disso, serão destacados pontos onde a modelagem pode ser considerada válida, bem como as possíveis explicações para os desvios encontrados nos resultados.

Finalmente, serão analisados os efeitos da falta ocorrida entre a fase *a* e o terra para o motor de indução trifásico. Como informado pelas seções 3.1 e 3.4, os resultados obtidos somente foram possíveis por meio da simulação computacional. Desta forma, a avaliação destes resultados será feita com base apenas na literatura disponível, que descreve o comportamento do motor quando submetido a este tipo de falta.

### **4.2 Desequilíbrio de Tensão**

Conforme descrito na Tabela 3, as tensões de linha  $V_{ab}$ ,  $V_{bc}$  e  $V_{ca}$  seguem o comportamento apresentado, de acordo com o fator de desequilíbrio, como mostrado nas Figuras 9 a 12.

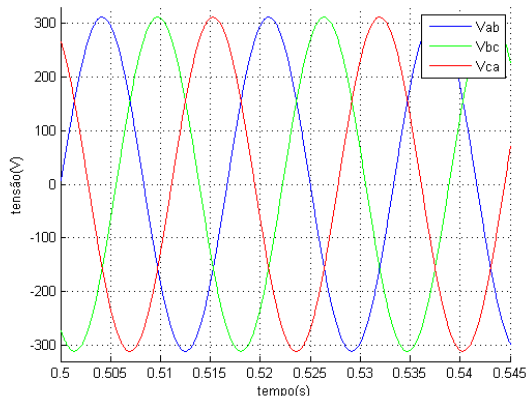


Figura 9 – Tensões de linha com fator de desequilíbrio igual a 0%.

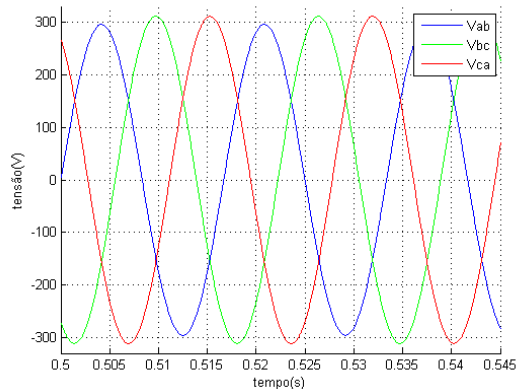


Figura 10 – Tensão de linha com fator de desequilíbrio igual a 5%.

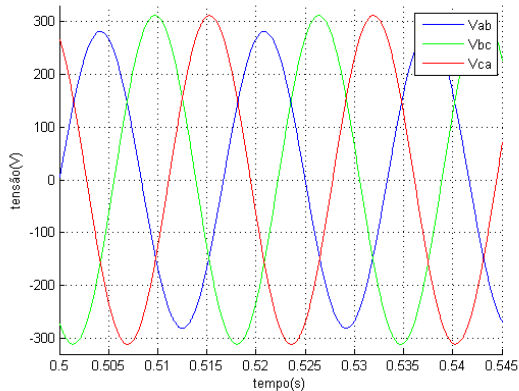


Figura 11 – Tensão de linha com fator de desequilíbrio igual a 10%.

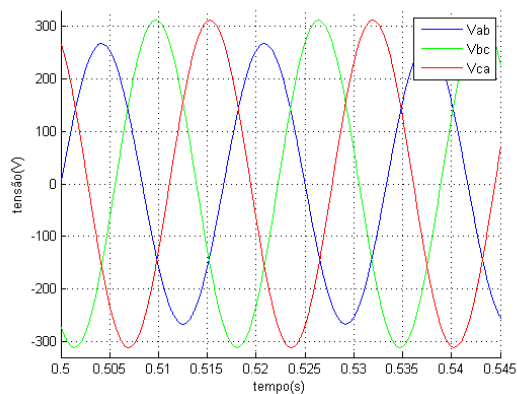


Figura 12 – Tensão de linha com fator de desequilíbrio igual a 15%.

Note que o desequilíbrio de tensão é dado pela diminuição da amplitude da tensão de linha  $V_{ab}$  de acordo com o fator de desequilíbrio. As tensões de linha restantes apresentam o valor de tensão de pico igual a 311,1 V.

Para observar como o desequilíbrio nas tensões de linhas acarretam nas de fase, o comportamento das tensões  $V_a$ ,  $V_b$  e  $V_c$  foi obtido da simulação e do ensaio, de acordo com o fator de desequilíbrio e a carga. As Figuras 13 a 20 mostram o caso do motor em vazio e as Figuras 21 a 28, o motor com carga nominal.

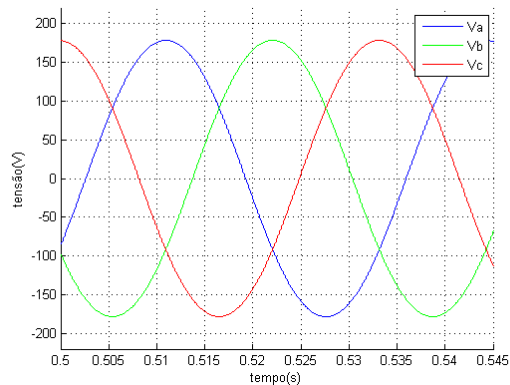


Figura 13 – Tensões de fase com desequilíbrio de 0% aplicadas ao motor sem carga (simulação).

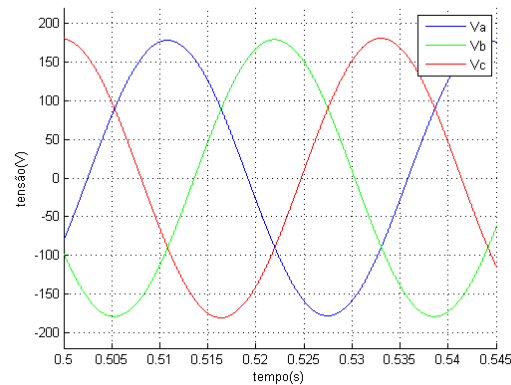


Figura 14 – Tensões de fase com desequilíbrio de 0% aplicadas ao motor sem carga (experimental).

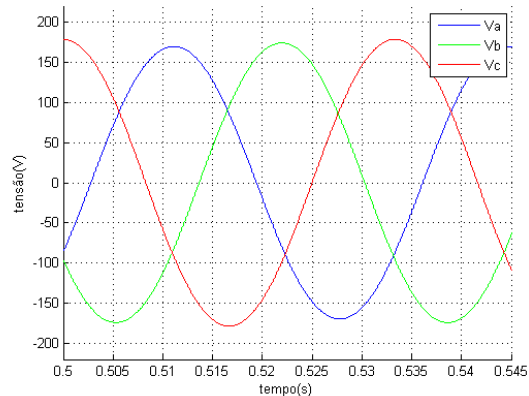


Figura 15 – Tensões de fase com desequilíbrio de 5% aplicadas ao motor sem carga (simulação).

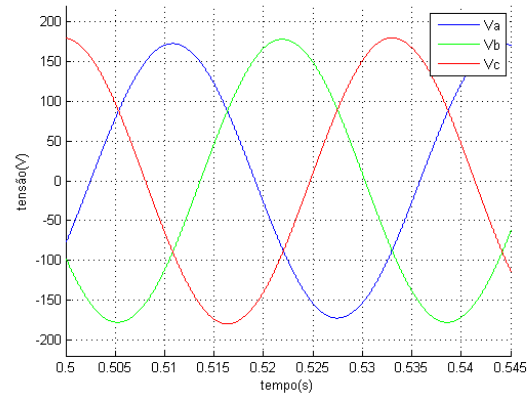


Figura 16 – Tensões de fase com desequilíbrio de 5% aplicadas ao motor sem carga (experimental).

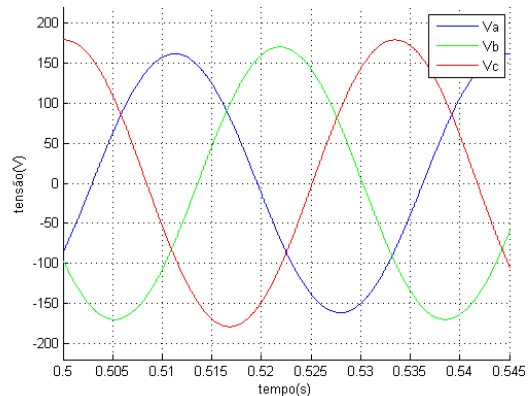


Figura 17 – Tensões de fase com desequilíbrio de 10% aplicadas ao motor sem carga (simulação).

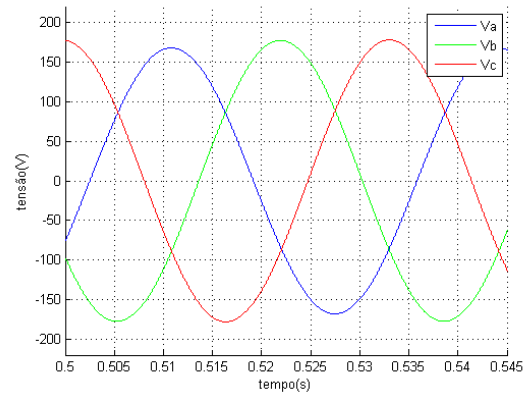


Figura 18 – Tensões de fase com desequilíbrio de 10% aplicadas ao motor sem carga (experimental).

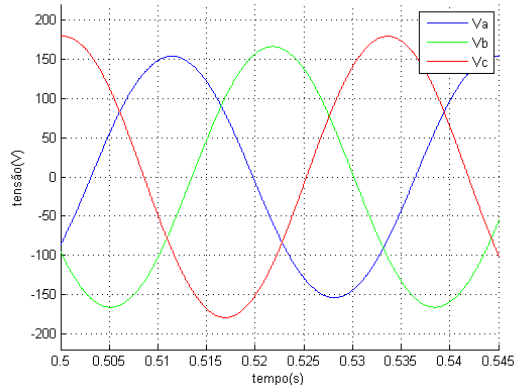


Figura 19 – Tensões de fase com desequilíbrio de 15% aplicadas ao motor sem carga (simulação).

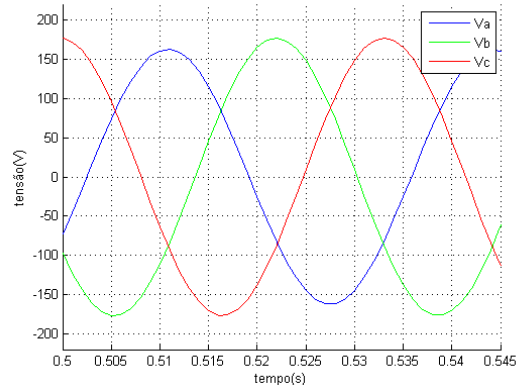


Figura 20 – Tensões de fase com desequilíbrio de 15% aplicadas ao motor sem carga (experimental).

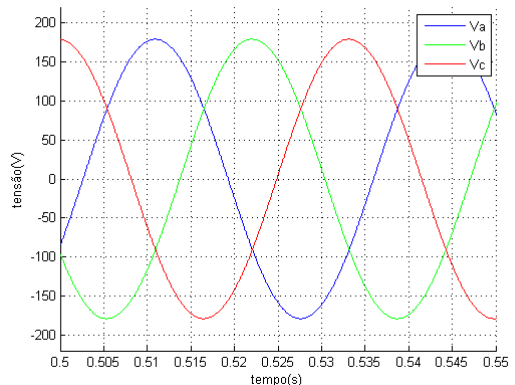


Figura 21 – Tensões de fase com desequilíbrio de 0% aplicadas ao motor com carga nominal (simulação).

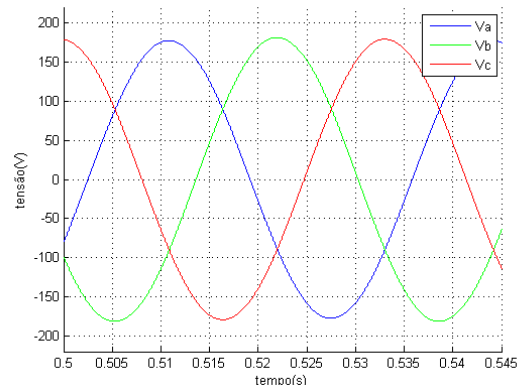


Figura 22 – Tensões de fase com desequilíbrio de 0% aplicadas ao motor com carga nominal (experimental).

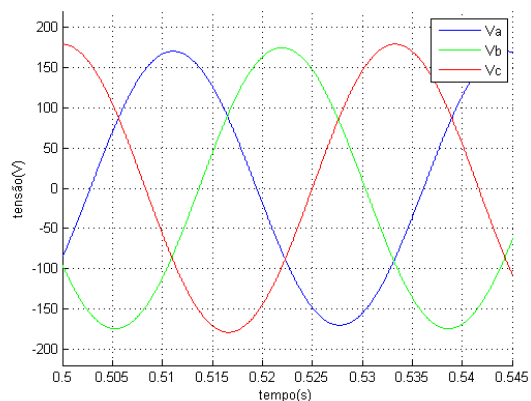


Figura 23 – Tensões de fase com desequilíbrio de 5% aplicadas ao motor com carga nominal (simulação).

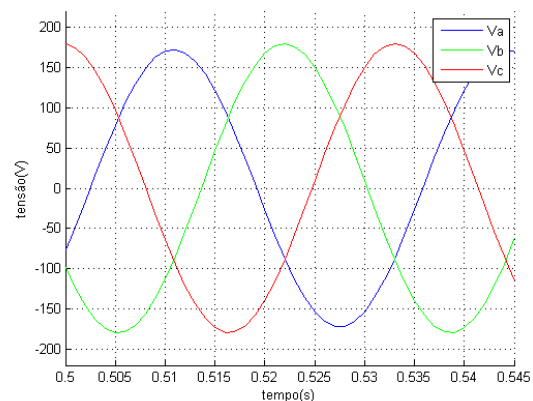


Figura 24 – Tensões de fase com desequilíbrio de 5% aplicadas ao motor com carga nominal (experimental).



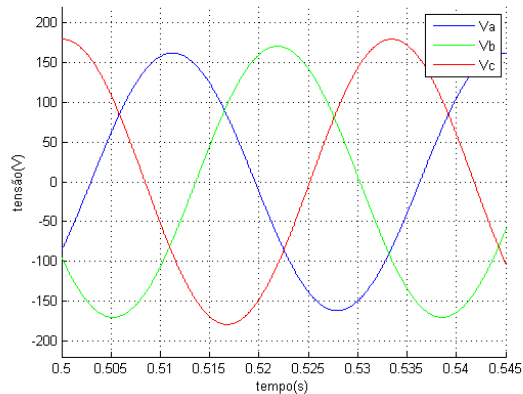


Figura 25 – Tensões de fase com desequilíbrio de 10% aplicadas ao motor com carga nominal (simulação).

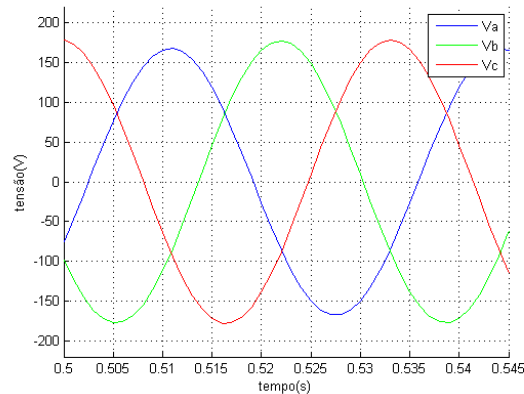


Figura 26 – Tensões de fase com desequilíbrio de 10% aplicadas ao motor com carga nominal (experimental).

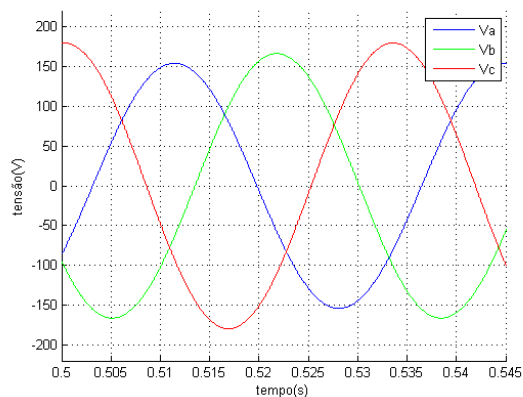


Figura 27 – Tensões de fase com desequilíbrio de 15% aplicadas ao motor com carga nominal (simulação).

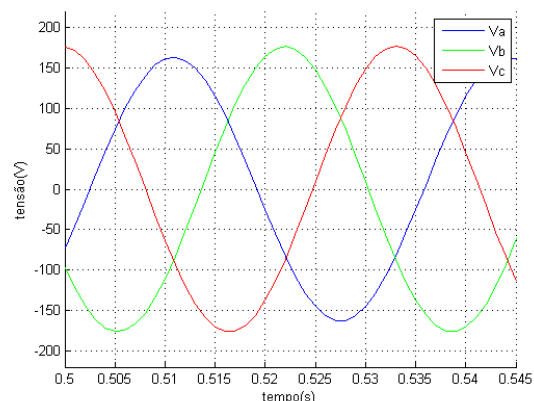


Figura 28 – Tensões de fase com desequilíbrio de 15% aplicadas ao motor com carga nominal (experimental).

Das Figuras de 13 a 28 observa-se que a simulação conseguiu prever de forma satisfatória, sobretudo em amplitude, as formas de onda obtidas por meio do ensaio em laboratório independente do motor estar ou não conectado a uma carga em seu eixo.

A Tabela 5 mostra os valores de pico referentes às tensões de fase, calculadas da simulação e medidas no laboratório, para o motor em vazio, e a Tabela 6 apresenta os mesmos valores para o motor com carga nominal.

Tabela 5 – Valor de pico (em V) das tensões de fase, conforme o fator de desequilíbrio, obtidas por meio da simulação e do ensaio em laboratório, para o motor de indução sem carga acoplada.

K(%)	Tensão V <sub>a</sub>		Tensão V <sub>b</sub>		Tensão V <sub>c</sub>	
	Simulação	Experimental	Simulação	Experimental	Simulação	Experimental
<b>0</b>	178,1	177,3	178,1	181,3	178,1	179,1
<b>5</b>	169,6	172,3	174,0	179,3	178,6	179,4
<b>10</b>	161,5	167,7	170,1	177,3	178,9	178,2
<b>15</b>	153,9	162,9	166,1	176,3	179,3	176,6

Tabela 6 – Valor de pico (em V) das tensões de fase, conforme o fator de desequilíbrio, obtidas por meio da simulação e do ensaio em laboratório, para o motor de indução com carga nominal.

K(%)	Tensão V <sub>a</sub>		Tensão V <sub>b</sub>		Tensão V <sub>c</sub>	
	Simulação	Experimental	Simulação	Experimental	Simulação	Experimental
<b>0</b>	178,9	178,0	178,9	179,0	178,9	180,7
<b>5</b>	170,2	172,5	174,5	177,8	179,0	179,7
<b>10</b>	161,9	167,9	170,3	177,3	179,1	177,9
<b>15</b>	154,0	162,7	166,3	176,6	179,5	177,1

Das Tabelas 5 e 6 conclui-se que os resultados adquiridos das Figuras 13 a 28 no que se refere à amplitude das formas de onda das tensões de fase são semelhantes, visto que os valores de pico simulados possuem uma boa aproximação com os obtidos experimentalmente. Embora a previsão fique pior à medida que o fator de desequilíbrio aumenta, esta modelagem consegue fornecer bons resultados dentro da faixa de desequilíbrio estudada. Um ponto que deve ser destacado é que, apesar de ser aplicado no motor tensões de linha equilibradas, as tensões de fase apresentaram um desequilíbrio de 2,2% para o motor sem carga e de 1,5% para o motor com carga nominal. Contudo, considerando que no Submódulo 2.8 do Operador Nacional do Sistema Elétrico, dado pela referência [23], sugere que os barramentos da rede básica apresentem um limite para o desequilíbrio de 2% e que as tensões nos terminais dos autotransformadores variem conforme a temperatura dos enrolamentos, tais desequilíbrios podem ser considerados para avaliação.

Comparando os valores de pico das tensões de fase dadas pelas Tabela 5 e 6 e os valores eficazes das de linha dispostas na Tabela 3, observa que o desequilíbrio somente em  $V_{ab}$

acarreta um desequilíbrio no módulo das três tensões de fase, visto que analiticamente a magnitude da tensão de linha é dada pela diferença das tensões de fase.

As Tabelas 7 e 8 mostram, respectivamente, o nível de terceiro harmônico (em %) fornecido pela modelagem e o medido experimentalmente para diferentes fatores de desequilíbrio, quando o motor está sem carga e carga nominal. Comparando estas tabelas note que o nível do terceiro harmônico é menor quando o motor é conectado a uma carga nominal, pois neste caso a corrente de magnetização deve suprir, além do ramo magnetizante, a carga acoplada ao eixo. Desta forma, é gerada uma força magnetomotriz de reação que tende a se opor à força magnetomotriz originada pelo campo girante produzido pelas correntes de sequência positiva. [15]

Tabela 7 – Nível de terceiro harmônico (em %), conforme o fator de desequilíbrio, obtido por meio da simulação e do ensaio em laboratório, para o motor de indução sem carga acoplada.

<b>K(%)</b>	<b>Harmônico em V<sub>a</sub></b>		<b>Harmônico em V<sub>b</sub></b>		<b>Harmônico em V<sub>c</sub></b>	
	Simulação	Experimental	Simulação	Experimental	Simulação	Experimental
<b>0</b>	0,812	0,586	0,810	0,309	0,807	0,403
<b>5</b>	0,627	0,163	0,627	0,498	0,668	0,347
<b>10</b>	0,596	0,156	0,472	0,457	0,555	0,313
<b>15</b>	0,585	0,140	0,414	0,473	0,527	0,355

Tabela 8 – Nível de terceiro harmônico (em %), conforme o fator de desequilíbrio, obtido por meio da simulação e do ensaio em laboratório, para o motor de indução com carga nominal.

<b>K(%)</b>	<b>Harmônico em V<sub>a</sub></b>		<b>Harmônico em V<sub>b</sub></b>		<b>Harmônico em V<sub>c</sub></b>	
	Simulação	Experimental	Simulação	Experimental	Simulação	Experimental
<b>0</b>	0,278	0,310	0,278	0,345	0,278	0,337
<b>5</b>	0,268	0,606	0,242	0,538	0,254	0,386
<b>10</b>	0,278	0,209	0,224	0,383	0,249	0,502
<b>15</b>	0,292	0,162	0,207	0,365	0,246	0,455

Como o motor de indução foi alimentado por tensões de linha 220 V, valor abaixo da nominal 380 V, os harmônicos dados pela modelagem e pelo ensaio ficaram menores que 1% como pode ser observado nas Tabelas 7 e 8. Isso também explica porque as formas de onda de

tensão nas Figuras 13 a 28 apresentam um comportamento senoidal dado pela frequência fundamental. Caso este motor fosse alimentado por tensões equilibradas e iguais à nominal, a simulação prevê um nível do terceiro harmônico igual a 5,844% para o motor sem carga e 4,335%, para o motor com carga nominal.

Durante o desequilíbrio foi estudado como é o comportamento do torque do motor de indução por meio da modelagem de acordo com o fator de desequilíbrio  $K$  e carga, cujos resultados podem ser verificados pelas Figuras 29 a 32, caso do motor sem carga e nas Figuras 33 a 36, com carga nominal. O desequilíbrio ocorre a partir do instante 0,4 segundos.

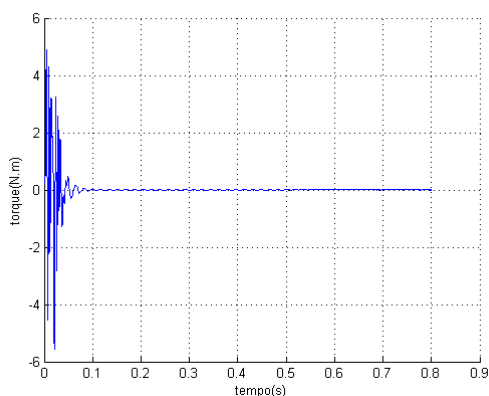


Figura 29 – Torque do motor sem carga com fator de desequilíbrio igual 0%.

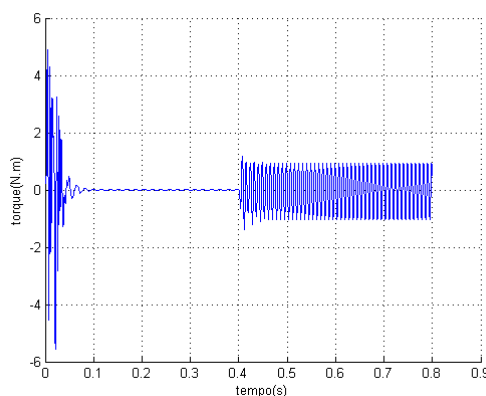


Figura 30 – Torque do motor sem carga com fator de desequilíbrio igual 5%.

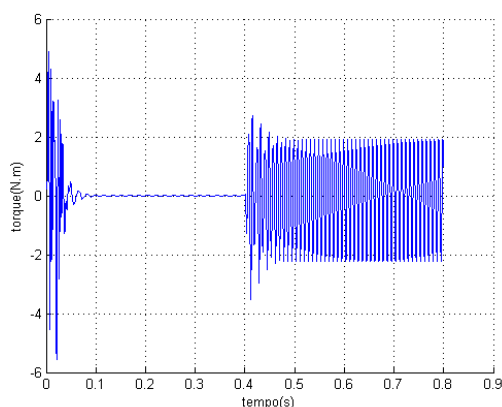


Figura 31 – Torque do motor sem carga com fator de desequilíbrio igual 10%.

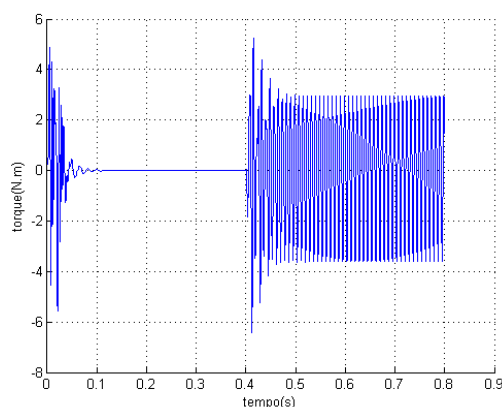


Figura 32 – Torque do motor sem carga com fator de desequilíbrio igual 15%.

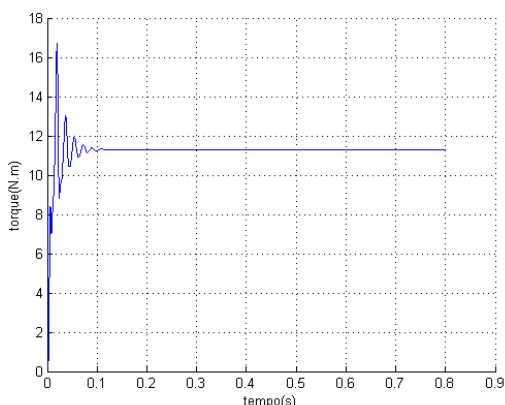


Figura 33 – Torque do motor acoplado a uma carga nominal com fator de desequilíbrio igual 0%.

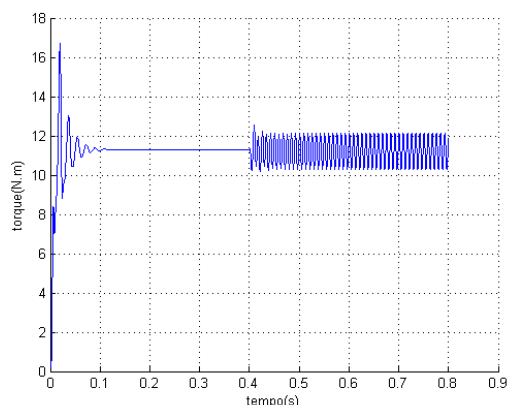


Figura 34 – Torque do motor acoplado a uma carga nominal com fator de desequilíbrio igual 5%.

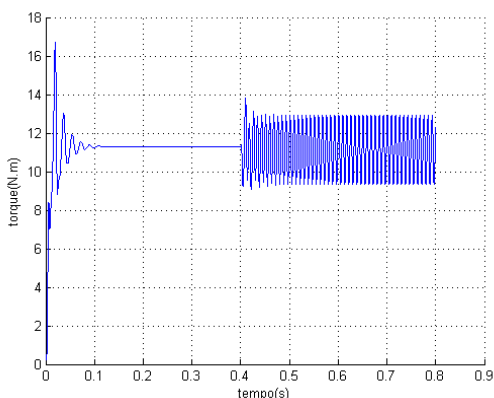


Figura 35 – Torque do motor acoplado a uma carga nominal com fator de desequilíbrio igual 10%.

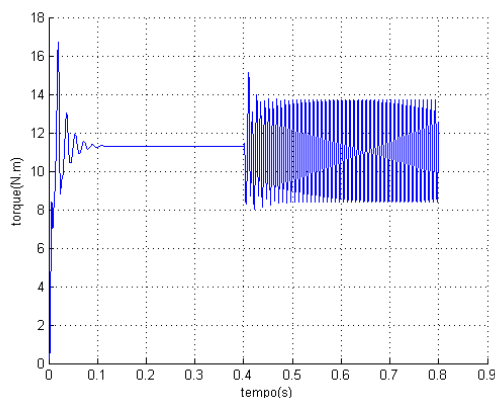


Figura 36 – Torque do motor acoplado a uma carga nominal com fator de desequilíbrio igual 15%.

A Figura 29 mostra que, após a partida do motor e, em seguida, o regime permanente, o torque do motor sem carga, na condição das tensões de alimentação equilibradas entre si é aproximadamente zero, o que implica que o rotor gira por inércia. Quando as tensões de alimentação tornam-se desequilibradas, o torque apresenta um transitório capaz de fazê-lo oscilar em torno do valor de referência. Após o transitório, esta oscilação se estabiliza enquanto permanecer fixo o nível de desequilíbrio. Esta oscilação se deve à presença do torque produzido pela componente de sequência negativa que se opõe ao torque gerado pelo campo girante proveniente das componentes de sequência positiva. Também pode-se observar que esta oscilação fica maior conforme o aumento do fator de desequilíbrio, pois isso provoca um aumento da influência do torque oriundo das componentes de sequência negativa. Pela Tabela

9, pode-se consultar os valores máximos e mínimos do torque do motor sem carga, bem como a variação entre esses valores, durante o desequilíbrio, no regime permanente.

A Figura 33 mostra como o torque do motor acoplado a uma carga nominal se comporta quando as tensões estão equilibradas. Pode-se observar por meio desta figura e da Tabela 9 que o valor encontrado, no regime permanente, para o torque do motor é 11,29 N.m. Assim como no caso anterior, o torque apresenta uma oscilação em torno deste valor conforme o desequilíbrio. Além disso, quanto maior o desequilíbrio, maior esta oscilação. Pela Tabela 9 pode-se consultar os valores máximos e mínimos do torque do motor com carga nominal, bem como a variação entre esses valores, durante o desequilíbrio, no regime permanente.

Outro ponto interessante que deve ser destacado é que, após observar as Figuras 29 a 36 e a Tabela 9, a oscilação do torque é menor para o motor com carga nominal, uma vez que nesta situação o escorregamento é maior o que leva a uma menor produção do torque induzido pelas correntes de sequência negativa.

Tabela 9 – Valores para torque (em N.m) do motor de indução conforme o fator de desequilíbrio e carga.

K (%)	Valor Mínimo		Valor Máximo		Variação	
	Sem Carga	Carga Nominal	Sem Carga	Carga Nominal	Sem Carga	Carga Nominal
0	0	11,29	0	11,29	-	-
5	-1	10,31	1	12,12	2,00	1,81
10	-2,23	9,33	1,89	12,92	4,12	3,59
15	-3,60	8,37	2,96	13,7	6,56	5,33

O comportamento da velocidade do motor de indução também foi obtido por meio da simulação com o fator de desequilíbrio  $K$  e carga, cujos resultados podem ser verificados pelas Figuras 37 a 40 no caso do motor sem carga e pelas Figuras 41 a 44 quando o motor está acoplado a uma carga nominal.

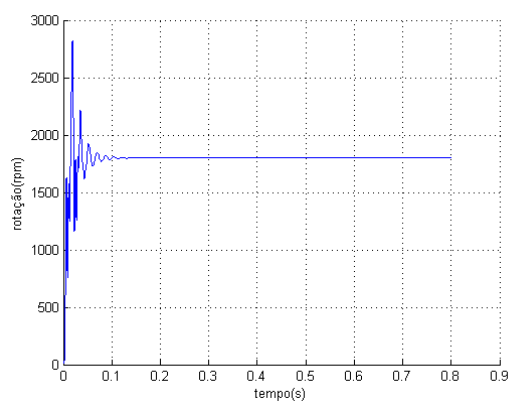


Figura 37 – Velocidade do motor sem carga com fator de desequilíbrio igual 0%.

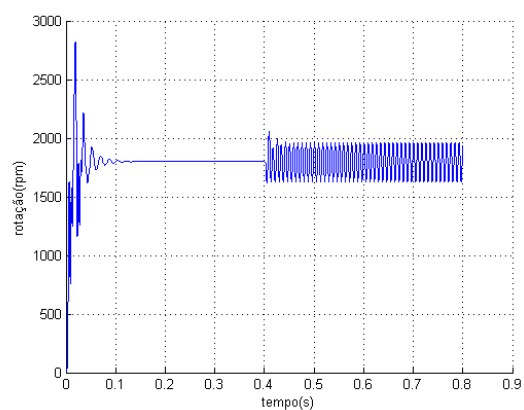


Figura 38 – Velocidade do motor sem carga com fator de desequilíbrio igual 5%.

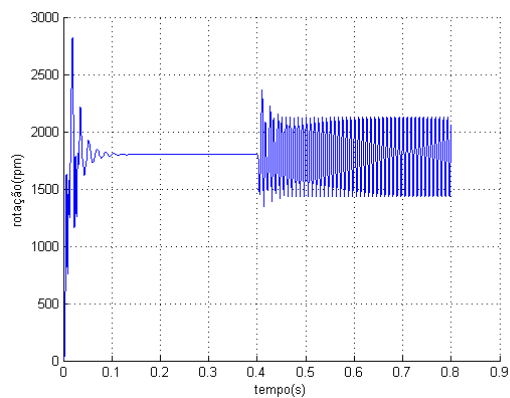


Figura 39 – Velocidade do motor sem carga com fator de desequilíbrio igual 10%.

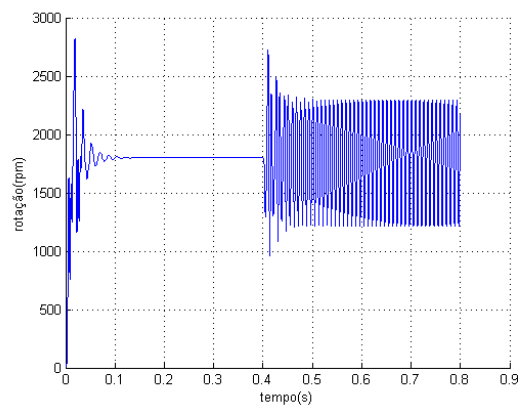


Figura 40 – Velocidade do motor sem carga com fator de desequilíbrio igual 15%.

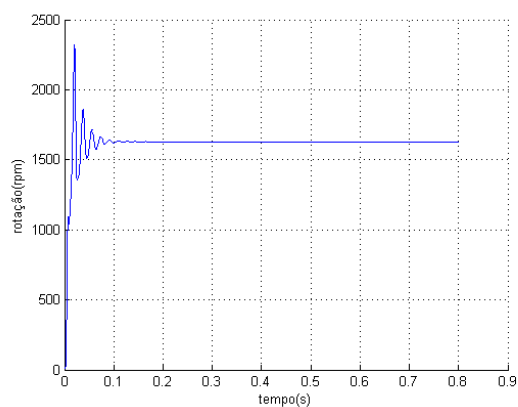


Figura 41 – Velocidade do motor acoplado a uma carga nominal com fator de desequilíbrio igual 0%.

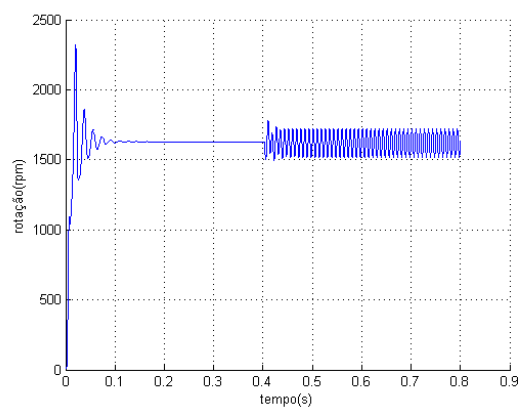


Figura 42 – Velocidade do motor acoplado a uma carga nominal com fator de desequilíbrio igual 5%.

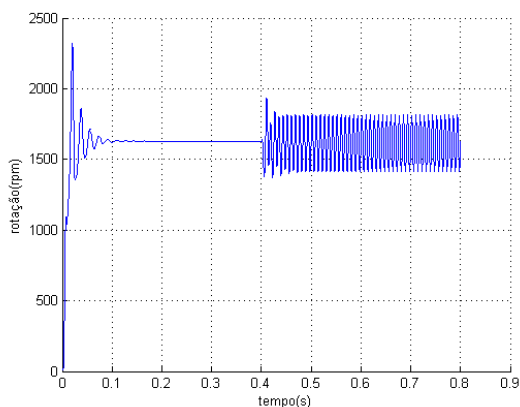


Figura 43 – Velocidade do motor acoplado a uma carga nominal com fator de desequilíbrio igual 10%.

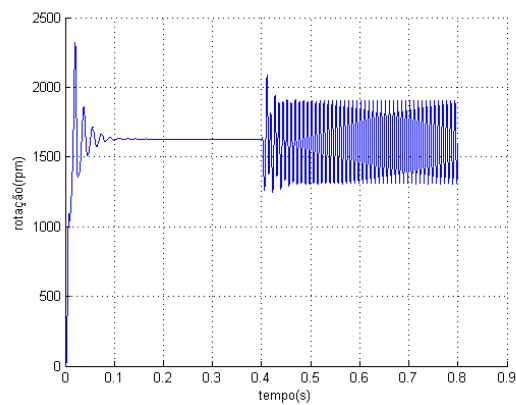


Figura 44 – Velocidade do motor acoplado a uma carga nominal com fator de desequilíbrio igual 15%.

A Figura 37 mostra que, após a partida, no regime permanente, a velocidade do motor sem carga, quando as tensões de alimentação se encontram equilibradas, assume o valor da velocidade síncrona do motor, ou seja, igual a 1800 rpm, já que o escorregamento é nulo neste caso. Experimentalmente o tacômetro mediu uma velocidade 1795 rpm, ou seja, um escorregamento de 0,28%. Desta forma, a modelagem consegue prever a velocidade do motor sem carga quando alimentado por tensões equilibradas.

Da mesma forma que o torque, quando as tensões de alimentação tornam-se desequilibradas, a velocidade submete a um transitório capaz de gerar uma oscilação em torno do valor de referência. Após o transitório, ela se estabiliza, enquanto permanecer fixo o nível de desequilíbrio. Esta oscilação se deve, assim como no torque, à presença das correntes de sequência negativa que produzem um campo magnético que gira no sentido oposto ao do campo girante gerado pelas componentes de sequência positiva. Para complementar, esta oscilação apresenta uma amplitude maior com o aumento do fator de desequilíbrio, visto que há um aumento da influência da circulação do fluxo oriundo das componentes de sequência negativa. Pela Tabela 10 pode-se verificar os valores máximos e mínimos da velocidade do motor sem carga, bem como a variação entre esses valores, durante o desequilíbrio, no regime permanente.

Quando o motor está acoplado a uma carga nominal, pode-se verificar pela Figura 41 o comportamento da velocidade do motor alimentado por tensões equilibradas. Pode-se observar que, com o auxílio da Tabela 10, o valor encontrado, no regime permanente, para a velocidade é 1629 rpm, o que implica em um escorregamento igual a 3,61%. Comparando com o valor



medido experimentalmente pelo tacômetro, este acusou a velocidade igual a 1620 rpm, ou seja, um escorregamento de 4,14%. Com isso, pode-se considerar que a modelagem consegue prever também a velocidade do motor com carga nominal quando alimentado por tensões equilibradas.

A velocidade do motor com carga nominal se comporta de forma semelhante quando este está sem carga, pois apresenta uma oscilação em torno da velocidade de referência conforme o desequilíbrio. Além disso, quanto maior o desequilíbrio, maior esta oscilação. Com a Tabela 10 pode-se consultar os valores máximos e mínimos da velocidade do motor com carga nominal, bem como a variação entre esses valores, durante o desequilíbrio, no regime permanente.

Ao observar as Figuras 37 a 44 e a Tabela 10 pode-se identificar que a oscilação da velocidade é menor para o motor com carga nominal, já que nesta situação o escorregamento da sequência positiva é maior, o que implica que o escorregamento de sequência negativa seja menor conforme a equação (3.4). Desse modo, de (3.5) conclui-se que a velocidade produzida pelas componentes de sequência negativa seja menor, levando, portanto, a uma menor variação da velocidade durante o desequilíbrio para o motor com carga nominal.

Tabela 10 – Valores para velocidade (em rpm) do motor de indução conforme o fator de desequilíbrio e carga.

K (%)	Valor Mínimo		Valor Máximo		Variação	
	Sem Carga	Carga Nominal	Sem Carga	Carga Nominal	Sem Carga	Carga Nominal
<b>0</b>	1800	1629	1800	1629	-	-
<b>5</b>	1628	1520	1960	1722	332	202
<b>10</b>	1434	1413	2123	1814	689	401
<b>15</b>	1218	1309	2292	1901	1074	592

### 4.3 Falta entre uma fase e terra

Como descrito na seção “Materiais e Métodos”, o estudo a respeito dos efeitos que uma falta entre uma fase (neste caso, a fase *a*) e terra pode causar em um motor de indução trifásico, alimentado por tensões de linha nominais, é obtido somente pela modelagem computacional. A ocorrência da falta se dá no instante 0,8 segundos.

As formas de onda das correntes e tensões durante a falta podem ser verificadas, respectivamente, pelas Figuras 45 e 46 no caso do motor sem carga e pelas Figuras 47 e 48 quando o motor com carga nominal.

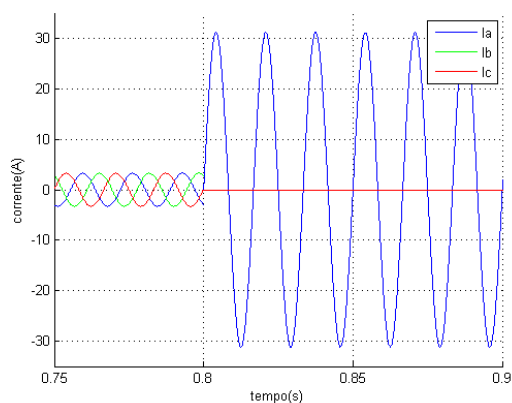


Figura 45 – Corrente em cada fase do motor de indução sem carga submetido a uma falta entre a fase *a* e terra.

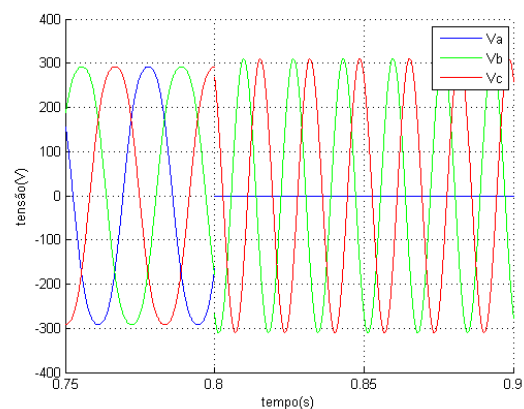


Figura 46 – Tensão em cada fase do motor de indução sem carga submetido a uma falta entre a fase *a* e terra.

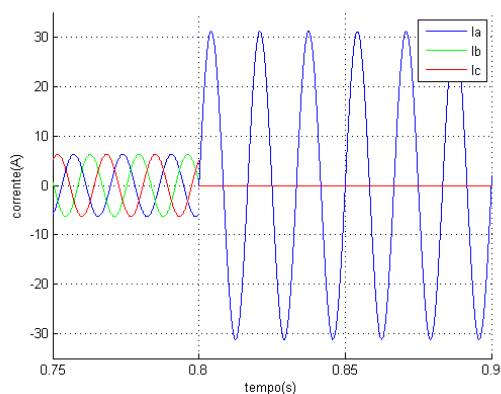


Figura 47 – Corrente em cada fase do motor de indução com carga nominal submetido a uma falta entre a fase *a* e terra.

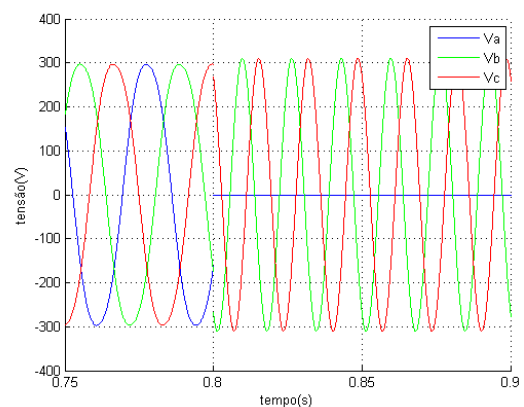


Figura 48 – Tensão em cada fase do motor de indução com carga nominal submetido a uma falta entre a fase *a* e terra.

Por meio da Tabela 11 pode-se consultar os valores de pico coletados das formas de onda das correntes e tensões quando o motor de indução trifásico é submetido a uma falta entre a fase *a* e terra de acordo com a carga acoplada ao seu eixo.

Tabela 11 – Valores de pico das correntes e tensões durante a falta ocorrida entre a fase *a* e terra em um motor de indução conforme carga.

	<b>I<sub>a</sub> (A)</b>	<b>I<sub>b</sub> (A)</b>	<b>I<sub>c</sub> (A)</b>	<b>V<sub>a</sub> (V)</b>	<b>V<sub>b</sub> (V)</b>	<b>V<sub>c</sub> (V)</b>
<b>Sem Carga</b>	31,2	0	0	0	310,3	310,3
<b>Carga Nominal</b>	31,2	0	0	0	310,3	310,3

Pelas Figuras 45 a 48 e pela Tabela 11 verifica-se que a corrente e tensão durante a falta independe da carga conectada ao motor. Além disso, a corrente percorrida na fase onde ocorreu a falta é 6 vezes maior que a corrente nominal do motor, cuja intensidade pode aumentar a temperatura dos enrolamentos do estator, danificando-os.

É oportuno comentar que os motores de indução trifásicos, cujo estator é ligado em estrela, não são aterrados para evitar que haja circulação de corrente de sequência zero. Como as componentes das correntes desta sequência estão em fase, elas contribuem com a passagem de uma corrente três vezes maior pelo neutro, o que permite aumentar a livre circulação de correntes de terceiro harmônico no motor. Pela equação (2.16) pode-se observar que, caso o motor com aterramento e ligado em estrela sofra uma falta fase e terra, será injetado na rede correntes de terceiro harmônico. Desta forma, estes motores são projetados para que os enrolamentos das três fases apresentem a mesma impedância, evitando assim a necessidade de aterramento. Portanto, pode-se dizer que a modelagem aborda também este ponto relevante para a qualidade de energia quando o motor se submete a uma falta.

O comportamento do torque e velocidade durante a falta pode ser analisado, respectivamente, pelas Figuras 49 e 50 no caso do motor sem carga e pelas Figuras 51 e 52 quando o motor está conectado a uma carga nominal.

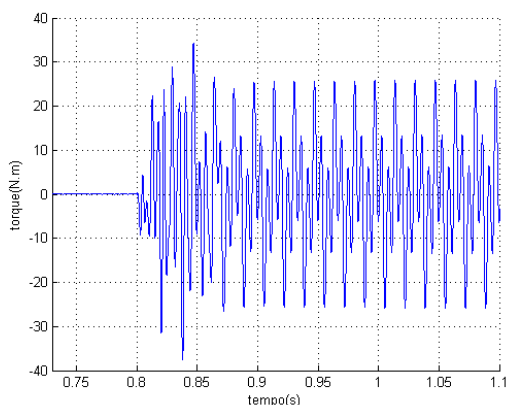


Figura 49 – Torque desenvolvido pelo motor de indução sem carga submetido a uma falta entre a fase a e terra.

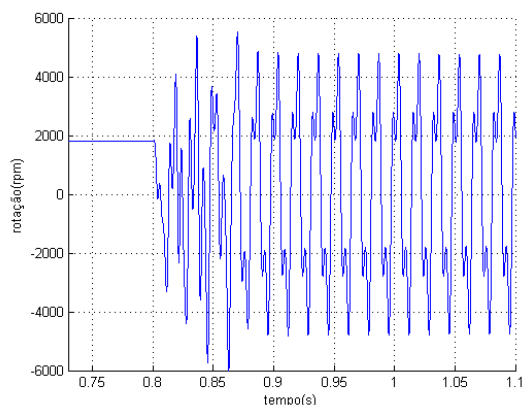


Figura 50 – Velocidade do motor de indução sem carga submetido a uma falta entre a fase a e terra.

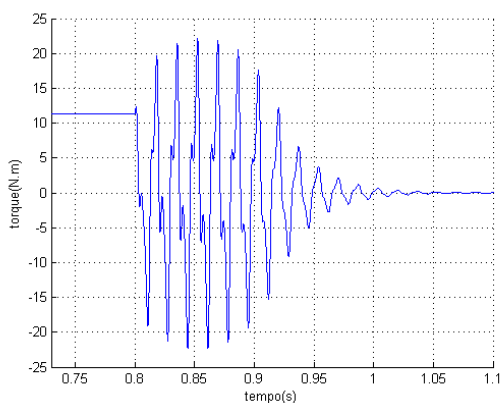


Figura 51 – Torque desenvolvido pelo motor de indução com carga nominal submetido a uma falta entre a fase a e terra.

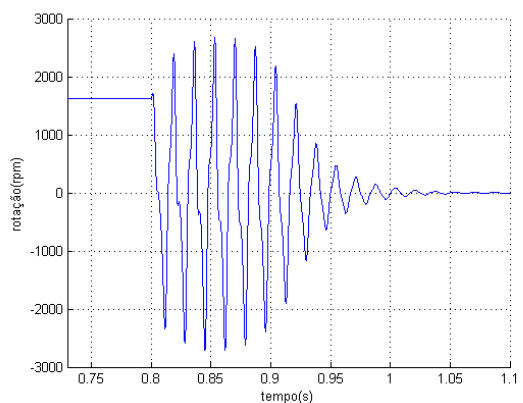


Figura 52 – Velocidade do motor de indução com carga nominal submetido a uma falta entre a fase a e terra.

Pela Figura 51 percebe-se que o torque desenvolvido pelo motor com carga nominal logo após a ocorrência da falta, apresenta uma forte oscilação no período transitório. Isso pode ser explicado pelo surgimento de uma alta corrente de sequência negativa, provocando a geração de um campo magnético que gira no sentido oposto ao do campo girante de sequência positiva. Assim há formação de um torque induzido pela componente de sequência negativa que se opõe ao de sequência positiva de modo que o torque resultante se reduz até que seja anulado. Diante disso, pode-se observar que há um brusco travamento do rotor, anulando, portanto, a velocidade do motor (Figura 52).

Quando o motor não está conectado a uma carga, verifica-se, pela Figura 49, que o torque sofre uma oscilação após a ocorrência da falta. Assim como no caso anterior, esta oscilação foi originada pela formação de um torque induzido devido às componentes de sequência negativa. Para reestabelecer o equilíbrio do campo magnético girante há também um surgimento do torque induzido pelas componentes de sequência positiva. Desse modo, pode-se observar que o torque mantém essa oscilação até que haja uma danificação severa dos enrolamentos do estator do motor. Além disso, esta oscilação provoca também uma variação da velocidade (Figura 50) que mantém da mesma forma que o torque.

Um resultado interessante é obtido quando se aumenta o momento de inércia do motor em 10 vezes. Logo após a ocorrência da falta, o rotor submete a um forte travamento devido ao surgimento do torque induzido devido às componentes de sequência negativa como se pode ver pela Figura 53. Em seguida, o torque resultante fica oscilando em torno do valor zero, o que demonstra uma tendência do rotor girar por inércia. Isso pode ser facilmente verificado pela Figura 54, pois, após o travamento, o rotor se movimentava conforme o campo magnético girante oriundo das componentes de sequência negativa. Note que há uma inversão de giro do motor e que a velocidade oscila em torno da síncrona, já que o motor está sem carga.

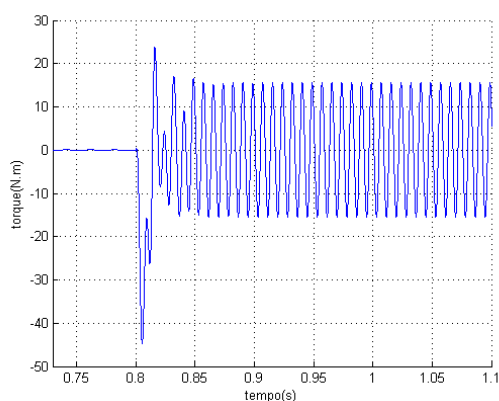


Figura 53 – Torque desenvolvido pelo motor de indução com carga nominal e momento de inércia 10 vezes maior submetido a uma falta entre a fase *a* e terra.

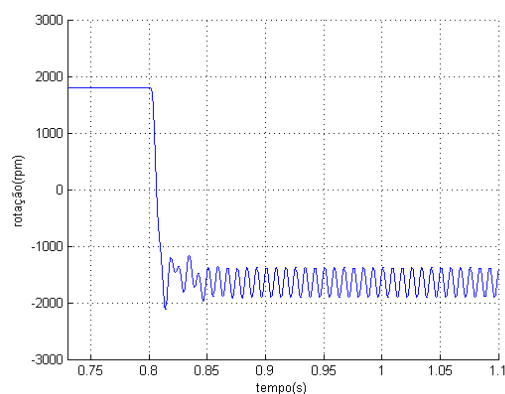


Figura 54 – Velocidade do motor de indução com carga nominal e momento de inércia 10 vezes maior submetido a uma falta entre a fase *a* e terra.

## 5 *Conclusões*

Este trabalho demonstrou que a adaptação feita para a modelagem apresentou resultados consistentes com a teoria e com os ensaios realizados em laboratório.

A respeito dos desequilíbrios de tensão de alimentação do motor, verificou-se que o comportamento das tensões de fase, obtidas pela simulação, é considerado válido, uma vez que apresentou um comportamento suficientemente próximo ao do real. Além disso, foi observado que a simulação conseguiu prever o nível de terceiro harmônico presente nas tensões e que respeitou a literatura, pois, tanto na simulação quanto nos testes, o motor foi alimentado por tensões abaixo da nominal, o que implicaria em baixos níveis de harmônicos nas tensões de fase do estator. Somado a esse resultado, a modelagem também conseguiu determinar com boa exatidão o comportamento do torque e velocidade para o motor conectado ou não com carga, indicando as oscilações esperadas para estas grandezas quando tal motor é submetido a desequilíbrios de tensões.

Na ocorrência de uma falta entre uma fase e terra foi possível mostrar que a modelagem é consistente com a literatura quanto ao comportamento das tensões, correntes, torque e velocidade. A aplicação do método das componentes simétricas na modelagem apresentou resultados satisfatórios, uma vez que houve somente circulação de corrente na fase onde ocorreu a falta e as tensões nas demais fases acusaram valores próximos às de alimentação. Desse modo, foi comprovado a efetividade deste método tradicional de identificação de falhas em motores de indução trifásicos. Além disso, observou-se que, após a falta, o surgimento de componentes de corrente de sequência negativa permitiram a formação de um torque induzido, que se opõe ao torque gerado pela sequência positiva, capaz de travar o rotor quando o motor estava conectado a uma carga ou de inverter o sentido de rotação do motor, quando este estava sem carga, mas com momento de inércia dez vezes maior ao valor definido para este motor.

Pelos resultados apresentados sobre a ocorrência de uma falta entre uma fase e terra, tendo a consciência que o aterramento em motores de indução permitem a circulação de corrente no neutro, elevando os níveis de terceiro harmônico das correntes que passam pelo estator, foi possível explicar a razão dos motores de indução ligados na configuração estrela não possuírem aterramento.

São dadas como sugestões para trabalhos futuros:

- verificação experimental do comportamento das tensões e correntes para o motor alimentado por tensões nominais desequilibradas;
- inclusão na simulação o regime transitório das correntes e tensões após ocorrer a falta;
- simulação de um sistema de proteção que deverá ser acionado após a falta;
- comprovação em laboratório para o torque e velocidade do motor alimentado por tensões desequilibradas;
- confrontação experimental das correntes, tensões, torque e velocidade quando o motor de indução é submetido a uma falta entre uma fase e terra.

## ***Referências Bibliográficas***

- [1] CAD, M. M. Estratégias de modelagem dinâmica e simulação computacional do motor de indução trifásico. Dissertação (Mestrado) – USP/São Carlos, 2000.
- [2] GOEDTEL, A. Estimador neural de velocidade para motores de indução trifásicos. Tese (Doutorado) – USP/São Carlos, 2007, pp. 159.
- [3] HOLLANDA, D. L. R. Análise comportamental do motor de indução trifásico submetido a desequilíbrios de tensão sob o ponto de vista de conjugado e rendimento. Dissertação (Mestrado) - UNB, 2012
- [4] BULGARELLI, R., Proteção térmica de motores de indução trifásicos industriais. Dissertação (Mestrado) – USP/São Paulo, 2006.
- [5] KAWAPHARA, M. K., et al. “Análise do comportamento da energia elétrica no acionamento de uma bomba centrífuga em função da variação da vazão através do estrangulamento de uma válvula ou via inversor de frequência”. In: VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais, Poços de Caldas, Brasil, 2008.
- [6] FAIZ, J., EBRAHIMPOUR, H., PILLAY P. Influence of unbalanced voltage supply on efficiency of three phase squirrel cage induction motor and economic analysis”. In: Energy Conversion and Management, vol. 47, 2006, pp. 289–302.
- [7] PAULO, G. Qualidade de Energia: desequilíbrios de tensão, pp. 42-48. Disponível em: <http://goo.gl/GDPck5>. Acesso em: set. 2009.
- [8] OLESKOVICZ, M. Qualidade da Energia Elétrica, USP, São Carlos, 2007, Apostila da disciplina Qualidade de Energia Elétrica, do curso de Mestrado em Engenharia Elétrica, UNESP/FEB, Bauru, 2007.
- [9] LEE, C. Y., et al. Effects of various unbalance voltages on the operation performance of an induction motor under the same voltages unbalanced fator condition. IEEE Industrial and Commercial Power System Technical Conference, pp.51-59, Edmonton, Canada, 1997.
- [10] DUGAN, R. C. et al. Electrical power systems quality. São Paulo: Mcgraw-Hill, 2003.
- [11] OLIVEIRA, J. E. A. de. Modelagem de um motor de indução trifásico operando com tensões desequilibradas por meio de redes neurais artificiais. Dissertação (Mestrado) – Unesp/Bauru, 2011.
- [12] NETO, C. T. de Andrade. Análise de um motor de indução trifásico submetido a tensões de alimentação distorcidas. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) UFV/Viçosa, 2012.
- [13] TEIXEIRA, Alexandre G. C. Estudo de distorções harmônicas no acionamento de máquinas elétricas. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) UFV/Viçosa, 2011.
- [14] VIEIRA, Bruno F. Simulação da máquina de indução trifásica operando na região linear e de saturação da sua curva normal de magnetização. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) UFV/Viçosa, 2012.
- [15] TAVARES, Roger N. Modelagem da máquina de indução trifásica para a simulação de desequilíbrios de tensões. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) UFV/Viçosa, 2014.



- [16] RESENDE, J. T. de. Modelagem da máquina de indução trifásica, incluindo a saturação magnética – análise dinâmica do gerador de indução auto-excitado. Tese (Doutorado) - UFU/Uberlândia, 1999.
- [17] STEVENSON Jr., William D. Elements of power systems analysis. New York: McGraw-Hill, 1982.
- [18] CHAPMAN, Stephen J. Electric machinery and power systems fundamentals. New York: McGraw-Hill, 2002.
- [19] SAADAT, Hadi. Power systems analysis. 3ª ed. PSA Publishing, 2010.
- [20] SANTOS, Fernanda M. C. Identificação de falhas em motores de indução trifásicos usando sistemas inteligentes. Tese (Doutorado) – USP/São Carlos, 2013.
- [21] PINHEIRO, David G. Modelagem matemática do gerador de indução trifásico, incluindo a saturação magnética e o controle da tensão gerada. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) UFV/Viçosa, 2007.
- [22] GARCIA, Diogo C. Avaliação e minimização numérica do desequilíbrio de tensão: estimativa por análise de sensibilidade incremental e soluções analíticas. Dissertação (Mestrado) – UnB/Brasília, 2007.
- [23] ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico (2011) “Procedimentos De Rede, Submódulo 2.8: Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e de seus componentes.” Revisão 2.0, data de vigência 11 de novembro de 2011.
- [24] REZENDE, Paulo H. O., SAMESIMA, Milton I. Efeitos do desequilíbrio de tensões de suprimentos nos motores de indução trifásico. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/horizontecientifico/article/viewFile/4473/11857>. Acesso em 15 jun. 2015.