

SIMULAÇÃO DE CARGAS MECÂNICAS PARA ESTUDOS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Andres Hluchan, Fabiana Alves pereira, Sérgio Ferreira de Paula Silva (Dr.)

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Laboratório de Eficiência Energética (LEFE), Uberlândia-MG, andres.ufu@gmail.com, fabialpereira@gmail.com, sergio@eletrica.ufu.br.

Resumo - O presente artigo tem como objetivo desenvolver uma estrutura laboratorial capaz de simular as principais cargas mecânicas utilizadas em ambientes industriais possibilitando assim pesquisas na área de eficiência energética sem a presença física destas cargas. Tal estrutura tem o intuito de facilitar a análise do desempenho e das características dos motores de indução trifásicos (MIT) em diversas condições de operação possibilitando o desenvolvimento de procedimentos e técnicas eficientes de acionamento e controle de sistemas motrizes.

Palavras-Chave - Automação Industrial, Controle de Processo, Freio Eletromagnético, Simulação de Cargas Mecânicas.

SIMULATION OF MECHANICAL LOADS FOR STUDIES OF ENERGY EFFICIENCY

Abstract - This article aims to develop a laboratory structure for simulate mechanical loads used on industrial environments making possible research about efficiency energy without the physical presence of these loads. This structure have for intention facilitate the analysis of performance of induction motors in various mode of operation through the development of procedures and techniques efficient for drive and control for motor systems.

Keywords - Electromagnetic Brake, Industrial Automation, Process Control, Simulation of Mechanical Loads.

I. INTRODUÇÃO

Na sociedade moderna, o consumo de energia é altamente correlacionado com o desenvolvimento econômico, tecnológico e com a melhoria da qualidade de vida. Tais fatores justificam o crescente aumento da demanda energética apresentada não apenas pelo Brasil, mas pelo mundo.

A energia se apresenta de várias formas na natureza o que faz com que o homem desde a pré-história busque desenvolver mecanismos capazes de proporcionar um maior

conforto a humanidade, reduzindo os esforços físicos necessários para o desempenho de determinadas tarefas. [1] O surgimento da energia elétrica, considerada símbolo da Era da Informação e marco da segunda revolução industrial, permitiu o desenvolvimento de inúmeras utilidades domésticas e acelerou o crescimento industrial. [2]

No entanto todo este desenvolvimento tecnológico acarretou crises de abastecimentos e impactos ambientais indesejados, alertando o homem da escassez dos recursos até então utilizados, promovendo a conscientização da importância da preservação do meio ambiente. Surge então o conceito de eficiência energética visando à mitigação dos impactos ambientais através do desenvolvimento de sistemas mais eficientes, que mantenham as condições de conforto, segurança e produtividade dos usuários.

Neste contexto, um dos primeiros passos para a promoção da eficiência energética no Brasil foi à criação, em 1985, do Programa Nacional de Conservação da Energia Elétrica (PROCEL) pelos Ministérios de Minas e Energia e da Indústria e Comércio, sendo que devido à importância do programa, o PROCEL foi transformando em um programa de governo em 1991. O PROCEL atua em diversos setores da sociedade (educação, indústria, governos municipais e saneamento) visando à racionalização da produção e do consumo de energia elétrica com o intuito de eliminar os desperdícios e reduzir os custos. [3]

De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN) [4] a energia elétrica corresponde a aproximadamente 17% do total da energia consumida no país, conforme mostra a Figura 1. O mesmo documento mostra que da parcela de consumo de energia elétrica, a indústria é o setor da economia que apresenta o maior consumo, cerca de 44% do total. A Figura 2 apresenta a composição do consumo de energia elétrica no Brasil por setores da economia.

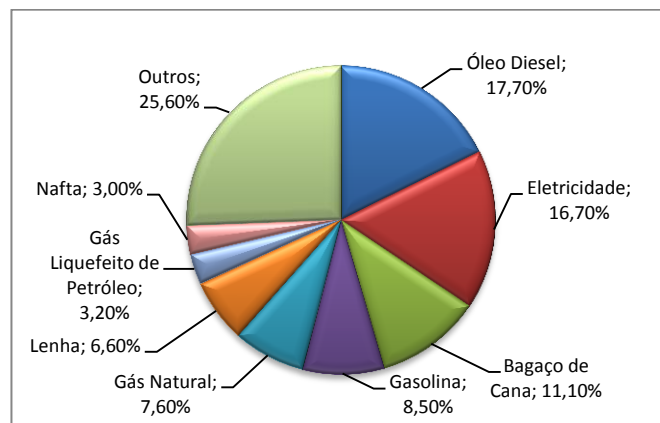


Fig. 1. Percentual de cada fonte de energia consumida no país.



XI CEEL – ISSN 2178-8308
25 a 29 de novembro de 2013
Universidade Federal de Uberlândia – UFU
Uberlândia – Minas Gerais – Brasil

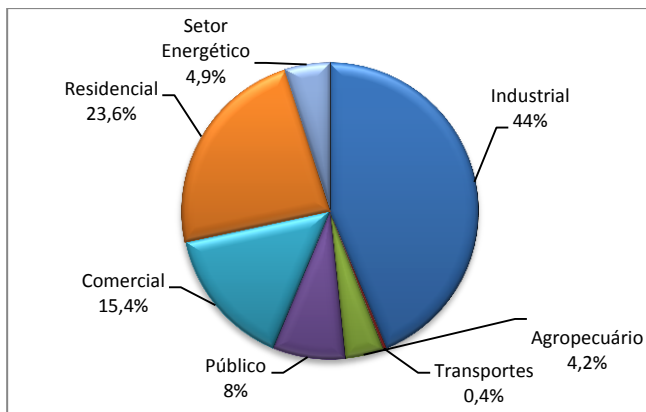


Fig. 2. Composição Setorial do Consumo de Eletricidade.

Dentro do consumo de eletricidade apresentado pelo setor industrial os motores, de acordo com o Balanço de Energia Útil (BEU 2005) [5], são responsáveis por consumir aproximadamente 62% da energia. Esta expressiva parcela do consumo de energia nas indústrias justifica o estudo e o desenvolvimento de procedimentos e técnicas eficientes de acionamento e controle de sistemas motrizes. [6]

Neste cenário, em que o desenvolvimento de equipamentos mais eficientes se faz indispensável, o presente trabalho tem como objetivo promover a simulação dos principais tipos de cargas mecânicas existentes nos ambientes industriais e acionadas por motores de indução trifásicos (MIT). A modelagem do comportamento eletromecânico destas cargas em um sistema automatizado permite o controle de um dispositivo eletromagnético responsável pela reprodução das diferentes cargas mecânicas. Nesta pesquisa foi utilizado um freio eletromagnético como instrumento de simulação das referidas cargas.

II. O FREIO ELETROMAGNÉTICO

Neste trabalho foi utilizado um freio eletromagnético para simulação de diferentes cargas mecânicas. Este dispositivo relativamente simples é, basicamente, composto por um disco metálico acoplado ao eixo do motor, no qual a força da frenagem ocorre por efeito de correntes induzidas que surgem a partir do campo magnético produzido por um conjunto de bobinas, conforme mostra a Figura 3.

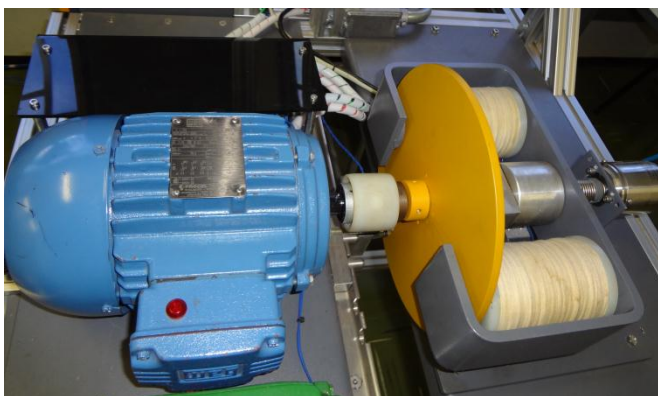


Fig. 3. Dispositivo eletromagnético de frenagem e simulação de cargas.

As primeiras descobertas significativas no que se refere aos freios eletromagnéticos, como o próprio nome sugere, são obtidas por volta de 1820, quando Hans Christian Oersted demonstra a relação existente entre a corrente elétrica e o campo magnético.

André Marie Ampère, a partir dos estudos de Oersted, concluiu por sua vez, que uma espira formada por um filamento condutor, apresenta uma tensão elétrica em seus terminais quando submetida a um campo magnético variável no tempo, obtido pelo movimento relativo entre o condutor e um campo magnético constante. Essa tensão, de origem não eletrostática, é denominada de força eletromotriz induzida (fem).

Posteriormente, a força eletromotriz foi quantificada através da Lei de Faraday, sendo representada matematicamente pela equação (1) a seguir:

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

Assim, pode-se concluir a partir da equação que a fem em um circuito fechado é determinada pela taxa de variação do fluxo magnético que atravessa o circuito, o sinal de menos presente na equação indica que se a fem está em uma direção tal que produz uma corrente cujo fluxo, se adicionado ao fluxo original, reduz a magnitude da fem. Esta afirmação de que a tensão induzida age de modo a produzir um fluxo de oposição é chamada de lei de Lenz.

Portanto, de acordo com o exposto a cima, se uma espira com terminais conectados for submetida a um campo magnético variável no tempo, será detectada a existência de uma corrente elétrica. Comportamento análogo acontece com uma superfície condutora.

Em 1855, Jean B. L. Foucault, físico e astrônomo francês, observou que a força necessária para a rotação de um disco de cobre aumenta quando este gira entre os polos de um ímã, demonstrando a partir dessa experiência a conversão do trabalho mecânico em calor. Este experimento é considerado o primeiro a descrever o efeito de dissipação de energia causado por correntes induzidas, conhecidas por “correntes de Foucault”.

As correntes induzidas no disco percorrem caminhos a fim de manter oposição à variação do campo magnético, no entanto as mesmas não apresentam um “caminho” bem definido, tendendo a fluir em torno de círculos curtos nas imediações do campo magnético, o que torna imprevisível o efeito de dispersão do campo magnético no entreferro.

O estudo realizado por Foucault sobre as correntes induzidas possibilitaram o surgimento de diversos aparelhos dentre eles o freio eletromagnético que é de importância a este trabalho, mas apesar de Foucault comentar o efeito de frenagem que ocorria no disco submetido a um campo magnético, foi apenas em 1906 que Reinhold Rudenberg realizou os primeiros estudos sobre aplicações das correntes induzidas em freios. [7]

Após R. Rudenberg surgiram diversas propostas de outros estudiosos, no entanto nenhuma dessas desenvolveu um modelo matemático geral para frenagem por correntes induzidas capaz de contemplar materiais distintos ou descrever a operação em todas as faixas de velocidade e conjugados das máquinas elétricas, no entanto a falta de uma

solução analítica capaz de modelar completamente o comportamento das não linearidades magnéticas não inviabiliza a utilização de freios eletromagnéticos, visto que podem ser utilizadas as equações básicas do eletromagnetismo. [7]

Diante do exposto, o freio eletromagnético também conhecido como freio de Foucault pode ser controlado de forma a produzir uma força contrária à rotação do motor, simulando assim uma carga mecânica acoplada ao mesmo. Este controle pode ser realizado através da tensão fornecida às bobinas responsáveis pela criação do campo magnético e consequentes correntes induzidas no disco. Para tanto é de fundamental importância o conhecimento e consequente modelagem do comportamento do conjugado e velocidade das diferentes cargas mecânicas.

III. CARGAS MECÂNICAS

As características das cargas mecânicas variam de acordo com a natureza das mesmas, obedecendo a equação (2), cujos parâmetros são obtidos por meio de ensaios práticos [8]:

$$M_r = M_{r0} + (M_{rn} - M_{r0}) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^x \quad (2)$$

Onde:

- M_r - Conjugado resistente na velocidade ω .
- M_{r0} - Conjugado resistente inicial.
- M_{rn} - Conjugado resistente na velocidade ω_n .
- ω - Velocidade do acionamento [rd/s]
- x - Coeficiente que caracteriza o tipo de carga.

Na sequência são apresentadas as características das principais cargas mecânicas encontradas em ambientes industriais.

A. Cargas de conjugado resistente constante ($x=0$)

Este tipo de carga apresenta um conjugado constante para qualquer valor de velocidade de acionamento, por exemplo, transportadores, compressores de pistão, portões eletrônicos, etc.

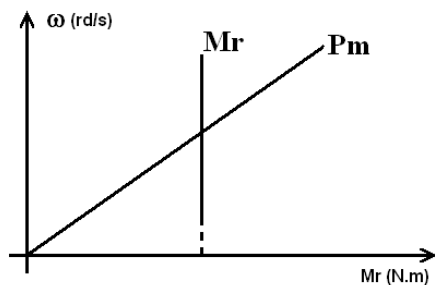


Fig. 4. Carga constante.

Onde:

- P_m - Potência Mecânica [W].
- M_r - Conjugado resistente na velocidade ω [N.m].
- ω - Velocidade do acionamento [rd/s]

B. Cargas de conjugado resistente proporcional à velocidade ($x=1$)

São cargas cujo conjugado varia linearmente em função da velocidade. Por exemplo: geradores de excitação independente, atrito viscoso, misturadores de líquidos, etc.

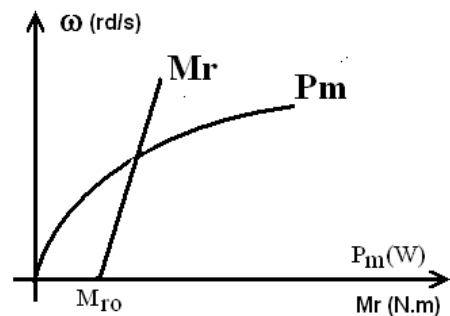


Fig. 5. Carga linear.

Onde:

- P_m - Potência Mecânica [W].
- M_r - Conjugado resistente na velocidade ω [N.m].
- M_{r0} - Conjugado resistente inicial.
- ω - Velocidade do acionamento [rd/s]

C. Cargas de conjugado resistente proporcional o quadrado da velocidade ($x=2$)

São cargas cujo conjugado varia quadraticamente em função da velocidade. Por exemplo: ventiladores, bombas centrífugas, hélice de navios, e outras.

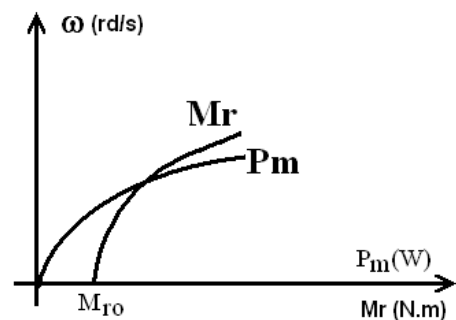


Fig. 6. Carga Parabólica.

Onde:

- P_m - Potência Mecânica [W].
- M_{r0} - Conjugado resistente inicial.
- M_r - Conjugado resistente na velocidade ω [N.m].
- ω - Velocidade do acionamento [rd/s]

D. Cargas de conjugado resistente proporcional ao inverso da velocidade ($x=-1$)

São cargas cujo conjugado varia hiperbolicamente em função da velocidade, por exemplo: fresadoras, máquina ferramentas de corte, rolos laminadores de indústria siderúrgicas, etc. É interessante ressaltar que para este tipo de carga não existe definição exata do conjugado para pequenas velocidades.

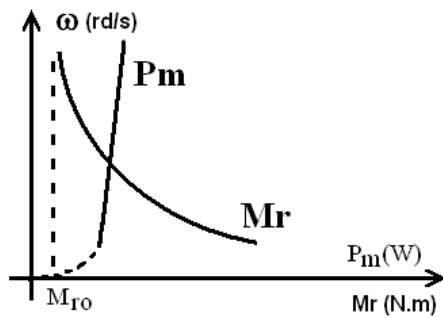


Fig. 7. Carga Hiperbólica.

Onde:

- P_m - Potência Mecânica [W].
- M_{r0} - Conjugado resistente inicial.
- M_r - Conjugado resistente na velocidade ω [N.m].
- ω - Velocidade do acionamento [rd/s]

IV. ESTRUTURA LABORATORIAL

O Laboratório de Eficiência Energética (LEFE) da Universidade Federal de Uberlândia conta com quatro bancadas tipicamente industriais, sendo que o freio eletromagnético utilizado no projeto se encontra na estação de trabalho da bomba centrífuga, mostrada na Figura 8. [9]



Fig. 8. Bancada do sistema de bombeamento.

A estação de trabalho do sistema de bombeamento possui dois motores de indução trifásicos de 1,5 cv, 220/380V e com sensor de temperatura por fase, sendo um de alto rendimento (AR) e linha padrão (LP), representados na Figura 9, os quais podem ser acionados através de um sistema supervisor de três formas: partida direta, *soft starter*, inversor de frequência.



Fig. 9. Motores de indução trifásicos (Linha Padrão e Alto Rendimento).

A bancada bomba centrífuga possui um freio eletromagnético, um painel de controle composto por chave geral, botão de emergência, multimetro digital de grandezas elétricas, contadores, disjuntores, resistores do tipo shunt, fusíveis, três dispositivos de partida (contator para partida direta, *soft starter*, inversor de frequência) e um controlador lógico programável (CLP).

O freio eletromagnético por corrente de Foucault é composto por um braço oscilante, no qual se tem duas bobinas e um disco de alumínio, além de sensores de torque e velocidade que permitem realizar o controle e análise do processo, tal como mostrado na Figura 3.

V. O PROJETO

A proposta deste projeto é a de utilizar um freio eletromagnético para promover a simulação das diversas cargas mecânicas existentes de forma automatizada por meio de um sistema supervisor, no qual o usuário selecionará o tipo de carga que deseja simular (constante, linear, parabólica ou hiperbólica) e inserirá valores para o conjugado resistente inicial e para o conjugado resistente máximo desejado. A fim de evitar possíveis danos ao sistema físico por sobrecarga, devido à inserção de valores de conjugado incompatíveis com a capacidade dos motores utilizados, o sistema será planejado para atuar apenas sobre uma determinada faixa de valores adequados ao sistema, informando aos usuários caso os valores inseridos se encontrarem fora da faixa permitida.

Abaixo seguem representadas a interface do sistema supervisor, Figura 9, e a tela de comando, Figura 10, que foram adaptadas para as simulações das cargas pelo freio eletromagnético.

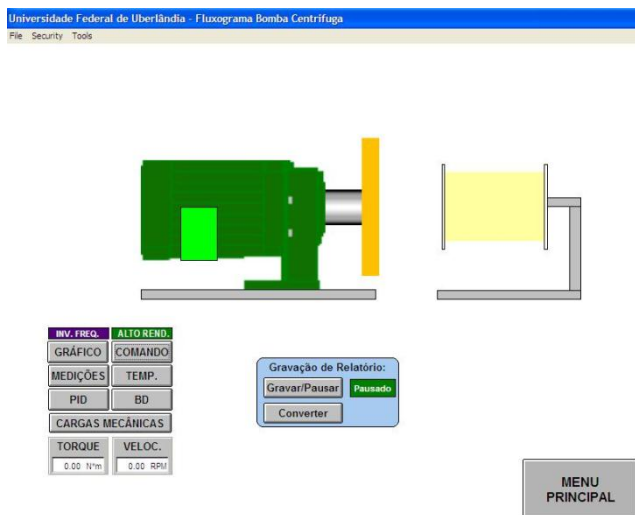


Fig. 10. Apresentação do freio eletromagnético na tela do supervisor.

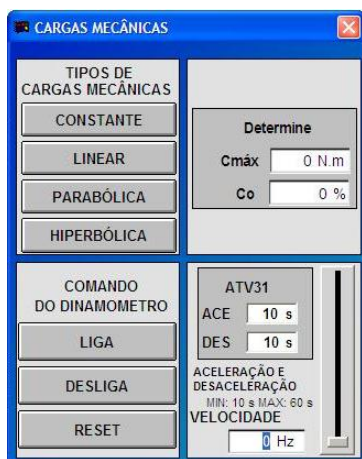


Fig. 11. Tela de comando.

A partir dos valores inseridos pelo usuário no supervisor o programa, com base na equação (2) que descreve a característica mecânica das cargas, irá determinar qual o conjugado o freio eletromagnético deve assumir para simular o tipo de carga desejado quando submetido a uma velocidade de rotação qualquer imposta através do inversor de frequência.

Uma vez de posse do valor de conjugado resistente que deverá ser desenvolvido pelo freio eletromagnético, o CLP enviará um sinal proporcional de 4 a 20 mA, que deverá ser convertido em uma tensão de 0 a 10V, responsável por controlar um relé de estado sólido linear promovendo deste modo, o controle da quantidade de energia aplicada sobre as bobinas, gerando assim, o conjugado resistente característico de determinada carga mecânica.

Na Figura 12, segue a representação, de forma resumida, do processo como um todo.

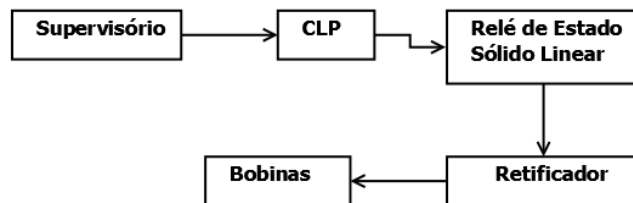


Fig. 12. Diagrama de representação do sistema.

VI. CONCLUSÕES

Em tempos em que as condições ambientais e climáticas são motivo de preocupação mundial, se faz necessário o desenvolvimento de sistemas mais eficientes que sejam capazes de manter as condições de conforto, segurança e produtividade dos usuários. Sendo assim, a promoção de estudos dos motores de indução trifásicos operando nas suas reais condições de operação se faz extremamente interessante, visto que os mesmos ainda são os maiores consumidores de energia elétrica no meio industrial.

Neste contexto, apesar do projeto ainda se encontrar em andamento, a utilização de dispositivos de frenagem eletronicamente controlado se mostra uma excelente opção para simulação dos diversos tipos de cargas mecânicas em laboratório, visto que se trata de uma estrutura única que requer um menor espaço físico para instalação, é mais econômica e não apresenta desgastes mecânicos na produção do conjugado.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Eficiência Energética (LEFE) da Universidade Federal de Uberlândia e à ELETROBRÁS que disponibilizaram toda a infraestrutura necessária para a realização dos procedimentos e desenvolvimento do projeto em questão. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelas bolsas de incentivo a iniciação científica. A todos os professores da Universidade Federal de Uberlândia que contribuíram, direta ou indiretamente, para o desenvolvimento desse projeto.

REFERÊNCIAS

- [1] Kitta, E; Lins V. Revelando a energia. 1.ed. Rio de Janeiro: Fundação Roberto Marinho, 2012. 49p. v.2.
- [2] Companhia Paulista de Força e Luz. História da Energia Elétrica. Disponível em: <http://www.cpf.com.br/UsoConsciente/HistoacuteriadaEnergiaEleacutetrica/tabid/1093/language/pt-BR/Default.aspx>
- [3] Cento Brasileiro de Informação de Eficiência Energética. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br>. Acesso em 29 de maio de 2013.
- [4] Ministério de Minas e Energia. Balanço Energético Nacional 2012: Ano Base 2011. <https://ben.epe.gov.br/>. Acesso em 07 de Junho de 2013.

- [5] Ministério de Minas e Energia. Balanço de Energia Útil 2005: Ano Base 2004. <http://www.mme.gov.br/mme>. Acesso em 07 de Junho de 2013.
- [6] Silva, V. P. Análise comparativa do desempenho do motor de indução trifásico de alto rendimento e linha padrão em condições de alimentação ideal e não ideal. 2012. 199f. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. 2012.
- [7] Pereira, A. H. Freio eletromagnético para ensaio de motores elétricos de indução. 2006. 121f. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Ceará, 2006.
- [8] BIM, EDSON – Maquinas Elétricas e Acionamento 2ed., Campus, Elsevier, Rio de Janeiro 2012.
- [9] Guimarães, R. Comportamento elétrico mecânico e hidráulico de um sistema de bombeamento sob o enfoque da eficiência energética. 2008. 172f. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. 2008.