

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PLÍNIO CARLOS BAÚ FILHO

PROJETO DE DIPLOMAÇÃO

FRENAGEM REGENERATIVA

Porto Alegre

2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

FRENAGEM REGENERATIVA
UM ESTUDO APLICADO A ELEVADORES

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para Graduação em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro

Porto Alegre
2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PLÍNIO CARLOS BAÚ FILHO

FRENAGEM REGENERATIVA
UM ESTUDO APLICADO A ELEVADORES

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da Disciplina de “Projeto de Diplomação”, do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, UFRGS

Doutor pela UFRGS – Porto Alegre, Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luiz Tiaraju dos Reis Loureiro, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Eng. Leoci Rudi Galle, ThyssenKrupp Elevadores S.A.

Mestre pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Luís Alberto Pereira, UFRGS

Doutor pela Universitat Kaiserslautern – Kaiserslautern, Alemanha

Porto Alegre, Dezembro de 2011.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, e as minhas irmãs pelo bom exemplo e apoio em todos os momentos. E em especial para o meu avô Eng. Luiz Kostelnaki.

AGRADECIMENTOS

Aos pais pelo bom exemplo, pelo suporte emocional e financeiro.

Aos colegas pelo auxílio nas tarefas desenvolvidas durante o curso.

Ao meu orientador pela paciência e orientações.

Ao meu conselheiro e grande amigo Geraldo Weinmann.

Ao departamento de pesquisa e desenvolvimento da fábrica ThyssenKrupp Elevadores S.A. em especial aos engenheiros Leoci Galle, Paulo Papke, Paulo Postal, e ao gerente de produção Tiaraju Loss.

Ao time de otimização de processo produtivo (OPP) da Andritz Ltda. pela valiosa oportunidade de trabalho e aprendizado em outra grande empresa, em especial ao gerente global Daniel Schuck, ao Gustavo Michel e ao engenheiro Guilherme Costa.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, professores, e funcionários.

À namorada pelo apoio e incentivo.

RESUMO

O aumento da eficiência dos sistemas de acionamentos de máquinas elétricas contribui para uma redução da crescente demanda de energia elétrica, bem como redução de consumo de combustíveis fósseis e impactos ambientais. O Presente trabalho constitui um comparativo entre tecnologias de frenagem regenerativas, o estudo de adequação da tecnologia para elevadores e, ao fim, uma simulação de um retificador regenerativo trifásico.

Palavras-chaves: Frenagem Regenerativa. Retificador Regenerativo. Frenagem de Motores elétricos. Eficiência Energética para Elevadores. Acionamento de máquinas elétricas. Engenharia Elétrica. Eletrônica de Potência. Volante de inércia. Supercapacitores.

ABSTRACT

Increasing the efficiency of electrical machines drives contributes to a reduction of the growing demand for electricity, as well as reduced fossil fuel consumption and environmental impacts. This study represents a comparative regenerative braking technologies, the study of matching the technology to elevators and, finally, a simulation of a three phase rectifier regenerative drive.

Keywords: Regenerative Braking. Regenerative Rectifier. Electric Motor braking. Energy Efficiency for Elevators. Electric Machines Drives. Electrical Engineering. Power Electronics. Flywheel. Supercapacitors

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
1.1	Motivação	13
1.2	Objetivo	13
1.3	Considerações Ambientais	13
1.4	Considerações Históricas	14
1.5	Organização do Trabalho	14
2.	PRINCÍPIO BÁSICO DE FUNCIONAMENTO DE MOTORES	15
2.1	Princípios de Conversão Eletromecânica de Energia	15
2.2	Princípios de Funcionamento de Máquinas Elétricas	17
2.2.1	Máquinas de Corrente Contínua	17
2.2.2	Máquinas de Indução	17
2.2.3	Máquinas Síncronas	19
2.3	Princípios de Controle de Velocidade de Motores	20
3.	FRENAGEM REGENERATIVA	22
3.1	Tipos de Frenagem de um Motor	22
3.2	Tipos de Frenagem Regenerativa	25
3.2.1	Frenagem com Volante de Inércia	25
3.2.2	Frenagem Hidráulica	29
3.2.3	Frenagem com Bateria	30
3.2.4	Frenagem com Supercapacitores	31
3.2.5	Frenagem com Devolução para Rede CA	33
4.	ESTUDO DE UM CASO: ELEVADOR	35
4.1	Dimensionamento da Máquina Elétrica	35
4.2	Cálculo de Energia e Eficiência	36
4.3	Análise gráfica	38
4.4	Comparativo entre Tecnologias	40
5.	RETIFICADOR REGENERATIVO	44
5.1	Retificador Monofásico Não Regenerativo	44
5.2	Retificador Trifásico Regenerativo	45
5.3	Sistema de Controle do Retificador Regenerativo	50
5.4	Simulação Computacional de um Retificador Trifásico Regenerativo	51
6.	CONCLUSÃO	57
	REFERÊNCIAS	58

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 FORMA CONSTRUTIVA DO MOTOR DE INDUÇÃO. VISTA EXPLODIDA E ROTOR EM DETALHE.....	18
FIGURA 2 VISTA EM SESSÃO TRANSVERSAL DE UMA MÁQUINA ELEMENTAR CA.....	19
FIGURA 3 DIAGRAMA DE BLOCOS DE UM INVERSOR. FONTE: DUBEY, 1989.	20
FIGURA 4 PERFIL DE VELOCIDADE, CONJUGADO E POTÊNCIA DE UM DETERMINADO SISTEMA.	22
FIGURA 5 DIAGRAMA BÁSICO DO CIRCUITO PARA APLICAÇÃO DO VOLANTE DE INÉRCIA COMO ARMAZENAMENTO DE ENERGIA. FONTE: SAMINENI, 2003.....	28
FIGURA 6 SISTEMA DE ARMAZENAMENTO PARA FRENAGEM REGENERATIVA COM SUPERCAPACITOR E BATERIAS.	31
FIGURA 7 DIFERENÇA ENTRE UM DIODO E UM IGBT E RETIFICADORES COM SENTIDOS DIFERENTES DE FLUXO DE POTÊNCIA. FONTE: SCHMITZ, 2007..	32
FIGURA 8 ANÁLISE FÍSICA DO SISTEMA, CONSIDERA-SE A CABINE EM VELOCIDADE CONSTANTE	34
FIGURA 9 RENDIMENTOS NA CONVERSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM ENERGIA POTENCIAL.....	36
FIGURA 10 RENDIMENTOS NA CONVERSÃO DA ENERGIA ELÉTRICA PARA A POTENCIAL E NOVAMENTE PARA A ELÉTRICA.	37
FIGURA 11 CURVAS DE VELOCIDADE E POSIÇÃO DO ELEVADOR	38
FIGURA 12 CURVAS DE POTÊNCIA E ENERGIA POTENCIAL GRAVITACIONAL DO ELEVADOR.....	38
FIGURA 13 CURVA DE ENERGIA CONSUMIDA PELO ELEVADOR COM FRENAGEM REGENERATIVA COM DEVOLUÇÃO PARA REDE CA	39
FIGURA 14 RETIFICADOR MONOFÁSICO: A) CIRCUITO B) FORMAS DE ONDA DA TENSÃO DE ENTRADA E DA CORRENTE. FONTE: (RODRÍGUEZ, 2005).	44
FIGURA 15 RETIFICADOR REGENERATIVO TRIFÁSICO.....	45
FIGURA 16 CIRCUITO FORMADO PELA TENSÃO DA REDE, REATOR E TENSÃO DO MODULADOR.....	45
FIGURA 17 DESLOCAMENTO ANGULAR δ ENTRE SENÓIDES DE MESMA AMPLITUDE E FREQUÊNCIA	47
FIGURA 18 ANÁLISE VETORIAL DO CIRCUITO PARA OPERAÇÃO COMO: A) RETIFICADOR, B) INVERSOR.....	47
FIGURA 19 CURVA DE POTÊNCIA POR DESLOCAMENTO ANGULAR (δ).....	48
FIGURA 20 DIAGRAMA DE BLOCOS DO SISTEMA DE CONTROLE. FONTE: POHREN, 2009.48	49
FIGURA 21 CURVA DE CORRENTE DA CARGA CC	51
FIGURA 22 CURVA DA CORRENTE NO CAPACITOR i_{CC}	52
FIGURA 23 CURVA DA TENSÃO NO CAPACITOR v_{CC}	53

FIGURA 24 CURVA DE CORRENTE i_a COM A TENSÃO v_a	53
FIGURA 25 DETALHE DA CURVA DE CORRENTE i_a COM A TENSÃO v_a PRÓXIMO AO INSTANTE $t = 0,2 s.$	54
FIGURA 26 DETALHE DA CURVA DE CORRENTE i_a COM A TENSÃO v_a PRÓXIMO AO INSTANTE $t = 0,7 s.$	54

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 FORÇA ESPECÍFICA DE MATERIAIS PARA O ROTOR. FONTE: INVESTIRE, 2003	26
TABELA 2 RENDIMENTO DE CADA PARTE DO SISTEMA FORMADO POR UM ELEVADOR	35
TABELA 3 COMPARATIVO ENTRE DIVERSAS FONTES DE ENERGIA. FONTE: DIXON, 2010.....	39

LISTA DE ABREVIATURAS

CA: Corrente Alternada

CC: Corrente Contínua

CV: Cavalo Vapor

IGBT: *Insulated Gate Bipolar Transistor*

PFC: *Power Factor Correction*

PLL: *Phase-Locked Loop*

PWM: *Pulse Width Modulation*

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

VSC: *Voltage Source Converter*

1. INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

Uma das motivações deste projeto é estudar um dos principais projetos de engenharia do Departamento de Pesquisa da fábrica de elevadores da ThyssenKrupp.

O aumento da eficiência dos sistemas é uma preocupação cada vez maior, não apenas devido ao aumento do custo da energia mas também por ser uma forma de *marketing*. É uma forma de promover a empresa ou o produto que cause menos impacto ambiental e que opere de maneira mais eficiente.

1.2 OBJETIVO

O objetivo do presente projeto é um estudo básico das principais tecnologias de frenagem regenerativa, a análise de um caso onde essas tecnologias possam ser empregadas, a comparação entre tais tecnologias para escolher a mais adequada e posteriormente o estudo mais detalhado da tecnologia escolhida.

1.3 CONSIDERAÇÕES AMBIENTAIS

Seguir as tendências globais de atenuação de impactos ambientais e aplicar conceitos fundamentais da física no dia a dia de uma empresa para adequar produtos fabricados às novas tecnologias é o que se espera de um profissional de engenharia.

1.4 CONSIDERAÇÕES HISTÓRICAS

O primeiro sistema de frenagem regenerativo foi empregado no ano de 1902 em bondes na cidade de Newcastle na Inglaterra. Pode-se dividir a história da frenagem regenerativa, em bondes, em três fases. A primeira ocorre entre 1902 e 1911. Em 1911 acontece um importante acidente envolvendo um bonde que fica sem freio. A causa seria falta de energia elétrica em seu sistema de alimentação. A segunda fase, na década de 1930, e a terceira após 1970 com o surgimento da eletrônica de potência de estado sólido.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Após a introdução do trabalho, segue-se para o capítulo 2, onde é feita uma revisão nos conceitos de conversão eletromecânica de energia e máquinas para que se inicie na teoria estudada durante o curso de engenharia elétrica.

No capítulo 3 são estudadas as principais tecnologias de frenagem regenerativa que podem ser empregadas para elevadores.

No capítulo 4 tem-se o estudo de um elevador como sendo o de um caso de estudo. Mostra-se os cálculos essenciais para dimensionamento de máquinas do elevador, cálculos de energia e eficiência e a comparação e escolha da tecnologia mais adequada.

No capítulo 5 tem-se um estudo mais detalhado da tecnologia escolhida para o elevador estudado. A análise matemática e a simulação computacional da tecnologia também serão averiguadas.

2. PRINCÍPIO BÁSICO DE FUNCIONAMENTO DE MOTORES

2.1 PRINCÍPIOS DE CONVERSÃO ELETROMECAÂNICA DE ENERGIA

Diversos métodos podem ser utilizados para determinar forças líquidas de interesse em máquinas elétricas nos processos de conversão eletromecânica de energia. A técnica estudada para o propósito desse trabalho será o método da energia que baseia-se no princípio da conversão da energia.

A conversão eletromecânica de energia ocorre através do meio que é a energia magnética armazenada. Como o sistema de armazenamento de energia, que é o campo magnético não apresenta perdas, a taxa de variação da energia armazenada no campo magnético em relação ao tempo, é igual à potência elétrica da entrada menos a potência mecânica da saída do sistema de armazenamento de energia e pode ser visto na equação (1).

$$\frac{dW_{campo}}{dt} = ei - f_{campo} \frac{dx}{dt} \quad (1)$$

Onde:

W_{campo} é a energia armazenada no campo magnético [J];

e é a tensão [V];

i a corrente do terminal [A];

x é a posição do elemento [m];

f_{campo} força mecânica aplicada [N].

A força eletromotriz nos terminais do enrolamento sem perdas do modelo de armazenamento de energia magnética é dada pela derivada no tempo do fluxo concatenado do enrolamento. A expressão pode ser vista na equação (2).

$$e = \frac{d\lambda}{dt} \quad (2)$$

E multiplicando a equação (1) por dt, obtém-se a equação (3).

$$dW_{campo} = id\lambda - f_{campo}dx \quad (3)$$

As equações (1) e (3) formam a base do método da energia. O princípio de conservação de energia afirma que a energia não é criada nem destruída, a energia simplesmente muda de forma. Para melhor estudar um sistema, isola-se o sistema e identifica-se claramente seus limites. O fluxo líquido de energia que entra no sistema através de seus limites é igual à soma das taxas de variação, no tempo, da energia armazenada no sistema. Aplicando esse princípio a sistemas eletromecânicos cujo mecanismo predominante de armazenamento de energia é o campo magnético, pode-se equacionar a transferência de energia como a equação (4).

$$\left(\begin{array}{c} \text{entrada de} \\ \text{energia a partir} \\ \text{de fontes elétricas} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{saída de} \\ \text{energia} \\ \text{mecânica} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Aumento da energia} \\ \text{armazenada no campo} \\ \text{magnético} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Energia} \\ \text{convertida} \\ \text{em calor} \end{array} \right) \quad (4)$$

(FITZGERALD, 2006)

A energia convertida em calor, o último termo da equação (4) que pode ser denotado por E_{CC} , pode ser relacionada com as perdas totais pela equação (5). Pode-se equacionar a potência convertida em calor da equação (5) como perdas totais da equação (6).

$$\frac{dE_{CC}}{dt} = P_T \quad (5)$$

$$P_T = P_{elétrica} + P_{mecânica} + P_{magnética} \quad (6)$$

Conforme a equação (6), as perdas podem ser de origem magnética, elétrica ou mecânica. As perdas de origem elétrica são as perdas ôhmicas, originadas das resistências dos enrolamentos das máquinas elétricas. As perdas de origem mecânica são constituídas por atrito e perdas causadas pelo atrito do ar com as partes móveis das máquinas. As perdas de origem magnéticas são compostas por perdas por histerese, parasitas e anômalas. Ver a equação (7).

$$P_{magnética} = P_H + P_P + P_A \quad (7)$$

Onde:

P_H são as perda por histerese [W];

P_p são as perdas por correntes parasitas. [W];

P_A são as perdas anômalas [W].

2.2 PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DE MÁQUINAS ELÉTRICAS

Dos diversos tipos de máquinas elétricas existentes, algumas delas são mais utilizadas em aplicações que requerem maior potência na instalação. Tais aplicações são o escopo desse trabalho uma vez que para instalações de mais baixas potências não é vantajoso o uso de frenagem regenerativa.

Dos principais tipos de máquinas elétricas podemos citar máquinas de corrente contínua, e de corrente alternada. Os principais tipos de máquinas de corrente alternada são máquinas de indução e máquinas síncronas.

2.2.1 Máquinas de Corrente Contínua

Máquina de corrente contínua, é uma máquina que possui uma comutação interna projetada para operar a partir de de uma fonte de corrente contínua.

Antes do grande aumento de produção de inversores, (nos dias atuais é quase considerado uma “*commodity*”) as máquinas de corrente contínua eram preferidas em aplicações que requeriam bom controle de velocidade e frequentes partidas, frenagem e reversão.

2.2.2 Máquinas de Indução

Máquinas de indução, especificamente as do tipo gaiola de esquilo, apresentam diversas vantagens sobre outros tipos de máquinas elétricas. Apresentam manutenção reduzida, melhor confiabilidade, menor custo, peso, volume e inércia rotacional, maior

eficiência e capacidade de trabalhar em ambientes hostis. A maior vantagem é o fato de não possuir comutações físicas e escovas. Por causa das vantagens, motores de indução são mais amplamente utilizados que todos outros tipos de motores juntos. Entretanto até recentemente eles eram mais utilizados em aplicações que requeriam velocidade constante (DUBEY, 1989).

Com a melhoria na tecnologia dos semicondutores e redução de custo, ficou mais fácil de utilizar máquinas de indução em aplicações cujo controle de velocidade seja por frequência. Antes, aplicações com controle de velocidade variável como elevadores, eram mais comumente feitos por motores CC. Recentemente é mais utilizado motores de indução (DUBEY, 1989).

A forma construtiva pode ser visto na figura 1.

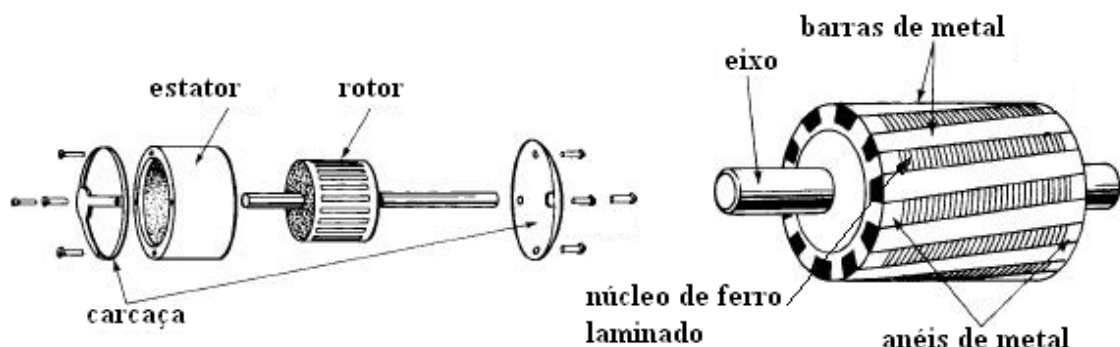


Figura 1 Forma construtiva do Motor de Indução. Vista explodida e rotor em detalhe.

Para análise de funcionamento pode-se considerar o motor de indução como um transformador, onde o enrolamento primário deste é formado pelo estator e o enrolamento secundário pelo rotor. O próprio nome “motor de indução” se deve ao fato de que toda a energia requerida pelo rotor para a geração de conjugado é “induzida” pelo primário do transformador (estator) no secundário (rotor).

Como existem dois campos magnéticos, um no estator e outro no rotor, aparecerá uma força entre o rotor e o estator que fará com que o rotor gire, já que é o único que pode se

movimentar, pois está montado sobre rolamentos, disponibilizando assim energia mecânica (conjugado) no seu eixo.

2.2.3 Máquinas Síncronas

Para análise de funcionamento, podemos considerar que a máquina síncrona trifásica é formada por quatro enrolamentos, um em cada fase e outro enrolamento de campo no rotor. A interação entre os campos magnéticos dos enrolamentos de rotor e estator faz com que eles tendem a se alinharem. Essa interação provoca um conjugado na máquina. Na figura 2 tem-se uma vista em sessão transversal de uma máquina elementar síncrona.

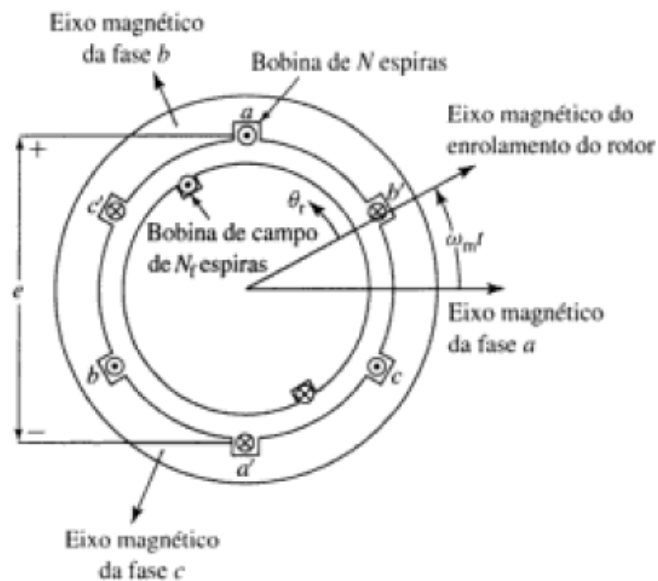


Figura 2 Vista em sessão transversal de uma máquina elementar CA.

Fonte: FITZGERALD, 2006.

2.3 PRINCÍPIOS DE CONTROLE DE VELOCIDADE DE MOTORES

O controle de velocidade das máquinas de indução pode ser realizado pela variação da tensão dos terminais, pela variação da resistência do rotor, pela injeção de tensão no rotor ou pela variação de frequência. No caso da máquina síncrona o controle de velocidade é realizado pela variação da frequência. Neste trabalho será analisado um método de controle de velocidade pela variação de frequência e de tensão através de um inversor.

Apesar da grande variedade de maneiras de controlar a velocidade de um motor, o método que vem sendo cada vez mais utilizado é o do uso de inversores.

O diagrama de blocos de um conversor de frequência, também chamado de inversor é mostrado na figura 3.

Inversor é um circuito elétrico que controla o fluxo de potência de uma fonte para o motor de maneira que as características de velocidade por conjugado e velocidade por corrente fiquem compatíveis com as demandas da carga (DUBEY, 1989).

A unidade de controle consiste em um circuito contendo lógica digital podendo conter um microprocessador. O sinal de comando é o dado de entrada do sistema, muitas vezes chamado *set point*. A unidade de controle é isolada do circuito de potência para segurança do operador e para evitar que correntes harmônicas geradas na parte de potência causem interferência com o sinal de controle.

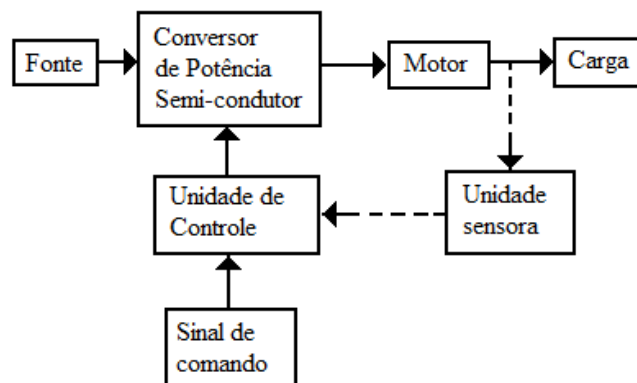


Figura 3 Diagrama de blocos de um inversor. Fonte: DUBEY, 1989.

A tensão induzida no estator é proporcional ao produto da frequência de alimentação e do fluxo no entreferro. Se a queda de força magnetomotriz no estator é desprezada frente à queda no entreferro, a tensão terminal do motor é considerada proporcional ao produto da frequência e do fluxo. Uma redução na frequência da fonte, sem uma mudança na tensão terminal causa um aumento no fluxo do entreferro. Motores de indução são projetados para operar no joelho da curva de magnetização para usar melhor as características magnéticas do material. Portanto, um aumento no fluxo irá saturar o motor. Isso irá aumentar a corrente de magnetização, distorcer a corrente e tensão de linha, aumentar as perdas no núcleo e no estator e produzir um ruído acústico de alta frequência. Enquanto um aumento no fluxo acima do valor de saturação é indesejado, um valor abaixo irá diminuir a capacidade de conjugado do motor. Portanto, o controle de frequência variável abaixo da frequência estudada é reduzido à tensão de fase da máquina juntamente com a frequência de modo que o fluxo é mantido constante. Acima da frequência estudada, o motor é operado com tensão constante por causa das limitações impostas pelo isolamento do estator ou pela limitação de tensão da fonte (DUBEY, 1989).

Portanto, o tipo de inversor mais atual, que está sendo mais empregado nos elevadores mais modernos utiliza um método de aumentar a frequência quando a velocidade da máquina está aumentando e diminuir a tensão juntamente com a frequência quando a velocidade da máquina está diminuindo.

3. FRENAGEM REGENERATIVA

3.1 TIPOS DE FRENAGEM DE UM MOTOR

Em diversas aplicações para motores elétricos é necessário frear o motor. Algumas vezes é necessário parar o motor dentro de um intervalo de tempo. Outras vezes é necessário apenas desacelerar o mesmo. Pode ser necessário mudar o sentido de rotação do motor ou mantê-lo em uma posição fixa. Na figura 4 é demonstrado um perfil de velocidade, conjugado e potência de um determinado sistema composto por motor, controle, acionamento e carga.

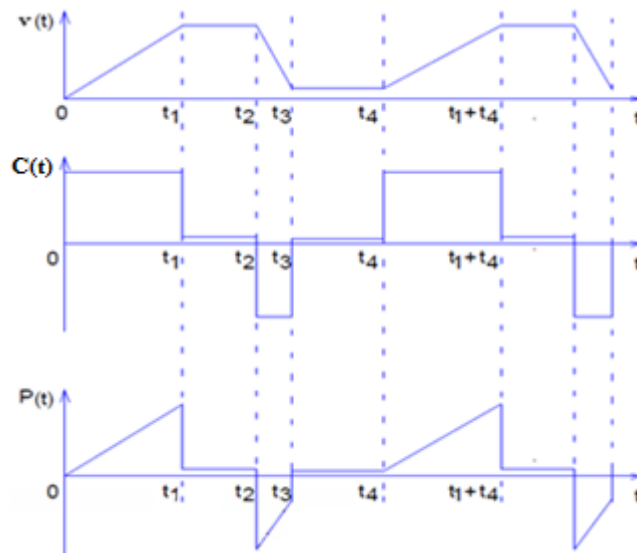


Figura 4 Perfil de velocidade, conjugado e potência de um determinado sistema.

Do ponto de vista físico, pode-se dizer que a frenagem é a transformação de energia cinética de um sistema em outra forma de energia. Um projetista de um sistema com frenagem regenerativa precisa refletir como transformar essa energia.

Entre as opções, um projetista pode especificar a dissipação de energia na forma de calor em um dispositivo mecânico como um freio. Outra opção é aplicar um conjugado no motor que está no sistema para atuar de maneira contrária ao movimento. Para aplicar esse

conjugado, há diversas maneiras. Pode-se simplesmente fazer o motor atuar como gerador e conectar um resistor em seus terminais, dessa maneira a energia cinética é convertida em energia elétrica que, por sua vez, é convertida em calor no resistor. Controlando a quantidade de corrente que flui para o resistor pode-se controlar o conjugado de frenagem da máquina. A técnica de dissipar a energia em um resistor chama-se frenagem dinâmica.

Outras opções de frenagem elétrica são a frenagem por fluxo e por injeção de corrente contínua.

Na frenagem por fluxo maximizam-se as perdas no motor, aumentando-se a corrente de magnetização.

Na frenagem por corrente contínua, aplica-se uma corrente contínua nos enrolamentos do estator criando-se um campo magnético estacionário que induz um conjugado igualmente estacionário no rotor. Enquanto a corrente estiver sendo aplicada, o motor tende a parar e permanecer na mesma posição, oferecendo resistência a um conjugado em qualquer sentido. Essa força resistente ao movimento é proporcional a corrente sendo aplicada no enrolamento do estator.

Porém ambos métodos tendem a desperdiçar energia se comparados a frenagem regenerativa.

Todo processo de conversão eletromecânica de energia apresenta perdas, como pode ser visto na equação (4). Para evitar essas perdas, diminui-se o número de conversões da energia em um sistema. Portanto um projetista de um sistema de frenagem pode optar por converter a energia cinética do sistema em elétrica e aproveitá-la mais diretamente armazenando a mesma em baterias ou bancos de capacitores ou devolvendo a rede CA que alimenta o motor elétrico.

Um projetista deve ter em mente todos os fatores que afetam a escolha de um método de frenagem. Parte-se da quantidade e da qualidade de frenagem necessária, do tipo de

operação, contínua ou intermitente, bem como os custos e prazos, tanto da compra de um sistema quanto na implementação e manutenção. Devem-se observar normas de paradas de emergências e operações em situações de emergência como falta de energia elétrica, incêndio, terremoto.

No caso de máquinas CA, onde se tem inversor e *link* CC, pode-se definir a frenagem regenerativa com a citação a seguir: “Frenagem Regenerativa é obtida quando o fluxo de potência do inversor para o *link* CC é empregado de maneira útil, tanto absorvendo no próprio *link* CC ou transferindo a energia para a rede CA” (DUBEY, 1989, p. 309).

Para o caso de máquinas de corrente contínua, pode-se utilizar a mesma citação apenas modificando a palavra inversor para máquina uma vez que não se utiliza um inversor para acionar, apenas um retificador que pode ser controlado ou não.

Os sistemas a seguir elencados, são sistemas em que se obtêm ganhos consideráveis com a frenagem regenerativa:

- **Sistemas de transporte.** Automóveis, motocicletas, caminhões, ônibus, trem.
- **Aplicações industriais.** Exemplo: centrífugas, laminadores de aço, correias transportadoras para baixo.
- **Elevadores e guindastes.**

Das vantagens da utilização de frenagem regenerativa nos sistemas de transporte pode-se citar o aumento de autonomia dos veículos, a redução do custo do combustível por km rodado, menor dissipação de calor e desgaste no sistema de freio e redução de impactos ambientais.

Das vantagens nas aplicações industriais e em elevadores podemos citar ganhos financeiros devido a redução do consumo de energia elétrica e de sistemas de refrigeração e redução de impactos ambientais.

3.2 TIPOS DE FRENAGEM REGENERATIVA

2.2.3 Frenagem com volante de inércia

Um sistema de armazenamento de energia com volante de inércia funciona quando se acelera um disco a uma velocidade muito alta e se mantém a energia nesse sistema de energia rotacional. Quando a energia é extraída desse sistema, a velocidade angular do volante é reduzida em consequência do princípio de conservação de energia; adicionando energia ao sistema corresponde a um aumento na velocidade do volante (INVESTIRE, 2003).

Sistemas avançados de volante de inércia têm um volante feito de filamentos de carbono de alta resistência, suspensos por um rolamento magnético e giram a velocidade de até 60 000 rpm em um encapsulamento com vácuo no interior. Os volantes podem atingir tais velocidades em questão de minutos, de modo a operar muito mais rápido que outras formas de armazenamento de energia (INVESTIRE, 2003).

Os volantes de inércia podem ser acionados por eletricidade, através de uma máquina elétrica que atua como motor e gerador, dependendo do sentido do fluxo de potência para o sistema. A máquina atua como motor elétrico quando aumenta a energia armazenada no volante. A máquina atua como gerador quando alimenta a carga com a energia do volante. Os volantes também podem ser acionados diretamente por uma engrenagem mecânica utilizando um sistema de transmissão infinitamente variável contendo engrenagens cônicas.

A energia cinética contida em um volante é expressa pelas equações (8) e (9):

$$E = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (8)$$

$$I = M r^2 \quad (9)$$

Sendo:

E é a energia cinética armazenada no volante [J];

I é o momento de inércia [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$];

ω é a velocidade angular do volante [rad/s];

r é o raio do rotor [m];

M é a massa do rotor. [kg].

A energia pode ser aumentada tanto aumentando o momento de inércia como aumentando a velocidade angular do volante, conforme se verifica pela equação (8). Velocidades angulares mais altas são mais atrativas para aplicações automotivas devido ao menor tamanho do volante e pelo fato de a energia armazenada variar com o quadrado da velocidade angular (LUKIC, 2008).

Observar que a equação (9) é aplicada para o caso de massa pontual em movimento angular. Para o caso de uma análise mais detalhada, emprega-se a equação (10):

$$I = \int r^2 dm_x \quad (10)$$

Onde:

r é a distância da massa diferencial ao eixo de rotação [m];

dm_x massa diferencial [kg].

Substituindo a equação (9) na (8) obtém-se:

$$E = \frac{1}{2} M r^2 \omega^2 \quad (11)$$

A resistência a tração a uma dada velocidade angular é expressa por:

$$\sigma = \rho r^2 \omega^2 \quad (12)$$

Sendo:

ρ é a densidade do material [kg/m^3].

Portanto a energia máxima armazenada é expressa:

$$E_{MAX} = \frac{1}{2} m \frac{\sigma_{MAX}}{\rho} \quad (13)$$

Onde:

m representa toda massa concentrada no centro de massa de um volante hipotético [kg].

A expressão (11) mostra que a máxima energia armazenada para uma dada massa é atingida por um volante feito de um material que combine alta resistência a tração com baixa densidade.

Tabela 1 Força Específica de materiais para o rotor. Fonte: INVESTIRE, 2003

	Densidade [kg.m ⁻³]	Força [MN.m ⁻²]	Máxima Energia Específica Teórica [Wh.kg ⁻¹]
Aço (AISI 4340)	7800	1800	32
Liga (AlMnMg)	2700	600	31
Titanio (TiAl6Zr5)	4500	1200	37
GFRP Polímero de fibra de vidro reforçado	2000	1600	111
CFRP Polímero de fibra de vidro de carbono	1500	2400	222

A energia específica por unidade de massa é:

$$E_m = \frac{1}{2} r^2 \omega^2 \quad (14)$$

Do ponto de vista das questões ambientais, de acordo com INVESTIRE (2003), não há materiais perigosos para o meio ambiente e os materiais usados para produzir o volante de inércia são basicamente, aço, alumínio, cobre, vidro e fibra de vidros, resinas *epoxy*, silício nos circuitos de eletrônica de potência e ímãs de terras raras.

O circuito de eletrônica de potência inclui semicondutores de silício e dissipadores que podem conter óxido de berílio, no qual é perigoso apenas se pó é liberado a partir de depósitos de usinagem (INVESTIRE, 2003).

O sistema possui uma eficiência de rede (carga e descarga) de 93,7%. As perdas no ciclo de carga e descarga são principalmente devido a correntes de Foucault e perdas histerese no rolamento magnético e na máquina elétrica. As perdas incluem a operação no modo motor, no modo gerador, e no volante mas excluem as perdas no circuito de potência. Para comparação, as baterias químicas usadas atualmente possuem eficiência de menos de 80%. Uma vez que as baterias e os volantes de inércia possuem o circuito de potência similar, o volante de inércia é mais eficiente (HEBNER, 2002).

Sobre as perdas mecânicas do volante de inércia, de acordo com o fabricante (FLYBRID, 2011), são de 2% da energia total acumulada por minuto, porém estima-se que 95% das vezes há uma frenagem para veículos em circuitos urbanos em menos de 55 segundos.

A tecnologia começou a ser utilizada na Formula 1 no ano de 2009, para seguir as tendências globais de atenuação de impactos ambientais. O atual sistema é capaz de armazenar 400 kJ de energia e possui um pico de potência de 60 kW, o que equivale a 81,6 cv em 6,67 s. O sistema ocupa um volume total de 13 L (ou $0,013 m^3$) e pesa 25 kg.

Uma aplicação que está sendo estudada, em SAMINENI (2003), é o uso do volante de inércia para manter a alimentação continuada em uma carga crítica. Na figura 5 pode-se ver o diagrama básico do circuito.

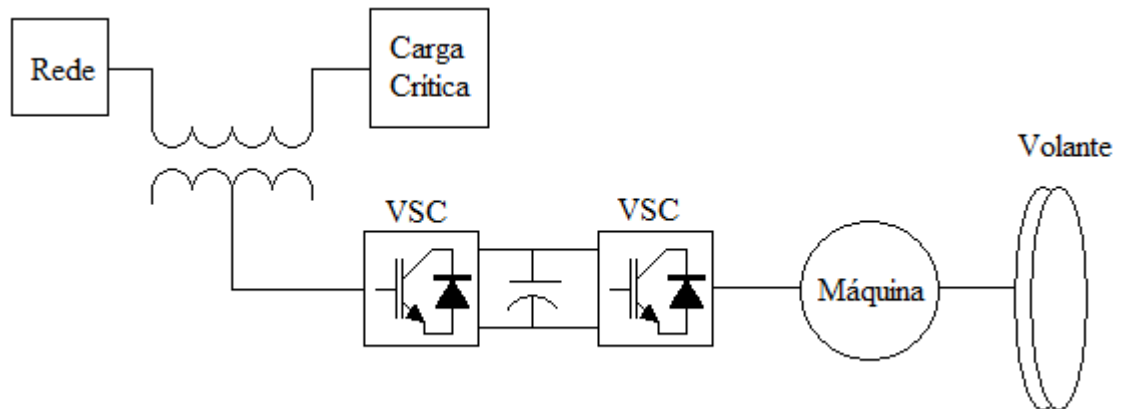


Figura 5 Diagrama básico do circuito para aplicação do volante de inércia como armazenamento de energia. Fonte: SAMINENI, 2003.

3.2.2 Frenagem hidráulica

Em elevadores hidráulicos convencionais, quando a cabine se move para baixo toda energia potencial da mesma é desperdiçada e convertida em calor por estrangulamento do fluido. Por causa disso a energia consumida em um elevador hidráulico é muito maior em comparação com o elevador de tração. Para reduzir o consumo e o requisito de potência da instalação, desenvolve-se mecanismos de frenagem regenerativa nos elevadores hidráulicos desde 1997 (YANG, 2006).

Em elevadores hidráulicos, há três métodos comuns que podem ser usados para recuperar a energia quando a cabine se move para baixo:

- contrapeso no sistema de elevação da cabine
- motor elétrico do compressor como uma turbina com um gerador
- acumulador como um “contra peso hidráulico”

(YANG, 2006).

Em seu artigo, YANG (2006) introduz um método de frenagem regenerativa utilizando os três métodos mencionados anteriormente. O acumulador consiste de um reservatório de óleo pressurizado. YANG (2006), conclui o artigo afirmando que com o seu método a eficiência é 70,8% maior do que a de um elevador hidráulico sem tal sistema.

3.2.3 Frenagem com bateria

Bateria é um dispositivo que converte energia química em elétrica diretamente. O princípio de operação da bateria baseia-se no movimento de cargas elétricas entre eletrodos positivos e negativos. Entre os eletrodos está localizada uma membrana feita de um material poroso eletricamente isolante. Esses componentes são mergulhados em um fluido eletrolítico. Os íons podem se movimentar pelo fluido eletrolítico e através da membrana isolante que causa uma tendência dos elétrons se moverem mas são forçados a circular pelo exterior da bateria devido a propriedade isolante da membrana.

As características mais importantes de uma bateria para aplicações automotivas são:

- ciclo de vida (numero de cargas e descargas)
- eficiência (relacionada a resistência interna da bateria e correntes de auto descarga)
- energia e Potência específica (estão relacionadas com o desempenho e autonomia do veículo, porque quanto mais energia armazenada, maior a autonomia do veículo com uma mesma carga e quanto maior a potência específica maior a potência e aceleração do veículo)
- segurança (Risco de explosão)

(LUKIC, 2008).

O circuito mais simples para acionar uma máquina com frenagem regenerativa consiste de ligar a bateria entre os terminais da parte CC do inversor. Se corretamente acionados pelo circuito de controle, os IGBT's do inversor podem fazer a transferência da energia da máquina para as baterias.

3.2.4 Frenagem com supercapacitância

Armazenamento com supercapacitores é uma tecnologia recente que é capaz de armazenar quantidades consideradas de energia em capacitores de alta capacitância. Uma vez que não há reação química envolvida, a resistência interna é menor do que das baterias. A velocidade de carga e descarga é maior, conferindo uma maior densidade de potência em comparação com as baterias. Outras vantagens do uso de supercapacitores é o maior tempo de vida útil dos mesmo, que de acordo com KHALIGH (2010), é de aproximadamente três vezes maior em comparação com uma bateria produzida com as tecnologias mais avançadas atualmente para uma mesma aplicação. O mesmo autor também aponta um custo de quatro vezes menor comparando com uma determinada tecnologia de baterias.

Comparativo de densidades de potência e energia de supercapacitores e baterias:

Supercapacitores: densidade de potência: 20 kW/kg. Densidade de energia: 30 Wh/kg

Baterias: densidade de potência: 1 kW/kg. Densidade de energia: 460 Wh/kg

(MAXWELL, 2011)

Observa-se que os supercapacitores possuem uma densidade de potência maior porém uma densidade de energia menor, ou seja, os supercapacitores podem absorver grandes picos de corrente em um sistema com a tensão constante, porém a quantidade total de energia elétrica fica menor do que das baterias. Logo, observa-se que seria interessante utilizar ambos os métodos de armazenamento de energia em uma única tecnologia de frenagem regenerativa.

Uma topologia para usar ambos métodos é mostrado na figura 6, onde um conversor *Buck-Boost* administra o fluxo de potência pelo nível da tensão.

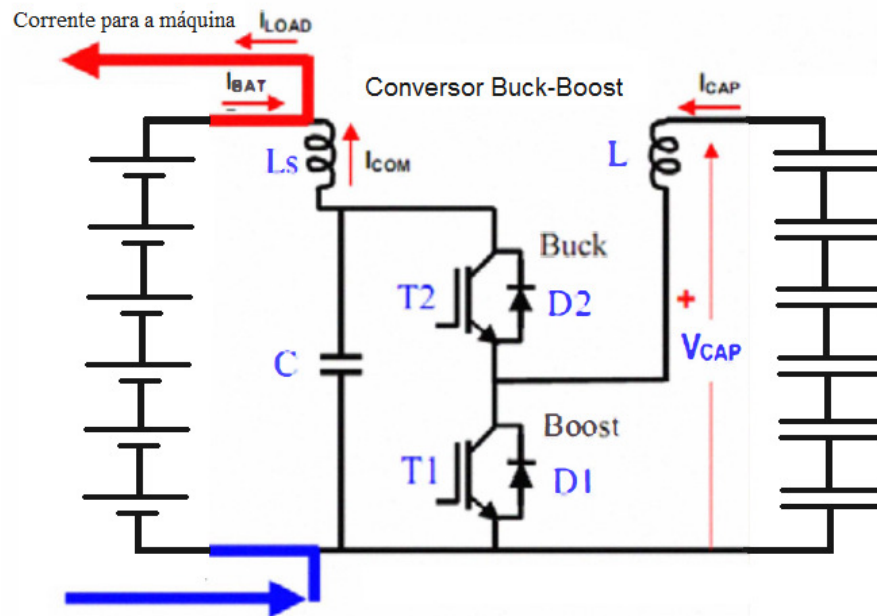


Figura 6 Sistema de armazenamento para frenagem regenerativa com supercapacitor e baterias. Fonte: Do autor, adaptado de YOONG, (2010).

Essa aplicação é estudada em YOONG, (2010) para uso em tecnologia automotiva. Um conversor *Buck* e *Boost* é conectado em paralelo com um banco de baterias e um banco de capacitores para controlar a corrente e com isso a potência que é armazenada em cada um deles. Durante a aceleração do veículo, a tensão do banco de capacitores pode descarregar da tensão máxima até o valor de um terço da tensão máxima. Durante a desaceleração do veículo a energia retorna ao banco de supercapacitores que carrega novamente com a tensão nominal.

Observar que a mesma solução pode ser adaptada para ser empregada no uso de elevadores, utilizando o banco de supercapacitores para absorver o pico de potência instantânea que ocorre na máquina elétrica quando o elevador acelera ou desacelera no início ou fim do movimento. Esse pico de energia pode ser visto na figura 12.

3.2.5 Frenagem com devolução para rede CA

O diodo permite o fluxo de corrente somente em um sentido. A corrente flui sempre que o diodo é polarizado diretamente. O IGBT deixa passar corrente em ambas as direções. Na direção reversa ele atua como um diodo e na direção direta ele pode ser acionado quando aplicada um pulso em seu terminal de *gate*, sua entrada de controle.

Utilizando essas dois componentes em uma ponte trifásica, os circuitos vão ser classificados como unidirecionais e bidirecionais respectivamente quanto ao fluxo de potência. Na Figura 7 é mostrada a topologia dessas pontes retificadoras. A ponte IGBT pode transferir a corrente de volta a linha CA se acionado de maneira inicialmente sincronizado com as frequências senoidais da rede trifásica e posteriormente com uma defasagem angular entre as senóides.

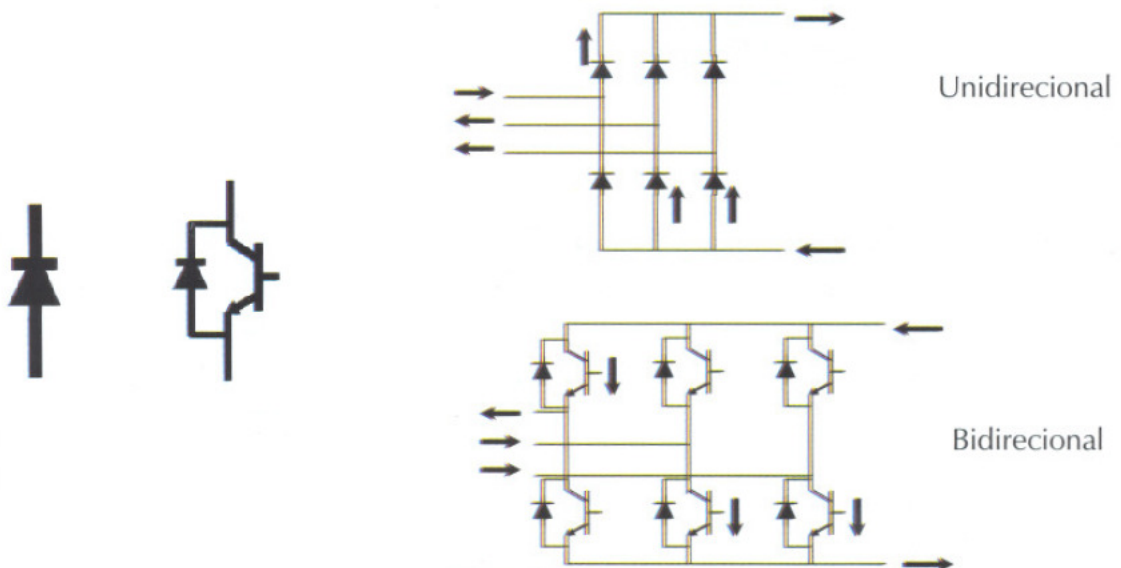


Figura 7 Diferença entre um diodo e um IGBT e retificadores com sentidos diferentes de fluxo de potência. Fonte: SCHMITZ, 2007.

Durante a frenagem regenerativa, o motor esta operando com conjugado na direção oposta a rotação do motor. O inversor CA tende a remover essa energia do sistema mecânico através do motor, que estará operando como gerador. Enquanto o inversor remove energia da carga, ele carrega os capacitores do barramento CC do inversor. Sem um método de transformação dessa energia, ou seja sem utilizar uma ponte bidirecional a tensão do barramento CC continuaria a subir até o inversor acusar uma falha de sobre tensão. A regeneração para a rede CA é um método que devolve a energia dos capacitores para a rede CA.

4. ESTUDO DE UM CASO: ELEVADOR

4.1 DIMENSIONAMENTO DA MÁQUINA ELÉTRICA

Será analisado um elevador para 22 passageiros em um percurso de um prédio de 10 andares. A carga útil do elevador será calculada multiplicando o número de passageiros por um peso médio de cada passageiro de 75 kg. Obtém-se o valor de carga útil de 1650 kg. A velocidade será de 6 m/s.

Em um sistema de polias, subtrai-se o valor do contrapeso do elevador para analisar o sistema em movimento retilíneo uniforme, conforme a figura 8. O valor da massa do contrapeso é de aproximadamente a metade do valor da carga útil.

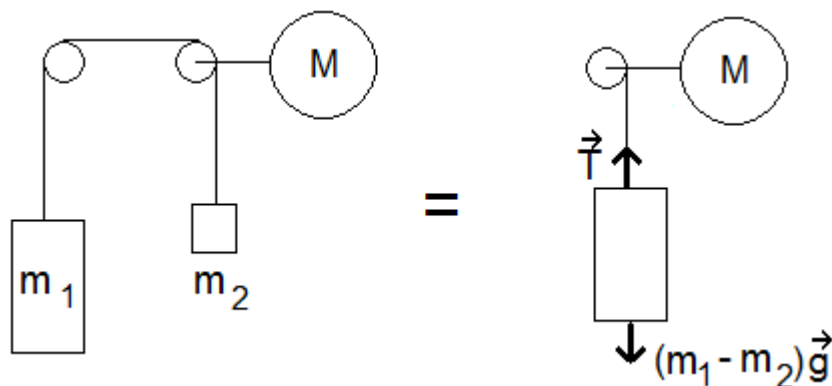


Figura 8 Análise física do sistema, considera-se a cabine em velocidade constante. Fonte: do autor.

Da definição de potência tem-se a equação (15). Partindo da equação (15) e observando a figura 8, é deduzida a equação (16).

$$P_{mec} = \frac{dW}{dt} = \frac{Fdx}{dt} = Fv \quad (15)$$

$$P_{mec} = \frac{m_{eq}gv}{\eta_{mec}} = \frac{1650/2 \times 6 \times 9,81}{0,9} = 53,96 \text{ kW} \quad (16)$$

Onde:

P_{mec} é a potência mecânica necessária para movimentar o elevador [W];

W é o trabalho realizado pela máquina sobre a cabine do elevador [J];

F é a força mecânica necessária para movimentar a cabine [N];

x é a posição do elevador [m];

v é a velocidade da cabine do elevador [m/s];

m_{eq} é a massa equivalente da cabine para se dimensionar a máquina [kg];

g é a aceleração da gravidade [m/s^2];

η_{mec} é o rendimento do sistema mecânico.

A potência elétrica necessária é obtida dividindo-se a potência mecânica pelo rendimento da máquina. Supondo rendimento de 0,9, obtém-se 59,95 kW. Este valor equivale a 81,45 cv. Adotando-se uma máquina de 82 cv, obtém-se a potência elétrica de 60,35 kW. Em uma rede de 380 V ($U_l = 380 V$), em uma máquina com fator de potência (FP) de 0,87, a corrente será dada pela equação (17).

$$I_n = \frac{P_{ele}}{U_l \times \sqrt{3} \times FP} = 105,52 A \quad (17)$$

4.2 CÁLCULO DE ENERGIA E EFICIÊNCIA

A quantidade de energia potencial que o elevador possui é calculada pela equação (18).

$$E_{pot} = mg\Delta h \quad (18)$$

Onde:

E_{pot} é energia potencial da cabine do elevador [J];

m é a massa do elevador [kg];

Δh é a diferença de altura entre as extremidades do percurso do elevador [m];

g é a aceleração da gravidade [m/s^2];

Supondo a altura do pé direito do prédio de 3 m, obtém-se a quantidade de energia potencial do elevador igual a 242 kJ.

A energia potencial deve ser convertida em energia elétrica através de um sistema com diversas perdas. O cálculo da quantidade de energia que é aproveitada de maneira útil em vez de ser perdida pode ser calculado pelo rendimento. Supondo os rendimentos conforme a tabela 2, obtém-se valor máximo de energia elétrica igual a 176 kJ. Convertendo o valor para uma unidade mais conhecida para medir energia elétrica obtém-se $4,8 \times 10^{-2}$ kWh.

Tabela 2 Rendimento de cada parte do sistema formado por um elevador.

Parte do sistema	Rendimento aproximado
Retificador	$\eta_1 = 0,95$
Inversor	$\eta_2 = 0,95$
Máquina elétrica	$\eta_3 = 0,9$
Sistema mecânico, polias, cabos, engrenagens, etc...	$\eta_4 = 0,9$
Total do sistema	$\eta_T = 0,73$

Do mesmo modo como anteriormente, pode-se calcular a energia elétrica necessária para entregar a energia potencial gravitacional do elevador. Dividindo-se o valor de 242 kJ pelo valor de rendimento total do sistema obtém-se 322 kJ e convertendo-se para uma unidade de energia elétrica mais usual obtém-se 9×10^{-2} kWh. As figuras 9 e 10 ilustram os cálculos. A Partir da figura 10 percebe-se que o rendimento da conversão de energia elétrica em energia potencial e novamente para energia elétrica, multiplica-se duas vezes pelo rendimento total, obtendo-se rendimento de aproximadamente 0,5.

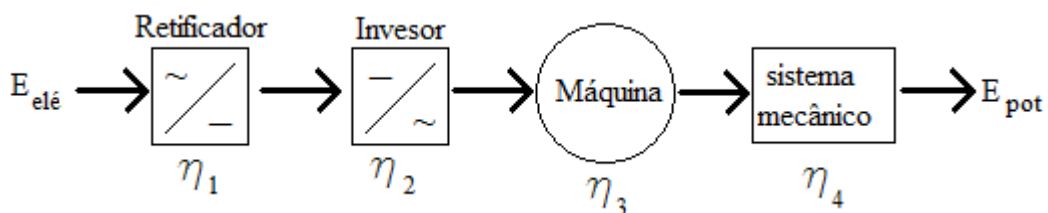


Figura 9 Rendimentos na conversão de energia elétrica em energia potencial. Fonte: do autor.

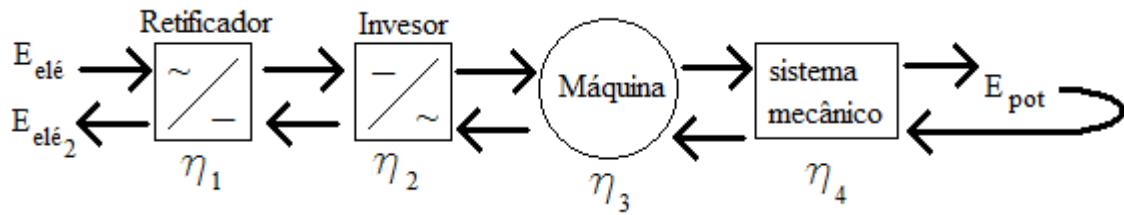


Figura 10 Rendimentos na conversão da energia elétrica para a potencial e novamente para a elétrica. Fonte: do autor.

4.3 ANÁLISE GRÁFICA

Com base em RUFER (2001), pode-se fazer um estudo semelhante e mostrar os gráficos de velocidade e posição do elevador na figura 11. Na figura 12 tem-se os gráficos de potência instantânea e energia potencial gravitacional do elevador. Observar que o cálculo de dimensionamento da máquina do elevador é feito com base na potência em que o nível é constante e os valores de pico de potência no gráfico são momentos de operação acima da potência nominal da máquina mas que não apresentam risco de aquecimento excessivo dos enrolamentos da mesma pois permanecem pouco tempo nessa condição.

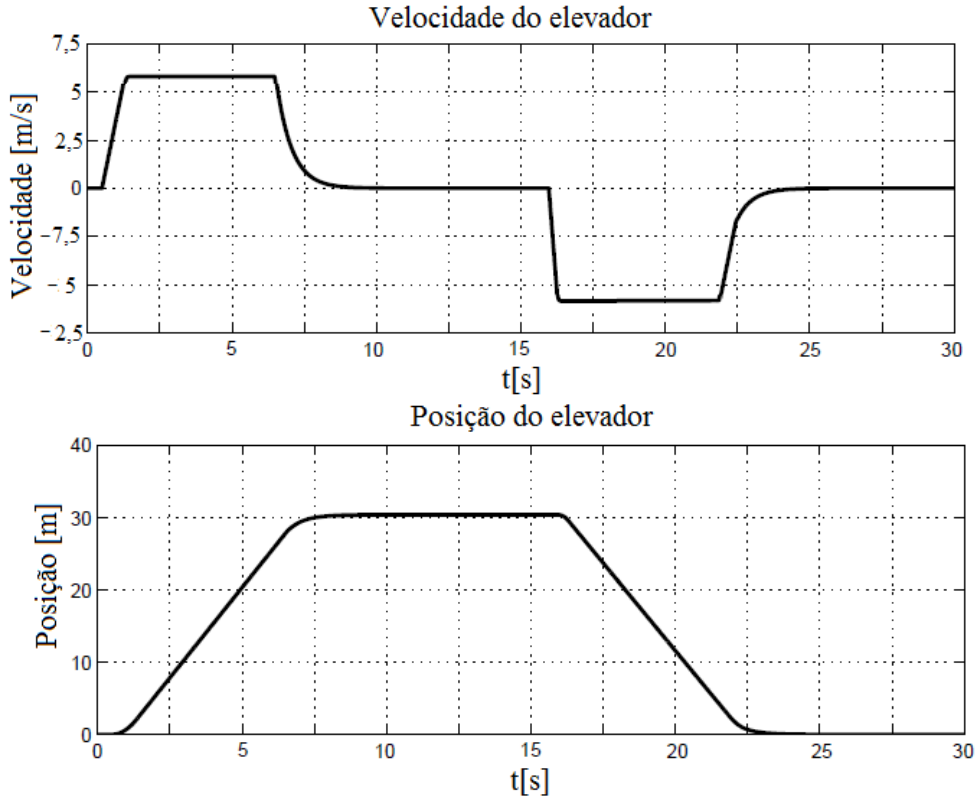


Figura 11 Curvas de velocidade e posição do elevador. Fonte: RUFER (2001).

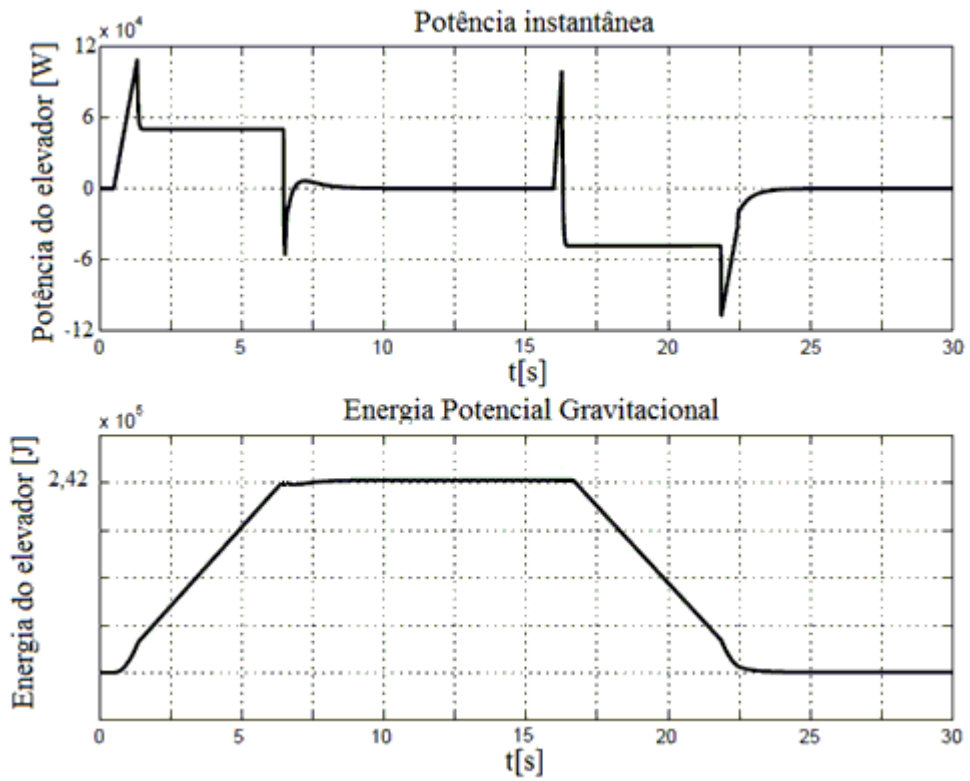


Figura 12 Curvas de potência e energia potencial gravitacional do elevador. Fonte: RUFER (2001)

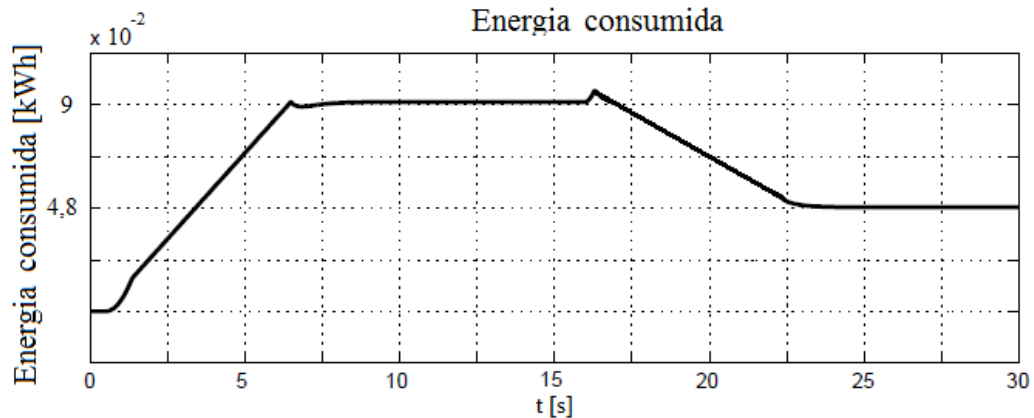


Figura 13 Curva de energia consumida pelo elevador com frenagem regenerativa com devolução para rede CA. Fonte: do autor, adaptado de RUFER (2001).

Na figura 13 é mostrado o valor de energia consumida pelo elevador que foi calculado anteriormente. Observar que aproximadamente metade da energia elétrica consumida no ciclo de subida do elevador pode ser devolvida para a rede elétrica pelo método de frenagem regenerativa de devolução para rede CA. Esse valor deve-se ao fato de que as perdas de energia do sistema de elétrico para energia potencial que são mostrados na tabela 2 ocorrem duas vezes, conforme mostrado no final da seção anterior.

4.4 COMPARATIVO ENTRE TECNOLOGIAS

O estudo dos métodos de armazenamento de energia é importante para o projetista de um sistema com frenagem regenerativa porque a energia proveniente da energia cinética do sistema deve ser utilizada de alguma forma podendo ser armazenada em uma das fontes de energia que constam na Tabela 3.

Tabela 3 Comparativo entre diversas fontes de energia. Fonte: DIXON, 2010

Fonte de Energia	Wh/ kg	W/kg	Ciclo de Vida	Custo US\$/kWh
Supercapacitores	5	2.000	500.000	25.000
Volante de inércia	40	3.000	5.000	20.000
Baterias				
USABC*	200	400	1.000	100
Chumbo-Ácido	35	150	700	150
Ni-MH	70	220	1.500	1.500
Ion-Lítio	130	350	1.000	2.000
ZEBRA	110	150	1.500	700
Zn-O ₂	200	100	1(Combustível)	5.000**

* Consórcio norte-americano para metas avançadas de bateria de materiais para o rotor.

** Precisa de um sistema caro para recuperar ânodos Zn

A Tabela 3 compara diferentes sistemas de armazenamento de energia quanto a densidade de potência, a densidade de energia, o ciclo de vida em número de cargas e descargas e o custo da energia armazenada.

Para todas opções de tecnologias de frenagem regenerativa estudadas, exceto a tecnologia de frenagem hidráulica que não se aplica no estudo desse caso, a quantidade de calor dentro da casa de máquinas do elevador será inferior do que um elevador sem nenhuma tecnologia de frenagem regenerativa, o que implica em redução de custos de ventilação da mesma. Para todas tecnologias estima-se redução de consumo de energia elétrica do elevador em torno de 30%, o que representa ganho financeiro e redução de impactos ambientais.

Para o caso do elevador fictício estudado, é necessário 242 kJ de energia armazenada. Conforme foi estudado por RUFER (2002), calcula-se um dimensionamento do banco de supercapacitores de 3 vezes o valor necessário, portanto 725 kJ. Esse valor corresponde a 0,2 kWh. Portanto o custo da fonte de armazenamento calcula-se com base nesse valor.

Com base no artigo de DIXON (2010), utilizando os dados da tabela 3, pode-se estimar os custos para as tecnologias de supercapacitores e volante de inércia em US\$ 5000,00 e US\$ 4000,00 respectivamente. A esses custos deve-se adicionar o custo do circuito que faz a

conexão do sistema com os armazenadores de energia. Os circuitos que fazem tal conexão são circuitos de potência, devem-se adicionar ainda os circuitos de controle dos mesmos sistemas. Ambos os circuitos são menos dispendiosos para o caso de supercapacitores, pois o circuito de potência é ligado diretamente no barramento *link* do circuito de potência da máquina elétrica. No caso de volante de inércia há duas opções. Pode-se utilizar um volante que utilize energia elétrica em seus terminais de potência e desse modo conecta-se no barramento do *link* ou pode-se empregar volantes de inércia acionados mecanicamente e nesse caso utiliza-se um acoplamento diretamente no eixo da máquina elétrica que traciona o elevador.

Sobre a possibilidade de utilizar baterias para o armazenamento de energia, deve-se considerar a baixa transferência de potência das mesmas. As baterias podem armazenar grandes quantidades de energia porém não possuem boa capacidade de entregar essa energia em curtos instantes de tempo uma vez que necessitam de reações químicas relativamente lentas. Observa-se que se for desenvolvida uma tecnologia para extrair a energia das baterias, o custo das mesmas no quesito energia é extremamente inferior as tecnologias de volante de inércia e supercapacitores.

Sobre a tecnologia de frenagem regenerativa com devolução para rede CA, deve-se lembrar que não é necessário o uso de armazenadores de energia. Para instalar um sistema de frenagem regenerativa com tal sistema, aplicam-se apenas os custos da instalação do sistema de devolução para rede CA, e tais custos compreendem apenas a substituição da ponte retificadora por um retificador regenerativo e os circuitos de controle da mesma. De acordo com KULKARNI (2000), o custo do retificador regenerativo é de 40% maior do que o não regenerativo. Com o uso dessa tecnologia obtém-se aumento significativo no fator de potência. O uso de retificadores não regenerativos das outras tecnologias tem um fator de potência de 0,9 chegando a 0,86 com carga máxima enquanto com retificador regenerativo o fator de potência é de 0,99 e não se altera. KULKARNI (2000). Para o caso dessa tecnologia a

eficiência é maior uma vez que não há perdas no sistema armazenador de energia pois com menos conversões de energia há menos perdas.

Portanto resumindo as vantagens do uso da tecnologia de frenagem regenerativa com devolução para rede CA:

- não necessita de elementos armazenadores de energia (manutenção reduzida);
- fator de Potência próximo a 1 com isso obtém-se um ganho no dimensionamento dos cabos;
- maior eficiência (maior quantidade de energia devolvida);
- menor distorção harmônica.

Portanto, na presente seção conclui-se que a melhor tecnologia para o elevador fictício estudado é a devolução para rede CA e que será estudado mais detalhadamente na próxima seção.

A respeito da viabilidade da instalação de um sistema de frenagem regenerativa sobre o sistema de acionamento dos elevadores já instalados, os engenheiros da fábrica da ThyssenKrupp verificaram que para potências do sistema de frenagem acima de 40kW, o retorno financeiro ocorre em poucos anos. Para valores de potência menores do que 40kW, o retorno financeiro ocorre em uma quantidade maior de anos porém, o maior ganho nesses casos é na atenuação de impactos ambientais e no uso racional de energia elétrica.

5. RETIFICADORES REGENERATIVOS

O principal elemento onde a frenagem regenerativa com devolução para rede CA atua é no retificador. As próximas seções comparam os dois tipos de retificadores: os não regenerativos e os regenerativos.

A finalidade de um retificador é realizar a conversão CA-CC. A conversão CA-CC é cada vez mais utilizada em uma grande variedade de aplicações: fontes de alimentação para circuitos com microeletrônica, aparelhos eletrodomésticos, reatores eletrônicos, carregadores de bateria, *drives* de motor CC, conversão de energia, etc... (WILSON, 1979).

Pode-se dividir os retificadores em dois grupos, um comutado pela linha e outro que corrige o fator de potência chamado PFC (*Power Factor Correction*). Os retificadores do grupo comutados pela linha, dentre eles o circuito formado por uma simples ponte de diodos, possuem um funcionamento simples, dispensam o uso de circuitos de controle porém possuem a desvantagem de produzir correntes harmônicas na rede e potência reativa, conforme a figura 14.

5.1 RETIFICADOR MONOFÁSICO NÃO REGENERATIVO

Observar na figura 14 a topologia do circuito de um retificador monofásico comutado pela linha e as formas de onda de tensão e corrente dos pontos mostrados no circuito. Tal retificador é mostrado para que possa ser comparado com o retificador a seguir mostrado na próxima seção.

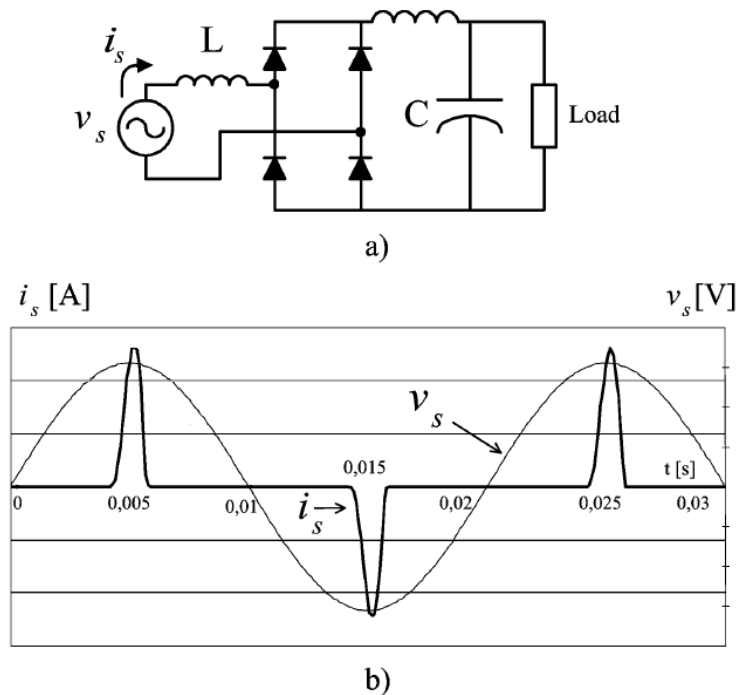


Figura 14 Retificador Monofásico: a) circuito b) formas de onda da tensão de entrada e da corrente. Fonte: (RODRÍGUEZ, 2005).

5.2 RETIFICADOR TRIFÁSICO REGENERATIVO

No grupo de retificadores PFC, há o subgrupo de retificadores regenerativos. Uma vez que tais retificadores possuem um sistema de controle para corrigir o fator de potência, também pode-se usar o mesmo sistema para controlar o fluxo de potência em ambos os sentidos. Para que a potência possa fluir nos dois sentidos, os IGBT's devem ser acionados de modo a produzir uma tensão senoidal. Tal acionamento é realizado através da modulação por largura de pulso (*Pulse Width Modulation* ou PWM). “PWM refere-se a transformação de uma variável contínua em um sinal binário alternante entre dois valores extremos” (BORLE, 1999). Na figura 15 pode-se ver o circuito de um retificador regenerativo trifásico.

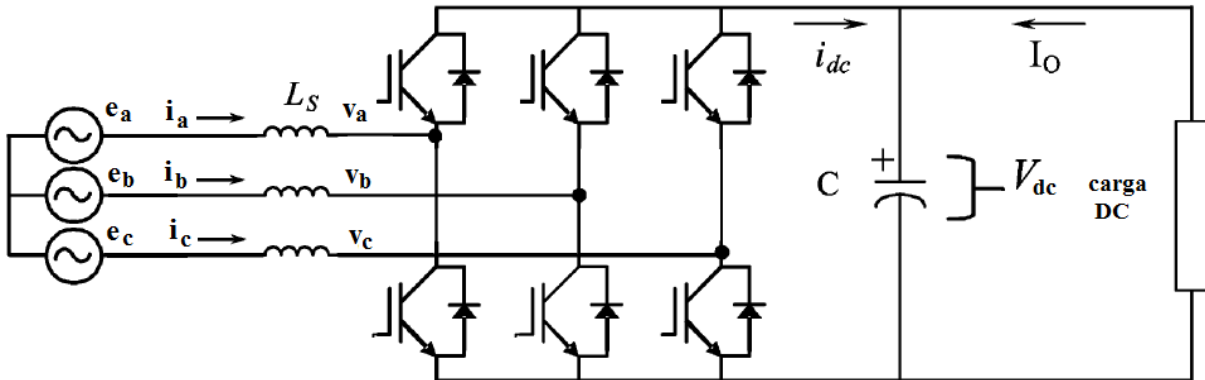


Figura 15 Retificador Regenerativo trifásico.

Onde:

e_a, e_b, e_c são as tensões senoidais da rede trifásica [V];

i_a, i_b, i_c são as correntes que fluem da rede para o retificador regenerativo [A];

v_a, v_b, v_c são as tensões na saída do modulador PWM [V];

L_s representa o reator;

i_{DC} é a corrente que vai para o capacitor [A];

V_{DC} é a tensão no capacitor [V];

I_o é a corrente que vai para a carga DC do circuito [A].

Analisando o efeito do reator em apenas uma fase, pode-se obter uma análise vetorial.

Na figura 16 tem-se o circuito para ser analisado.

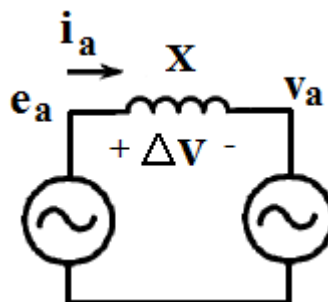


Figura 16 Circuito formado pela tensão da rede, reator e tensão do modulador. Fonte: do autor.

Sendo:

e_a é a tensão de linha da rede [V];

i_a é a corrente que flui da rede para o retificador regenerativo [A];

v_a é a tensão na saída do modulador PWM [V];

X é a reatância do reator [Ω];

ΔV é a queda de tensão no reator [V].

A tensão e_a pode ser escrita na forma complexa da equação (19). A corrente i_a pode ser expressa pela equação (20) aplicando a lei das correntes de Kirchoff e colocando na forma complexa. A Potência que flui pelo circuito da figura 16 pode, então, ser calculado pelo produto da tensão pelo complexo conjugado da corrente e ser expresso como na equação (21).

$$e_a = \sqrt{2}e_a \cos \delta + j\sqrt{2}e_a \sin \delta \quad (19)$$

$$i_a = \frac{e_a - v_a}{jX} = \frac{1}{X} [e_a \sin \delta - j(e_a \cos \delta - v_a)] \quad (20)$$

$$S = e_a i_a^* = P + jQ = \frac{v_a}{X} [e_a \sin \delta - j(e_a \cos \delta - v_a)] \quad (21)$$

Onde:

δ é o deslocamento angular entre e_a e v_a ;

j é o número imaginário $\sqrt{-1}$;

S é a potência aparente [VA];

P é a potência ativa [W];

Q é a potência reativa [VA_r].

Caso o reator L_S seja dimensionado para a potência máxima seja entregue no ângulo δ_0 e fazendo a aproximação $\sin \delta \cong \delta$, considerando ângulos pequenos, pode-se obter as expressões (22) e (23) para potência ativa e reativa respectivamente.

$$P = \left(\frac{v_a}{\sin \delta_0} \right) e_a \delta \quad (22)$$

$$Q = \left(\frac{e_a}{\sin \delta_0} \right) [e_a - v_a] \quad (23)$$

Deseja-se que o fator de potência seja unitário, portanto que a potência reativa seja zero, $Q = 0$. Pela equação (23) percebe-se que fazendo a amplitude de e_a igual a amplitude de v_a obtém-se $Q = 0$. Uma representação mais visual pode ser visto na figura 17.

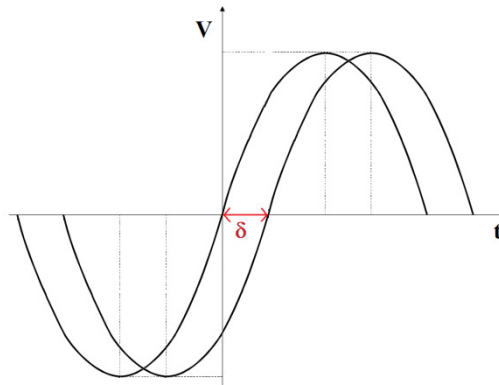


Figura 17 Deslocamento angular δ entre senóides de mesma amplitude e frequência. Fonte: do autor.

Pode-se representar as tensões e correntes do circuito da figura 16 por fasores como na figura 18.

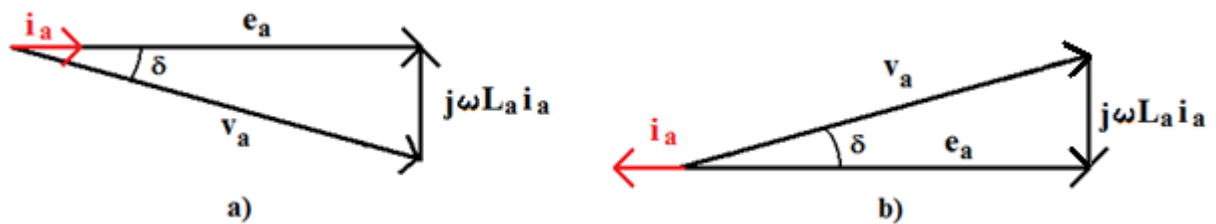


Figura 18 Análise vetorial do circuito para operação como: a) Retificador, b) Inversor. Fonte: do autor.

Desprezando a queda de tensão devido a resistência do reator, o valor de potência que flui pelo circuito é expresso por:

$$S = P = \frac{|v_a||e_a|}{X} \sin \delta \quad (24)$$

E pode ser visto na figura 19.

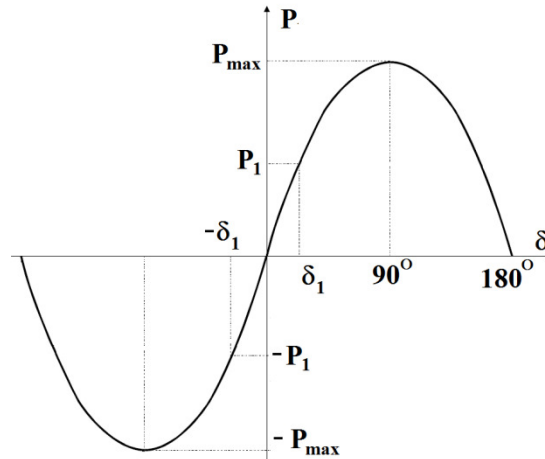


Figura 19 Curva de potência por deslocamento angular (δ). Fonte: do autor.

Portanto a potência que flui pelo circuito da figura 16 depende do deslocamento angular. Com essa demonstração, verifica-se que o sistema de controle para a tensão e_a deve criar uma onda senoidal com a mesma frequência e amplitude da tensão da rede. O mesmo sistema deve ser responsável pelo controle do deslocamento angular entre as duas senóides.

Em uma aplicação para elevadores, a carga CC da figura 15 será um inversor com uma máquina elétrica. A corrente I_0 terá um valor menor do que zero quando a máquina estiver operando como motor (com conjugado positivo) e terá um valor maior do que zero quando a máquina estiver operando como um gerador (com conjugado negativo).

Quando a máquina estiver operando como motor, ela irá demandar corrente do capacitor C, e a tensão do mesmo tenderá a cair. Quando a máquina estiver operando como gerador, ela irá fornecer corrente para o capacitor e a tensão do mesmo tenderá a elevar.

Portanto outra função do sistema de controle do retificador regenerativo será a de manter a tensão no capacitor constante transferindo potência da rede para o capacitor quando

a tensão no mesmo diminui ou transferindo potência do capacitor para rede quando a máquina causa uma elevação na tensão do capacitor.

5.3 SISTEMA DE CONTROLE DO RETIFICADOR REGENERATIVO

O sistema de controle deverá ser capaz de manter as especificações descritas anteriormente no capítulo 4.2. Na figura 20 pode-se ver uma representação em diagrama de blocos do mesmo.

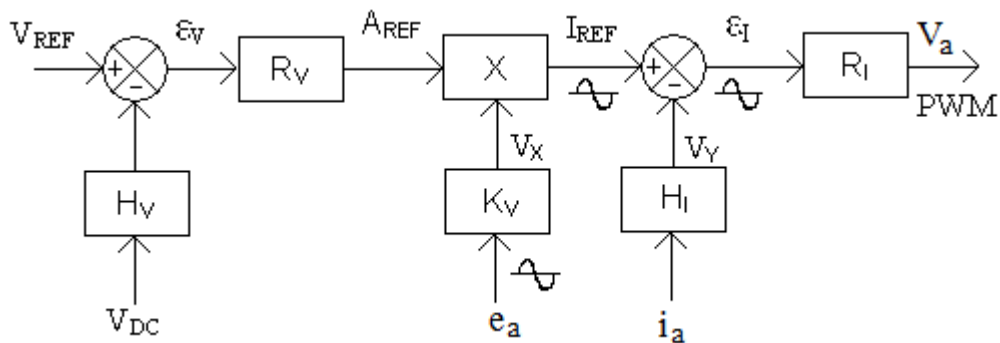


Figura 20 Diagrama de blocos do sistema de controle. Fonte: POHREN, 2009.

Onde:

V_{REF} é o valor de tensão a ser mantido [V];

H_V é o ganho do transdutor de tensão;

ε_V é o sinal de erro [V];

R_V é o regulador de tensão;

A_{REF} é o sinal de saída do regulador de tensão [V];

K_V é o ganho de tensão;

V_x é a referência de forma de onda senoidal [V];

I_{REF} é a corrente a ser seguida [A];

H_I é o ganho do transdutor de corrente;

V_Y é o sinal de corrente [A];

ε_I é o sinal de erro do controle de corrente [A];

R_I é o regulador de corrente.

Para que a tensão no modulador PWM possa ser de igual frequência da rede, pode-se escolher dois métodos.

Um método é com o uso de um PLL (*Phase-Locked Loop*), porém as desvantagens desse método são sua maior complexidade e a diferença de tensão que pode ocorrer entre a senóide gerada pelo PLL e a da rede em caso de surto ou afundamento de tensão.

O segundo método é simplesmente conectar o sinal da rede multiplicado por um ganho em um multiplicador no sistema de controle, como pode ser observado o bloco que realiza tal operação na figura 20. O valor da tensão e_a é dividido pelo ganho estático do bloco K_V originando o sinal V_x que é multiplicado pelo sinal A_{REF} . O sinal A_{REF} é originado do sinal de erro ε_V (onde $\varepsilon_V = V_{REF} - V_{DC} \cdot H_V$) multiplicado pelo ganho estático do bloco R_V .

Na saída do bloco multiplicador tem-se o valor desejado de corrente I_{REF} . Subtraindo o mesmo do sinal i_a , obtém-se o valor de erro ε_I . O bloco R_I recebe o valor do erro ε_I e gera um deslocamento δ proporcional ao erro. O sinal de erro ε_I pode ser tanto positivo quanto negativo. Com esse deslocamento irá ocorrer o fluxo de potência descrito anteriormente e com isso a tensão V_{DC} irá se modificar até atingir o valor esperado V_{REF} .

É estudado o sistema de controle de um retificador trifásico regenerativo sem a utilização de transformadas Clarke ou Park, diferentemente da maioria das publicações com esse mesmo tema. A finalidade é evitar um nível maior de complexidade mantendo o presente trabalho mais didático para que possa servir de referência para o estudo de frenagem regenerativa a nível de graduação.

5.4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE UM RETIFICADOR TRIFÁSICO REGENERATIVO

Esta seção avalia o funcionamento do retificador regenerativo trifásico estudado com o auxílio do *software* Simulink® pertencente ao Matlab®.

Para realizar a simulação, a carga CC que em uma aplicação real seria composta de um inversor e uma máquina assíncrona ou síncrona trifásica, foi simulada como uma fonte de corrente. O valor da fonte é o mesmo valor da corrente nominal da máquina elétrica, calculado na seção 4.1 pela equação 17. Portanto define-se I_0 na equação (25).

$$I_0 = \begin{cases} -100A, & \text{para } 0,2 < t < 0,5 \\ 50A, & \text{para } 0,7 < t < 1 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (25)$$

Na figura 21 tem-se a corrente I_0 demandada pela carga CC.

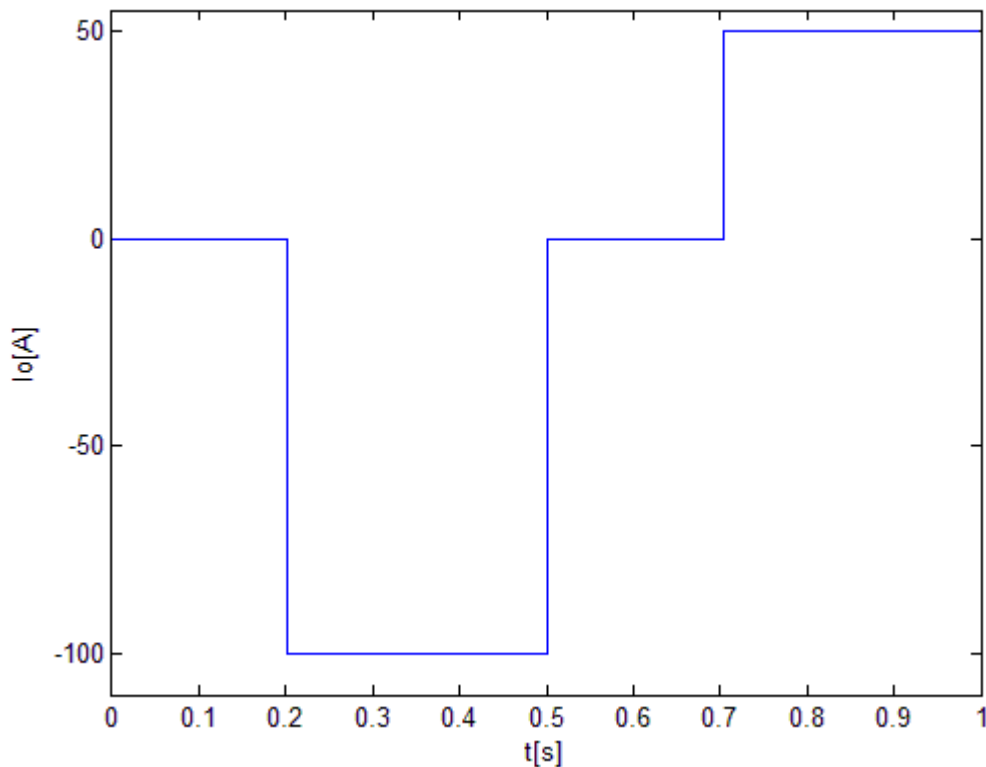


Figura 21 Curva de corrente da carga CC.

Conforme já foi citado na seção 4.2, a corrente da máquina primeiramente será retirada do capacitor causando uma queda de tensão do mesmo. O sistema de controle irá perceber essa queda de tensão e irá retirar potência da rede elétrica trifásica para injetar corrente CC no capacitor. Na figura 22 pode-se ver a corrente no capacitor. Pode ser observado que a corrente demandada que ocorre no instante $t = 0,2 \text{ s}$ e portanto a variação de tensão no capacitor está apresentado na figura 23. As transições ocorrem causando um comportamento oscilatório de senóide exponencialmente amortecida característica de sistemas de controle em malha fechada.

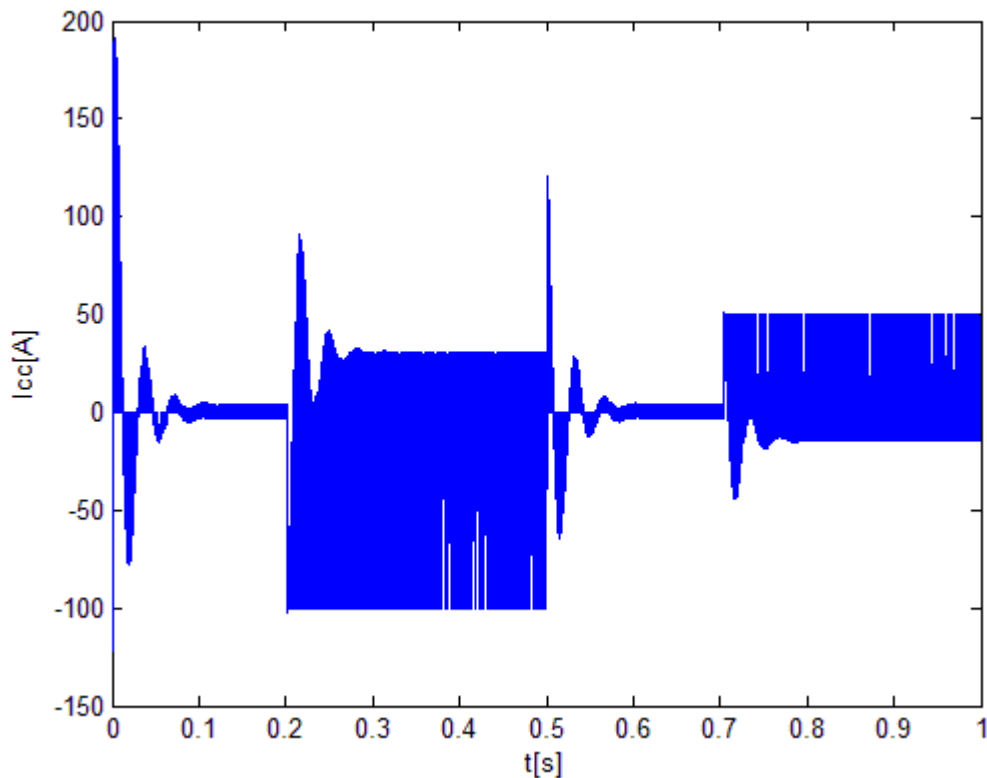


Figura 22 Curva da corrente no capacitor i_{cc} .

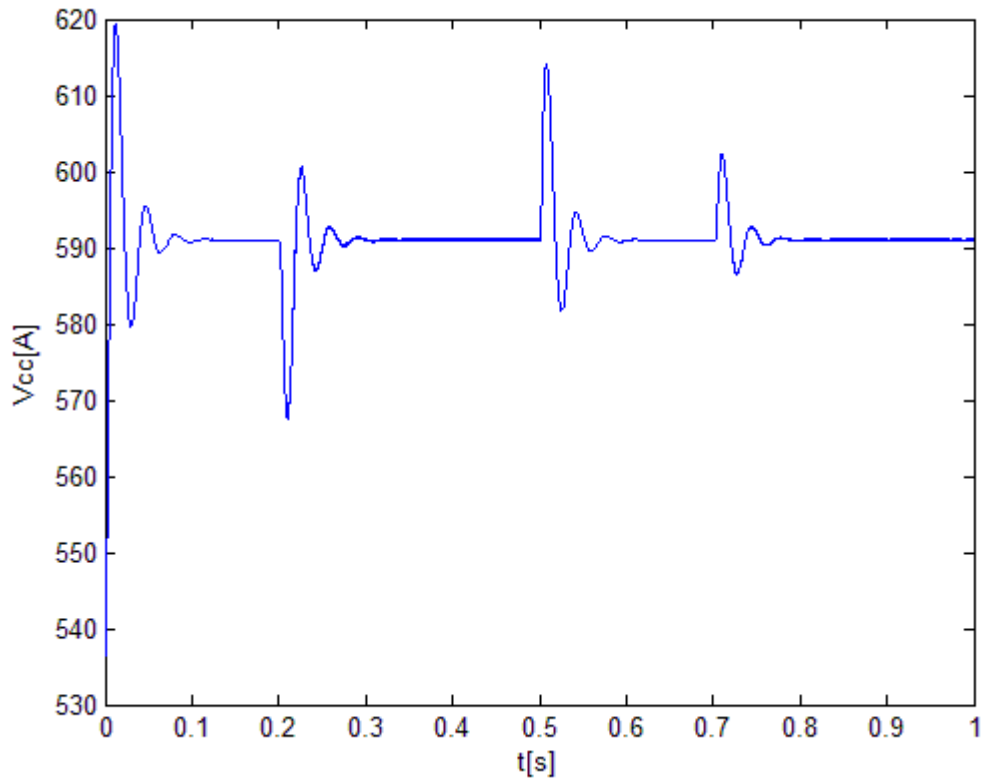


Figura 23 Curva da tensão no capacitor v_{CC} .

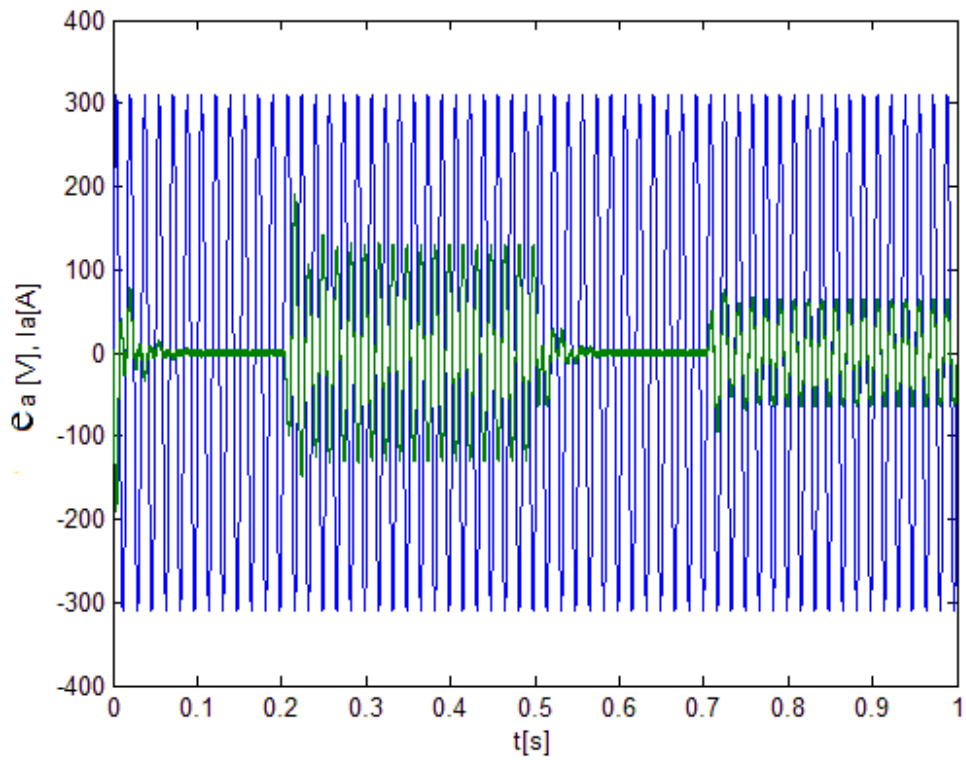


Figura 24 Curva de corrente i_a com a tensão e_a .

Na figura 24 está apresentada a corrente i_a . Inicialmente obtém-se um pico de corrente para carregar o capacitor com a tensão de *boost*, após ela atinge um valor pequeno para suprir as perdas internas e manter o sistema de controle operando. Entre os instantes $t = 0,2$ s e $t = 0,5$ s após atingir regime permanente, a corrente possui um valor de pico de 141 A para suprir a corrente demandada pela máquina de 100 A CC. Entre os instantes $t = 0,5$ s e $t = 0,7$ s a corrente reduz quase a zero para, novamente suprir as perdas internas e manter o sistema de controle operando. No instante $t = 0,7$ s a corrente inverte a fase em 180 graus e fica com valor de pico em aproximadamente 70 A (corresponde a mesma potência do valor de corrente CC de 50 A), neste intervalo de tempo a corrente está fluindo da máquina para a rede elétrica.

As figuras 25 e 26 apresentam em detalhe a mesma curva da figura 22 porém com detalhe nos instantes de tempo $t = 0,2$ s e $t = 0,7$ s respectivamente. Atentar a fase da corrente que, na figura 25 está defasada de 180 graus em relação à tensão e na figura 26 a corrente está em fase com a tensão.

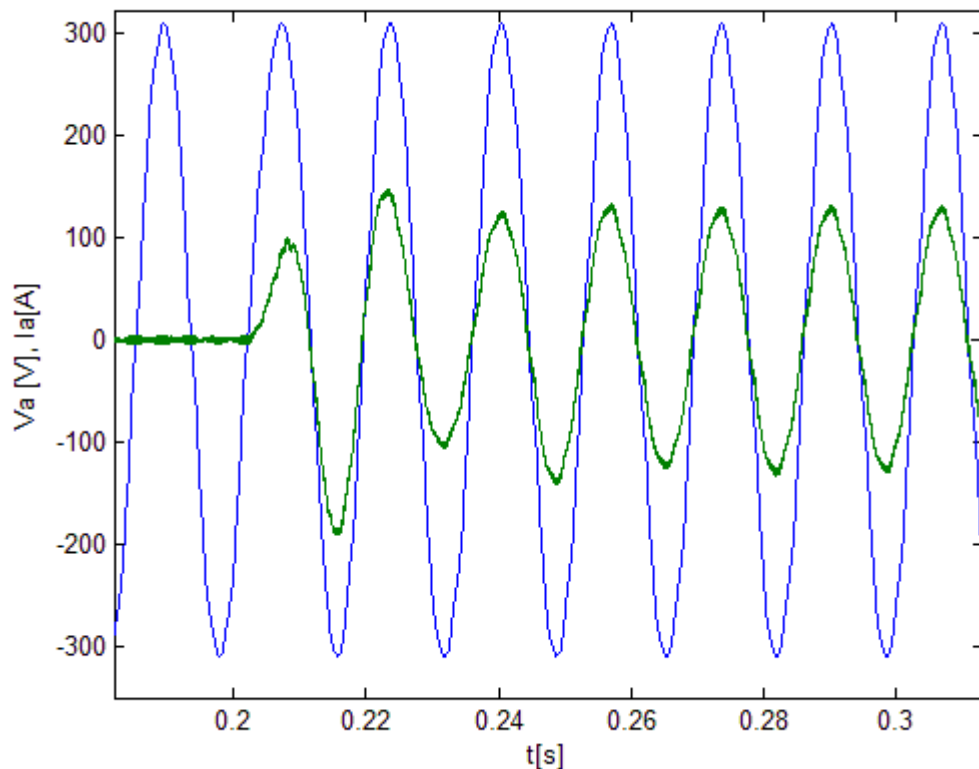


Figura 25 Detalhe da curva de corrente i_a com a tensão v_a próximo ao instante $t = 0,2$ s.

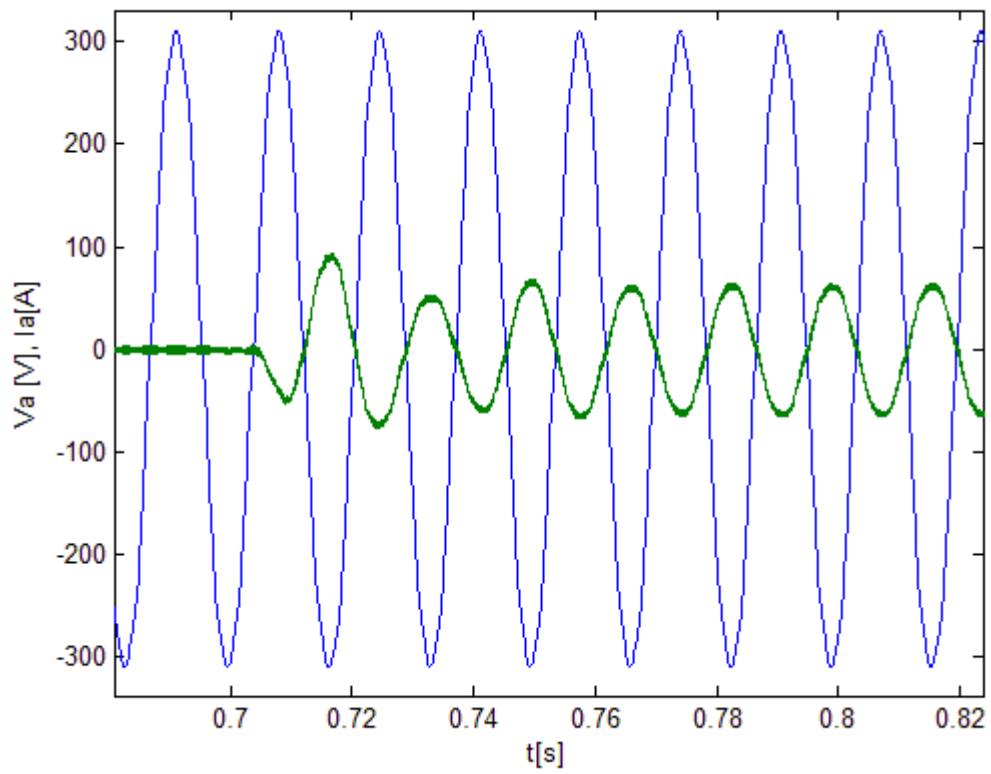


Figura 26 Detalhe da curva de corrente i_a com a tensão v_a próximo ao instante $t = 0,7$ s.

6 CONCLUSÃO

Conforme proposto, analisou-se diferentes tecnologias para frenagem regenerativa. Estudou-se qual a melhor tecnologia para ser empregada em um elevador fictício. Conclui-se que a melhor tecnologia de frenagem regenerativa para elevadores é a tecnologia do método de devolução para rede CA. Portanto sugere-se direcionar os investimentos em pesquisa para essa tecnologia frente as outras.

Pode-se verificar os dados teóricos com o resultado da simulação.

Chama-se a atenção para a importância dessa tecnologia devido a sua contribuição para o uso racional da energia elétrica e redução de impactos ambientais.

No contexto socioeconômico brasileiro, a frenagem regenerativa para elevadores através do método de devolução de energia para rede CA, ainda é uma tecnologia bastante onerosa. Porém, como ela é uma tecnologia que apresenta avanços na eficiência de um sistema, a tendência é que entre em produção para os novos sistemas de acionamento de grandes elevadores e, com isso, tende a diminuir o custo e, em um futuro próximo, ficar acessível para ser instalada em uma grande quantidade de prédios.

REFERÊNCIAS

BAISDEN, Andrew C. and Ali Emadi. Advisor-based model of a battery and an ultra-capacitor energy source for hybrid electric vehicle. **IEEE Transactions on vehicular Technology**, Vol. 53, NO. 1, (pag. 199-205) Jan 2004.

BORLE, Lawrence Joseph. **Zero Average Current Error Control Methods for Bidirectional AC-DC Converters**. Dissertação (Doutorado em engenharia), Curtin University of Technology, Australia. 1999.

DIXON, Juan. Energy Storage for Electric Vehicle Battery, **IEEE International Conference on Industrial Technology**, p. 20-26, Mar. 2010.

DUBEY, Gopal K. **Power Semiconductor Controlled Drives**, Prentice-Hall International Editions, 1989. 495 p. ISBN: 0-13-685942-9.

FITZGERALD, A. E. et al. **Máquinas Elétricas**. São Paulo: Bookman, 2006. 648 p. ISBN: 0-07-021134-5.

FLYBRID. Site da empresa fabricante. **Battery (Electricity)**. 1 p. Disponível em: <<http://www.flybridsystems.com/FAQ.htm>>. Acesso em: 10 out. 2011

HEBNER, Robert et al. Flywheel batteries come around again. **IEEE Spectrum**, IEEE Inc. New York, p. 46-51, 2002.

INVESTIRE, Thematic Network, Ruddell Alan, **Investigation on Storage Technology for Intermittent Renewable Energies: Evaluation and Recommended R&D Strategy**, ST6: Flywheel. 30 p. Jun 2003.

KHALIGH, Alireza and Li Zhihao. Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage System for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell and Plug-In Hybrid Electric Vehicle: State of the Art. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, Vol. 59, NO. 6, Jul 2011.

KULKARNI, Ashok B. Nguyen Hien et al. A comparative Evaluation of Line Regenerative and Non-Regenerative Vector Controlled Drives for AC Gearless Elevators. **IEEE Industry Applications Conference**, Vol. 3. Italy. p. 1431-1437, 2000.

LUKIC, Srdjan M. Cao, Jian et al. Energy Storage System for Automotive Application. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, Vol. 55, NO. 6, São Paulo: Valete Editora Técnica Comercial, p. 86-92, 2007.

MAXWELL. Site da empresa fabricante. Disponível em: <<http://www.maxwell.com>>. Acesso em: 9 dez. 2011

OSÓRIO, Jonas Obert Martins. **Análise da Máquina Torus sob Frenagem Eletrodinâmica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia), UFRGS, 157 p., 2011.

POHREN, Felipe Fischborn. **Projeto de um Retificador Regenerativo**. Dissertação (Graduação em engenharia), UFRGS, 54 p., 2009.

ROBERTSON, Struan Jno T, Markham, John. **The Regenerative Braking Story**, Scottish Tramway & Transport Society, 2006. 208 p. ISBN: 978-1-905304-219

RODRÍGUEZ, J., Dixon, J. et al. PWM Regenerative Rectifiers: State of the art. **Transactions on industrial Electronics**, Vol. 52, NO. 1, 22 p., Fev, 2005.

RUFER A., Barrade P. A Supercapacitor-Based Energy Storage System for Elevators with Soft Commuted Interface. **IEEE Transactions on Industrial Application**, Vol. 38, NO. 5, p. 1413-1418., 2001

SAMINENI, Satishet all. Modeling and Analysis of a Flywheel Energy Storage System with a Power Converter Interface. **International Conference on Power System Transients – IPST in New Orleans, USA**. 6 p. 2003

SCHMITZ, Raymond et BRADLEY Allen. Entendendo a Regeneração. **Controle & Instrumentação**. São Paulo: Valete Editora Técnica Comercial, p. 86-92.2007.

WALKER, Halliday Resnick. **Fundamentos de Física**, volume 1. LTC. Rio de Janeiro, 277 p., 2002. ISBN: 85-216-1303-2

WILSON, J. The forced-commutated inverter as a regenerative rectifier. **IEEE Transactions on Industrial Application**, Vol. IA-14, NO. 4, p. 335-340 Jul/Ago. 1978

YANG, Huayong, Sun, Wei, XuBing. **Investigation into Energy Regeneration of Hydraulic Elevators**. Proceedings of the 2nd IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications Transactions. 6 p., ago. 2007.

YOONG, M. K. **Studies of Regenerative Braking in Electric Vehicle**. Proceedings of the 2010 IEEE Conference on Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technology Universiti Tunku Abdul Rahman. Faculty of Engineering, Kuala Lumpur, Malaysia, 6 p., nov. 2010.