

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
PECE – PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA DA ESCOLA
POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

MARCEL DORTI SILVA

**Caracterização da máquina de indução atuando na região de
gerador utilizando conversores regenerativos**

São Paulo

2013

MARCEL DORTI SILVA

Caracterização da máquina de indução na região de gerador
utilizando conversores regenerativos

Monografia de conclusão de curso de energias
renováveis, geração distribuída e eficiência
energética do Programa de Educação Continuada
da Escola Politécnica da USP

Orientador: Prof. Ivan Eduardo Chabu

São Paulo

2013

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catalogação da Publicação

Serviço de Documentação da Escola

Politécnica da Universidade de São Paulo

Silva, Marcel Dorti

Caracterização da máquina de indução na região de gerador utilizando conversores regenerativos / M.D. Silva. -- São Paulo, 2014.

109 p.

Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Programa de Educação Continuada em Engenharia.

1. Conversores regenerativos 2. Máquinas de indução I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Programa de Educação Continuada em Engenharia II.t.

Nome: Silva, Marcel Dorti

Título:

Caracterização da máquina de indução na região de gerador utilizando conversores regenerativos.

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de especialista em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____ Instituição _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____ Instituição _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____ Instituição _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Dedico meu trabalho a todos os profissionais da área de acionamentos, que muitas vezes se questionaram sobre como melhor proceder em um estudo de acionamentos para eficiência energética. Que este trabalho seja de bom grado e que acrecente a suas vidas profissionais e os ajude (técnica e corporativamente) a tomar as decisões mais adequadas para fins de eficiência energética e, consequentemente, para o progresso da nação.

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Ivan Chabu pelo interesse e esclarecimento claro de minhas dúvidas na área de motores, acionamentos e auxílio extraordinário no desenvolvimento da monografia.

A Siemens pelo fornecimento dos materiais para a parte experimental do trabalho e manuais de aplicação.

A Bonfigliori Redutori pelo fornecimento de acoplamentos mecânicos para o desenvolvimento do kit de regeneração.

Ao meu colega de trabalho Henrique Barlera pelo revisão técnica adicional do texto da monografia.

Ao pessoal do Suporte Técnico Siemens pelo apoio nas revisões.

Aos meus amigos, que me apoiaram durante o desenvolvimento da mesma.

A minha mãe que sempre me apoiou em todos os meus projetos.

A minha amiga Bárbara Moraes, pelas revisão profissional da ortografia e texto.

A todos os professores do PECE pelo excelente material ministrado durante o curso.

Deixe que o futuro diga a verdade
e avalie cada um de acordo com
seus trabalhos e resultados, o
presente é deles, o futuro pelo qual
eu trabalhei é meu.

Nikola Tesla

RESUMO

Dorti, Marcel – **Caracterização da máquina de indução na região de gerador utilizando conversores regenerativos.** 2013 – Monografia de conclusão de curso – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

Os motores de indução trifásicos são, em qualquer estudo de eficiência energética, os maiores responsáveis pelo consumo de energia na indústria, correspondendo a quase cinquenta por cento do consumo dessa atividade industrial no Brasil. Incluem-se aí as mais diversas aplicações de bombas e compressores para refrigeração a acionamentos em geral para içamento de cargas e transporte de minério, estando presentes em praticamente todo tipo de acionamento. Levando em consideração que toda máquina de indução (MI) pode ser usada indistintamente nos modos motor ou gerador, o presente estudo trata dos aspectos e aplicações que caracterizam nesse último modo, objetivando a eficiência do uso da energia em que a regeneração é significante. O avanço da eletrônica de potência nos últimos anos tornou o conjunto de acionamento conversor de frequência e motor cada vez mais comum, viável e mais modular nas indústrias. Aproveitando-se da capacidade de regeneração dos motores, os conversores de frequência que antes necessitavam dissipar potência em resistores de frenagem para evitar sua queima, agora podem ser usados como conversores regenerativos devolvendo para a rede a potência extraída da desaceleração das cargas, ampliando a eficiência do acionamento e, consequentemente, sua viabilidade. Existem basicamente duas formas de regeneração usando máquinas de indução e conversores de frequência: a regeneração de máquinas de indução para um barramento comum DC, denominada regeneração AC/DC, e a regeneração para o barramento DC e depois uma conversão para a rede em AC, denominada conversão AC/AC. O presente estudo trata de aspectos teóricos e aplicações incluindo as duas formas de regeneração e ainda comenta o uso de conversores com regeneração AFE (Active Front End), sua influência na senoide enviada para a rede e seus efeitos. O estudo é composto de uma introdução teórica de máquinas elétricas, abordando a atuação das regiões motor e gerador, e apresenta os conversores de frequência, seu uso e detalhes sobre os retificadores regenerativos. O texto aborda o assunto teoricamente e, em seguida, apresenta uma forma de calcular a quantidade de energia que pode ser regenerada nas aplicações de centrífugas, utilizadas em usinas de cana de açúcar, içamento de cargas, utilizados em portos e mineradoras, sistema de trens

e vagões e sistemas de elevadores, contemplando todos os elementos do acionamento (conversor, motor e redutor).

Palavras-chave: Conversores regenerativos, regeneração, máquina de indução na região de gerador.

ABSTRACT

Dorti, Marcel – **Characterization of induction machine on generator region using regenerative converters.** 2013 – Monograph assingment for course conclusion – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

Three-phase induction motors are surely the greatest responsible machines for energy consumption in any energy efficiency study in industry. They are responsible for almost 50% of the all industrial activity consumption, including the most several applications from pump and compressors for chilling to general drive for load hoisting and ore transportation. Considering the fact that every induction machine MI can be used as an energy consumer (motor region) and as an energy generator (generator region), the present study talks about the aspects and applications which characterize the motors as generators for electrical energy efficiency usage in some application where regeneration is continuous. The advancement of power electronics in the latter years made the set of drive motor and frequency converter more and more common, made it also more viable and modular in industries, making the use of motor regeneration, frequency converters, which before needed to dissipate power in braking resistances to avoid burning, now can be used as regenerative with frequency converters and thus give back to the net supply the power of generator region, making the usage of energy from the utility lower, widening the drive energy efficiency and consequently its viability. There are basically two ways for regeneration using frequency converters: regeneration from machines using a common DC bus bar, which is said AC/DC regeneration and regeneration using conversion to a DC bus bar and then conversion to the AC supply, which is said AC/AC regeneration. The present study treats about theoretical aspects and applications including both forms of regeneration and still talks about the use of frequency converters with AFE (Active Front End) regeneration and its influence on the fundamental sine wave sent back to the supply and its effects. The study is basically composed by a theoretical introduction of electrical machines, clarifying the actuation on the motor and generator region, after frequency converters are presented and also its usage with details on regenerative rectifiers, and following the study shows ways to calculate the amount of energy which can be regenerated on centrifuge application, widely used in sugar and ethanol plants, load hoisting, used in harbors and mining companies, train and wagon system and elevator and lifting systems, aiming at all elements of the drive (converters, motor and gearbox).

Key-words: Regenerating converters, regeneration, induction machine on generator region.

Lista de ilustrações

Fig. 1 - Consumo de Energia Elétrica no Brasil	19
Fig. 2 - Usos finais de eletricidade no Brasil.....	20
Fig. 3 - Interface de eletrônica de potência entre fonte e carga.....	21
Fig. 4 - Sistema motor, válvula de restrição e bomba.....	22
Fig. 5 - Controle com conversor de frequência	23
Fig. 6 - Curva do motor trifásico de Indução.....	23
Fig. 7 - Aplicação usando motor em modo gerador.....	24
Fig. 8 - Sistema de içamento, com torque, velocidade e tempo	25
Fig. 9 - Esquema de um acionamento regenerativo	25
Fig. 10 - Princípio da máquina de indução	28
Fig. 11 - Estator da máquina de indução	29
Fig. 12 - Rotor com anéis curto-circuitados	29
Fig. 13 - Rotor bobinado com anéis coletores.....	30
Fig. 14 - Ligação de resistências no rotor através de anéis.....	31
Fig. 15 - Máquina de indução em corte.....	31
Fig. 16 - Produção de campo magnético girante a velocidade síncrona	33
Fig. 17 – Duplicação das bobinas ao longo do entreferro.....	36
Fig. 18 – Diagrama de fases da máquina de indução ideal	40
Fig. 19 - Máquina de indução ideal - circuito do rotor.....	40
Fig. 20 - Relação de torque e escorregamento e diagramas fasoriais.....	42
Fig. 21 - Vista do Fluxo, corrente, força e tensão no modo motor.....	43
Fig. 22 - Vista do Fluxo, corrente, força e tensão no modo gerador	44
Fig. 23 - Curva torque e velocidade nas regiões da máquina de indução	44
Fig. 24 – Perfil de velocidade de uma centrífuga de açúcar	45
Fig. 25 - Esquema de um conversor: retificador, Link C.C. e parte inversora com IGBTs	48
Fig. 26 – Simulação de regeneração transitente.....	50
Fig. 27 - Síntese do inversor.....	51
Fig. 28 - Princípio do PWM senoidal num inversor de três fases	55
Fig. 29 - Formas de ondas de fase e de linha do inversor PWM.....	56
Fig. 30 - Conversor PWM de dois lados - inversor e retificador.....	58
Fig. 31 - Diagrama de operação em 4 quadrantes	59
Fig. 32 - Diagrama fasorial com fator de potência adiantado.....	60
Fig. 33 - Foto de um módulo de potência regenerativo de 7,5 kW	61
Fig. 34 - Esquema de um conversor regenerativo com GTOs	62
Fig. 35 - Correntes e link C.C. durante regeneração	64

Fig. 36 - Correntes de entrada durante reversão em motor de alta velocidade	65
Fig. 37 - Efeito das perturbações na tensão da rede e na entrada do conversor.....	66
Fig. 38 - Aplicações com conversores de frequência	67
Fig. 39 - Curva Torque velocidade para ventiladores e bobinadores.....	69
Fig. 40 - Curva Torque velocidade de transportes elétricos, robôs e máquinas-ferramentas.....	70
Fig. 41 - Curvas torque velocidade escavadores e elevadores	71
Fig. 42 - Perfil de velocidade tempo de um acionamento	72
Fig. 43 - Perfil de torque exigido.....	73
Fig. 44 - Comportamento do conversor em regeneração transitente	73
Fig. 45 - Elevador com diversas transmissões e contra-peso.....	74
Fig. 46 - Comparativo de economia de energia	76
Fig. 47 - Comparaçāo entre drives regenerativos e não regenerativos	77
Fig. 48 - Forma de tensão e corrente num conversor regenerativo	78
Fig. 49 - Forma de tensão e corrente de um conversor não-regenerativo.....	78
Fig. 50 - Esquema da aplicāo de eleveção.....	79
Fig. 51 - Perfil de velocidade na descida	82
Fig. 52 - Perfil de regeneração	82
Fig. 53- Diagrama do sistema de duas pontes.....	83
Fig. 55 - Energia anual num sistema de 2 pontes.....	84
Fig. 54 - Potēncia num sistema de 2 pontes	84
Fig. 56 - Perfil de velocidade e corrente de um ciclo de centrífuga de açucar	86
Fig. 57- Oscilograma operação centrífuga otimizada	88
Fig. 58 - Acionamento e comportamento interno da centrífuga	89
Fig. 59 - Esquema de subestações, e linhas entre as estações de trem	91
Fig. 60 - Esquema de medição e aquisição de dados das subestações.....	92
Fig. 61 - Tensão catenária e corrente na estação A.....	93
Fig. 62 - Tensão catenária e corrente na estação B	93
Fig. 63 - Potēncia e tensão catenária na estação A	94
Fig. 64 - Potēncia nos alimentadores no tempo da estação A.....	94
Fig. 65 - Potēncia e tensão catenária na estação B	95
Fig. 66 - Potēncia nos alimentadores no tempo da estação B.....	95
Fig. 67 - Energia de tração e regenerada na estação A	97
Fig. 68 - Energia de tração e regenerada na estação B	97
Fig. 69 - Energia regenerada nas subestações	99
Fig. 70 - Energia perdida subestações	99
Fig. 71 - Nível de harmônicos em relação a RSC em retificador de seis pulsos.....	102
Fig. 72 - Típicas formas de forma de corrente e RSC	102
Fig. 73 - Nível de harmônicos e RSC em retificador regenerativo sem AFE	103
Fig. 74 - Formas de onda na motorização e regeneração	104

Fig. 75 - Harmônicos de corrente num conversor AFE	104
Fig. 76 - Harmônicos de tensão num conversor AFE	104

Lista de tabelas

Tabela 1 - Número de pólos, P e velocidade síncrona com uma rede de 60Hz	35
Tabela 2 - Família de harmônicos para PWM Senoidal	56
Tabela 3 - Comparação Potência e energia num sistema de 2 pontes.....	84
Tabela 4 - Energia regenerada do ciclo da centrífuga.....	87
Tabela 5 - Energia de tração e regeneração na estação A.....	96
Tabela 6 - Energia de tração regenerada na estação B.....	97
Tabela 7 - Condições para cálculo.....	98
Tabela 8 - Energia regenerada total nas subestações	98
Tabela 9- THD em retificadores de seis pulsos	102
Tabela 10 - THD em conversor regenerativo sem AFE.....	103
Tabela 11 - THD em conversores regenerativos com AFE.....	105

Lista de abreviaturas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AFE – Active Front End

NBR – Norma Brasileira Reguladora

C.C. – Corrente contínua

DC – Direct Current

AC – Alternated Current

HVAC – Heating, Ventilation and air-conditioning

THD – Total Harmonic Distortion

MI – Máquina de Indução

GTO – Gate Turnoff Thyristor

IGBT – Insulated-Gate Bipolar Transistor

IGCT – Integrated-Gate Commutated Thyristor

PEBB – Power Electronic Building Blocks

DSP – Digital Signal Processor

VSI – Voltage Source Inverter

PWM – Pulse Width Modulation

SPWM – Sinusoidal Pulse Width Modulation

ATO – Automatic Train Operation

RSC – Rated Short Circuit

Lista de símbolos

B_g – Indução magnética

E – Tensão induzida

I_s – Corrente do estator

I_c – Corrente do conversor

J – Momento de inércia

M – Momento (Torque)

V_d – Tensão do link C.C.

V_c – Tensão do conversor (converter)

V_s – Tensão da rede (supply)

α – Aceleração angular

η – Rendimento

ω – Velocidade angular

Sumário

1.	Introdução	19
2.	Revisão da Literatura	26
3.	Teoria da máquina de indução	28
3.1.	<i>Príncipios de construção</i>	28
3.2.	<i>Campo girante produzido por aplicação de tensão no estator</i>	32
3.3.	<i>Funcionamento da máquina de indução</i>	37
3.4.	<i>Característica elétrica e modos de operação da máquina de indução.....</i>	39
4.	Teoria e uso de conversores de frequência	46
4.1.	Generalidades sobre conversores AC/AC com circuito intermediário	48
4.1.1.	<i>Inversores com PWM (Pulse Width Modulation).....</i>	53
4.1.2.	<i>Conversor PWM como retificador de linha.....</i>	57
5.	Regeneração	63
6.	Aplicações com drives e regeneração	67
6.1.	<i>Aplicações e Potêncial de regeneração de acionamentos</i>	67
6.2.	<i>Curvas Típicas Torque / velocidade</i>	69
6.2.1.	<i>Perfil de velocidade, potência e torque</i>	71
7.	Regeneração em elevadores	74
8.	Aplicação de elevação (Hoist Gantry)	79
9.	Aplicação em Centrífugas de açúcar	85
10.	Regeneração em trens	90
11.	Condições de linha utilizando conversores regenerativos	100
11.1.	<i>Relação de curto-circuito.....</i>	101
11.2.	<i>Nível total de harmônicos.....</i>	102
12.	Conclusões e considerações finais.....	106

1. INTRODUÇÃO

O uso de motores de indução trifásicos tem se tornado cada vez mais comum na indústria, fato devido a seu baixo custo relativo e fácil operação. No passado, os motores de indução não eram utilizados para aplicações que requeriam precisão e posicionamento. Tais açãoamentos eram substituídos por motores de corrente contínua devido ao seu alto grau de controle entre as grandezas mais utilizadas como torque e velocidade. As alterações nas curvas do motor trifásico assíncrono requeriam alterar a construção do circuito do rotor o que inviabilizava seu uso de forma simples. Hoje, com a utilização de conversores de frequência, o uso do motor trifásico de indução tem se tornado cada vez mais comum em diversas aplicações. Com a evolução da eletrônica de potência e dos algorítimos de modelagem dos circuitos dos motores, suas aplicações se expandiram no espaço onde antes apenas motores C.C. eram usados. O setor industrial é responsável por 46% do consumo de energia elétrica no Brasil, conforme apresentado na Fig. 1. Sabe-se ainda que o consumo de eletricidade nos sistemas motrizes corresponde a 62% do total de energia elétrica consumido na indústria, conforme pode ser observado na Fig. 2. Sendo assim, sistemas motrizes industriais são responsáveis pelo consumo de 28,5% da eletricidade consumida no Brasil (C. A. FERREIRA, 2009).

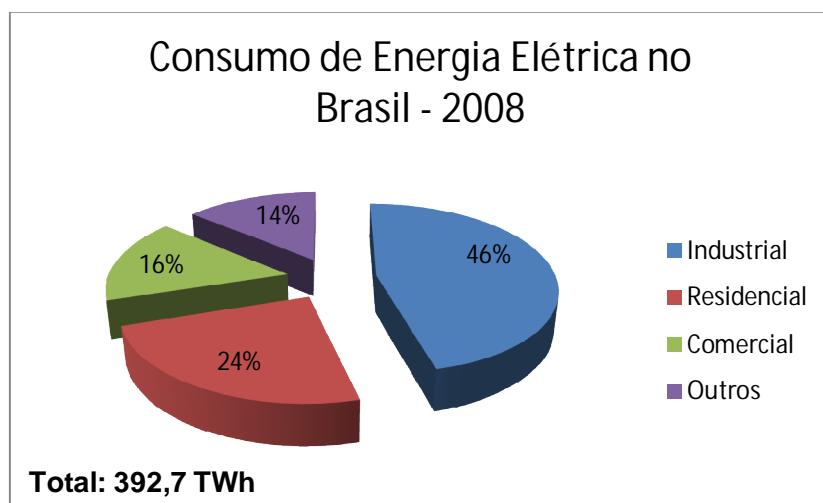


Fig. 1 - Consumo de Energia Elétrica no Brasil (Fonte: Eletrobrás 2008)

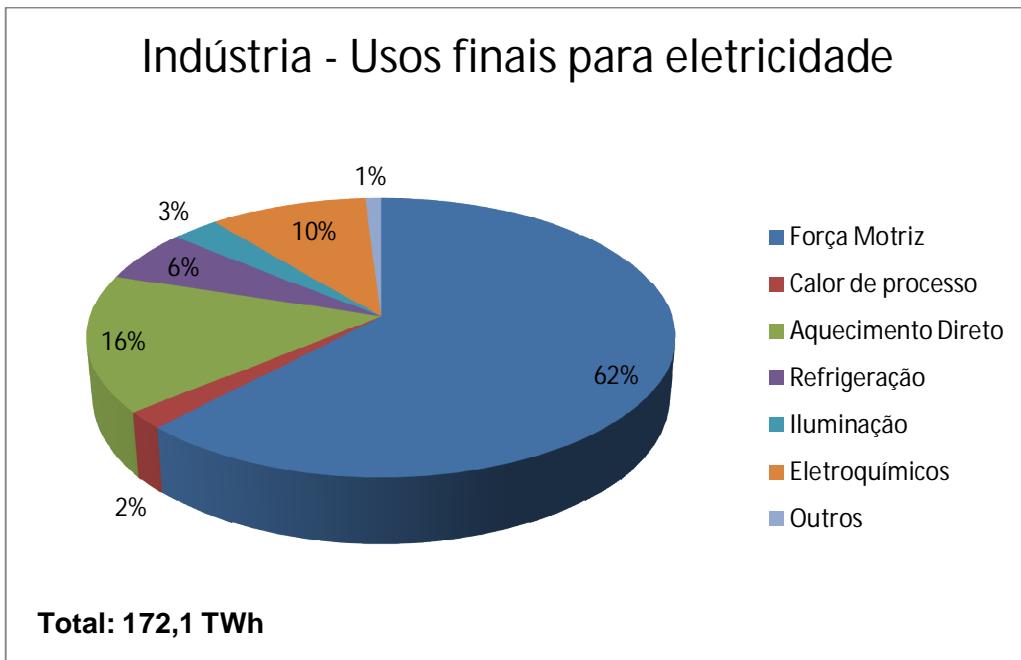


Fig. 2 – Usos finais de eletricidade no Brasil (Fonte: Eletrobrás 2008)

Considerando os motores usados na refrigeração, o uso de motores representa quase 70% do uso na indústria. A ANEEL em seu decreto N. 4.508 – DE 11 DE DEZEMBRO DE 2002 dispõe sobre a regulamentação específica que define os níveis mínimos de eficiência energética de motores elétricos trifásicos de indução com rotor de gaiola de esquilo, de fabricação nacional ou importados, para comercialização ou uso no Brasil com valores de eficiência descritos pela NBR 7094/2000 da ABNT (ANEEL, 2002). Isso explicita a importância dos motores elétricos na matriz energética brasileira e a NBR 7094/2000 chega a assinalar eficiência de até 96% em potências maiores em plena carga, o que moveu fabricantes brasileiros a modificarem seus motores para comercialização no mercado nacional. Os fabricantes estrangeiros, em sua grande maioria, já possuíam motores que atendiam tais quesitos, pois a norma de eficiência energética na Europa e nos Estados Unidos já exigia níveis mínimos de alto rendimento. Estes fabricantes só precisaram comprovar seus estudos através de institutos brasileiros competentes como o INMETRO (selo PROCEL) com estudos analisados pela Eletrobrás. Por outro lado, há um fator importante também que deve ser mencionado que leva à ineficiência do uso de motores.

Um dos maiores problemas nas indústrias é a quantidade de motores mal dimensionados para muitas aplicações de pequeno e médio porte. Potências superdimensionadas operando com baixa porcentagem de carga resultam em baixo fator de potência na rede, o que baixa a eficiência, além de cargas acima do especificado reduzem a vida útil dos motores fazendo-os operar em sobrecarga (FABIÁN YAKSIC, 2012).

Com a utilização dos conversores de frequência, alguns cálculos elétricos puderam ser negligenciados, já que uma interface eletrônica agora se coloca entre a rede e o motor. A eletrônica de potência é uma tecnologia para melhoria, pois a fonte de alimentação (rede) e o acionamento podem através desta ter frequências diferentes, amplitudes diferentes e até mesmo número de fases diferentes. Um conversor de frequência facilita a transferência de potência da fonte (rede) para a carga (acionamento) convertendo formas de tensão e corrente, o que torna possível a fonte e a carga trocarem suas posições no sistema, ou seja, consumindo ou gerando. (MOHAN, 2003).

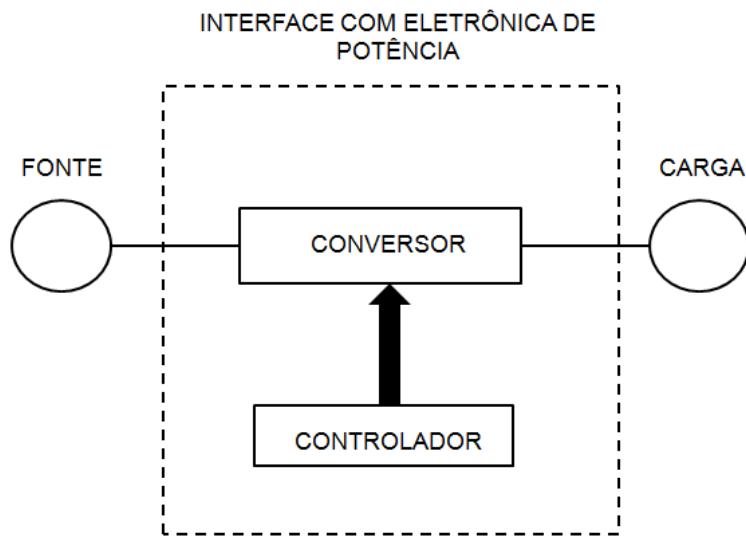


Fig. 3 - Interface de eletrônica de potência entre fonte e carga (Fonte: MOHAN, 2003)

Os conversores de frequência foram pioneiros em colaborar com a eficiência energética, pois permitiam uso de motores de acordo com sua curva velocidade e torque casado com a curva da carga que acionam certos aspectos, os quais só podiam ser obtidos antes para algumas aplicações com variadores

mecânicos, redutores e outros aparelhos ligados em série com o estator ou rotor (motor de anéis). Nestes casos, os motores poderiam alterar sua potência de acordo com a variação de sua velocidade, em que um exemplo clássico é a operação de sistemas HVAC com conversores de frequência. Nos Estados Unidos, 16% do uso da energia gerada é consumida por sistemas HVAC, tradicionalmente moto-bombas rodam em velocidade constante (velocidade nominal) e o fluxo de fluido é controlado, desperdiçando energia através de uma válvula de restrição (MOHAN, 2003).

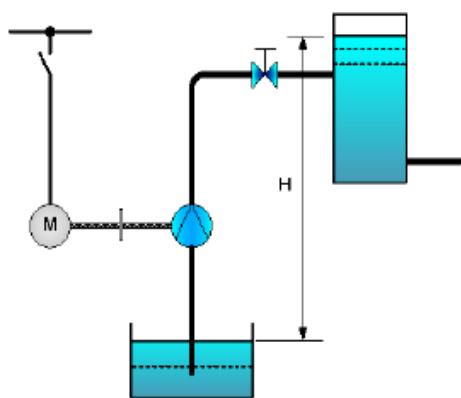


Fig. 4 - Sistema motor, válvula de restrição e bomba (Fonte: Oening, 2011)

Este desperdício pode ser evitado somente com a implementação da interface de eletrônica de potência, ou seja, um conversor de frequência controlando a velocidade do motor e, consequentemente, sua potência (MOHAN, 2003).

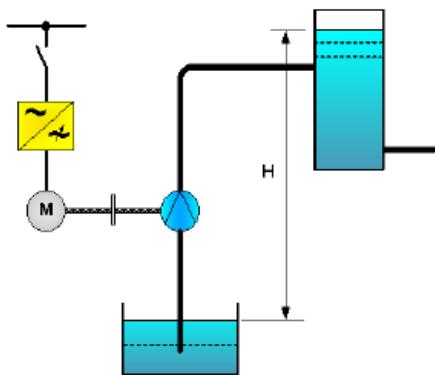


Fig. 5 - Controle com conversor de frequência (Fonte: Oening, 2011)

Esta introdução ao uso de conversores de frequência para acionamentos serve de base para a compreensão geral de como os mesmos interferem no consumo da matriz e os conversores de frequência os tornam mais eficientes. O objetivo deste estudo é mostrar o uso do sistema conversor de frequência e máquina de indução utilizando conversores regenerativos em aplicações que possam utilizar a máquina de indução da região de gerador de forma significativa.

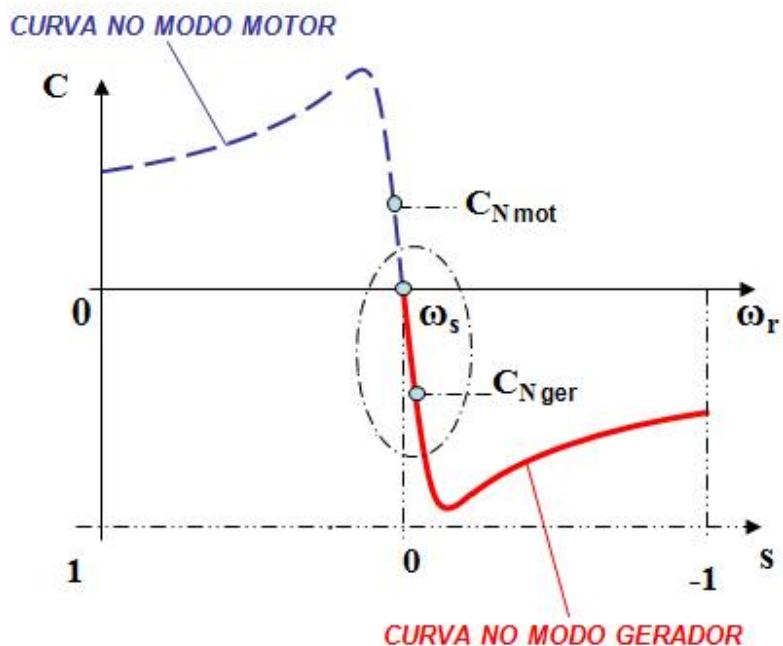
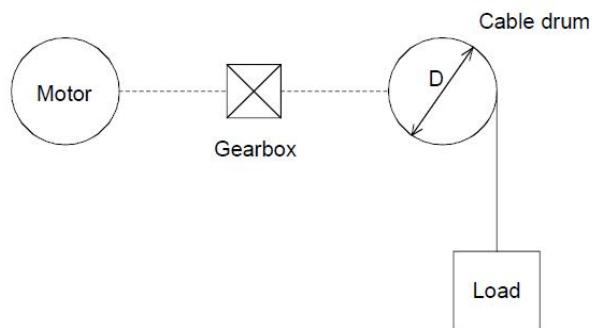


Fig. 6 - Curva do Motor trifásico de Indução, evidencia região de motor e gerador de acordo com o escorregamento, velocidade angular e conjugado. (Fonte: Aulas do curso de Máquinas Elétricas Prof. Ivan Chabu)

A regeneração, operação no motor em modo gerador, é inerente ao seu funcionamento, quando o escorregamento é negativo. Devido à aplicação de uma potência mecânica no eixo do motor, o rotor interage com o estator invertendo o fluxo de potência elétrica ativa, tornando-o um gerador. Todas as aplicações de içamento de cargas são, por sua natureza, regenerativas, pois a carga é motorizada e depois deve descer regenerando. Aplicações de alta inércia como centrífugas e até mesmo alguns transportadores como sistemas de trens e metrôs fazem com que o motor entre no modo gerador.



Principle of operation of a hoisting drive (single-cable)

Figura 7 - Exemplo de uma aplicação usando o motor em modo gerador (Fonte: Siemens, MasterDrive Application Manual 2003)

O esquema acima refere-se à aplicação de levantamento de carga com redutor e tambor com cabos para içar a carga. Quando o sistema num ciclo atuar na direção da gravidade, o motor será movido pela carga e haverá regeneração. A potência é um produto da força pela velocidade, logo da velocidade angular pelo torque exercido: quanto maior a carga, mais potência será regenerada e quanto maior o tempo de descida, mais energia poderá ser disponibilizada através de um drive regenerativo.

A Fig. 7 e o gráfico da Fig. 8, bem como a Fig. 9, ilustram um esquema básico de ligação de um acionamento, com retificador e filtro AFE regenerativo, inversor e motor. Nos capítulos a seguir será elucidado como calcular e dimensionar acionamentos para aplicações regenerativas e o quanto pode ser regenerado.

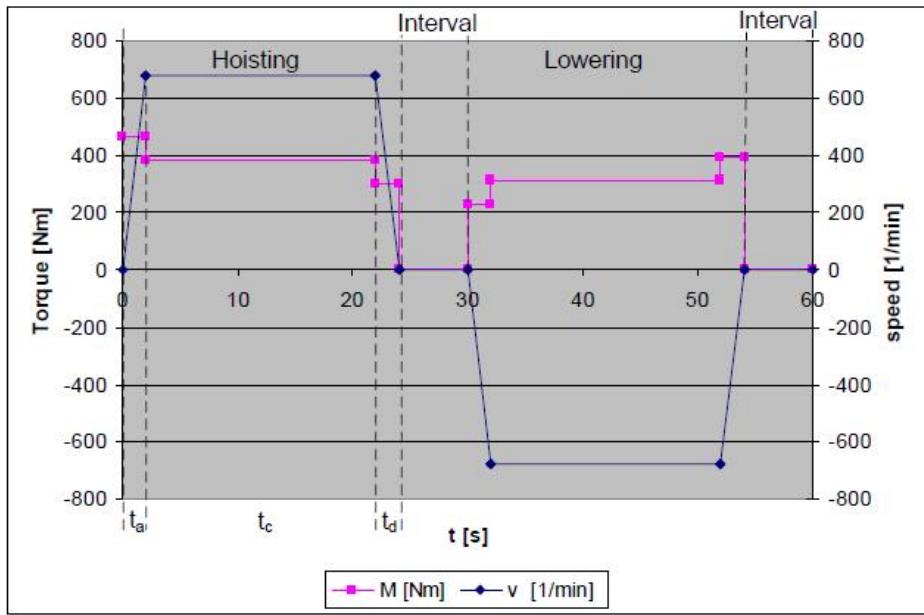


Fig. 8 - Sistema de içamento, com torque, velocidade e tempo - (Fonte: Cranes Application guide, Siemens)

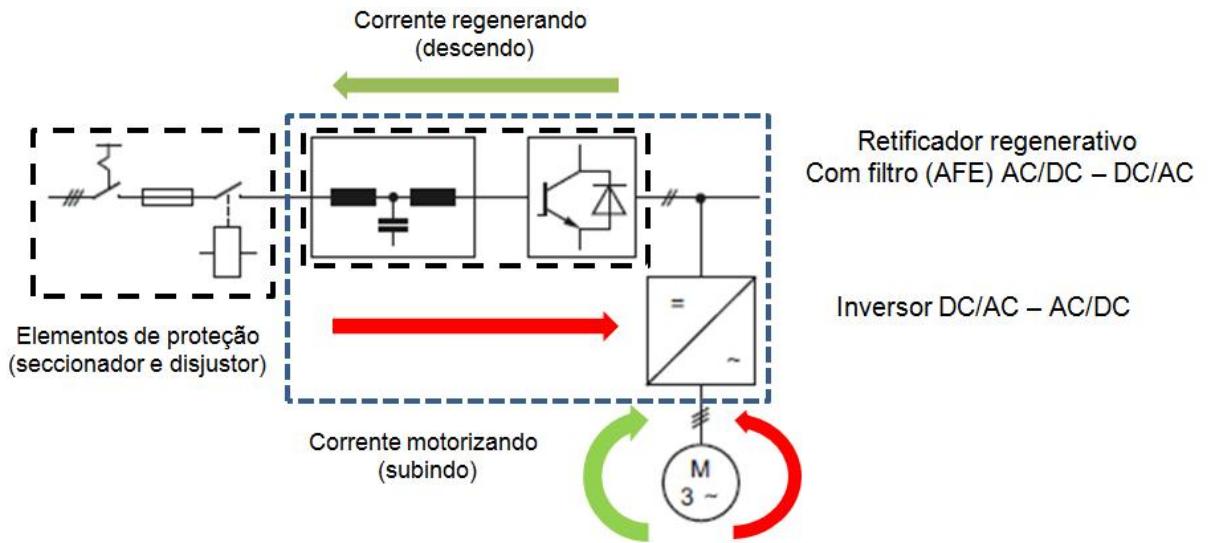


Fig. 9 - Esquema de um acionamento regenerativo - (Fonte: Catálogo Siemens PM 21)

2. REVISÃO DA LITERATURA

O uso dos conversores de frequência regenerativos é uma alternativa para aumento da eficiência energética nos acionamentos e em consonância com NR nº 482 de 17 de abril de 2012 que dispõe sobre como fontes geradoras podem disponibilizar energia na rede e serem compensadas seu pelo preço em kWh, estes podem se tornar uma alternativa viável no futuro da geração distribuída.

O principal enfoque ainda é o uso da energia regenerada em uso local, ou seja, sem que esta seja contabilizada por um medidor bidirecional, mas que possa diminuir a demanda de energia drenada da rede.

Para tal, KOSOW (2005) apresenta os modos de operação da máquina de indução e FITZGERALD (2006) a descreve na região de motor e região de gerador. SAY (1976) descreve os equivalentes em circuito e como a curva torque, velocidade da máquina de indução, acontece nas diferentes regiões. BOSE (2002) descreve os princípios teóricos, fundamentos dos conversores de frequência e principais semicondutores utilizados, em BOSE (2006) a teoria por trás dos principais retificadores de linha para conversão DC/AC é apresentada.

DRURY (2000) fornece uma visão mais prática do uso de conversores regenerativos com oscilogramas e aplicações em cargas, ilustrando o uso da regeneração.

NASAR (2006) apresenta como as curvas de velocidade de torque se comportam para tipos diferentes de cargas, explana sobre o perfil de velocidade e torque nos acionamentos e como conectá-los para dimensionamento de aplicações, exemplifica a economia de energia por parte do uso de conversores, com modelamento de aplicações como elevadores.

ASHOK B. KULKAM (2000) apresenta resultados de uma aplicação com conversores regenerativos e um estudo de seu uso em prédios comerciais evidenciando e comparando a economia de energia e mostrando aumento na qualidade da rede.

No manual de aplicações (Siemens, 1999) um exemplo de aplicação com ponte-rolante é apresentada e uma análise de seu potencial de economia de energia com conversores regenerativos é mostrada, desde o dimensionamento ao seu resultado em kWh regenerados por ciclo.

No estudo de centrífugas para o setor sucroalcoleiro, os manuais de aplicação (Siemens LD, 2002) referem-se à prática de um segmento já consolidado no ramo de aplicações e com grande potencial regenerativo, uma análise quantitativa baseada em gráficos obtidos de forma empírica nas aplicações de campo é contextualizado para averiguar a quantidade de energia regenerada.

Nas aplicações em trens, CHANG-HAN BAE DONG (2007) apresenta um estudo de medição de potência em duas subestações e disserta sobre como a energia não aproveitada no lado DC dos trens é desperdiçada, defendendo o uso de um conversor regenerativo do lado DC, para o lado de alta nas subestações que alimentam as linhas ferroviárias.

No desfecho da monografia são dadas diretrizes para máximo proveito deste recurso e como verificar suas condições de perturbações nas redes nas quais serão instalados, para tal o Sinamics Engineering Manual (2011) explana sobre as condições de conversores de frequência em relação a RSC dos transformadores onde serão inseridos, com níveis de harmônicos e THD (I) e THD (V) em três tipos de retificadores: Diodos com 6 pulsos, regenerativos sem AFE e os regenerativos com AFE e filtros de entrada.

O capítulo final apresenta conclusões das aplicações mencionadas e alguns aspectos financeiros das mesmas, além de um panorama do futuro da regeneração em seu estado da arte, os conversores regenerativos de média tensão, que logo estarão disponíveis com tecnologia *grid compliance* rumo à conexão com os *smart grids*.

3. TEORIA DA MÁQUINA DE INDUÇÃO

3.1. PRINCÍPIOS DE CONSTRUÇÃO

(IRVING L. KOSOW, 2005)

A máquina de indução (MI) é mostrada na Fig. 10 e possuí basicamente um estator e um rotor, o enrolamento da armadura do estator portanto pode ser conectado a uma fonte polifásica ou monofásica. A máquina de indução torna-se um *gerador de indução* assíncrono quando o rotor é acionado por uma máquina primária numa velocidade que excede à velocidade síncrona.

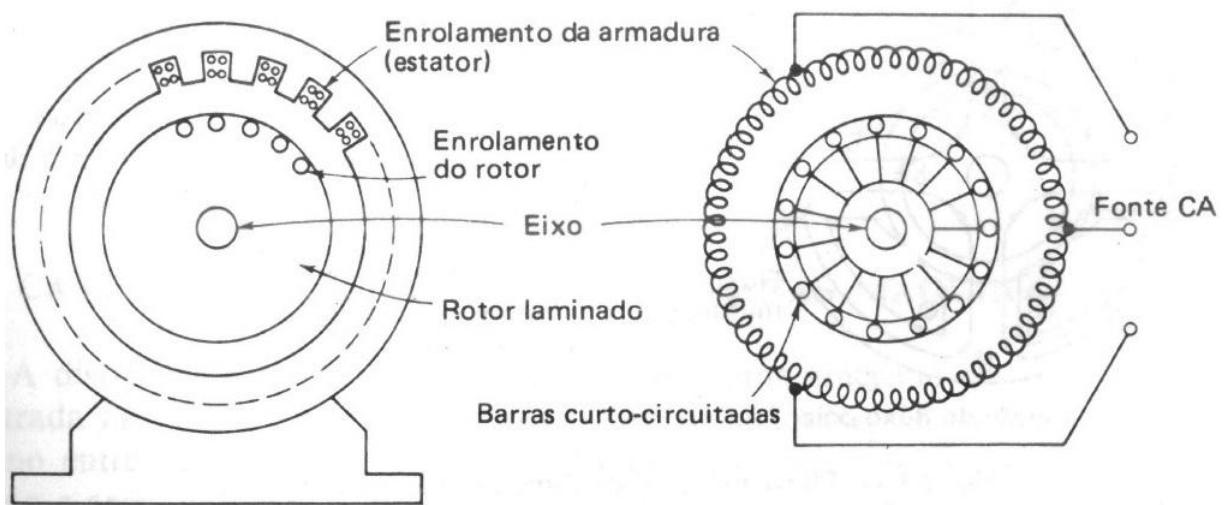


Fig. 10 - Princípio da máquina de indução

“Se a armadura é ligada a uma fonte monofásica ou polifásica CA, a máquina funcionará normalmente como *motor de indução*.” (IRVING L. KOSOW, 2005). Deve-se notar que, mesmo operando como motor ou gerador, a máquina de indução assíncrona requer que o estator esteja conectado a uma fonte CA. A máquina de indução é duplamente excitada (no estator diretamente a partir de uma fonte CA e no rotor por indução a partir do estator), existindo fluxo de corrente em ambos os enrolamentos.

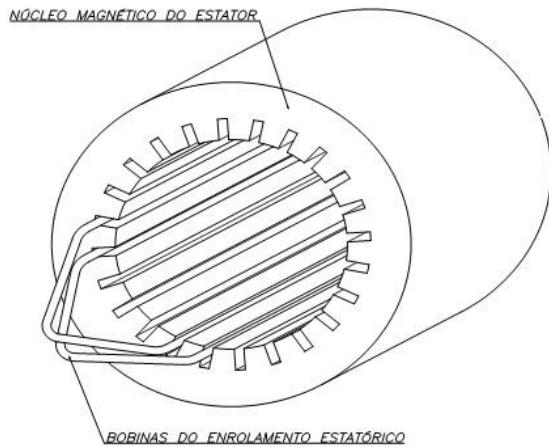


Fig. 11 - Estator da máquina de indução (Fonte: Notas de aula Prof. Dr. Ivan Chabu)

O núcleo do rotor da máquina de indução é um cilindro de aço laminado, no qual condutores de cobre ou alumínio são fundidos, inseridos ou enrolados paralelamente ao eixo em ranhuras ou orifícios existentes no núcleo.

No rotor gaiola de esquilo, os condutores estão curto-circuitados por anéis terminais contínuos. Em rotores maiores os anéis terminais são soldados aos condutores, ao invés de serem moldados na construção do rotor.

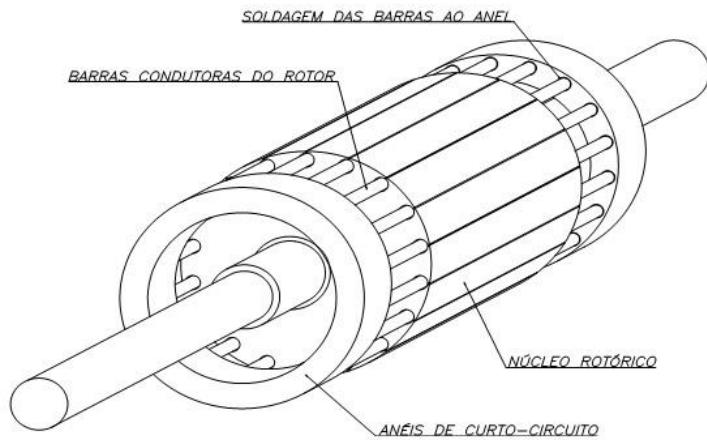


Fig. 12 - Rotor com anéis curto-circuitados - (Fonte: Notas de Aula Prof. Dr. Ivan Chabu - PECE)

Nos motores bobinados, os condutores de cobre são colocados nas diversas ranhuras do rotor, isolados do núcleo de ferro formando um enrolamento

trifásico, e os seus terminais são ligados a um coletor de anéis rotativos permitindo acesso externo ao enrolamento rotórico ou enrolamento secundário.

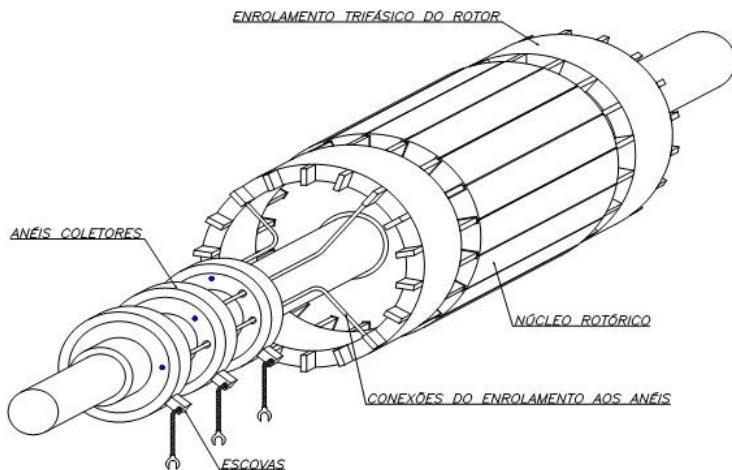


Fig. 13 - Rotor bobinado com anéis coletores. (Fonte: Notas de Aula Prof. Dr. Ivan Chabu - PECE)

Nos motores de rotor bobinado geralmente o enrolamento secundário é ligado em série com um conjunto de resistências para alterar a curva de torque e velocidade do motor. Antes da introdução dos inversores de frequência, esta era uma das formas mais usuais de se obter elevado torque de partida (característica oposta das máquinas de indução) e variação de velocidade. Aplicações usuais para este eram pontes rolantes e talhas transportadoras, os quais ainda estão presentes em diversos segmentos da indústria como siderurgia e portos, os quais poderão ser substituídos por acionamentos com inversores de frequência num futuro retrofit. Motores de anéis com partida por reostato rotórico ainda são a solução preferida para acionamento de cargas de elevado momento de inércia, como britadores, moinhos, bem como prensas com volante de grande capacidade.

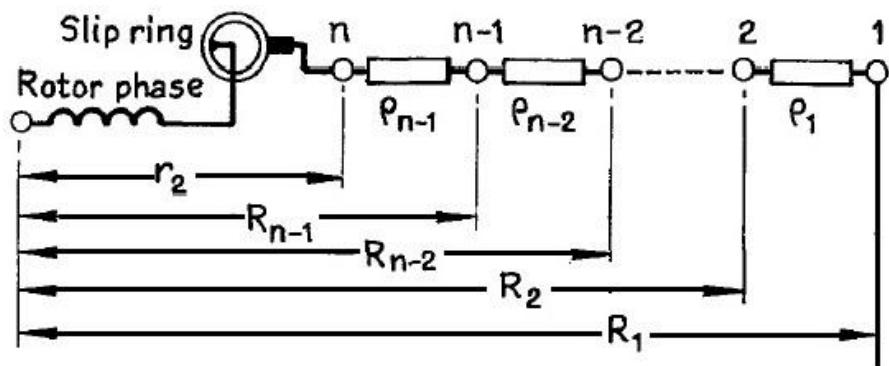


Fig. 14 - Ligação de resistências no rotor através de anéis (Fonte: M. G. Say - Alternating Current Machines)

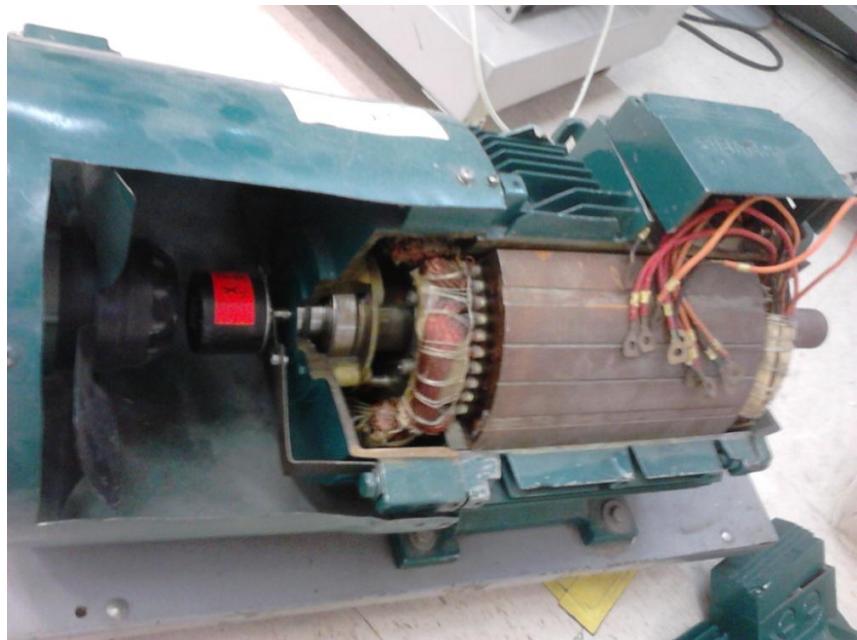


Fig. 15 - Máquina de indução em corte – (Fonte: Siemens Labs.)

3.2.CAMPO GIRANTE PRODUZIDO POR APLICAÇÃO DE TENSÃO NO ESTATOR

Uma máquina de indução pode produzir um campo girante, rodando a uma velocidade síncrona, a qual pode ser produzida por qualquer conjunto polifásico de enrolamentos deslocados no espaço do estator, se as correntes circulantes no enrolamento também forem defasadas no tempo. Desta forma, todas as máquinas de indução trifásicas a fim de produzirem um campo magnético constante em amplitude e que gira a velocidade síncrona, necessitam de três enrolamentos individuais e idênticos, deslocados no estator por 120° elétricos e pelos quais circulem correntes defasadas também em 120° no tempo, ou na fase.

$$N_s = \frac{120f}{2p}$$

Onde:

N_s = rotação síncrona [rpm]

f = frequência do campo girante [Hz]

P = número de pares de pólos

A Fig. 16 (a) mostra a um diagrama fasorial e um gráfico de amplitude ao longo do tempo de como as correntes circulam no estator da máquina de indução trifásica nas suas sequências ABC. Sua relação gráfica de variação senoidal por ciclo também pode ser vista na Fig. 16 (b). Já na Fig. 16 (d) podemos predizer o fluxo resultante produzido por todas as bobinas de uma fase, com 12 condutores (6 bobinas) por fase, tendo então F_A , F_B e F_C , ligados a um ponto comum e seus inícios de enrolamento conectados a uma rede trifásica.

No instante t_1 , a corrente da fase A, está num valor máximo num determinado sentido, enquanto as correntes das bobinas B e C alcançam exatamente 0,50 do seu valor máximo no sentido oposto.

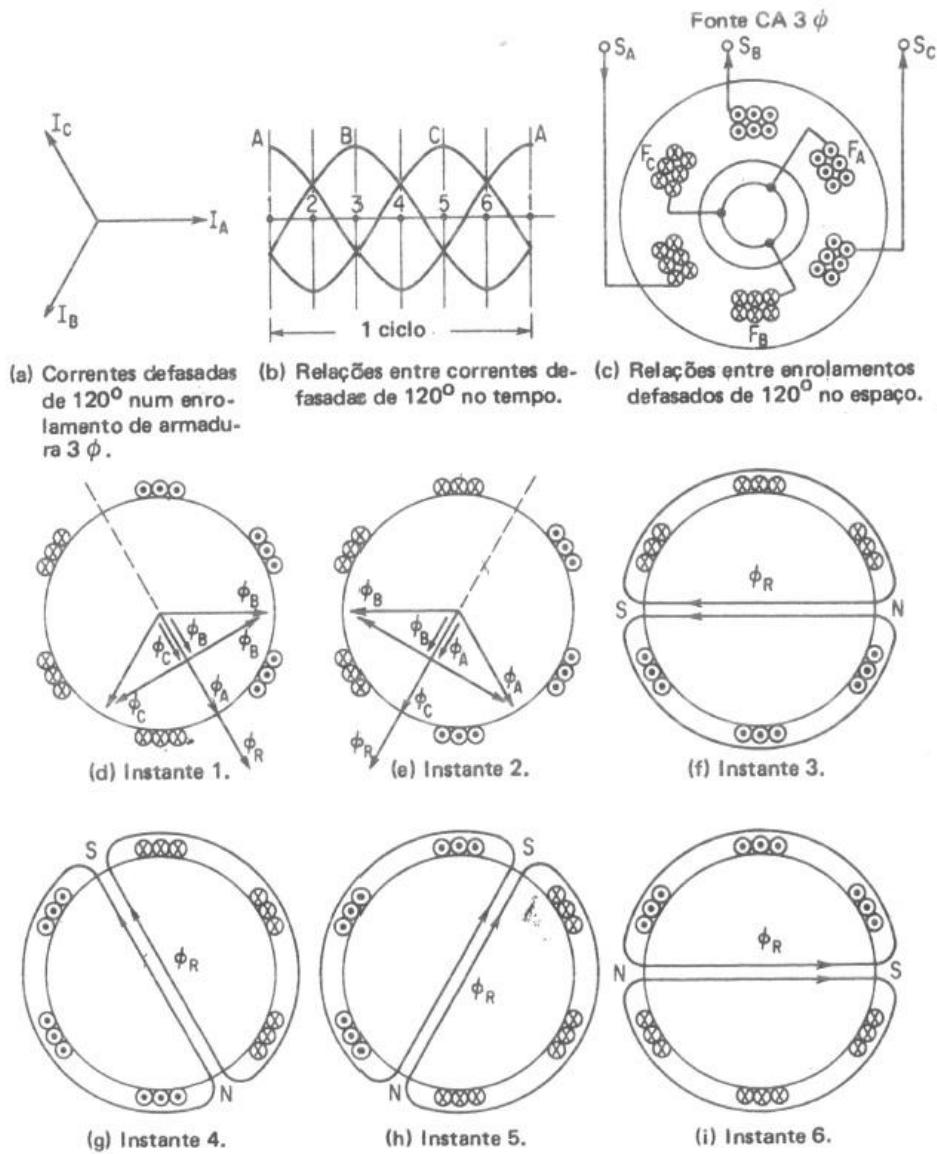


Fig. 16 - Produção de campo magnético girante a velocidade síncrona – Fonte: (IRVING L. KOSOW, 2005)

Os fluxos produzidos por estes condutores podem ser vistos na Fig. 16, com a regra da mão direita, Φ_B e Φ_C e Φ_A produzem um fluxo resultante Φ_R . As componentes de quadratura de Φ_B e Φ_C se cancelam por terem sentidos opostos. O mesmo acontece no instante t_2 , quando a corrente na fase B está invertida e tem o mesmo valor em amplitude e sentido oposto que o da corrente da fase A (a qual agora descreceu para 0,5 de seu valor máximo).

A corrente na fase C agora está no seu valor máximo no instante t_3 , o fluxo resultante é novamente desenhado para cada uma das fases, neste instante Φ_A e Φ_B cancelam suas componentes de quadratura e somam suas componentes em fase com Φ_C (no mesmo sentido) para produzir mais uma vez o fluxo resultante Φ_R do mesmo valor que o existente em t_1 .

Logo no instante t_2 , 60° elétricos mais tarde que o instante t_1 , o fluxo resultante girou 60° mas permaneceu com seu *valor constante*. Logo, no instante t_3 o fluxo resultante será no sentido horizontal da direita para esquerda, entrando no estator um pólo S e deixando-o num pólo N a direita. Um *campo magnético girante constante* é produzido por um enrolamento trifásico localizado no estator. O deslocamento no espaço do campo magnético girante corresponde exatamente ao deslocamento temporal das correntes da fonte.

O enrolamento da Fig. 17 produziu dois pólos utilizando 3 bobinas para um enrolamento trifásico com 6 ranhuras / (3 fases x 2 pólos) ou uma ranhura por pólo por fase. Essa é uma configuração mínima com uma única bobina por fase do enrolamento, com abertura ou passo de 180° . Se existirem minimamente duas bobinas em cada fase deslocadas de 180° e com abertura ou passo de 90° , as correntes formariam um campo de 4 pólos. Logo, vemos que:

$$n = p$$

Onde:

p = números de pares de pólos

n = número mínimo de bobinas por fase

A velocidade do campo magnético girante varia diretamente com a frequência, mas inversamente ao número de pólos. Sendo assim, seguindo a equação já mostrada ($N_s = \frac{120f}{2P}$) a velocidade do campo girante de qualquer máquina de indução pode ser obtida através do número de pólos e frequência, considerando uma frequência de 60 Hz na fonte trifásica, obtemos:

Número de pólos	2	4	6	8
$n = p$	1	2	3	4
N_s (velocidade síncrona) [rpm]	3600	1800	1200	900

Tabela 1 - Número de pólos, p e velocidade síncrona com uma rede de 60 Hz

A Fig. 17 a seguir mostra uma ilustração de um estator com um $p = 1$, logo 2 pólos e $p = 2$, logo 4 pólos. A Fig. (a) possuí um passo elétrico de π rad e a Fig. 17 (b) possui um passo elétrico de $\pi/2$ rad, a velocidade síncrona dada por (CHABU, 2012):

$$\omega_s = \omega/p = 2\pi f/p$$

Onde:

ω_s = rotação angular síncrona [rad/s]

ω = frequência angular das correntes

p = número de pares de pólos

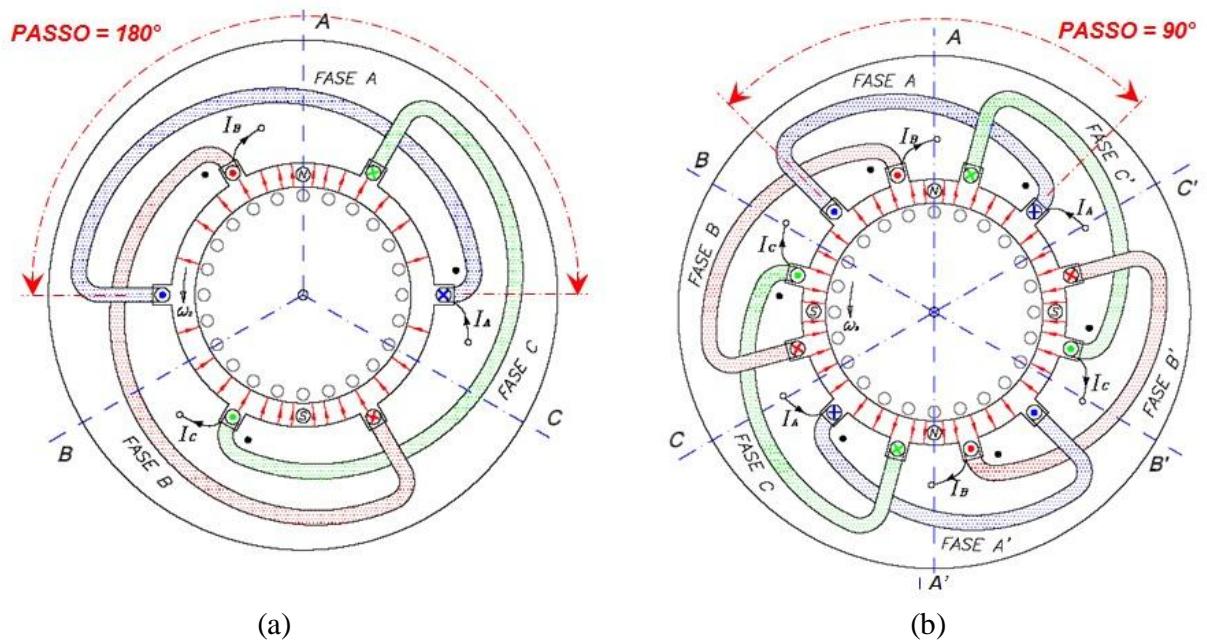


Fig. 17 – Duplicação das bobinas ao longo do entreferro (pólos): Estator (a) $n = 1$, $2p = 2$ pólos, 3600 rpm - 1 rotação a cada ciclo de corrente. Estator (b) $n = 2$, $2p = 4$ pólos, 1800 rpm - 1/2 rotação a cada ciclo de corrente. (Fonte: CHABU, 2012).

3.3. FUNCIONAMENTO DA MÁQUINA DE INDUÇÃO

(FITZGERALD, 2006)

Supondo um rotor girando a uma velocidade n no mesmo sentido do campo girante induzido por um estator a velocidade síncrona n_s , a diferença entre a velocidade do campo girante e a velocidade do rotor é denominada escorregamento absoluto, logo o escorregamento do rotor é $(n_s - n)$ medido em rpm. O escorregamento relativo, ou simplesmente escorregamento, é geralmente expresso com uma fração da velocidade síncrona.

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

A velocidade do rotor em rpm pode ser expressa em termos do escorregamento, logo:

$$n = (1 - s)n_s$$

Logo a velocidade mecânica pode ser expressa em termos da velocidade síncrona:

$$\omega_m = (1 - s)\omega_s$$

O fluxo girante do entreferro induz tensões no rotor com a frequência de escorregamento nos enrolamentos do rotor. As correntes do rotor são determinadas pela magnitude da tensão induzida pelo estator e pela impedância do rotor, representada na frequência de escorregamento.

Na partida o rotor está parado, logo, $n = 0$, escorregamento é 1, a frequência do rotor é igual a frequência da tensão do estator. Logo, o campo produzido pelas correntes do rotor gira com a mesma velocidade que o campo do estator, resultando num conjugado de partida que atua no rotor no sentido da rotação do campo do estator. Se este conjugado for suficiente para vencer a inércia e da carga do eixo, então o rotor atingirá sua velocidade de operação, no entanto, as velocidades do rotor e do campo girante do estator não podem se igualar, pois se isso acontecesse os condutores do rotor estariam estacionários em relação ao

campo do estator, não haveria indução e, consequentemente, não haveria conjugado. Como tais campos giram de forma sincronizada, o conjugado que existe no intervalo de velocidades do motor que seja diferente da velocidade síncrona é chamado *conjugado assíncrono*.

3.4. CARACTERÍSTICA ELÉTRICA E MODOS DE OPERAÇÃO DA MÁQUINA DE INDUÇÃO

(SAY, 1976)

Vamos considerar uma máquina de indução ideal de 2 pólos operando em três regiões: a região de motor onde o escorregamento s está entre 0 e 1, está motorizando uma carga; funcionando como gerador em que o escorregamento é menor que 0, ele está sendo motorizado e, portanto, gerando potência e tensão em seus terminais (objetivo do estudo); temos também a região de freio, onde s é maior que 1, contudo, não nos atentaremos a esse modo, visto que nosso enfoque é a operação em modo motor ou gerador.

Através das ilustrações e conceitos vistos nas seções anteriores, pudemos visualizar a ação da indução de campo do estator no rotor. Como o rotor está curto-circuitado em si mesmo sem conexões externas, a corrente está sendo induzida através do campo rotativo estabelecido no entreferro (air gap) entre estator e rotor. O estator é responsável por manter a magnetização constante, a tensão V_1 no estator é balanceada pela f.e.m. E_1 induzida por um fluxo Φ_m . Quando o rotor se encontra em repouso, é induzida no mesmo uma tensão $E_1 = E_2$, e, quando há escorregamento, tal tensão se atenua $E_1 = sE_2$ e o rotor começa a produzir velocidade e torque. As correntes do rotor precisam ser contrabalanceadas por uma corrente oposta no estator $I_1 = -I_2$ para manter o equilíbrio e o fluxo Φ_m , situação representada abaixo no diagrama fasorial da Fig. 18.

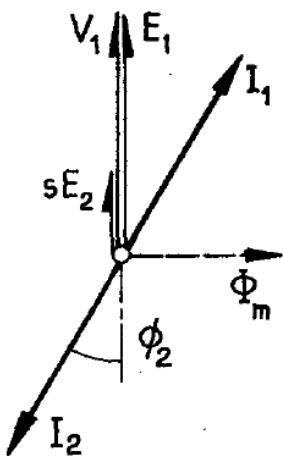


Fig. 18 – Diagrama de fases da máquina de indução ideal (Fonte: SAY, 1976)

Para qualquer s , a corrente do rotor será determinada pela f.e.m. induzida sE_2 e sua impedância apropriada sendo $Z_{2s} = (r_2 + sjX_2)$, de onde a corrente contrabalanceada no estator é dada por:

$$I_1 = -I_2 = \frac{sE_2}{Zr} = \frac{sE_2}{\sqrt{r_2^2 + sx_2^2}}$$

Com uma defasagem de corrente $\arctg(sx_2/r_2)$, o circuito equivalente da expressão acima é mostrado na Fig. 19:

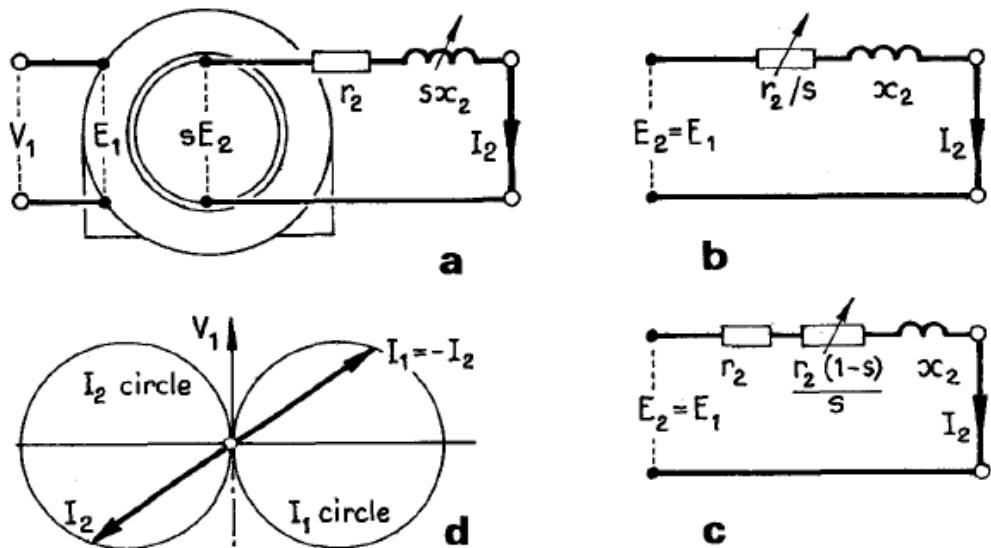


Fig. 19 - Máquina de indução ideal - circuito do rotor

Na Fig. 19 (a) o circuito mostra a tensão induzida E_1 e a tensão induzida sE_2 , a resistência e a reatância do rotor, a qual varia conforme o escorregamento s . Contudo, as condições são diferentes em (a) e (b), pois em (a) temos r_2 e em (b) temos (r_2s) , diferença importante e que pode ser explicada dividindo r_2 em componentes em série como em (c), visto que a r_2 em sua primeira resistência nos dá as perdas no rotor I^2r e a última resistência $r_2(s-1)/s$ nos dá a quantidade de potência que deve ser convertida em *potência mecânica*.

Com uma tensão $E_1 = E_2 = 100\text{V}$ e uma impedância no rotor de $r_2 = 0,1 \text{ Ohm}$ e $x_2 = 0,5 \text{ Ohm}$ e um escorregamento de $s = 0,05$, temos $r_2s = 2 \text{ Ohm}$ e $I_1 = 48 \text{ A}$ defasada de E_1 por $\arctan(x_2/r_2) = (0,5/2) = 14^\circ$. Todavia, se o escorregamento for negativo (máquina de indução sendo movimentada por um torque mecânico no eixo acima da velocidade síncrona) com $s = -0,05$ temos a mesma corrente de 48 A, contudo, o ângulo de fase é $\phi_2 = 166^\circ$, isto é, a componente de potência ativa **muda de sentido** e a máquina de indução está entregando potência nos terminais como um **gerador**, obviamente com o estator conectado a uma rede trifásica. Este é o princípio do uso da máquina de indução na **região de gerador**, girar o rotor a uma velocidade hipersíncrona.

A potência ativa no estator pode ser dada pela seguinte equação:

$$P_1 = V_1 I_1 \cos(\phi_2) = E_1(-I_2) \cos(\phi_2) = P_2$$

E pode ser convertida para a seguinte forma mecânica:

$$P_m = (1 - s) P_2$$

O torque é proporcional à potência do rotor sem considerar o escorregamento, P_2 pode ser tida como o torque em rotação síncrona, ω_1 e é dado por:

$$M = \frac{Pm}{\omega_R} = P_2 \frac{(1 - s)}{\omega_1(1 - s)} = (P_2/\omega_1)$$

O torque obtido através de quantidades do rotor e escorregamento pode ser dado através de:

$$M = \left(\frac{1}{w_1} \right) (sE_2^2 r_2) / (r_2^2 + sx_2^2) = \frac{s\alpha}{(s^2 + \alpha^2)} K$$

Em que:

$$K = \frac{E^2}{W_1 X_2} \rightarrow \alpha = \frac{r_2}{X_2}$$

Para uma máquina de indução ideal, o torque varia de acordo com escorregamento e a razão de sua resistência e sua reatância equivalente. A equação acima mostra que para uma condição de máximo torque ($s^2 = \alpha^2$) .

$$M_{max} = \frac{K\alpha^2}{2\alpha^2} = \frac{1}{2}K$$

Sendo para as duas velocidades, acima e abaixo da velocidade síncrona. As relações de torque e escorregamento para 3 valores de $\alpha = r_2/x_2$ são dadas na Fig. 20, onde a reatância x_2 é fixa, mas a resistência pode ser variada. Em todos os casos, o torque máximo é o mesmo, a alteração da resistência somente altera em qual escorregamento s , ele acontece.

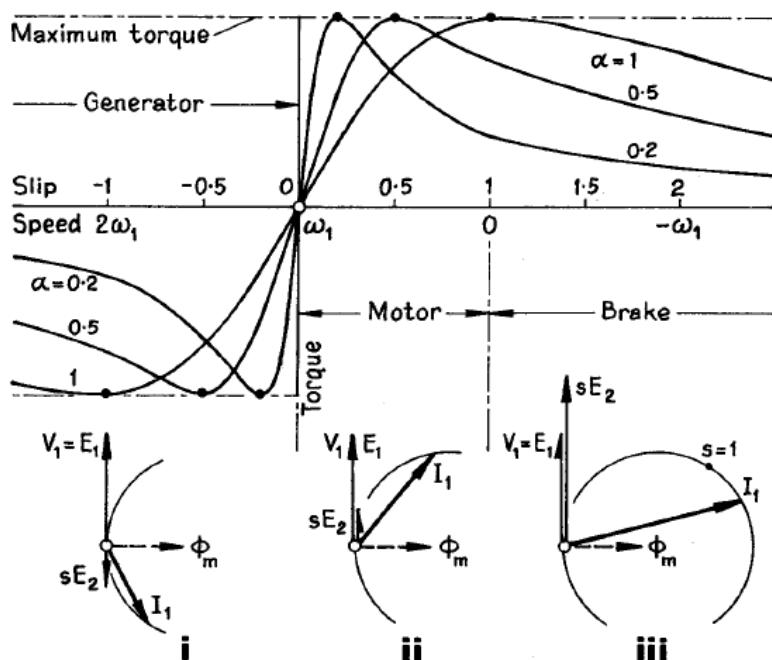


Fig. 20 - relação de torque e escorregamento e diagramas fasoriais – Fonte: (SAY, 1976)

Modo motor:

A máquina opera entre o estado de repouso e de velocidade síncrona (para fluxo constante) com escorregamento positivo entre 0 e 1. Se a máquina rodar sem carga (no-load condition) o escorregamento é muito pequeno e próximo de 0,01 p.u. A f.e.m. do rotor é muito pequena e a impedância do circuito é quase resistiva e existe corrente para devolver torque e desenvolver a rotação. Se uma carga é colocada no eixo, o rotor desacelera, aumentando o escorregamento, a f.e.m. do rotor aumenta em magnitude e frequência, produzindo mais corrente e torque enquanto a reatância permitir. Valores muito grandes de carga resultam em mais torque até o motor entrar em condição de “stall” (conjunto desenvolvido não consegue acelerar o conjunto oposto da carga, o rotor fica então parado).

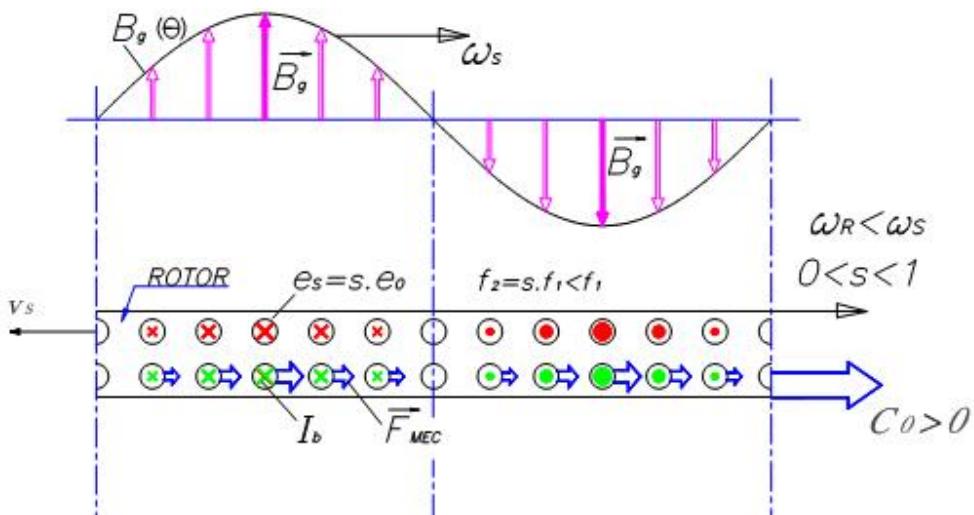


Fig. 21 - Vista do Fluxo, corrente, força e tensão no modo motor - Fonte: (CHABU, 2012)

Modo Gerador:

No grande enfoque do trabalho, o rotor opera em velocidade hipersíncrona, e o escorregamento é negativo e geralmente pequeno, então as f.e.m. do rotor e suas correntes tendem a disponibilizar potência nos terminais do motor, obviamente como já mencionado o estator deve estar ligado à alimentação trifásica para que possa haver magnetização. Logo, apenas girar o eixo da máquina de indução não resultará tensão nos terminais se este não estiver magnetizado. A Fig. 23 a seguir mostra as relações, escorregamento, torque e velocidade da máquina de indução:

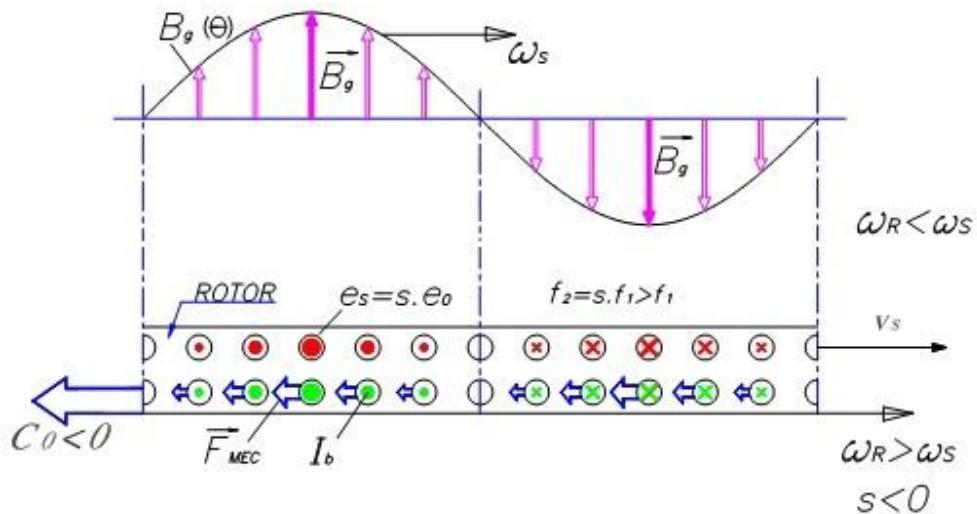


Fig. 22 - Vista do Fluxo, corrente, força e tensão no modo gerador (Fonte: CHABU, 2012)

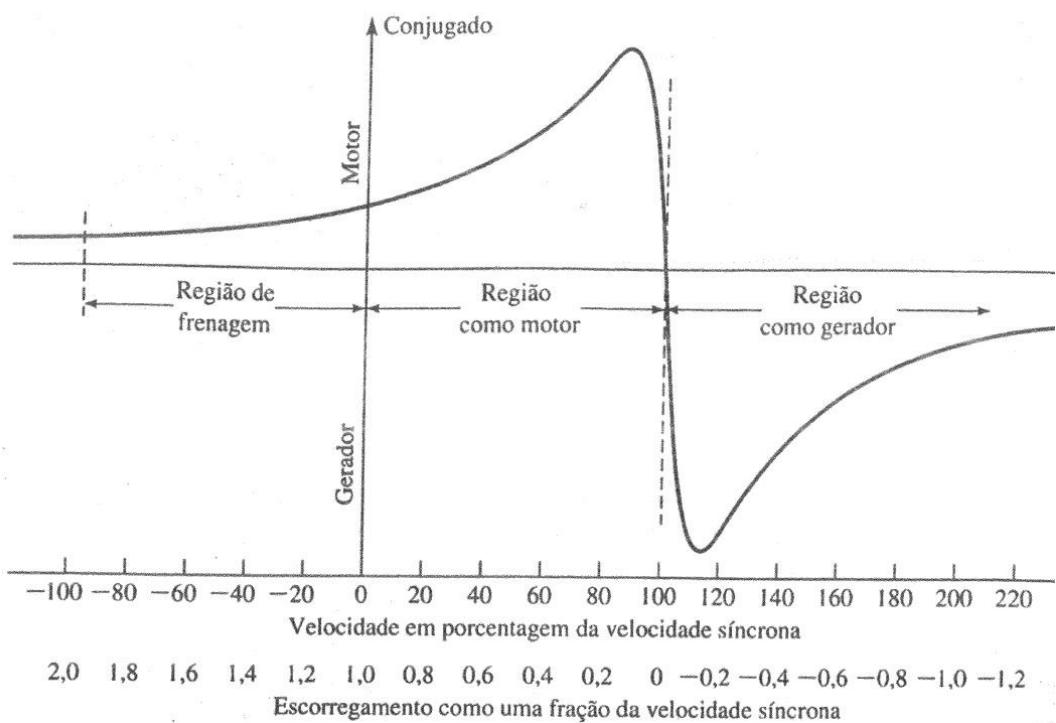


Fig. 23 - Curva torque e velocidade nas regiões da máquina de indução - Fonte: (FITZGERALD, 2006)

A regeneração é inerente à máquina de indução, seu uso não se limita ao uso de conversores regenerativos, contudo, com inversores de frequência com essa função, o controle sobre a energia regenerada é possível de forma fácil e passível de leitura pelo próprio equipamento. Como visto, as aplicações que mais nos

servirão de utilidade para uso da energia de regeneração são aplicações com alta inércia. Um exemplo é um acionamento de centrífuga, utilizada em processo de usinas sucroalcooleiras.

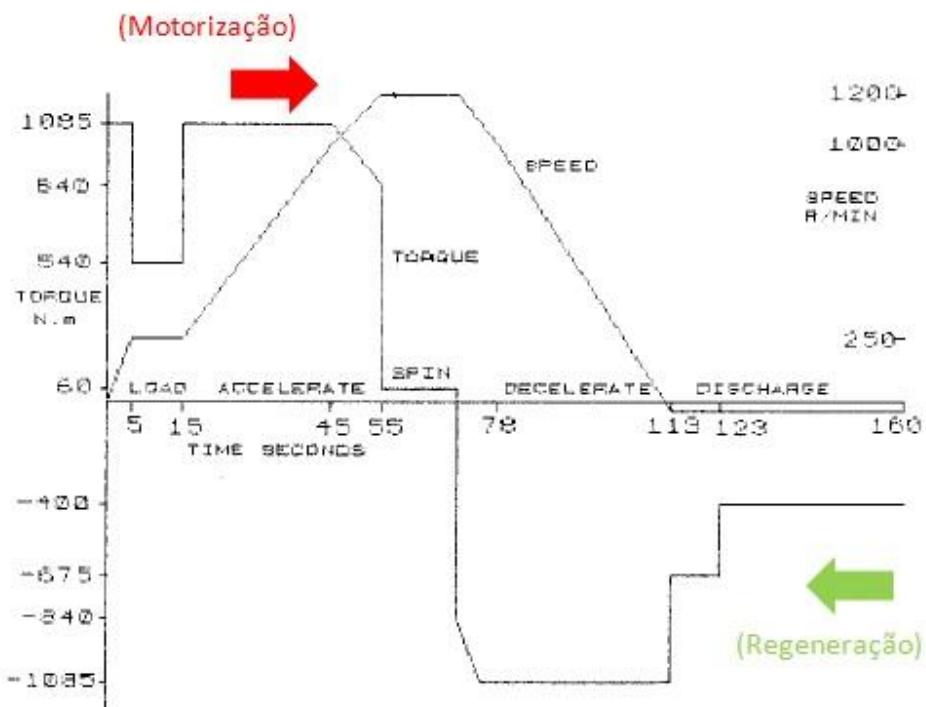


Fig. 24 – Perfil de velocidade de uma centrifuga de açúcar - Fonte: (RICHARD H. OSMAN, 1991)

4. TEORIA E USO DE CONVERSORES DE FREQUÊNCIA

(BOSE, 2006)

A economia de energia é certamente um dos maiores benefícios propiciados pela eletrônica de potência e o mais importante objetivo das aplicações com conversores de frequência além de suas aplicações dinâmicas. O uso de controles por chaveamento de frequência são altamente eficientes se comparados a controles reostáticos, visto que no último, a energia é dissipada em forma de calor por meio de resistências.

Apresentamos na introdução o percentual de energia no Brasil gasto com motores, com a utilização de conversores de frequência, diminuímos o regime dos motores e portanto a potência demandada. Podemos listar abaixo alguns pontos sobre o uso de conversores de frequência em acionamentos:

- O controle por chaveamento de frequência é mais eficiente que o controle reostático.
- Aproximadamente 60% a 65% da energia gerada é consumida por máquinas elétricas, principalmente bombas e ventiladores.
- O controle com variação de velocidade melhora em até 30% controles de fluxo em baixa carga.
- O controle por variação de velocidade em ar-condicionados e bombas pode economizar até 30% de energia.

Os conversores de frequência podem ser classificados em quatro gerações, desde sua concepção na eletrônica de potência de estado sólido:

Primeira geração (1958 – 1975) – A era do Tiristor:

- ✓ Diodo
- ✓ Tiristor
- ✓ Triac

Segunda geração (1975-1985):

- ✓ TJB de potência
- ✓ MOSFET de potência
- ✓ GTO
- ✓ Microprocessadores
- ✓ ASIC (Application Specified Integrated Circuit)
- ✓ PIC

Terceira geração (1985–1996):

- ✓ IGBT
- ✓ Módulos inteligentes de potência – cartões IPM
- ✓ DSPs
- ✓ Controle avançado

Quarta geração (1995 -):

- ✓ IGCT
- ✓ Cool MOS
- ✓ PEBB
- ✓ Controle sem sensor
- ✓ Lógica Fuzzy, Redes neurais e algoritimos genéticos

No nosso estudo, abordaremos o uso de inversores de terceira geração com IGBTs, controle vetorial sem sensor e controles avançados de inversores VSI (Voltage Source Inverters), com retificadores e inversores em PWM.

4.1. GENERALIDADES SOBRE CONVERSORES AC/AC COM CIRCUITO INTERMEDIÁRIO

(DRURY, 2001)

A categoria dos acionamentos A.C., conhecidos como inversores de frequência é certamente a mais importante nas aplicações industriais. Consideramos o conversor completo (retificador, link C.C. e inversor).

Neste estudo, falaremos dos inversores de tensão VSI (Voltage Source inverters), um inversor de tensão que aplica uma tensão à máquina de indução e suas impedâncias determinam a corrente.

Os inversores de tensão requerem uma fonte A.C. numa frequência fixa antes de seus estágios de retificação. Ao retificar a tensão A.C. da entrada, o circuito intermediário C.C. é então carregado com tensão C.C. em seus capacitores, formando um *buffer* de tensão, a partir do qual as chaves eletrônicas, como por exemplo IGBTs, serão comandados sintetizando valores médios de tensão e frequência. Na saída do estágio inversor são aplicados os enrolamentos da máquina de indução como mostra a Fig. 25.

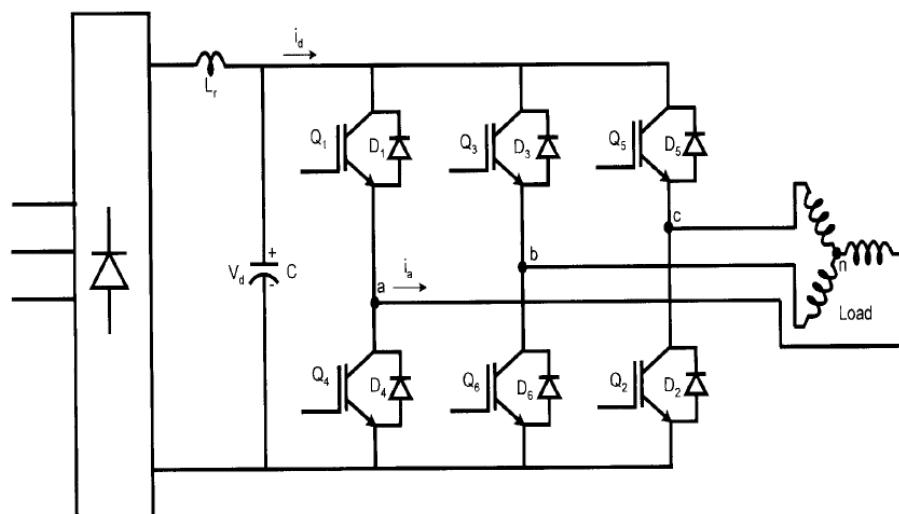


Fig. 25 - Esquema de um conversor: retificador, Link C.C. e parte inversora com IGBTs - Fonte: (BOSE, 2002)

As maiores aplicações deste tipo de conversor incluem:

- Cargas multimotor – inversores podem ser usados para alimentar vários motores ligados em paralelo, importantes em mesas de rolos para siderurgia, máquinas girantes e aplicações onde apenas a velocidade é importante, seu uso com controles apurados como controle vetorial não é aplicável.
- A inversão não depende da máquina de indução, logo, várias máquinas (indução, síncronas e até mesmo relutância) podem ser usadas contanto que a corrente drenada esteja nos limites do inversor.
- Proteção de circuito aberto inerente, muito útil em aplicações onde o cabeamento entre inversor e motor são de certa forma perigosos, o conversor desliga quando existe uma abertura no circuito.
- Facilidade de operar em depressões de tensão, por causa do *buffer* de tensão do circuito intermediário C.C. as oscilações de tensão na entrada não são sentidas pelas máquinas de indução.
- A operação em ambos os modos de máquina de indução: modo motor e modo gerador só é possível com a adição de resistores de frenagem ou de conversores regenerativos (que devolvem a energia que seria dissipada para a rede). Dinamicamente, muitas aplicações requerem rampas curtas de desaceleração, os quais fazem a máquina de indução entrar na região de gerador de forma transitória, geralmente dissipados em resistências de frenagem, visto que sua viabilidade econômica para um conversor regenerativo é baixa.

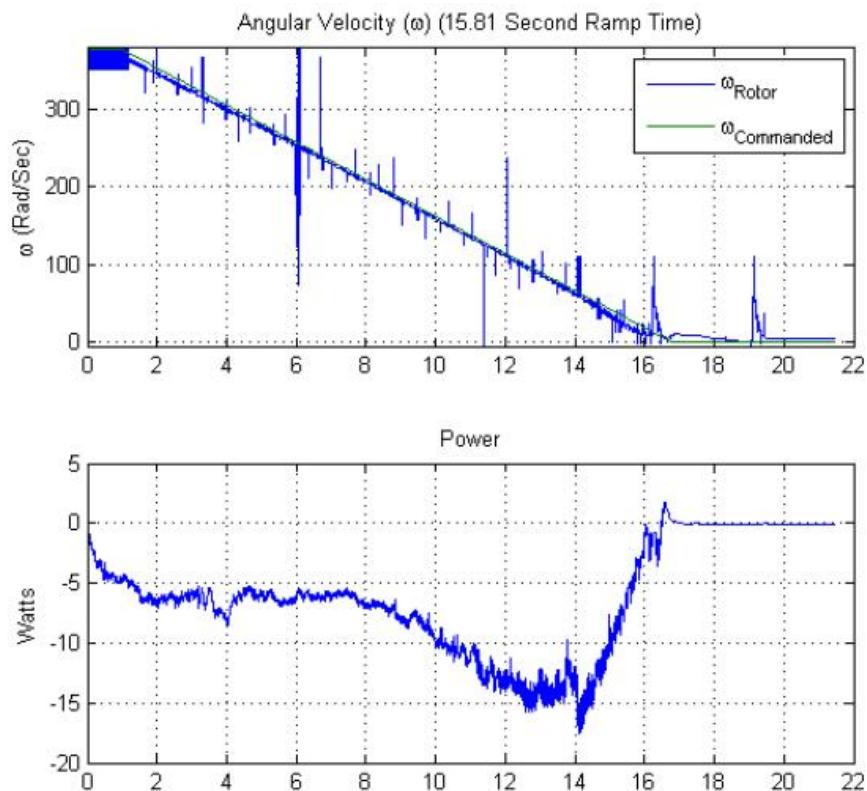


Fig. 26 – Simulação de regeneração transitória - potência negativa e rampa de desaceleração íngreme

Fonte: (NYTKO, 2000)

(BOSE, 2006)

O circuito de inversão consiste de uma ponte inversora de três fases, que são mutuamente deslocadas em um ângulo de $2\pi/3$ para gerar formas de onda de tensão em três fases.

As características de chaveamento de um inversor (*six-step inverter*) podem ser vistas na Fig. 27. O estado de condução dos componentes Q_n podem ser visualizados conduzindo em (g) a forma de onda de tensão em função de V_d (tensão C.C.) e a corrente resultante.

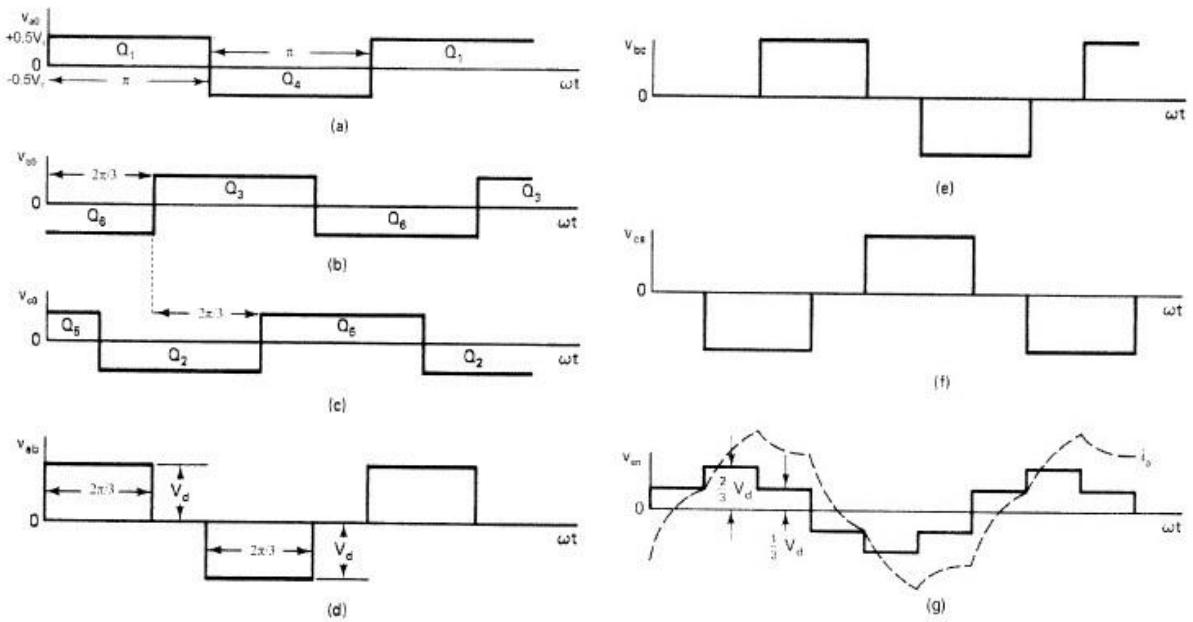


Fig. 27 - Síntese do inversor

Vantagens deste tipo de inverter:

- Alta eficiência, cerca de 98% em sua frequência nominal em altas potências.
- O inverter pode atuar com a potência ativa nos dois sentidos, tanto motorizando quanto regenerando para o Link C.C.

Desvantagens:

- Baixo fator de potência para a rede A.C. em baixas rotações, o filtro do capacitor DC é alto e reduz o tempo de resposta do sistema devido à mudança de velocidade (tiristores). Em pontes a diodos este efeito é nulo.
- Para a **regeneração é necessário um retificador de dois quadrantes**. O inverter com retificador unidirecional visto até agora **não pode devolver potência ativa à rede**. Resistores de frenagem são então usados para dissipar a energia da regeneração, veremos a seguir o retificador necessário para a regeneração, encontrado nos conversores regenerativos.

Algumas destas desvantagens foram eliminadas com a modulação por largura de pulso e seus tipos de modulação como SVM, onde o chaveamento devido ao uso de IGBTs é mais rápido, e dada tamanha velocidade de chavamento (de 2 a 18Khz) algoritímos puderam ser desenvolvidos para melhor controle e resposta dos sistemas.

4.1.1. INVERSORES COM PWM (PULSE WIDTH MODULATION)

(DRURY, 2001)

Num inversor com modulação PWM, a tensão do link C.C. é fornecida por uma ponte retificadora de diodos, o estágio de inversão pode então ser controlado com técnicas de modulação de largura de pulso.

A tensão de saída então pode ser controlada eletronicamente e os tiristores, GTOs ou IGBTs podem ser chaveados rapidamente com suas frequências inerentes, dentro de um ciclo para gerar a tensão de saída, a qual é normalmente de baixo conteúdo harmônico.

Usando o PWM, as pulsações de baixo torque são virtualmente eliminadas já que componentes de baixa ordem harmônica são desconsiderados, logo, torna-se a solução perfeita para cargas num amplo intervalo de velocidades (inclusive baixas velocidades).

Já que a frequência e tensão são controladas com o PWM, respostas rápidas a uma oscilação seja na frequência ou tensão são obtidas, além do mais, com uma ponte retificadora de diodos, o circuito de entrada tem seu fator de potência próximo à unidade, o que tem relação direta com a **eficiência da energia** usada da rede.

Os inversores PWM são altamente eficientes e podem chegar a 98% de rendimento, contudo, este número está diretamente relacionado à escolha da *frequência de chaveamento*, quanto maior a frequência de chaveamento, maiores as perdas no acionamento.

Na prática, esta frequência está restrita ao tipo de semicondutor usado: 100Hz para GTOs, cerca de 1Khz para sistemas baseados em transistores e de 2Khz a 18Khz para IGBTs, logo, os IGBTs com maior frequência de chavamento abrem espaço para técnicas de controle de motores com algoritmos de modelamento, as quais aumentam a resposta dinâmica e a eficiência do uso do torque como o controle vetorial (VC).

Existem várias técnicas de controle PWM, mas vamos nos ater a SPWM, (Sinusoidal Pulse Width Modulation), que não é a mais usada em controles atuais como a SVM, contudo, seu funcionamento elucida o conceito. A explanação do SVM requer um estudo à parte e pode ser encontrado na bibliografia mencionada.

(BOSE, 2002)

A modulação senoidal pode ser visualizada na Fig. 28, onde uma forma de onda portadora em forma de triângulo isóceles de frequência f_c é comparada com uma frequência fundamental f da modulante senoidal e os pontos de intersecção determinam os momentos de chavamento dos componentes. A análise de Fourier pode ser usada no desenvolvimento desta modulação e pode ser mostrada através da mesma como:

$$V_{ao} = 0,5mV_d \sin(\omega t + \theta) + termos (M\omega_{C_0} \pm N\omega) de alta frequencia$$

Onde m é o índice de modulação, ω é a frequência fundamental em rad/s (a mesma que a frequência de modulação) e a fase θ representa o ângulo da posição do vetor. O índice de modulação m é definido como: $m = V_p/V_T$, onde V_p = valor de pico da modulante e V_T = valor de pico da portadora, de forma ideal, m pode assumir valores de 0 a 1. A saída em PWM contém harmônicos relacionados à frequência da portadora e à frequência modulante das bandas laterais na forma de $M + N = um inteiro par$.

A tabela 2 abaixo mostra alguns harmônicos de saídas e o coeficiente de modulação m . É importante entender o PWM e suas implicações harmônicas, pois assim como na motorização via inversor o mesmo ocorre quando a tensão é modulada para a rede, na região de gerador, o qual implica diretamente na qualidade de energia.

Quando os componentes harmônicos estão entre o inversor e motor podem causar perdas expressivas na isolamento do enrolamento da máquina de indução. Quando no modo gerador podem causar influências na qualidade de energia e, consequentemente, no fator de potência geral da rede.

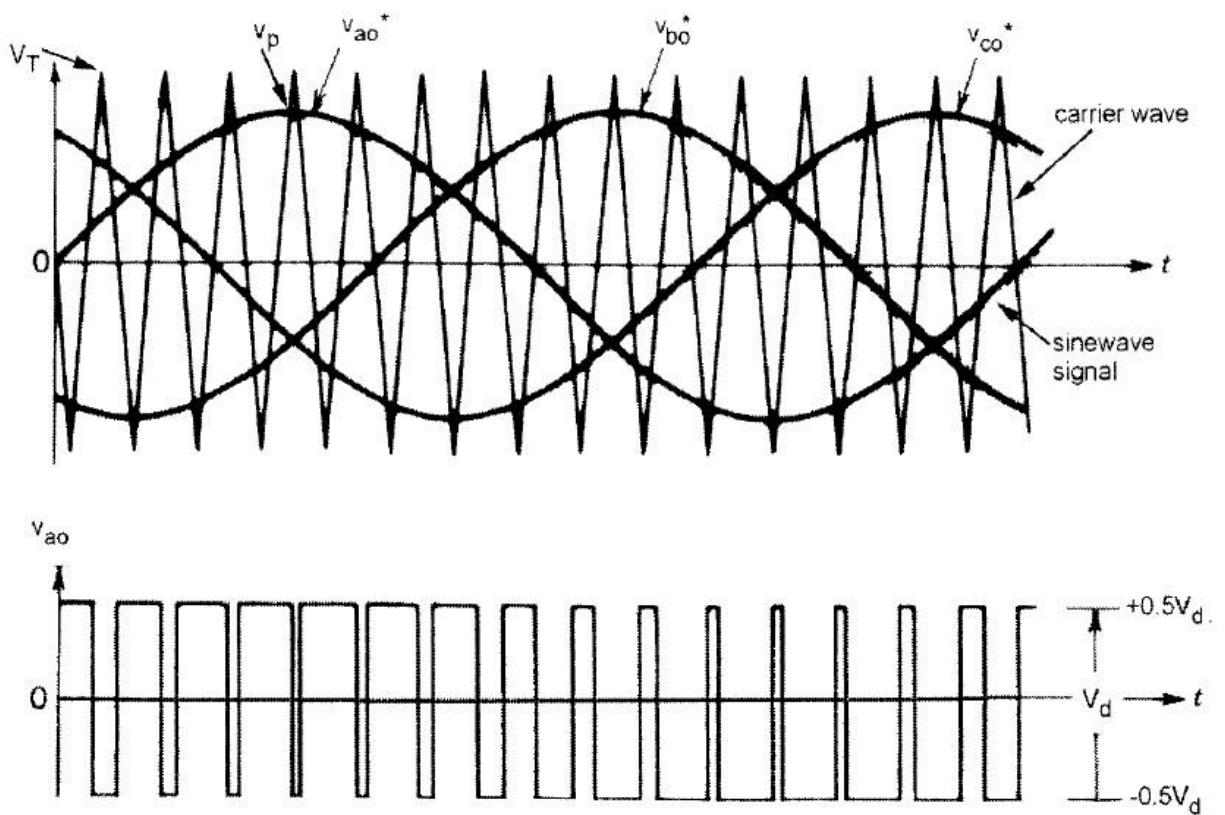


Fig. 28 - Príncipio do PWM senoidal num inversor de três fases – Fonte: (BOSE, 2002)

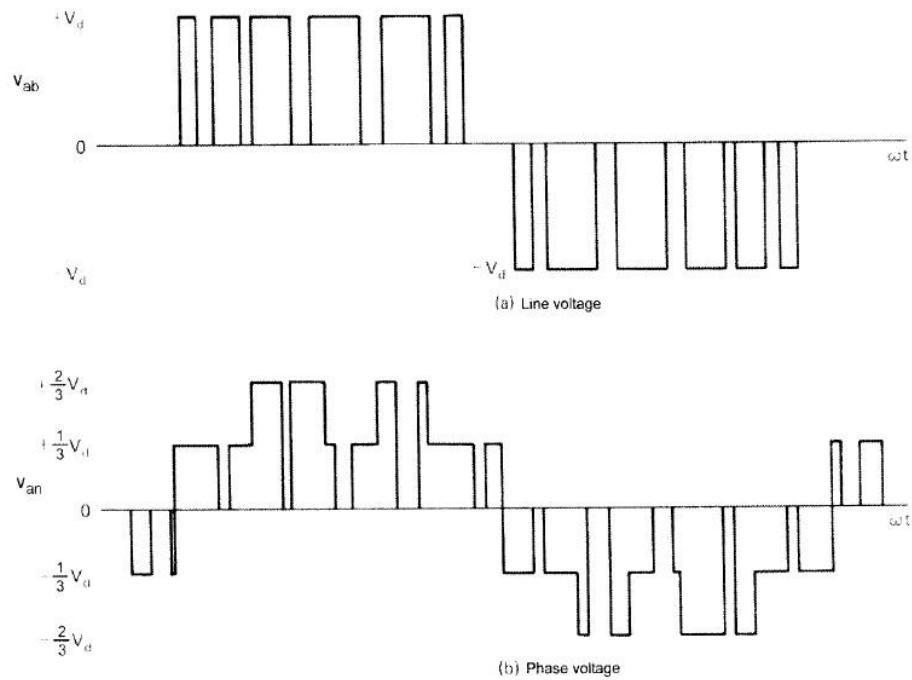


Fig. 29 - Formas de ondas de fase e de linha do inversor PWM

Modulação (m)	Harmônicos ($\omega_{carrier}/\omega = 15$)
1	15ω $15\omega \pm 2\omega$ $15\omega \pm 4\omega$
2	$30\omega \pm \omega$ $30\omega \pm 3\omega$ $30\omega \pm 5\omega$
3	45ω $45\omega \pm 2\omega$ $45\omega \pm 4\omega$

Tabela 2 - Família de harmônicos para PWM Senoidal

4.1.2. CONVERSOR PWM COMO RETIFICADOR DE LINHA

(BOSE, 2002)

Um inversor PWM também pode ser operado como um retificador PWM, a potência A.C. no lado da máquina de indução pode ser convertida em C.C. e então uma unidade retificadora com o mesmo princípio pode ser conectada para agir como um inversor em PWM direcionando a potência gerada pela máquina de indução para a rede.

Neste caso, o retificador será usado como um inversor (que inverte para a rede). Usado como retificador ou inversor seu controle deve manter a tensão C.C. (Link C.C.) V_d constante e dentro dos limites do conversor, a tensão no link C.C. conterá um *ripple* de 120Hz, o qual é reduzido por um capacitor, que além de armazenar a tensão V_d , age como filtro. A Fig. 30, mostra um esquema do circuito retificador PWM, link C.C. e inversor em uma fase.

O retificador PWM basicamente opera como um *boost chopper* com tensão A.C. na entrada, mas C.C. na saída, mantendo a corrente senoidal de linha, como mostrado a tensão V_d sempre deve ser maior para que tensão de pico ($V_d > \sqrt{2V_s}$).

O princípio do retificador PWM para corrente de linha senoidal em fator de potência unitário é mostrado na parte inferior da Fig. 32. O controle V_d^* é comparado com o valor atual de V_d e o sinal de erro passa por um controlador PI e é multiplicado com a onda da tensão de linha V_s para gerar a corrente de comando I_s^* . A corrente de linha do retificador I_s pode ser controlada pelo método PWM da histerese de banda e a corrente atual segue então a corrente de comando.

A tensão V_c é basicamente uma tensão em PWM fabricada da tensão do link C.C. V_d (similar ao inversor), e a indutância L ajuda a suavizar a corrente de linha. A magnitude e fase da componente fundamental V_c podem ser controladas pelo retificador. Para V_s e I_s serem co-fasais, a tensão V_c tem que ser maior e deslocada em fase para satisfazer o diagrama da Fig. 32.

Com frequências de chaveamento maiores, o valor de L e da respectiva queda reativa $I_s X_L$ pode ser diminuída para que o fasor V_C se aproxime de V_s , havendo assim fator de potência próximo ao unitário em modo regenerativo.

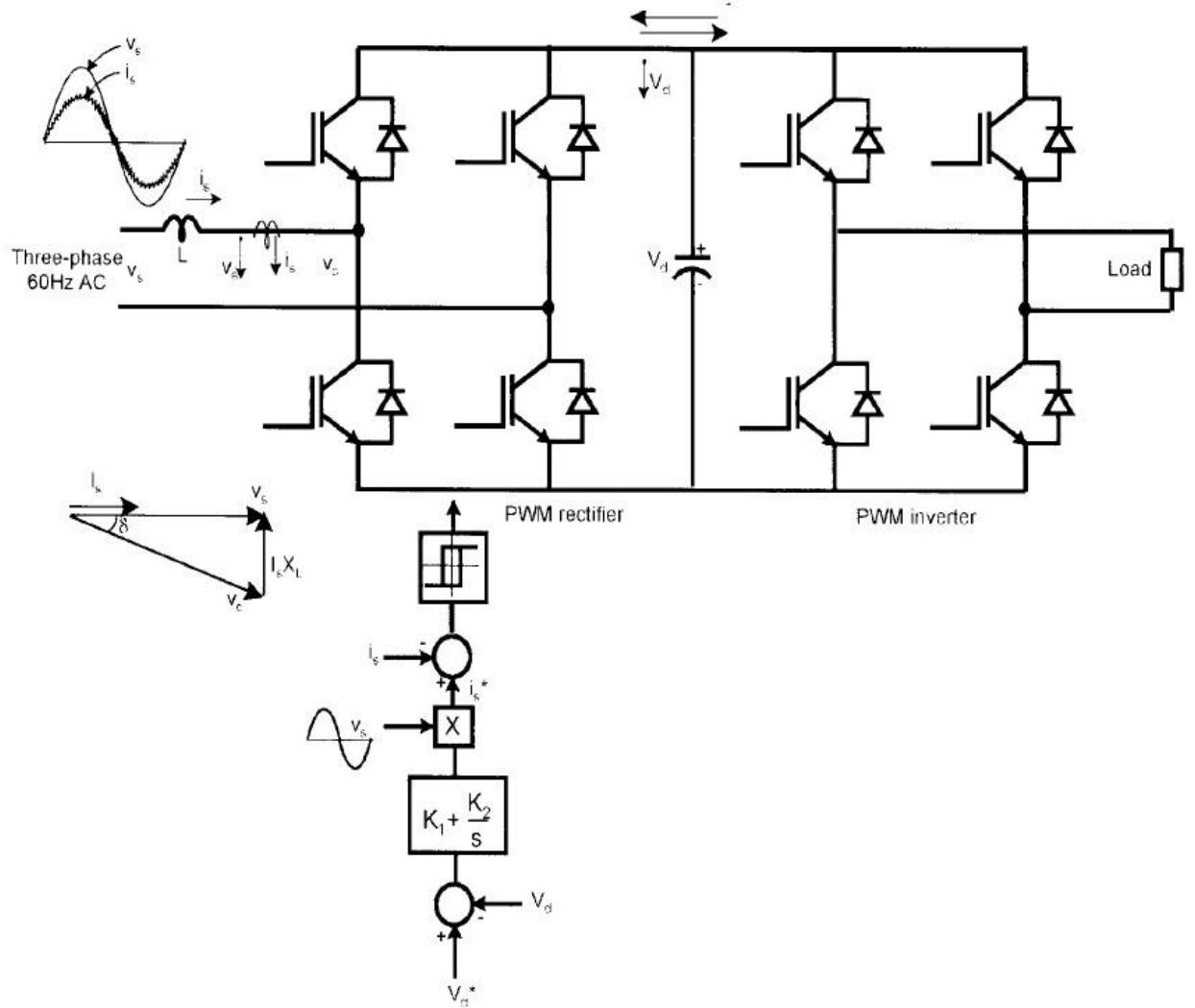


Fig. 30 - Conversor PWM de dois lados - inversor e retificador – Fonte: (BOSE, 2002)

O princípio do retificador PWM monofásico acima pode ser estendido para o trifásico, a Fig. 31 mostra um conversor PWM de dois lados para uma aplicação com motor usando três fases e conversores de dois níveis. Esta configuração, foco de nosso presente estudo, é extremamente importante nas aplicações industriais e suas características essenciais podem ser resumidas em:

- **Operação em quatro quadrantes** – No **modo motor**, a potência flui para o motor, e o conversor PWM na linha atua apenas como retificador, enquanto o lado da carga opera como um inversor. No **modo regenerativo**, os papéis se invertem, ou seja, o inversor do lado da carga opera como um retificador, enquanto o conversor da linha opera como um inversor.

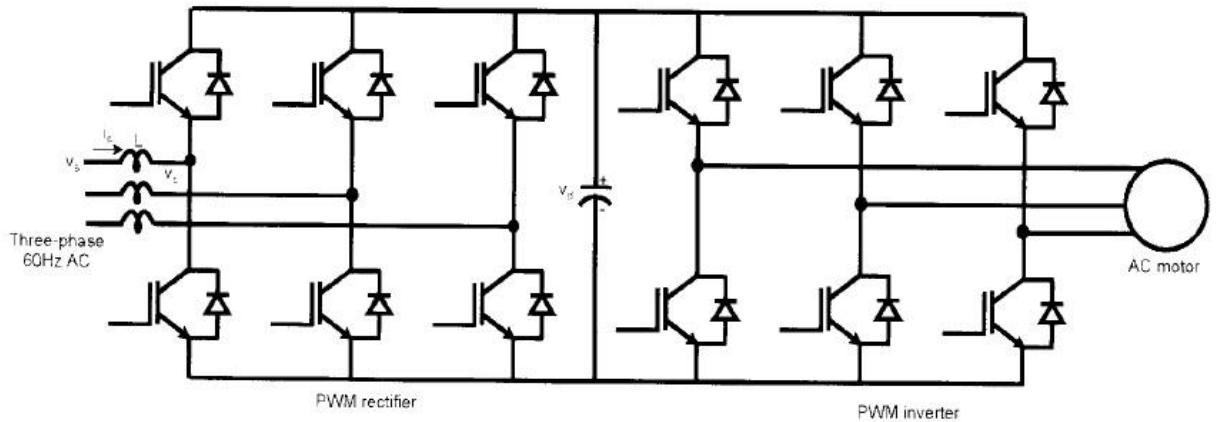


Fig. 31 - Diagrama de operação em 4 quadrantes – Fonte: (BOSE, 2002)

A direção de rotação da máquina de indução será determinada pela sequência de fases no conversor no lado da carga. O sistema pode continuamente regenerar potência se a máquina for um gerador, como nos sistemas de geração eólica.

- **Compensação de elevações na linha** - Como o conversor opera em modo *boost rectifier* para manter a tensão V_d constante independente da tensão de linha, o conversor aumenta a confiabilidade do drive compensando as elevações da linha.
- **Fator de potência programável** – Junto à operação do fator de potência em unidade, como visto acima, o fator de potência pode ser programado para capacitivo ou indutivo (atrasado ou adiantado). Abaixo as expressões de potência ativa ou reativa na linha que são dadas respectivamente:

$$P = 3V_s I_s \cos \varphi$$

$$Q = 3V_S I_S \sin \varphi$$

Onde V_s e I_s são fasores da linha, e φ = ângulo do fator de potência adiantado. Como indicado na Fig. 32, do diagrama de fasores, podemos ter as expressões:

$$V_L = \omega L I_S$$

$$V_L \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) = A = V_C \sin \delta$$

$$V_L \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) = B = V_C (\cos \delta - V_S)$$

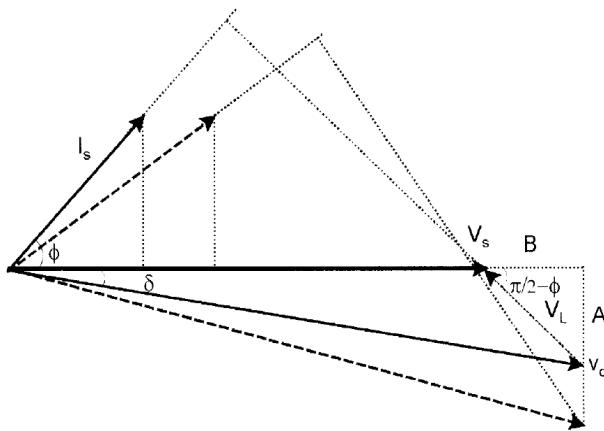


Fig. 32 - Diagrama fasorial com fator de potência adiantado – Fonte: (BOSE, 2002)

Onde L é a indutância do suavizador de corrente de linha, ω = frequência da rede, V_c é o fasor FCEM¹, e δ , o ângulo entre os fasores V_s e V_c . Substituindo temos as seguintes equações:

$$P = \frac{3V_S V_C \sin \delta}{\omega L}$$

$$Q = \frac{3V_S (V_C \cos \delta - V_S)}{\omega L}$$

¹ - Força contra eletromotriz

As equações acima indicam que FCEM V_c e o ângulo δ podem controlar a potência ativa P e a potência reativa Q . Se for necessário manter Q como constante mas variar a potência ativa P . Os fasores $I_S \sin \varphi$ e $V_C \cos \varphi$ devem ficar constantes. Indicados nos vetores pontilhados na Fig. 32.

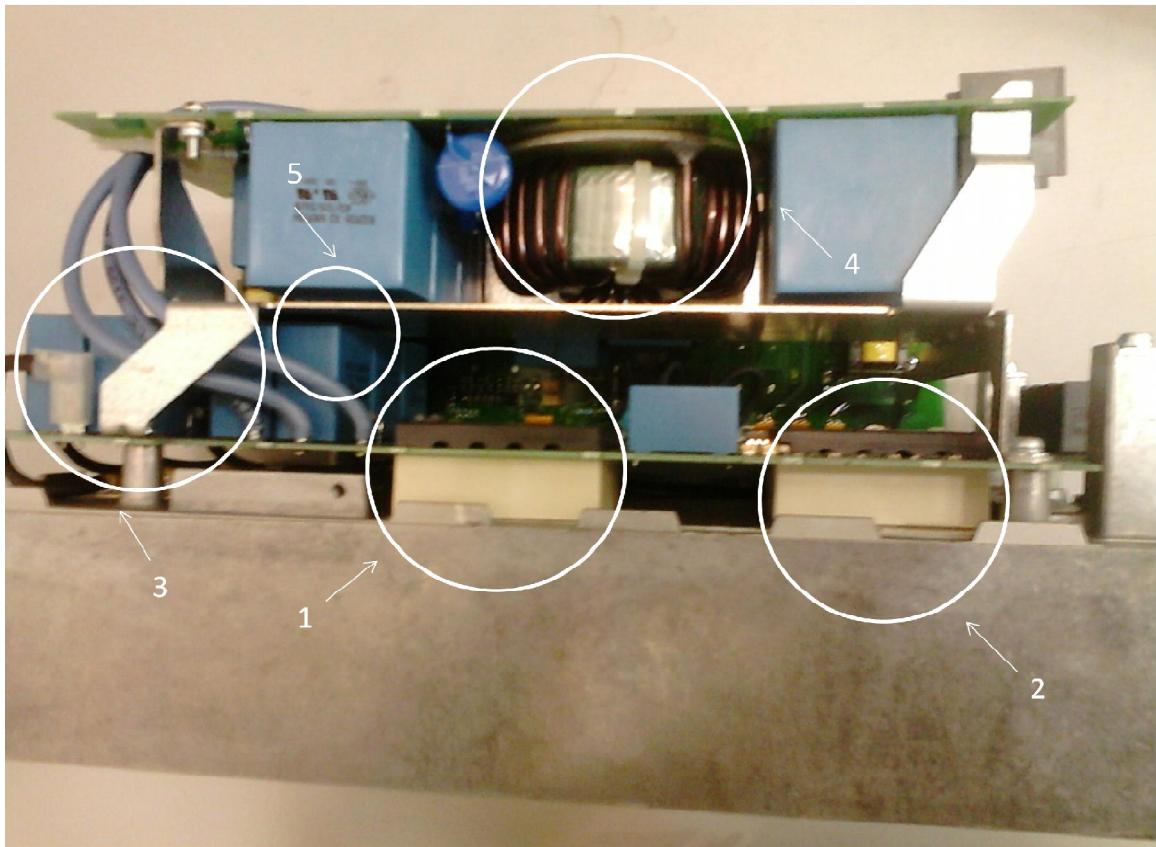


Fig. 33 - Foto de um módulo de potência regenerativo de 7,5 kW – Fonte: Laboratório Siemens

1 - Ponte H (IGBTs e diodos) retificador/inversor para regeneração.

2 - ponte H (IGBTs e diodos) retificador/inversor para motorização.

3 - Link C.C.

4 - Filtro opcional RFI classe A.

5 - Pequeno filtro de corrente para suavização (reatânciā de linha)

Desta forma, o conversor pode controlar o fator de potência para mantê-lo próximo à unidade em modo regenerativo, melhorando a qualidade de energia de rede. Filtros podem ser utilizados na entrada do retificador para diminuir a quantidade de harmônicos na rede. Notemos que a tensão no link C.C. deve ser adequadamente alta para a síntese da onde é gerada em PWM, isso significa que:

$$\sqrt{2} 2V_S \leq 0,5V_d \rightarrow 1,63V_L \leq V_d$$

Onde a tensão de linha $V_L = \sqrt{3} V_S$. Para qualquer saturação do PWM, a corrente de linha será altamente distorcida por **harmônicos de baixa ordem**.

Para média tensão, drives de alta potência, conversores de três níveis podem substituir os conversores de dois níveis. A Fig. 34 mostra um conversor de três níveis com GTOs. Hoje, já possuímos conversor multiníveis com IGBTs de potência que garantem níveis nulos de harmônicos nos drives de média tensão, aplicações regenerativas com conversores de média tensão são raras ao redor do mundo, pois requerem alto nível de engenharia e aplicabilidade, entretanto, novas tecnologias já o trazem como conceito para incorporação na rede, sendo estes denominados *grid compliance medium voltage drives*.

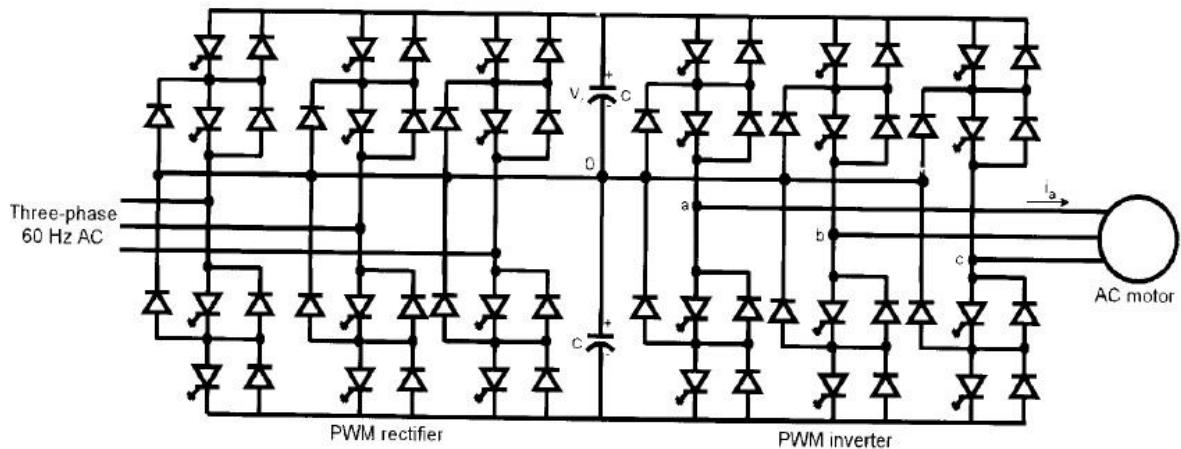


Fig. 34 - Esquema de um conversor regenerativo com GTOs

5. REGENERAÇÃO

(DRURY, 2001)

Os estágios de entrada dos conversores de frequência não regenerativos são geralmente compostos por uma ponte de diodos não controlada, logo, a potência não pode fluir para a rede, nos drives regenerativos existem IGBTs que com o link C.C. conduzem de forma controlada como vimos nos conversores com retificadores PWM de linha no capítulo 4, podemos então classificar os nossos dois tipos de regeneração mais utilizados na indústria:

Conversores Regenerativos AC/AC (Regeneração AC/AC)

Neste tipo de regeneração, os conversores possuem operação em 4 quadrantes AC/AC, a energia vinda da máquina de indução aumenta a tensão do link C.C. que é retificada depois chaveada em A.C. para a rede. Aplicações típicas são cargas de alta inércia, como misturadores (que necessitam de parada rápida), centrífugas, trans-elevadores, virador de carros de minério e pontes rolantes .

Conversores Regenerativos AC/DC (Regeneração AC/DC)

Neste tipo de regeneração, os inversores possuem operação em quatro quadrantes, AC/DC para regeneração e DC/AC para motorização, os inversores estão conectados a um barramento C.C. comum, já denominado link C.C. Quando qualquer um dos inversores tiver a tensão no link C.C. aumentada pela Potência regenerada de uma máquina indução, outro motor usa essa potência abaixando a tensão no link C.C. deixando-a em seus níveis permitidos, neste tipo de regeneração não há necessidade de um retificador inversor (teoricamente) se as cargas tiverem sincronização de consumo de potência do barramento DC comum. Esta forma de regeneração é muito utilizada em máquinas de grande porte, como máquinas de papel, sistemas de trens para transporte urbano,

mineração e qualquer outra com grandes níveis de regeneração, causada por bruscas paradas alternadas em motores diferentes.

A Fig. 35 abaixo mostra uma transição em sobrecarga onde o retificador PWM vai até seu limite de corrente, contudo, o sistema mantém-se estável e a sincronização com a linha é mantida.

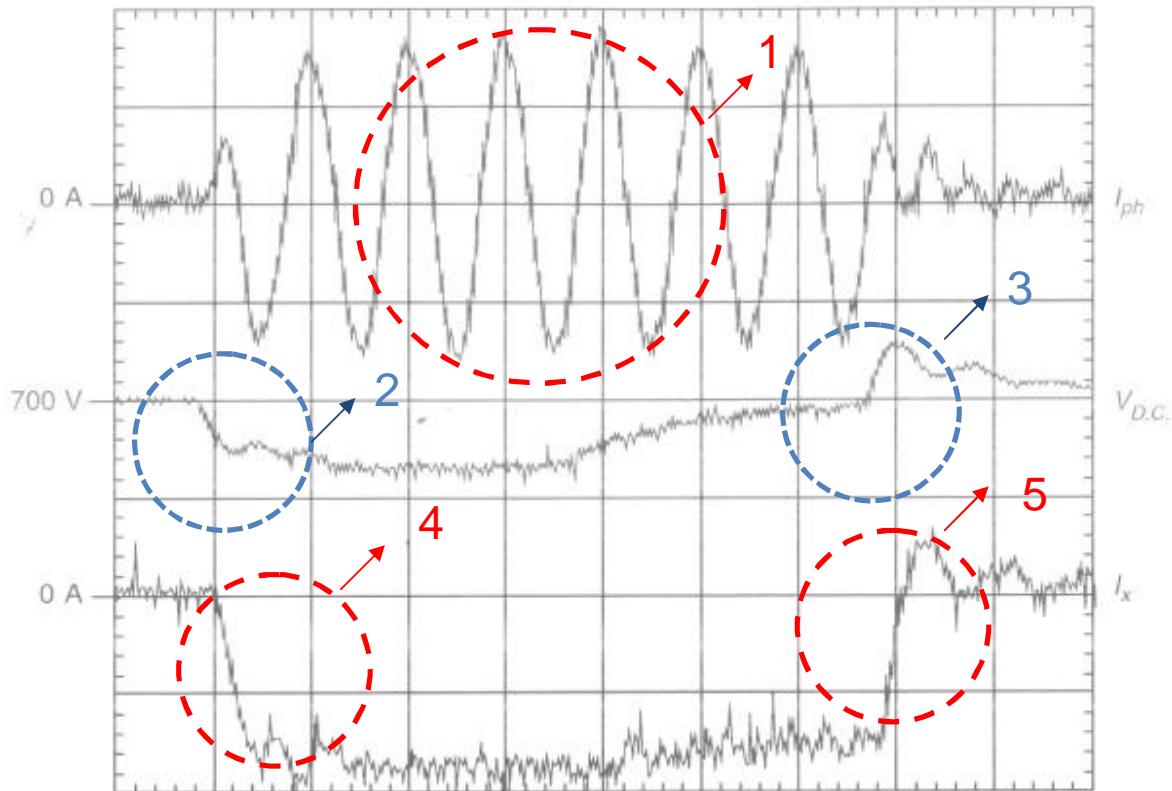


Fig. 35 - Correntes e link C.C. durante regeneração – Fonte: (DRURY, 2001)

A Fig. 35 ilustra através de oscilogramas a regeneração de um conversor AC/AC, em (1) – podemos ver a corrente de fase aumentando, ($I_{ph} = 100$ A/div) enquanto em (2) a tensão do link C.C. ($V_{dc} = 100$ V/div) começa a diminuir e em (4) a corrente do motor ($I_x = 85$ A/div) segue decrescendo. Em (3) a tensão do link C.C. volta ao seu valor normal e também a corrente do motor em (5). Em (1) a corrente flui para a rede, sendo assim possível ser aproveitada pelas demais cargas ou até mesmo para a concessionária.

Formas de onda V_{dc} , I_x e I_y são apresentadas na Fig. 36 e mostram a resposta a um sistema transiente usando um drive de 37kW como um retificador PWM para fornecer outros 37kW alimentando um motor em controle vetorial. O motor tem seu sentido de rotação invertido sem rampas. Pode notar-se que a transição é de rápida resposta (menos de 5ms). Em (1) podemos ver a pequena variação no link C.C. ($V_{dc} = 180V / \text{div}$) e em (2) o sentido do motor sendo mudado, ou seja, indo para zero sem rampa e assumindo outro sentido na corrente I_x ($I_x = 85 A/\text{div}$), indicação da regeneração, essa corrente foi absorvida por outro acionamento motorizando em I_y ($I_y = 85 A/\text{div}$).

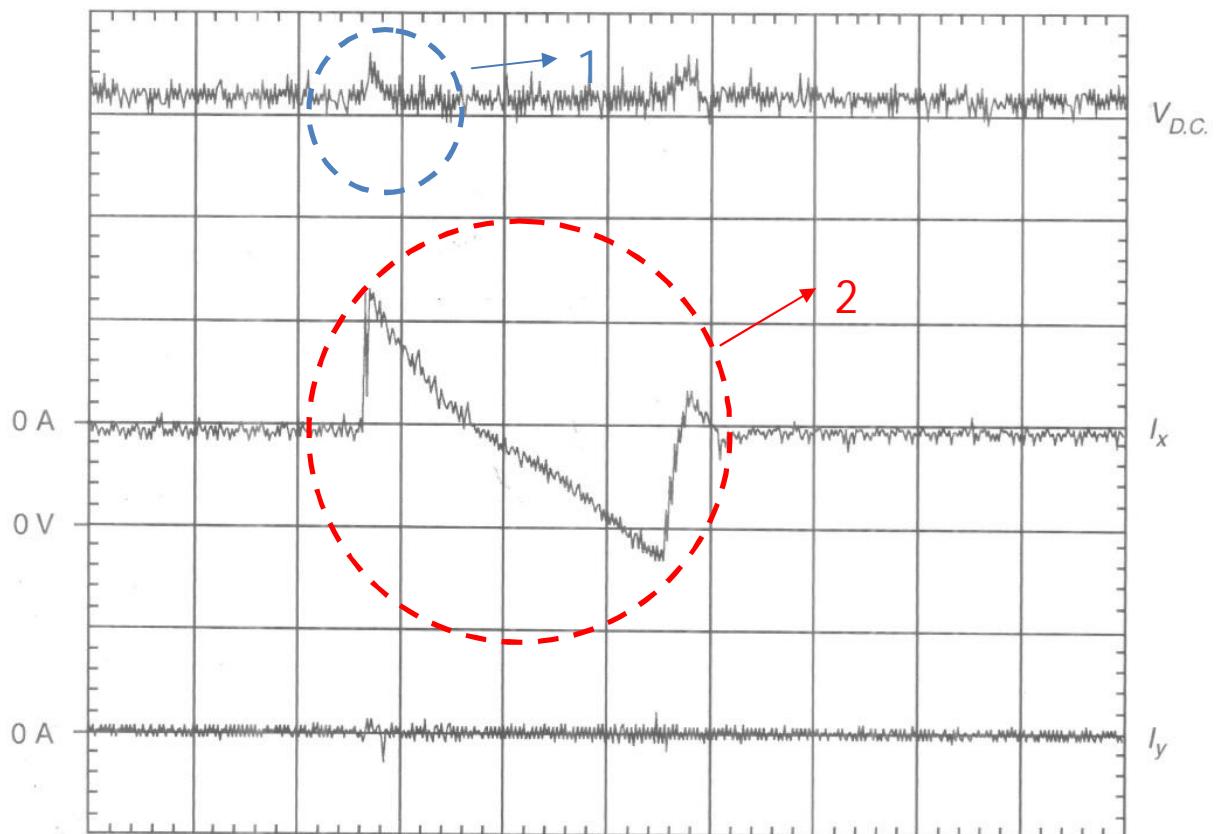


Fig. 36 - Correntes de entrada durante reversão em motor de alta velocidade

A sincronização e formas de onda, apesar das distorções causadas pelos fatores como harmônicos e efeitos de notching², são muito satisfatórias em aplicações industriais. A Fig. 37 representa os efeitos da corrente e tensão na linha de um motor conectado a rede com um retificador regenerativo sem PWM e sem filtros e reatância de linha, nota-se que mesmo sendo o notching quase 100% e a corrente levemente distorcida, o sincronismo é mantido.

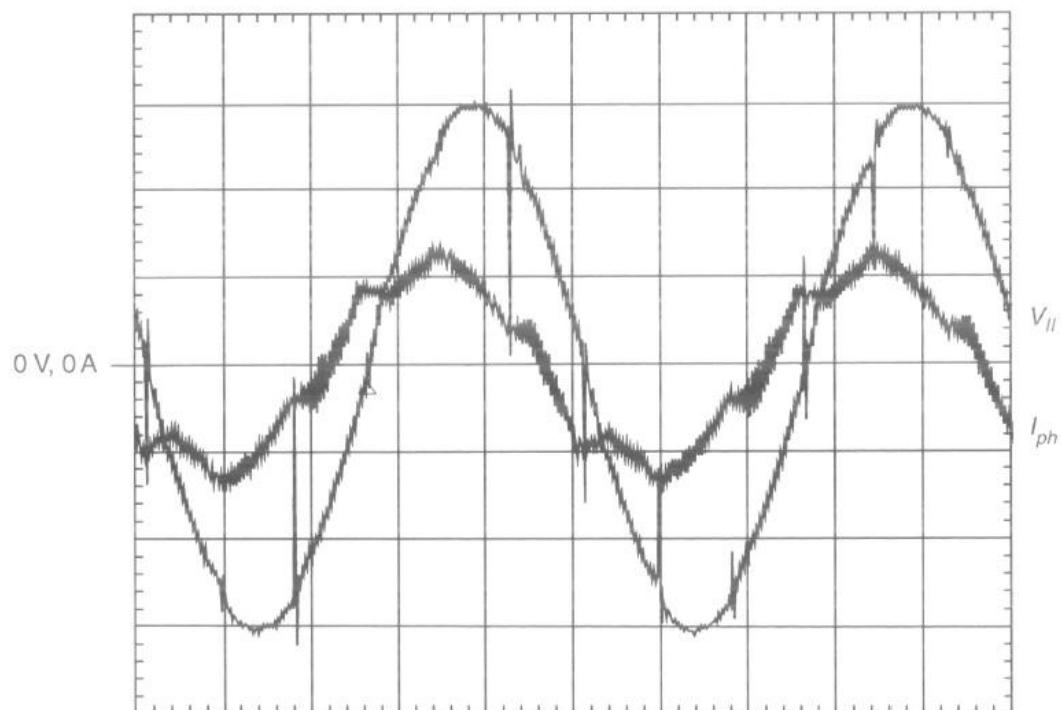


Fig. 37 - Efeito das perturbações na tensão da rede e na entrada do conversor

² Sinal em forma V estreito causado por transientes geralmente em sinais chaveados

6. APLICAÇÕES COM DRIVES E REGENERAÇÃO

6.1. APLICAÇÕES E POTENCIAL DE REGENERAÇÃO DE ACIONAMENTOS

(NASAR, 2006)

Um resumo das principais aplicações industriais estão mostradas no gráfico abaixo em potência e performance:

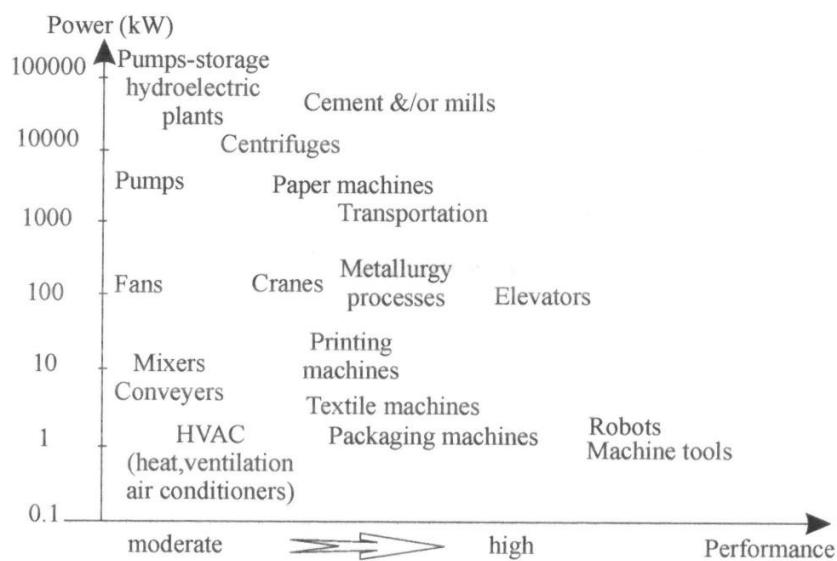


Fig. 38 - Aplicações com conversores de frequência – Fonte: (NASAR, 2006)

Os conversores de frequência são energeticamente mais eficientes em todas as aplicações motorizadas que necessitam variação de velocidade. Contudo, já nas aplicações regenerativas, apesar de muitas apresentarem regeneração, nem todas são viáveis de aproveitamento.

Certamente a aplicação de maior potência de regeneração são os moinhos, contudo, por operarem em regime transitório de regeneração, não apresentam Potencial energético tão grande. No acionamento de crane³, sua potência e nível de regeneração são altos por içarem cargas de toneladas, seguida pelo elevador de praticamente mesmo nível de regeneração, porém, menos carga. As centrífugas apesar de terem maior potência só regeneram em regime transiente e

³ Segmento da tecnologia de acionamentos voltados para içamento de cargas

mesmo sendo estes transientes de alto Potencial energético, sua capacidade regenerativa está atrelada ao seu número de ciclos e inércia da carga. Depois temos as aplicações de transporte, como os trens que possuem alto Potencial regenerativo, mas estão sujeitos ao uso não determinístico dos usuários.

As aplicações cujas potências são baixas geralmente não apresentam interesse no uso da regeneração, pelo menos do ponto de vista econômico. Sem a consideração de performance dinâmica, é preferível nestes casos adotar resistências de frenagem.

A quantidade de energia de regeneração pode ser dada pela seguinte relação:

$$E_{regen} = \frac{1}{2} J_{total} (\omega_2 - \omega_1)^2 / 360000 \text{ [kWh]}$$

Onde ω_1 e ω_2 são as velocidades inicial e final do acionamento em rad/s, J_{total} o somatório de todos os momentos de inércia atrelados ao eixo. Logo, visto a eficiência da máquina de indução e do conversor, a quantidade de energia recuperada para rede é:

$$E_{recuperada} = \eta_r \cdot \eta_{mi} \cdot \eta_{conversor} \cdot E_{regen} \text{ [kWh]}$$

Onde η_r = eficiência da redução, η_{mi} = eficiência da máquina de indução e $\eta_{conversor}$ = eficiência do conversor de frequência. Logo, quanto maior o momento de inércia, a diferença de velocidade e eficiência do conversor, motor e redutor maior é quantidade de energia que pode ser regenerada pela máquina de indução em modo gerador e então reaproveitada.

6.2.CURVAS TÍPICAS TORQUE / VELOCIDADE

(NASAR, 2006)

As curvas torque x velocidade são mostradas na Figs. 39, 40 e 41. Elas nos dão uma forte indicação da variedade das características de torque e velocidade e como a potência mecânica exigida pelo motor varia com a velocidade. Esta relação é dada basicamente pela seguinte relação:

$$\text{Potência} = T_{\text{CARGA}} \cdot \omega_{\text{rotação}}$$

Para dimensionar a área de torque e velocidade requeridas, o motor e o conversor devem ser cuidadosamente selecionados. O motor e o conversor não devem ser dimensionados apenas para regime contínuo mas também para transientes como a aceleração, desaceleração e pequenos períodos de sobrecarga⁴. Estes transientes requerem mais torque e consequentemente maior corrente, as quais motor e conversor devem estar preparados para suportar.

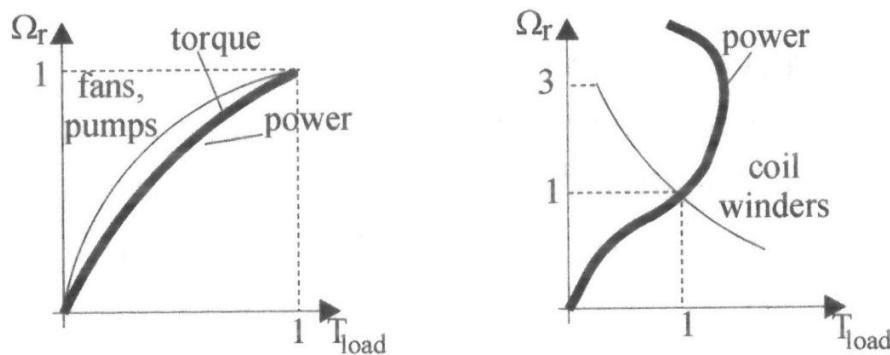


Fig. 39 - Curva Torque velocidade para ventiladores e bobinadores – Fonte: (NASAR, 2006)

Ventiladores por terem uma característica quadrática de carga assim com as bombas centrífugas, salvo em aplicações específicas, não possuem alto Potencial de aproveitamento na regeneração. A maioria deles não precisa ser parada num dado instante, em geral, os processos podem esperar que a carga seja parada pelo próprio atrito, arraste e inércia da carga. Bobinadores, por possuírem variação de massa devido ao processo de enrolamento, acabam ao término de

⁴ A negligência no dimensionamento para períodos de sobrecarga no inversor é um dos maiores erros cometidos nas aplicações com conversores de potência na indústria estes podem causar retrabalhos enormes para todos envolvidos no projeto do acionamento.

uma bobina tendo grande inércia e necessidade de parada rápida para o corte, conversores regenerativos são utilizados para melhorar a performance dinâmica do acionamento e manter o Link C.C. estável, evitando paradas. Logo possuem Potencial moderado de aproveitamento de regeneração, principalmente utilizando a forma AC/DC, onde vários rolos podem ser sincronizados para alternar em motorização rápida e regeneração rápida.

Muitas máquinas de papel utilizam conversores regenerativos e vários motores em seu link C.C. desta forma o Potencial de regeneração dependerá exclusivamente da topologia da máquina e obviamente, como em todas as outras, das inéncias empregadas.

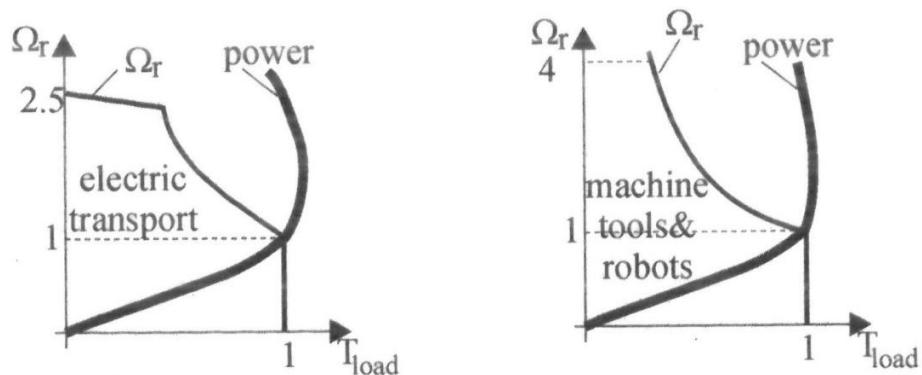


Fig. 40 - Curva Torque velocidade de transportes elétricos, robôs e máquinas-ferramentas

Transportadores aumentam seu torque e velocidade até chegarem a uma velocidade nominal, e nela permanecem. Seu Potencial de regeneração só é alto se as cargas forem muito pesadas e houver uma necessidade de parada muito brusca como acontece em indústrias automobilísticas no transporte de armação, ou quando transportam cargas extremamente pesadas como em processos de mineração. Robôs e máquinas-ferramentas geralmente usam motores de imã-permanente e possuem alto torque de partida e paradas muito precisas, isso torna um conversor regenerativo extremamente necessário para a dinâmica do acionamento, mas com ganhos energéticos em regeneração extremamente baixos.

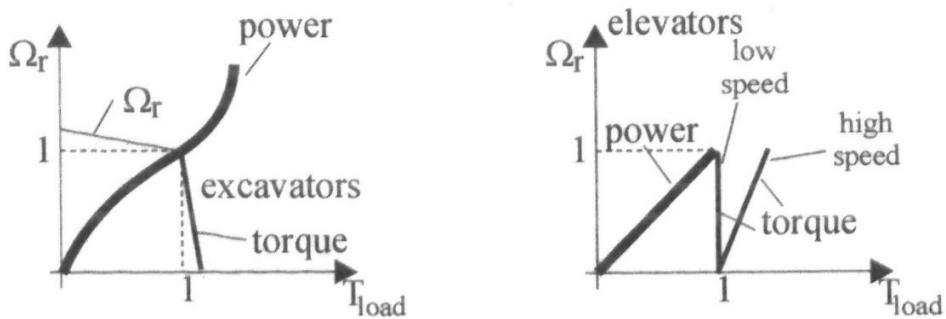


Fig. 41 - Curvas torque velocidade escavadores e elevadores – Fonte: (NASAR, 2006)

As escavadoras usadas em mineração e em escavações em geral são auxiliadas por diversos dispositivos hidráulicos e mecânicos, o que faz com que a Potência consumida pelo seu movimento seja menor. Contudo aplicações com escavadores de vários eixos podem ter alto Potencial de regeneração, principalmente se trabalharem na escavação de objetos de alta inércia. Elevadores possuem alto torque na elevação e podem ou não apresentar o mesmo torque na descida, por levarem cargas em ambas as direções, possuem alto Potencial de retorno energético com a regeneração.

6.2.1. PERFIL DE VELOCIDADE, POTÊNCIA E TORQUE

(NASAR, 2006)

A maneira mais prática de verificar o comportamento de um acionamento é certamente o perfil de velocidade no tempo. A partir dele com uma dada inércia podemos calcular o torque, com a relação torque e velocidade é fácil verificar o Potencial de energia regenerada. Consideremos um perfil velocidade/tempo como na Fig. 42 contra um torque constante $T_L = 10 \text{ Nm}$, e uma inércia do motor de $J = 0,02 \text{ Kgm}^2$.

A equação do movimento para obter o torque elétrico para o acionamento é dada por:

$$T_e(t) = J \frac{\omega_r(t)}{\partial t} + T_L(t)$$

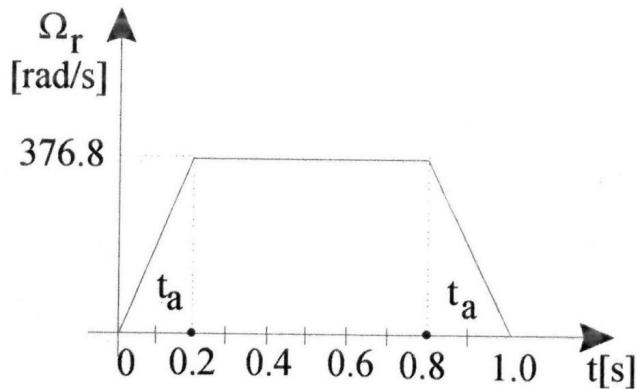


Fig. 42 - Perfil de velocidade tempo de um acionamento

$$\frac{\partial \omega_r}{\partial t} = \frac{\omega_{rMAX}}{t_a} = \pm \frac{376,8}{0,2} = \pm 1884 \text{ rad/s}^2$$

Pela derivada da velocidade angular podemos verificar a aceleração máxima e mínima do acionamento junto ao seu perfil. Logo, podemos pelo produto do momento de inércia e a aceleração angular somados ao torque da carga, ter o torque elétrico T_e para três intervalos:

T_e

$$= \begin{cases} 1884 \cdot 0,02 + 10 = 47,68 \text{ Nm} & \rightarrow \text{para } 0 \leq t \leq 0,2s \\ 0 + 10 \text{ Nm} = 10 \text{ Nm} & \rightarrow \text{para } 0,2 \leq t \leq 0,8s \\ -1884 \cdot 0,02 + 10 = -37,68 + 10 = -27,68 \text{ Nm} & \rightarrow \text{para } 0,8 \leq t \leq 1s \end{cases}$$

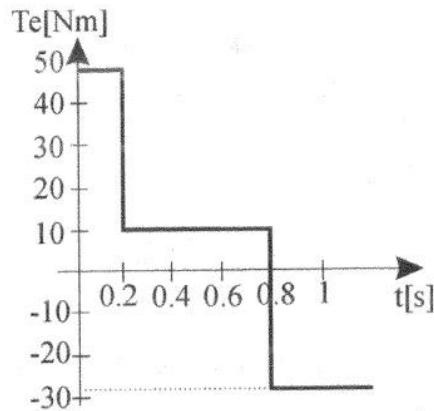


Fig. 43 - Perfil de torque exigido

Na prática, sabemos que mudanças repentinas no torque não se aplicam a fontes limitadas de energia. Entretanto, a variação de torque rápida é necessária. Os conversores de frequência atuais podem fazer rampas de torque em ms. A região negativa do torque corresponde à regeneração, e através do perfil podemos saber quanto de potência podemos disponibilizar através da regeneração e com o tempo, a energia. A Fig. 44 mostra um oscilograma da resposta de um degrau causado pela carga e link C.C.

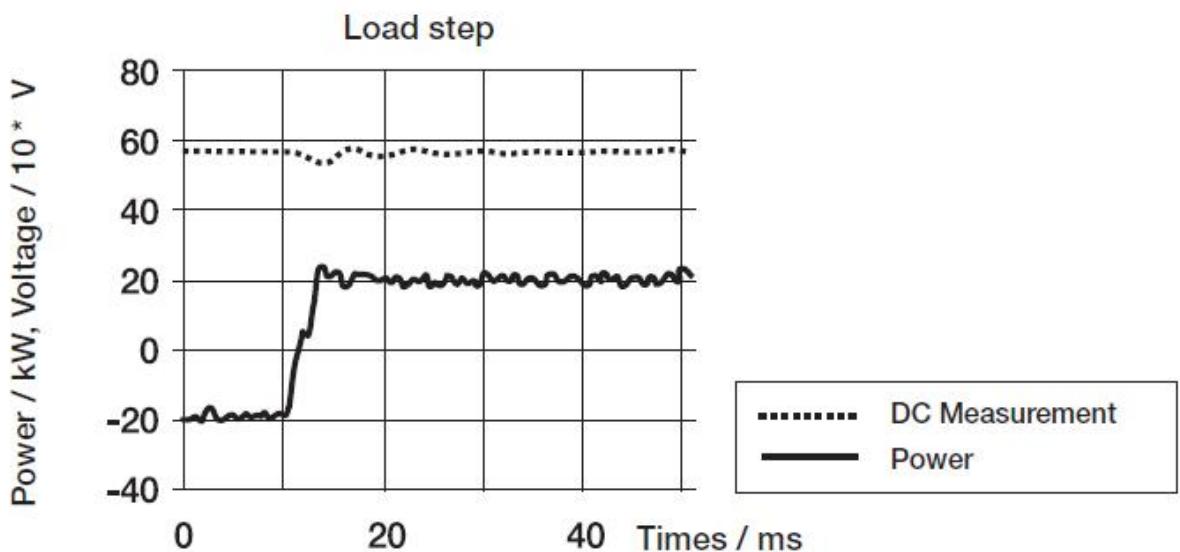


Fig. 44 - Comportamento do conversor em regeneração transiente – (Fonte: ABB – Electrical Braking Manual)

7. REGENERAÇÃO EM ELEVADORES

Consideremos um conversor de frequências para um elevador, como o mostrado na Fig. 44. O motor tem velocidade nominal de 1550 rpm, a eficiência do redutor é de 0,8. Vamos calcular o quanto resulta de inércia total (no eixo), torque e potência, com e sem contrapeso e regeneração.

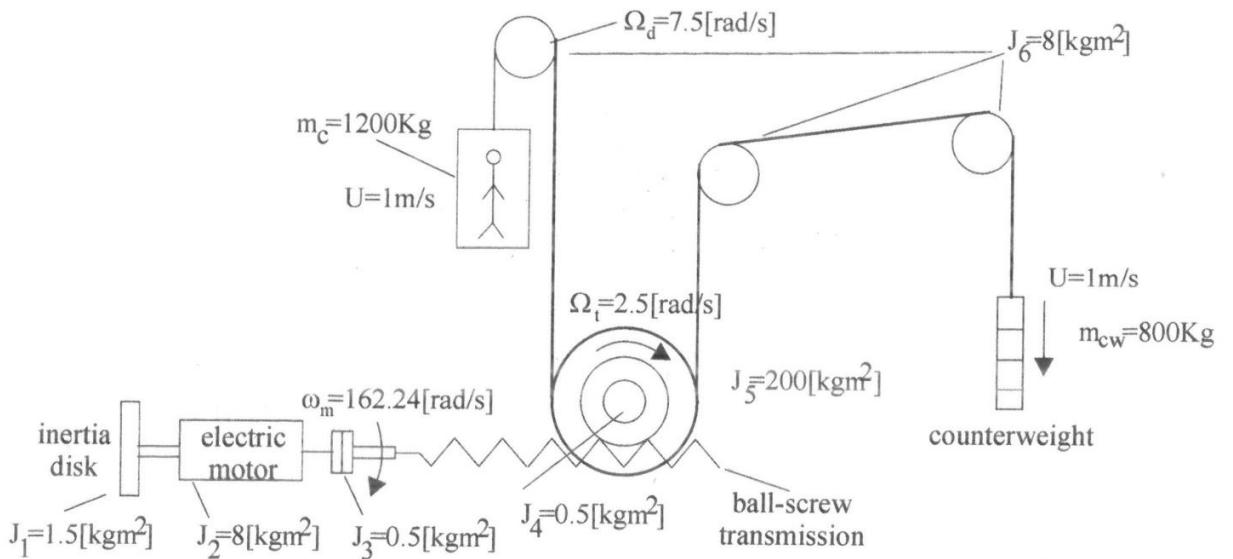


Fig. 45 - Elevador com diversas transmissões e contrapeso - Fonte: (NASAR, 2006)

Primeiramente, a velocidade angular do motor:

$$\omega_m = 2\pi n_n = \frac{1550}{60} = 162,22 \text{ rad/s}$$

A redução definida como a rotação ω_t/ω_n para (J_4+J_5) e ω_d/ω_n para J_6 . Consequentemente, o momento de inércia J_{res} , reduzido ao eixo do motor, é dado por:

$$J_{res} = J_1 + J_2 + J_3 + (J_4 + J_5) \cdot \frac{\omega_t^2}{\omega_m^2} + J_6 \cdot \frac{\omega_d^2}{\omega_m^2}$$

$$= 15 + 8 + 2 + (0,5 + 200) \cdot \left(\frac{2,5}{162,22}\right)^2 + 8 \cdot \left(\frac{7,5}{162,22}\right)^2 = 25,062 \text{ [Kgm}^2]$$

Considerando a cabine do elevador e o contrapeso, a velocidade u e a inércia reduzida ao eixo do motor torna-se:

$$J_e = (m_c + m_{cp}) \cdot u^2 / \omega_m^2 = (1200 + 800) \cdot \frac{1^2}{166,22^2} = 0,07238 [\text{Kgm}^2]$$

Logo, a inércia total J_t é:

$$J_t = J_{res} + J_e = 25,062 + 0,0724 = 25,135 [\text{Kgm}^2]$$

Na ausência de um contrapeso, a lei da conservação de energia nos dá:

$$T_{em} \cdot \omega_n \cdot \eta = m_c \cdot g \cdot u$$

Logo, o torque eletromagnético no eixo do motor resulta em:

$$T_{em} = 1200 \cdot 9,81 \cdot \frac{1}{162,22 \cdot 0,8} = 90,71 [\text{Nm}]$$

A potência do motor é dada então por:

$$P_{em} = T_{em} \cdot \omega_n = 90,71 \cdot 162,22 = 14715 [\text{W}]$$

Todavia, na presença de um contrapeso, o balanço de potência nos dá:

$$T_{em} = \omega_m \cdot \eta = (m_c + m_{cp}) \cdot g \cdot u = (1200 - 800) \cdot 9,81 \cdot \frac{1}{162,22 \cdot 0,8} = 30,71 [\text{Nm}]$$

Logo, a potência do motor, com contrapeso é:

$$P_{em} = T_{em} \cdot \omega_m = 30,71 \cdot 162,22 = 4905 [\text{W}]$$

Como podemos ver, o acionamento sem o contrapeso nos consumiria 14,715 kW de potência e com o contrapeso 4,905 kW. Aplicações com contrapeso produzem uma redução de cerca de 1 para 3 na potência consumida, além do uso do conversor ser indispensável para rampas suaves na aceleração de desaceleração. Se utilizássemos um conversor regenerativo, mesmo com o contrapeso, obteríamos de potência regenerativa:

$$-P_{regen} = P_{em} \cdot \eta_{reducao} \cdot \eta_{motor} \cdot \eta_{conv}$$

Supomos uma eficiência na redução = 0,8, eficiência do motor em 0,91 e eficiência do conversor = 0,92.

$$P_{recup} = 4905 \cdot 0,8 \cdot 0,91 \cdot 0,92 = 3208,17 \text{ [W]}$$

Toda vez que o elevador estiver descendo haverá uma regeneração de 3,21 kW de potência disponibilizada para a rede, para que ela possa ser consumida por outras cargas. Supomos agora que este elevador, com $u = 1 \text{ m/s}$, percorra num prédio de 10m, logo 10s descendendo e regenerando, a quantidade de energia regenerada pode ser dada por:

$$W_{recup} = \int_{t_0}^t P_{recup} (t) \cdot dt = 3208,17 \cdot (10 - 0) = 32851,728 \text{ [Kws]}$$

Ou:

$$W_{recup} = \int_{t_0}^t P_{recup} (t) \cdot dt = 3208,17 \cdot (10 - 0) = \frac{32851,728}{3600} = 9,12 \text{ [kWh]}$$

(ASHOK B. KULKAMI, 2000)

É estimado que um elevador faz viagens num período de 10h por dia na maioria dos edifícios. Contudo, o perfil de viagens é o que poderá nos dar o real número de economia. Numa análise de um dado perfil de um edifício, pode-se verificar que a economia de energia usando conversores regenerativos é de 30%, assim, das 10 horas de uso, 30% das mesmas estejam em modo regenerativo, logo 3h. O valor da potência disponibilizada (regenerada) em 1h = 9,12. Logo, $3 \times 9,12 = 27,36 \text{ kWh/dia}$. Considerando 265 dias úteis num ano, $265 \times 27,36 \text{ kWh/dia} = 7250 \text{ kWh/ano}$ de economia de energia.

TABLE II
ENERGY CONSUMPTION PER DAY

Elevator Speed	2.5 m/s	3.5 m/s
Energy consumption per day for VVVF regenerative drive	56.5 kWh	79.1 kWh
Energy consumption per day for VVVF non-regenerative drive	81.1 kWh	110.74 kWh

Fig. 46 - Comparativo de economia de energia – Fonte: (ASHOK B. KULKAMI, 2000)

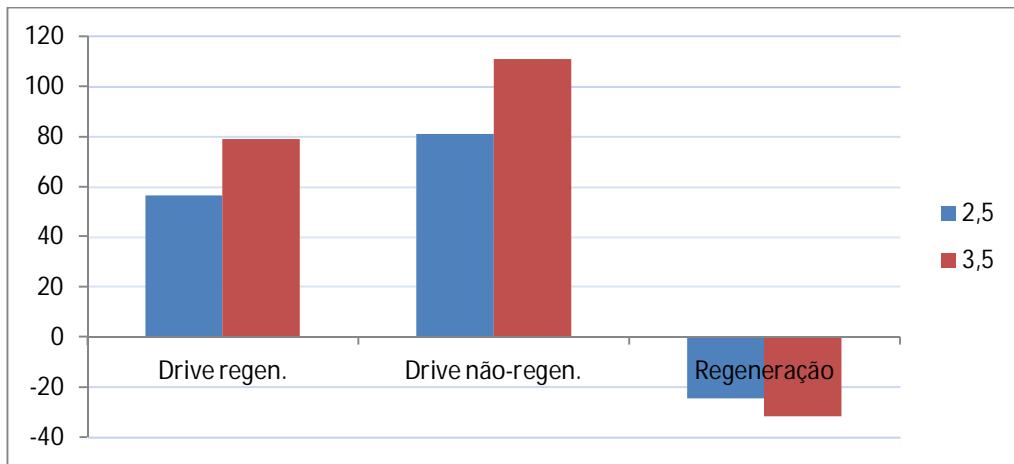


Fig. 47 - Comparação entre conversores regenerativos e não regenerativos (consumo em kWh/dia)

Como vimos no capítulo 4, o conversor pode melhorar o fator de potência igualando a potência reativa Q e a ativa P, isso resulta num fator de potência de 0,99 contra o de 0,95 de um conversor não regenerativo a plena carga e velocidade requerida do elevador.

A Fig. 48 ilustra as formas de tensão de corrente na entrada de um conversor regenerativo AFE, com PWM. A corrente e tensão mantém suas fases e no oscilograma além do fator de potência reduzido, existem poucos harmônicos resultantes (FFT) e o THD medido é de 4,5%. Já num conversor não regenerativo, como mostra a Fig. 49, o fator de potência é de cerca de 0,95 e podemos ver harmônicos de alta ordem associados às formas de onda de tensão e corrente.

É importante verificar que a energia regenerada deve ter uma carga prontamente associada para recebê-lá de volta, sem métodos de armazenamento ou sem cargas prontas para utilização, que diminuíam a potência drenada da rede, a regeneração se torna inútil e pode causar problemas aos conversores de frequência pela quantidade de energia superaquecendo seus capacitores.

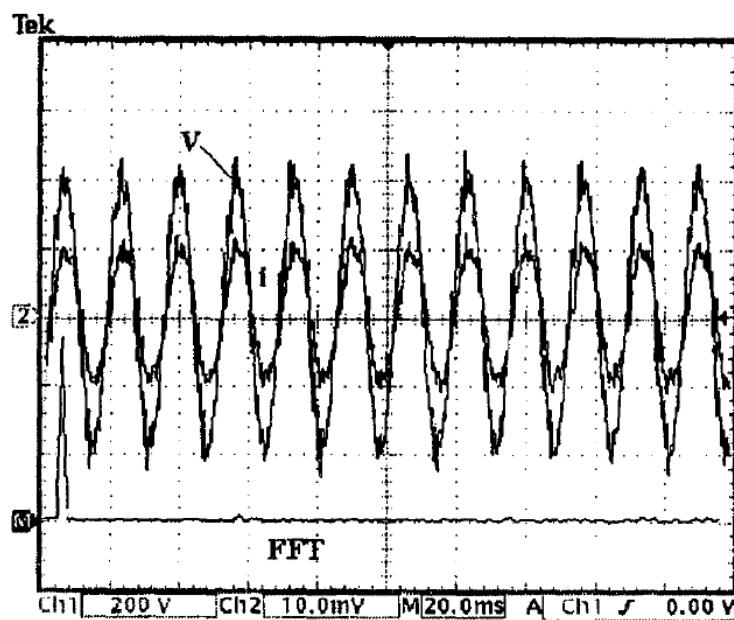


Fig. 48 - Forma de tensão e corrente num conversor regenerativo – Fonte: (ASHOK B. KULKAMI, 2000)

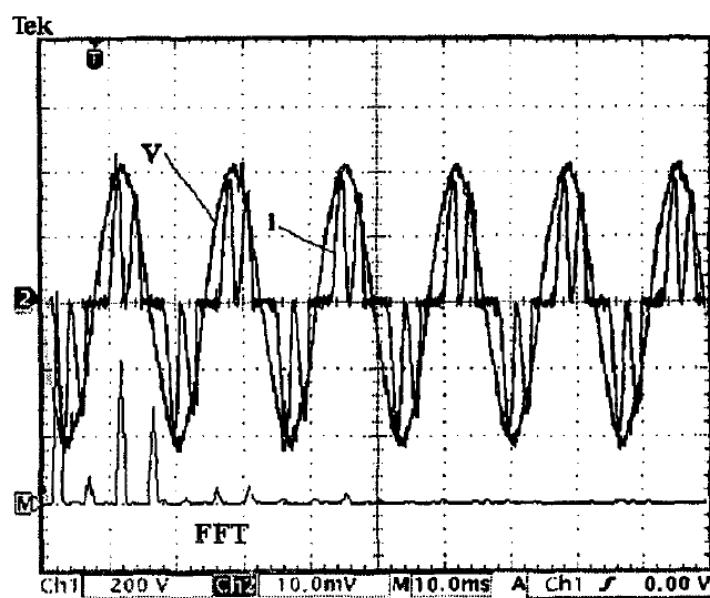


Fig. 49 - Forma de tensão e corrente de um conversor não regenerativo – Fonte: (ASHOK B. KULKAMI, 2000)

8. APLICAÇÃO DE ELEVAÇÃO (HOIST GANTRY)

(SIEMENS, 1999)

Neste exemplo de aplicação, temos uma elevação de carga utilizado num sistema de ponte, antes de um retrofit utilizando conversores de frequência, ele era motorizado por um motor de anéis de 6 pólos a potência nominal de 21,5 kW.

Vamos verificar as principais grandezas do projeto da ponte, a fim de calcular quanta energia precisaremos para motorizar e quanta energia poderemos disponibilizar para a rede no movimento de descida.

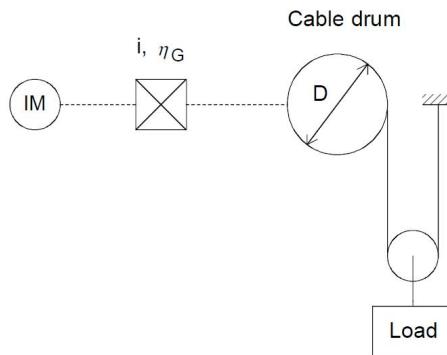


Fig. 50 - Esquema da aplicação de elevação – (Fonte: (SIEMENS, 1999)

Descrição	Sigla	Número	Unidade
Diâmetro do carretel	D	0,6	m
Redução	i	177	-
Eficiência do redutor	η_G	0,9	-
Carga permissível	Q	20	t
Carga teste Qmax	Qmax	25	t
Tempo de aceleração, desaceleração	t_a, t_{ad}	10	s
Potência nominal do motor	P_{motor}	22	kW
Torque nominal do motor	M_{motor}	215	Nm
Velocidade nominal do motor	n_{motor}	975	rpm
Momento de inércia do motor	J_{motor}	0,33	Kgm ²
Máxima altura de levantamento	h_{max}	5	m

Tabela 2 - Resumo dos dados do acionamento de elevação

Levantando a carga em velocidade constante temos:

$$F_{lev} = m_{carga} \cdot \frac{g}{2} = 20 \cdot \frac{10^3}{2} [Kg] \cdot 9,81 \left[\frac{m}{s^2} \right] = 98100[N] = 9,81[kN]$$

$$M_{carga} = F_{lev} \cdot \frac{D}{2} = 29430 [N] = 29,43 [kN]$$

Velocidade circunferencial do carretel:

$$V_{c\ max} = \frac{\omega_n}{i} \cdot \frac{D}{2} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{n_{motor}}{i} \cdot 2 = 2 \cdot \pi \cdot 975 \cdot \frac{06}{177} \cdot 60 = 0,173 [m/s]$$

Torque e potência de saída do motor:

$$P_{motor} = F_{lev} \cdot \frac{V_{c\ max}}{\eta_G} = 98100 \cdot \frac{0,173}{0,9} = 18857[W] = 18,857[kW]$$

Descendo a carga em velocidade constante (operação regenerativa):

$$\begin{aligned} P_{motor(regen)} &= -F_{lev} \cdot V_{c\ max} \cdot \eta_G = 98100 \cdot 0,173 \cdot 0,9 = -15275[W] \\ &= -15,275[kW] \end{aligned}$$

Para utilização na rede devemos considerar a eficiência do inversor, que é cerca de 0,92 e do motor 0,91:

$$P_{recuperada} = -0,92 \cdot 0,91 \cdot P_{motor(regen)} = 12788[W] = -12,788[kW]$$

O que nos mostra que é possível disponibilizar 12,788 kW na rede para cada ciclo de descida.

Calculando momentos de inércia e aceleração

Aceleração angulo e torque de aceleração:

$$\alpha = \frac{\omega_n}{ta} = 2 \cdot \frac{\pi}{60} \cdot \frac{975}{10} = 10,2 \text{ [rad/s}^2]$$

Torque de aceleração: motor + redutor:

$$M_{\text{acel. motor+redutor}} = (J_{\text{motor}} + J_{\text{redutor}}) \cdot \alpha_{\text{motor}} = (0,33 + 0) \cdot 10,2 = 3,37 \text{ [Nm]}$$

Momento de inércia, com referência do carretel na carga:

$$J_{\text{carga}} = \frac{1}{4} m_{\text{carga}} \cdot (D/2)^2 = \frac{1}{4} 20 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{0,6}{2}\right)^2 = 450 \text{ [Kgm}^2]$$

Dado momento de inércia do carretel, $J_{\text{carr}} = 20 \text{ Kgm}^2$, torque de aceleração do motor e do carretel:

$$\begin{aligned} M_{\text{acel. carga+carr}} &= (J_{\text{carga}} + J_{\text{carr}}) \cdot \alpha_{\text{carr}} = (J_{\text{carga}} + J_{\text{carr}}) \cdot \frac{\alpha_{\text{carr}}}{i} \\ &= (450 + 20) \cdot \frac{10,2}{177} = 27,08 \text{ [Nm]} \end{aligned}$$

Torque de levantamento, torque ao levantar a carga durante aceleração:

$$\begin{aligned} M_{\text{motor}} &= M_{\text{acel.motor+redutor}} + \frac{M_{\text{carga+carr}} + M_{\text{carga}}}{i \cdot \eta_G} \\ &= 3,37 + (27,08 + 29430) \cdot \frac{1}{0,9 \cdot 177} = 184,92 \text{ [Nm]} \end{aligned}$$

Tempo de descida da carga com uma altura $h_{max} = 5m$

$$V_{carga\ max} = V_{c\ max/2} = \frac{0,173}{2} == 0,0865\ m/s$$

$$t_a = t_d = 10s$$

$$t_{total} = t_{regen} = \left(\frac{h_{max} - V_{carga\ max} \cdot t_d}{V_{carga\ max}} \right) = \frac{5 - 0,0865 \cdot 10}{0,0865} = 67,8s$$

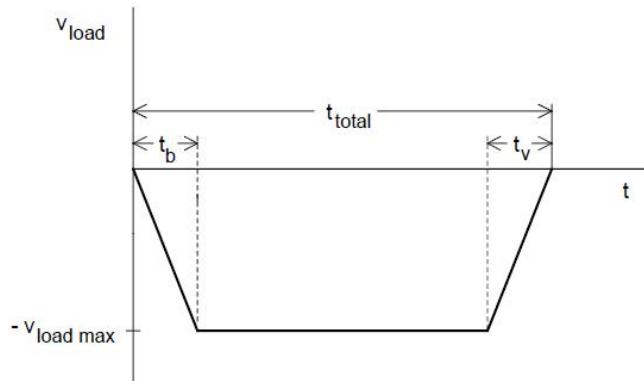


Fig. 51 - Perfil de velocidade na descida

Energia regenerada na descida:

$$W_{recup} = \int_{t_0}^t P_{recup}(t) dt = -12,788 \cdot \frac{(67,8 - 10)}{3600} = \frac{0,205[kwh]}{ciclo}$$

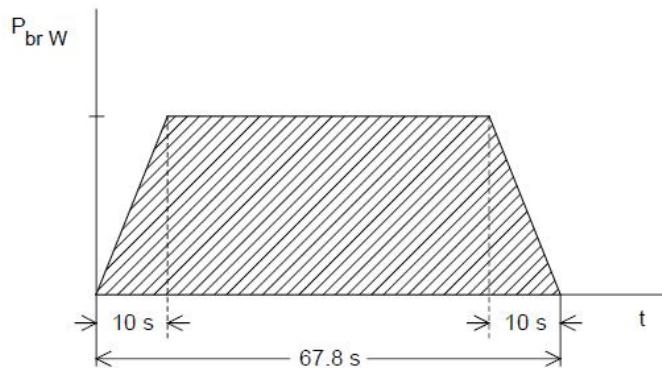


Fig. 52 - Perfil de regeneração

Podemos então regenerar para a rede 0,205 kWh/ciclo, supondo um ciclo de 90s, e uma operação de 10 horas diárias de ciclo contínuo, temos em 10 h (36000s) 400 ciclos. Logo, a energia recuperada é a quantidade de kWh/ciclo x número de ciclos por dia de uso.

$$E_{recup/dia} = n_{ciclos} \cdot 0,205 = \frac{82kWh}{dia}$$

Num ano, considerando uma operação de 260 dias úteis, temos:

$$E_{recup/ano} = 82kwh \cdot 260 \text{ dias} = 22360kwh/ano_{(dias \text{ úteis})}$$

Geralmente, existe mais de uma ponte numa instalação, a otimização total desse tipo de sistema dar-se-á quando no tempo que uma ponte desacelerar a outra acelerar, garantido assim o consumo da energia no período de potência disponível. A diferença entre energia utilizada e regenerada acontece apenas pelas perdas do sistema, como podemos ver na tabela 2 e na Fig. 53, um esquema da ligação dos conversores ligados a um ponto de comum acoplamento e a um transformador.

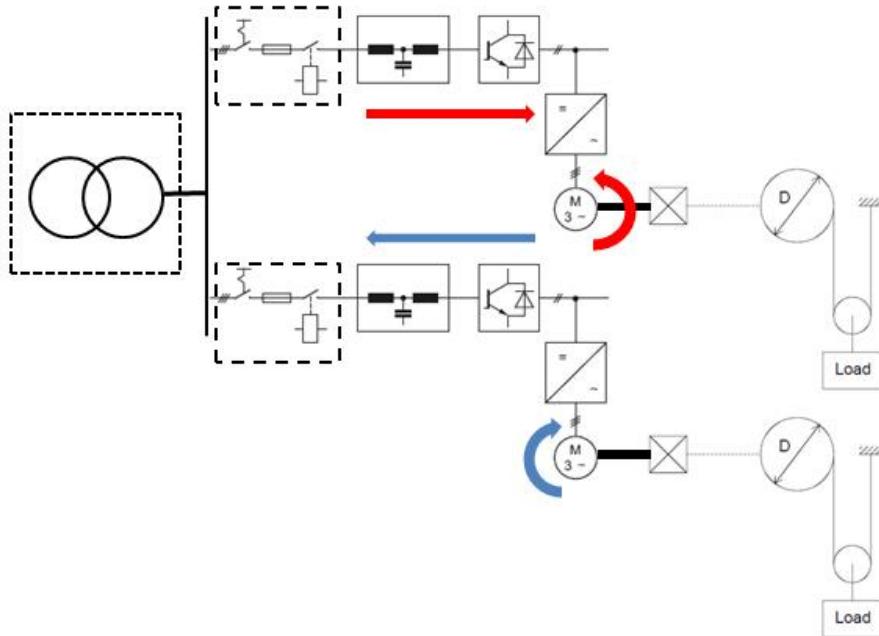


Fig. 53- Diagrama do sistema de duas pontes

	Estado	Potência (kW)	Tempo (s)	Energia (kWh)/ciclo	Energia/dia(10h) (kWh)	Energia/ano (kWh)
Ponte 1	subindo	13,87	57,8	0,22	89,08	23.159,82
Ponte 2	descendo	-12,788	57,8	-0,21	-82,13	-21.353,12
Da rede		1,082	-	0,02	6,95	1.806,70

Tabela 3 - Comparação Potência e energia num sistema de 2 pontes

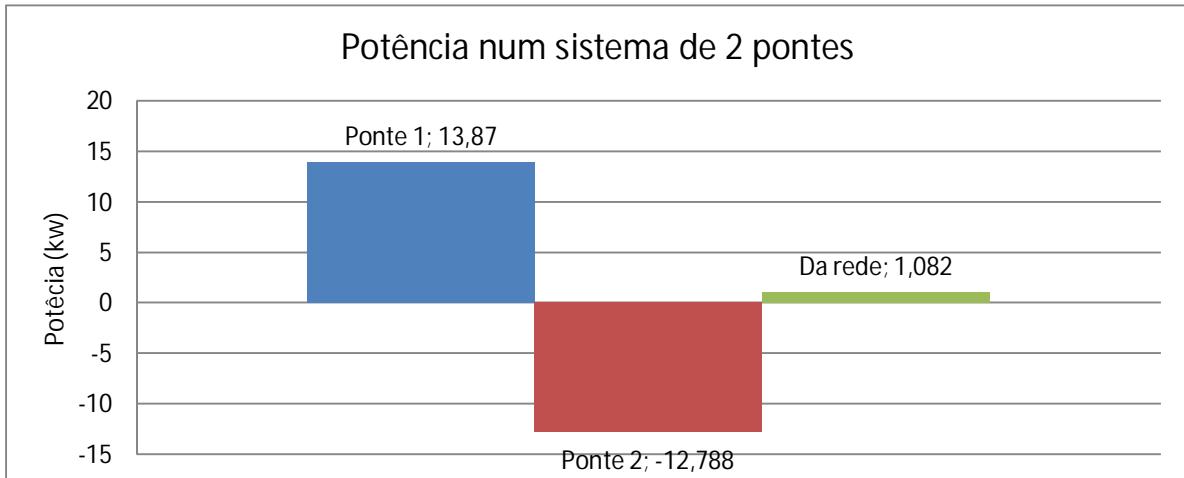


Figura 54 - Potência num sistema de 2 pontes

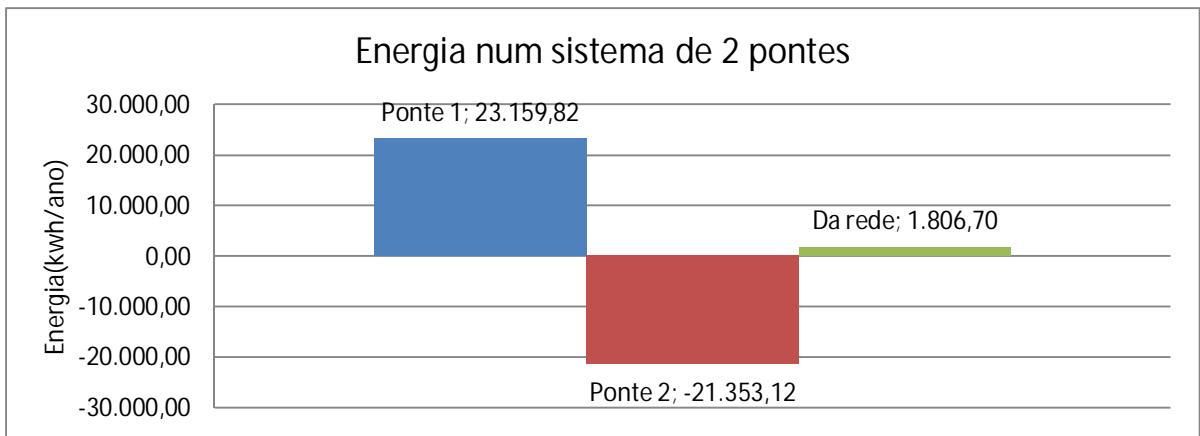


Fig. 55 - Energia anual num sistema de 2 pontes

9. APLICAÇÃO EM CENTRÍFUGAS DE AÇÚCAR

(SIEMENS LD, 2002)

A centrífuga de açúcar descontínua opera em diferentes velocidades num ciclo, que tem três segmentos: carregamento, centrifugação e raspagem. Dependendo da qualidade de açúcar requerido uma centrífuga contínua ou descontínua é usada.

A massa é inserida num intervalo de velocidade que vai de 50 a 250 rpm, a centrifugação ocorre entre 1000 e 1500 rpm e a raspagem das camadas de açúcar de 50 a 100 rpm.

Processos típicos de centrifuga de açúcar são preenchidas com 1250 Kg de material, as maiores centrífugas podem chegar até 2000 kg de massa por ciclo.

O motor da centrífuga é acionado por um conversor de frequência regenerativo, que satisfaz as condições de robustez do processo e também de regeneração para uma operação de 24h durante 8 meses de safra.

Existem 5 passos principais no processamento do açúcar: moagem, clareação, evaporação e panelas de vácuo, cristalizadores e centrífugas.

O processo de moagem consiste no uso de turbinas a vapor ou motores elétricos queacionarem facas que cortam a cana em pequenos pedaços e então são transportados para grandes moendas que esmagam o suco sob prensas de alta pressão. O bagaço remanescente é armazenado para uso como combustível com queima de biomassa.

O pH do suco extraído é ajustado com lima antes que seja aquecido e mandado para grandes tanques de clareamento, que permitem que os sólidos decantem para o fundo deixando apenas o suco claro para dar continuidade no processo.

A cana clara dos clareadores é então levada a evaporadores de múltiplos estágios para remover a maior parte da água do xarope. O xarope é então transferido para as panelas de vácuo onde são fervidas sob vácuo até que os cristais de açúcar chamados de massecuite sejam formados. O fervimento sob vácuo previne a

caramelização dos cristais de açúcar. Estes cristais são inspecionados para dosar a uniformidade do crescimento, enquanto o monitoramento e os testes garantem a qualidade. O xarope aquecido nos cristalizadores começa a cristalizar e separe-se em cristais de açúcar e massas chamadas “massecuite”. Os cristalizadores resfriam a mistura de cristais de açúcar e melaço, o que fazem os cristais crescerem em tamanho.

Para remover o cristal de açúcar do melaço, centrífugas de alta rotação centrifugam o melaço deixando apenas cristais de açúcar puro nas telas da centrífuga. O produto restante do melaço negro que é armazenado em tanques e vendidos como comida para gado. Todo açúcar cru então produzido é levado para armazéns e depois para refinarias. Aproximadamente para cada 1 tonelada de açúcar produz-se 100Kg de açúcar cru.

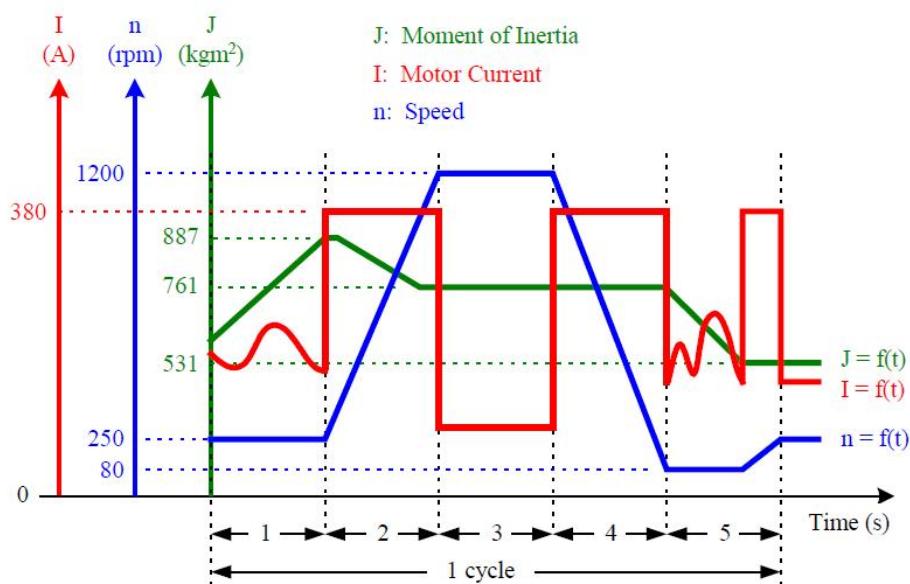


Fig. 56 - Perfil de velocidade e corrente de um ciclo de centrífuga de açúcar – Fonte: (Siemens, 2002)

1. Alimentação do material
2. Aceleração da centrífuga
3. Centrifugação
4. Desaceleração (regeneração)
5. Raspagem das telas

Tendo dados como momento de inércia, velocidade, podemos calcular a energia regenerada em regime transitório na desaceleração da centrífuga.

$$E_{regen} = \frac{1}{2} J_{total} (\omega_2 - \omega_1)^2 = \frac{1}{2} \cdot (761) \cdot \left(\frac{2\pi}{60} \cdot 250 - \frac{2\pi}{60} \cdot 1200 \right)^2 = 3761998,849 \text{ [J]}$$

$$E_{kwh} = \frac{E_j}{3600000} = \frac{3761998,849}{3600000} = 1,045 \text{ [kWh]}$$

$$E_{recuperada} = \eta_r \cdot \eta_{mi} \cdot \eta_{conversor} \cdot E_{regen} = 1 \cdot 0,92 \cdot 0,96 \cdot 1,045 = 0,923 \text{ [kWh]/ciclo}$$

Uma hora tem cerca de 23 ciclos de centrifugação de açúcar, logo:

$$E_{recuperada} = 0,923 \cdot 23 = 21,229 \text{ [kWh]/hora}_{23 \text{ ciclos}}$$

E tem operação de 24h durante uma safra de 8 meses:

$$E_{recuperada} = 21,229 \text{ [kwh]} \cdot 24[\text{horas}] \cdot 30[\text{dias}] \cdot 8[\text{meses}] = 122279 \text{ [kwh]/safra}$$

kWh/ciclo	kWh/hora	kWh/dia	kWh/mes	kWh/safra	Preço p/ consumidor (R\$ 110,00 MWh)
0,293	21,229	509,496	15284,88	122279,04	R\$ 13.450,69 / safra

Tabela 4 - Energia regenerada do ciclo da centrífuga

O preço para consumidor é uma estimativa do valor do kWh no qual a usina que processa o açúcar poderia comercializar utilizando geração e vendendo excedente, quanto menor for seu gasto, mais excedente pode ser vendido. Não estão sendo contabilizados os períodos de ponta, logo, a economia pode ser ainda maior. Centrífugas sem conversores regenerativos precisam de enormes bancos resistivos para dissipar a energia da regeneração, tomando além de energia, espaço, o que torna o uso dos conversores além de necessário, extremamente eficiente. A recuperação da energia está obviamente conectada ao seu uso imediato na regeneração, esquemas com mais de uma centrífuga com ciclos de aceleração e desaceleração podem ser utilizados como o sistema de 2 pontes para garantir o uso da energia regenerada e drenar o mínimo possível da geração ou rede ou da geração própria.

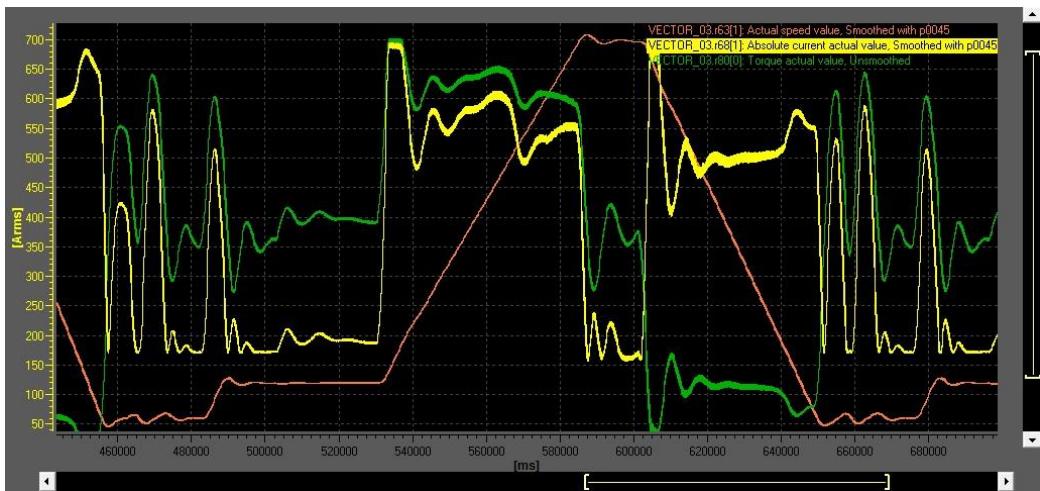


Fig. 57- Oscilograma operação centrífuga otimizada - Fonte: (Service Siemens, 2010)

As centrífugas devem ser manualmente otimizadas em seus conversores para prolongar a vida útil dos IGBTs. As operações em baixas frequências devem ser analisadas afim de verificar o ciclo de aquecimento e resfriamento dos IGBTs. Caso isso ocorra cálculos de *derating* devem ser feitos e frequências de pulso ajustadas para garantir a vida máxima de um IGBT em operação pesada e contínua. Os IGBTs se bem otimizados em seus ciclos térmicos tem uma vida útil de cerca de 10 anos, enquanto os não otimizados podem chegar a meses.

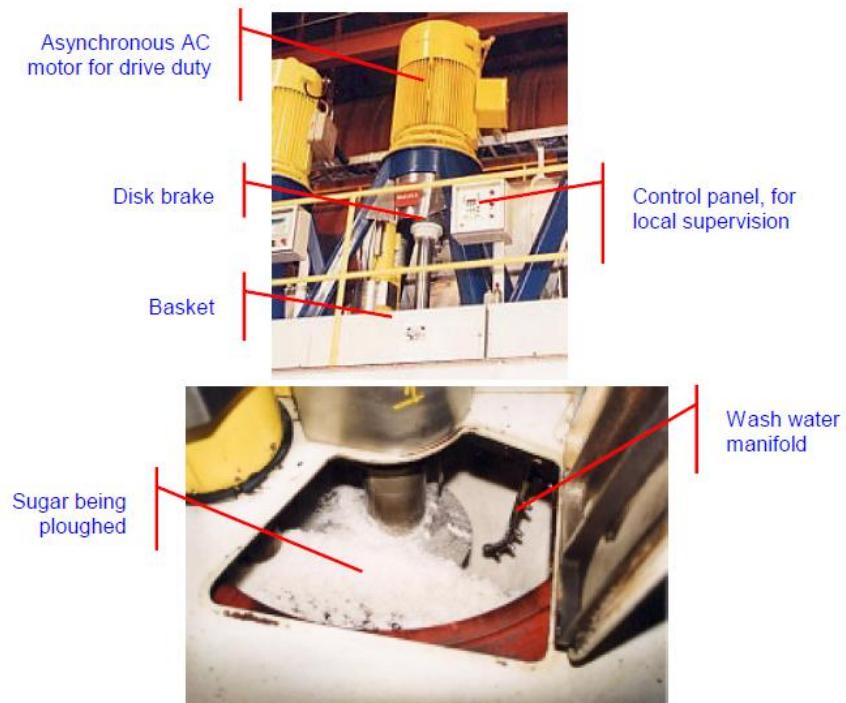


Fig. 58 - acionamento e compartimento interno da centrífuga – Fonte: (SIEMENS LD, 2002)

10. REGENERAÇÃO EM TRENS

(CHANG-HAN BAE DONG, 2007)

Embora a aplicação em trens não faça parte da indústria de manufatura, é um importante exemplo de como a regeneração aplicada a transportes pode economizar energia. A maioria das subestações elétricas de trem em DC adotaram o método de retificador com diodos para suprir potência estável em DC a fim de alimentar os trens. Contudo, para transmitir o excesso de Potência regenerada da frenagem dos trens para o sistema, uma estação de regeneração com inversores regenerativos adicional é necessária. Em estações de 1500 VDC que não possuem estações regenerativas, quando um trem realiza uma frenagem regenerativa, a mesma é usada para fornecer potência no mesmo lado DC, ou para outro alimentador que direcionará para outro trem se requisitada, ou consumida através de calor por um resistor de frenagem.

Se um inversor regenerativo estiver instalado em paralelo a um retificador a diodos, este pode absorver a energia regenerada excedente a qual seria direcionada para um resistor e transmiti-la para o lado de distribuição em alta tensão onde pode ser reutilizada.

Mesmo sendo uma forma de economizar energia, junto a isso, a regeneração pode melhorar a frenagem dos trens e a performance da ATO (Automatic Train Operation), aumentando a taxa de potência regenerada pela linha catenária, estendendo o uso das sapatas de freio, reduzindo a poeira causada pela abrasão das sapatas no espaço subterrâneo e suprimindo o aumento da temperatura. Em estações mais novas de trens e metrôs recentemente construídas a regeneração para o lado de alta tensão já é uma prática e estudos comprovam que pode ser realmente absorvida pelas subestações.

Numa ferrovia com trens usando motores DC, quando há desaceleração de um trem, a potência regenerada é transferida para os alimentadores e então dividida entre os outros trens consumindo a potência, diminuindo a demanda de energia da subestação. Quando não existe uso por parte de outros trens, a tensão da linha se torna instável até que esta potência tenha que ser consumida por resistores de

frenagem. Com um conversor regenerativo, esta tensão excedente pode ser absorvida pelos alimentadores e passada para as subestações, permitindo estabilização da tensão catenária e então repassada para o lado de alta conservando energia.

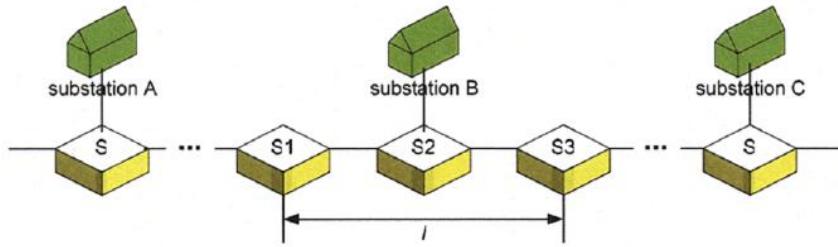


Fig. 59 - Esquema de subestações e linhas entre as estações de trem

Quando os trens realizam a frenagem regenerativa entre as estações A e B, assumindo a troca de energia entre os alimentadores, um número de trens a uma velocidade comercial v_s e um headway⁵ h podemos obter através da distância l um número para o cálculo de energia dado por:

$$N = \left(\frac{l}{v_s \cdot h} \right)$$

Sendo n um inteiro, l a distância em metros, v_s a velocidade em km/h e h em minutos. O total da energia obtido numa distância l então pode ser aproximada pela seguinte equação:

$$E_g = 2 \cdot T_0 N (k - 1) E_1 / h$$

Onde T_0 é o tempo de operação em um dia em minutos, k o número de trens numa linha l , h é o tempo de headway e E_1 a quantidade de energia regenerada, dada como já visto pela metade do produto da diferença das velocidades ao quadrado.

O total de energia regenerada então pode ser dado pela soma da energia regenerada no lado DC e utilizada pelos alimentadores e a energia que não é

⁵ Headway refere-se ao tempo ou distância entre dois veículos num sistema de trânsito. No caso de trens um headway menor significa um serviço mais frequente, ou seja, mais rápido. Trens operam com um headway de certa de 5 minutos, enquanto estradas possuem um headway de cerca de 2 segundos.

utilizada e geralmente é dissipada em resistores de frenagem, a qual pode ser reaproveitada com um conversor regenerativo para acrescentar energia ao lado de alta tensão:

$$E_g = E_T + E_r$$

Onde E_g é o total de energia regenerada num segmento de linha l , E_t é a quantidade de energia trocada entre os alimentadores e utilizada nos trens no lado DC e E_r é a quantidade de energia regenerada que aumenta a tensão da linha catenária a qual sem um conversor regenerativo será consumida por resistências de frenagem. Com estas equações é possível estimar a quantidade de energia útil regenerada para o lado de alta tensão, contudo, a quantidade de energia regenerada inclui as perdas das resistências das linhas dos alimentadores, logo, tais perdas aumentam não apenas com o consumo pelos alimentadores, mas também proporcionalmente com a troca de potência entre os mesmos.

A Fig. 60 mostra o esquema de medição em duas subestações do sistema ferrovário, nos quais foram utilizadas interfaces de conversão de potência para medição via Labview, com um programa de aquisição de dados de duas horas de aquisição.

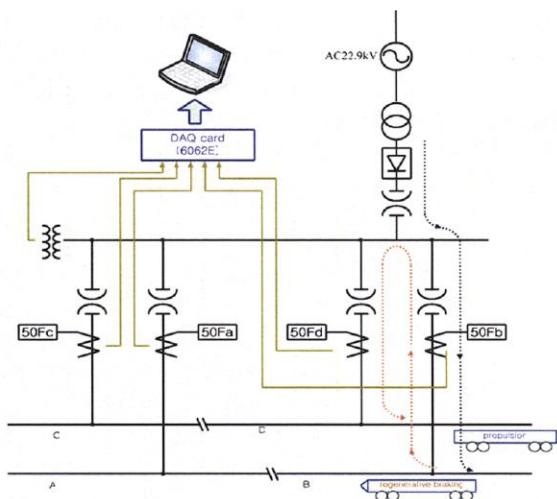


Fig. 60 - Esquema de medição e aquisição de dados das subestações – Fonte: (CHANG-HAN BAE DONG, 2007)

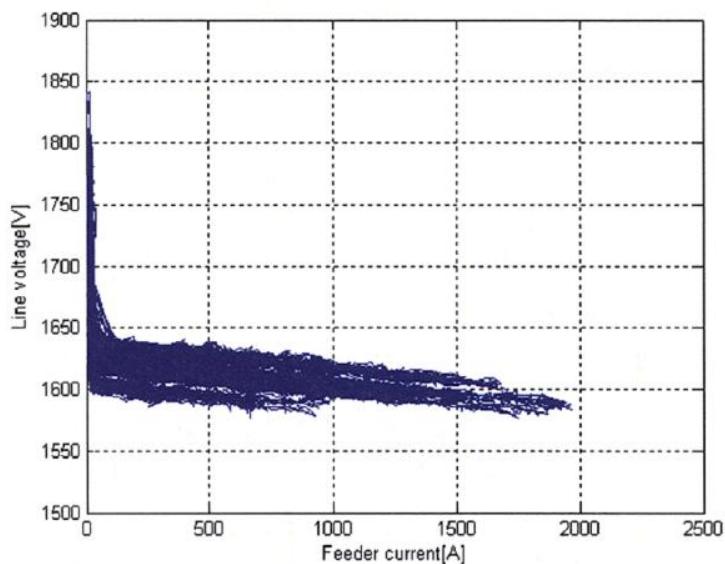


Fig. 61 - Tensão catenária e corrente na estação A – Fonte: (CHANG-HAN BAE DONG, 2007)

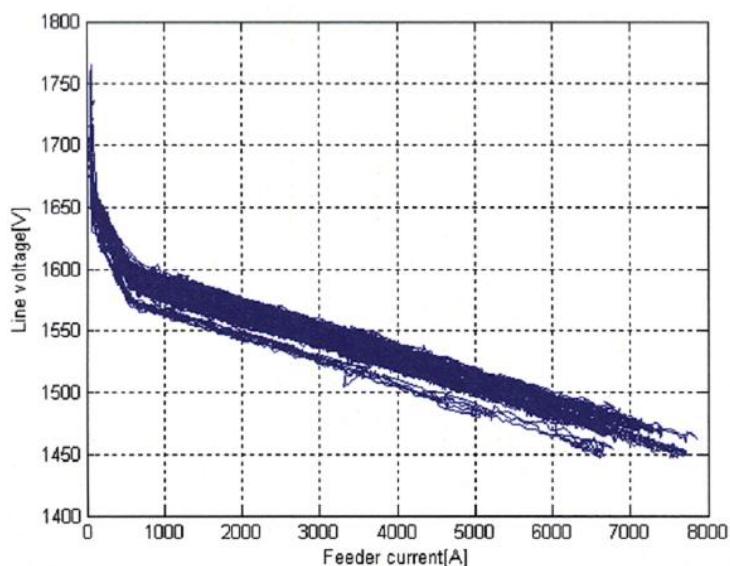


Fig. 62 - Tensão catenária e corrente na estação B – Fonte: (CHANG-HAN BAE DONG, 2007)

Na estação A as medidas foram realizadas das 06:47 até 08:47, na estação B foram medidas das 06:50 até as 07:50. A estação A possui tensão catenária maior, logo, queima a energia que poderia ser transferida para o lado de alta, em resistores de frenagem para manter a tensão estável, assim como a estação B. Se um conversor regenerativo fosse instalado em ambas, a tensão catenária seria menor, mais estável e a energia poderia ser então reaproveitada com a regeneração para o lado de alta.

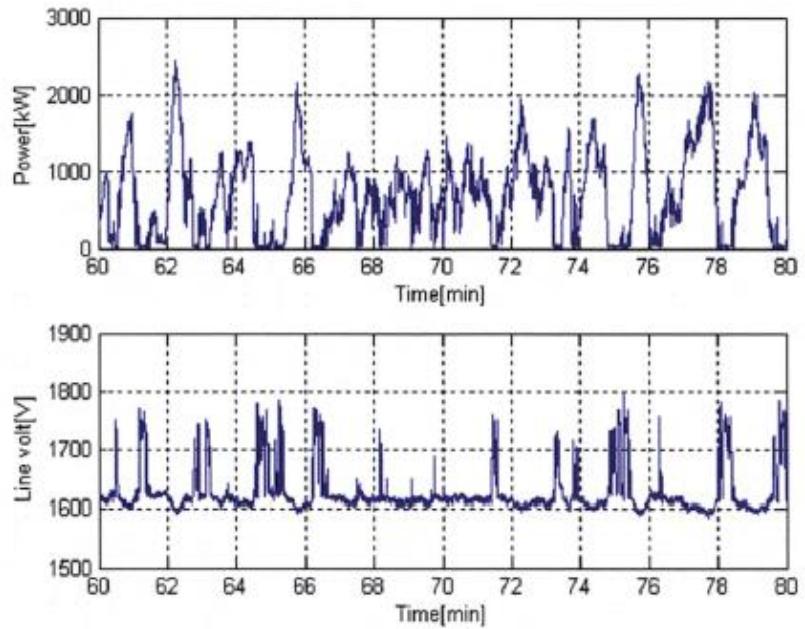


Fig. 63 - Potência e tensão catenária na estação A – Fonte: (CHANG-HAN BAE DONG, 2007)

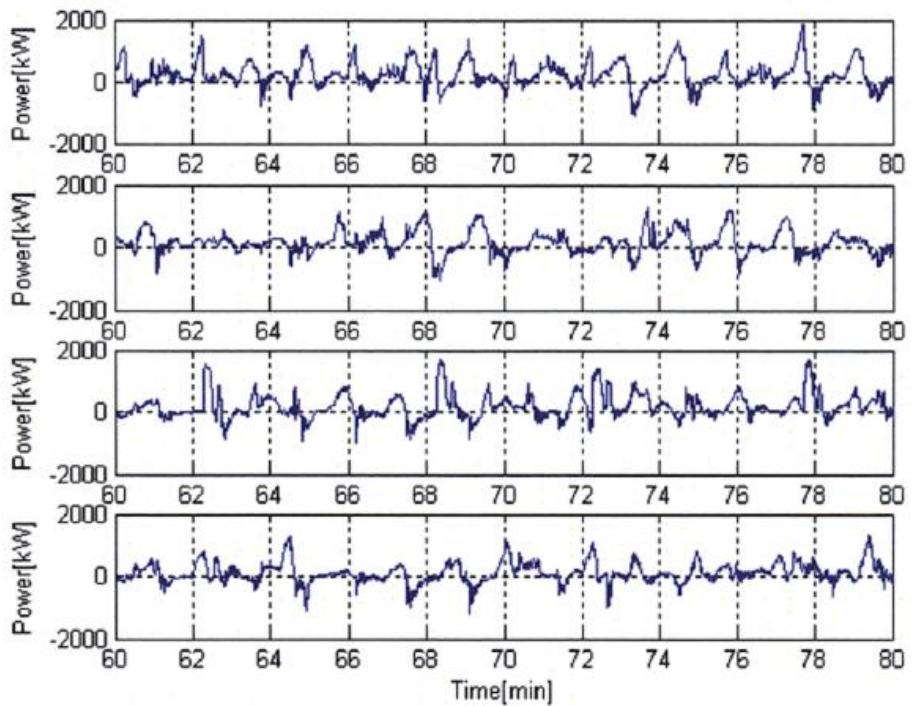


Fig. 64 - Potência nos alimentadores no tempo da estação A – Fonte: (CHANG-HAN BAE DONG, 2007)

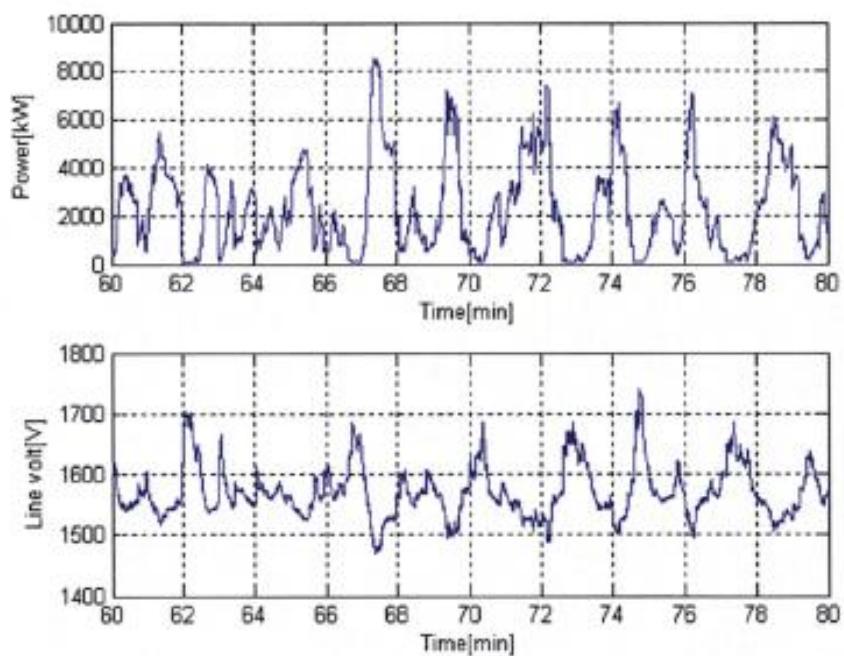


Fig. 65 - Potência e tensão catenária na estação B – Fonte: (CHANG-HAN BAE DONG, 2007)

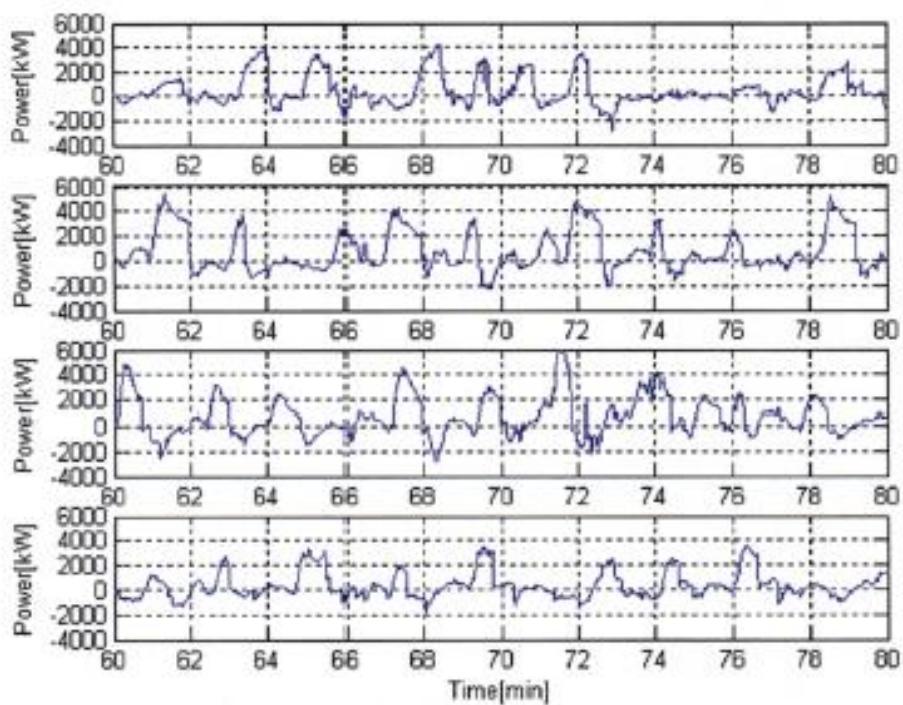


Fig. 66 - Potência nos alimentadores no tempo da estação B – Fonte: (CHANG-HAN BAE DONG, 2007)

A regeneração DC/DC já acontece nos trens e metrôs. Podemos verificar nas medições os períodos de pico de tensão dos alimentadores, referentes às paradas dos trens e também à potência negativa, que explicitam a regeneração quando a energia regenerada é consumida por outro trem. Entretanto, quando essa energia não é consumida, vemos na Fig. 61 e 62 o acréscimo da tensão catenária, além da utilização da regeneração DC/DC com um conversor regenerativo DC/AC na subestação é possível também suprir energia para o lado de alta, aumentando a performance do sistema de frenagem e reduzindo perdas, logo aplicando a eficiência energética e a regeneração dos motores. As tabelas 4 e 5 mostram os valores de energia calculados, utilizando as equações citadas e os parâmetros de cada estação.

	Energia de tração (kWh/dia)	Energia regenerada (kWh/dia)	Consumo de energia (kWh/dia)	Economia de energia (%)
Alimentador 1	3277,70	712,90	2564,80	21,75
Alimentador 2	3584,00	700,40	2883,60	19,54
Alimentador 3	2360,20	1426,10	934,10	60,42
Alimentador 4	1871,90	1579,90	292,00	84,40
Total	11093,80	4419,30	6674,50	39,84

Tabela 5 - Energia de tração e regeneração na estação A – Fonte: (CHANG-HAN BAE DONG, 2007)

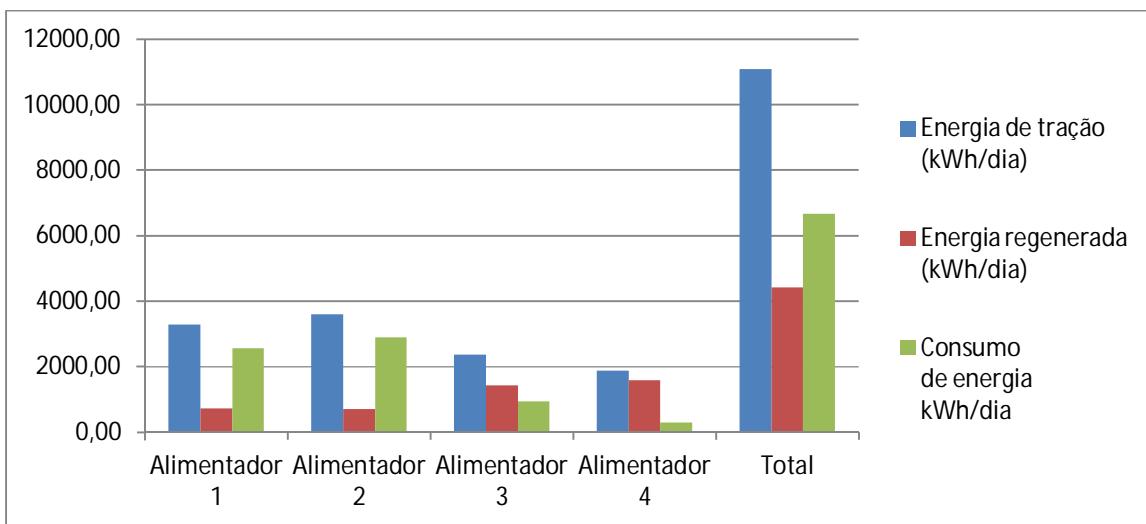


Fig. 67 - Energia de tração e regenerada na estação A – Fonte: Autoria própria com base na Tabela 4

	Energia de tração (kWh/dia)	Energia regenerada (kWh/dia)	Consumo de energia (kWh/dia)	Economia de energia (%)
Alimentador 1	13846,00	4470,00	9376,00	32,28
Alimentador 2	20481,00	3376,00	17105,00	16,48
Alimentador 3	18305,00	3175,00	15130,00	17,34
Alimentador 4	15060,00	3491,00	11569,00	23,18
Total	67692,00	14512,00	53180,00	21,44

Tabela 6 - Energia de tração regenerada na estação B – Fonte: (CHANG-HAN BAE DONG, 2007)

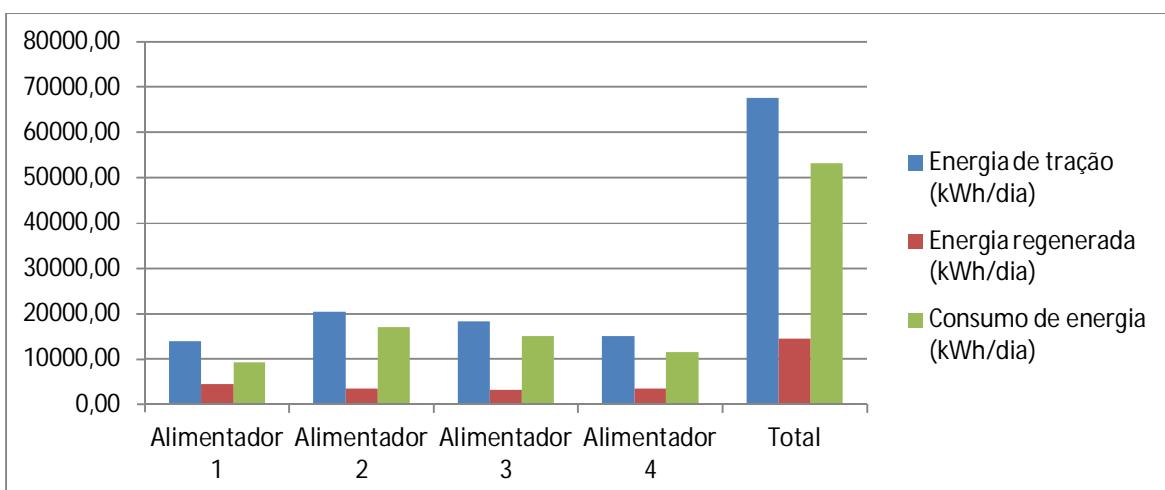


Fig. 68 - Energia de tração e regenerada na estação B – Fonte: autoria própria com base na Tabela 5

As tabelas 4 e 5, e os gráficos das Fig.s 68 e 69 mostram quanta energia é regenerada e aproveitada na regeneração DC/DC dos trens, contudo, podemos agora estimar o total de energia que poderia ser devolvida para a subestação levando em consideração número de trens, distância, energia regenerativa do conjunto de trens, velocidade e tempo de operação.

Condições	Estação A	Estação B
Distância	3,3 Km	4,6 Km
Headway	5 min	8 min
Energia regenerativa dos trens	22,8 kWh	9,13 kWh
Velocidade	35 Km.h	35 Km/h
Tempo de operação	17:21	18:10:00

Tabela 7 - Condições para cálculo – Fonte: (CHANG-HAN BAE DONG, 2007)

Com base nos dados da tabela 6, podemos estimar o quanto de energia, além do que é regenerado no lado DC, seria disponibilizado para o lado de alta tensão das subestações, onde Eg é a quantidade total de energia, Et a quantidade usada no lado DC e Er , a quantidade de energia que poderia ser aproveitada num conversor regenerativo.

Subestação	Energia Regenerada em [KWh]			Energia regenerativa dos trens [kWh/dia]
	Eg	Et	Er	
Subestação A	9459,00	4416,00	5043,00	9459,00
Subestação B	29882,00	14512,00	15310,00	29822,00

Tabela 8 - Energia regenerada total nas subestações – Fonte: (CHANG-HAN BAE DONG, 2007)

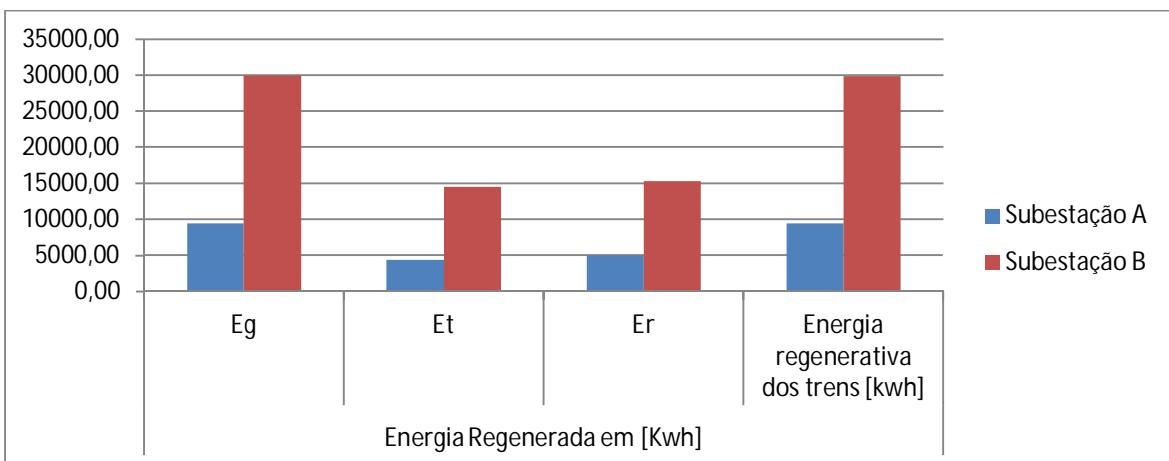


Fig. 69 - Energia regenerada nas subestações – Fonte: autoria própria com base na Tabela 7

A subestação A perde 5.043,00 kWh/dia por não possuir um conversor regenerativo e a subestação B perde 15.310 kWh/dia pela mesma razão. Se contabilizados num ano serão 1.840,695 kWh/ano na subestação A e 5.588,150 kWh/ano na subestação B, somando um total de 7,43 MWh de perdas de energia num ano, neste exemplo de duas estações na Coréia do Sul, a estação A, de Yangdong e a estação B, a de Seollung, tais dados foram medidos e refletem a importância de um sistema de regeneração incorporado ao sistema de transporte sobre trilhos nas novas estações e também nas antigas em forma de retrofit.

Apesar de ser um estudo de viabilidade, ainda não existe nenhuma linha regenerante para o lado de alta no Brasil, a única em modelo teste pela CPTM em São Paulo foi desativada por razões técnicas, avanços técnicos ainda são necessários para o uso deste tipo de regeneração. Habitualmente, com a regeneração no lado DC, consegue-se cerca de 15% de economia de energia regenerada.

Subestação	Energia Perdida em KWh/dia	Energia Perdida em MWh/ano
	Er _{dia}	Er _{ano}
Subestação Yangdong	5043,00	1,84
Subestação Seollung	15310,00	5,59

Fig. 70 - Energia perdida subestações – Fonte: (CHANG-HAN BAE DONG, 2007)

11. CONDIÇÕES DE LINHA UTILIZANDO CONVERSORES REGENERATIVOS

Para obter qualidade de energia, num determinado projeto, utilizando conversores regenerativos, além da viabilidade de potencial de economia de energia, alguns fatores elétricos de grande importância devem ser analisados.

Utilizar de uma rede confiável e saudável é também parte importante da melhoria do consumo de energia.

Altos níveis de harmônicos no lado de alta em determinados consumidores podem gerar multas, assim como fator de potencial fundamental abaixo de 0,92.

Para um bom dimensionamento de uma rede com conversores regenerativos, precisamos salientar e inquirir sobre os seguintes pontos principais:

- ✓ Razão de curto-circuito do trafo de média para baixa
- ✓ Nível total de harmônicos

11.1. RELAÇÃO DE CURTOCIRCUITO

(SIEMENS, 2011)

A relação de curtocircuito (RSC) é razão entre a potência de curtocircuito do transformador pela potência aparente total dos conversores instalados no lado do secundário, e pode ser dada então pela seguinte expressão:

$$RSC = S_{k\ linha}/S_{k\ conversores}$$

A relação de curtocircuto é um componente importante para estimar a presença de harmônicos com cada tipo de conversor.

- **Sistemas com alta RSC, $RSC > 50$ (sistemas fortes)**

Sistemas com $RSC > 50$ sempre requerem a instalação de reatâncias de linha para retificadores de 6 pulsos. Estes limitam os harmônicos de corrente e protegem o conversor contra sobrecargas térmicas.

- **Sistemas com média RSC, $15 \leq RSC \leq 50$**

Sistemas com RSC média geralmente não necessitam de medidas especiais para instalação, dependendo do potência dos conversores pode ser necessária a instalação de reatores de entrada onde houverem retificadores de 6 pulsos.

- **Sistemas com baixa RSC ≤ 15 (sistemas fracos)**

Sistemas com $RSC \leq 15$ devem ser verificados não somente pela perturbação do sistema de alimentação, como por exemplo por harmônicos de tensão, mas também por outros efeitos indesejáveis que podem ocorrer, como sobrecorrente, superaquecimento e queima dos equipamentos, por esta razão, o mínimo permitido para o RSC na instalação de conversores é 10.

Para todos os níveis de RSC listados acima, um filtro de harmônicos ou a utilização de um conversor regenerativo com filtros (AFE) torna o sistema livre das restrições harmônicas listadas, com exceção dos sistemas com $RSC < 10$. Mesmo esse, com sistemas AFE ou filtros de harmônicos tem sua operação livre de perturbações.

11.2. NÍVEL TOTAL DE HARMÔNICOS

(SIEMENS, 2011)

Num sistema com retificadores de seis pulsos, podemos verificar a presença dos harmônicos de corrente dadas as tabelas e gráficos abaixo.

RSC >> 50	h	1	5	7	11	13	17	19	23	25	THD(I)
	ih	100	45,8	21,7	7,6	4,6	3,4	1,9	1,9	1,1	51,7
RSC = 50											
	h	1	5	7	11	13	17	19	23	25	THD(I)
	ih	100	37,1	12,4	6,9	3,2	2,8	1,9	1,4	1,3	40
RSC < 15											
	h	1	5	7	11	13	17	19	23	25	THD(I)
	ih	100	22,4	7	3,1	2,5	1,3	1	0,8	0,7	23,8

Tabela 9- THD em retificadores de seis pulsos

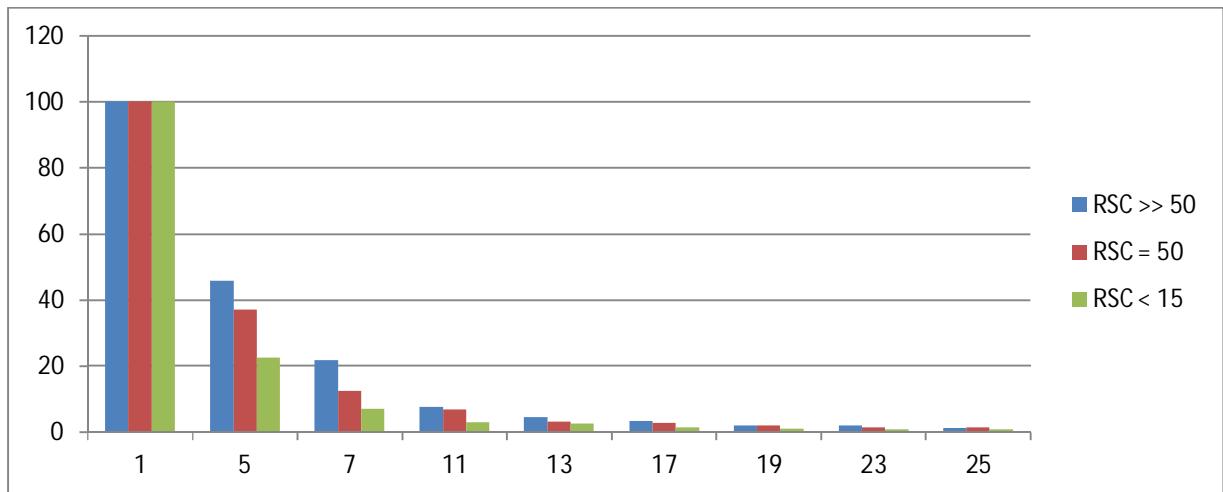


Fig. 71 - Nível de harmônicos em relação a RSC em retificador de seis pulsos

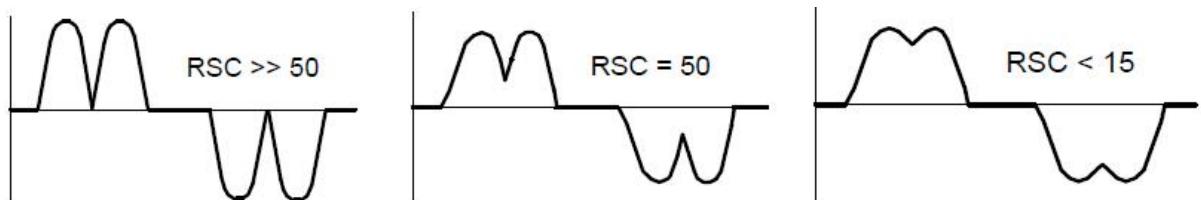


Fig. 72 - Típicas formas de forma de corrente e RSC

Em retificadores regenerativos, temos diferentes distribuições de harmônicos, listados na tabela abaixo. Pode-se notar que há diferenças entre o THD quando o conversor motoriza e quando regenera. Este conversor listado abaixo é regenerativo, contudo não possui a tecnologia AFE, com filtros e nem com PWM como retificador de linha, sua operação consiste em condução a cada 120° com um reator de linha de 4% numa RSC = 50.

Motorizando	1	5	7	11	13	17	19	23	25	THD(I)	
	h	100	30,6	8,6	5,7	3,1	2,1	1,6	1,2	1,1	32,6
Regenerando	ih(%)	1	5	7	11	13	17	19	23	25	THD(I)
	ih(%)	100	20	16	11	8	7	6	5	4	32

Tabela 10 - THD em conversor regenerativo sem AFE

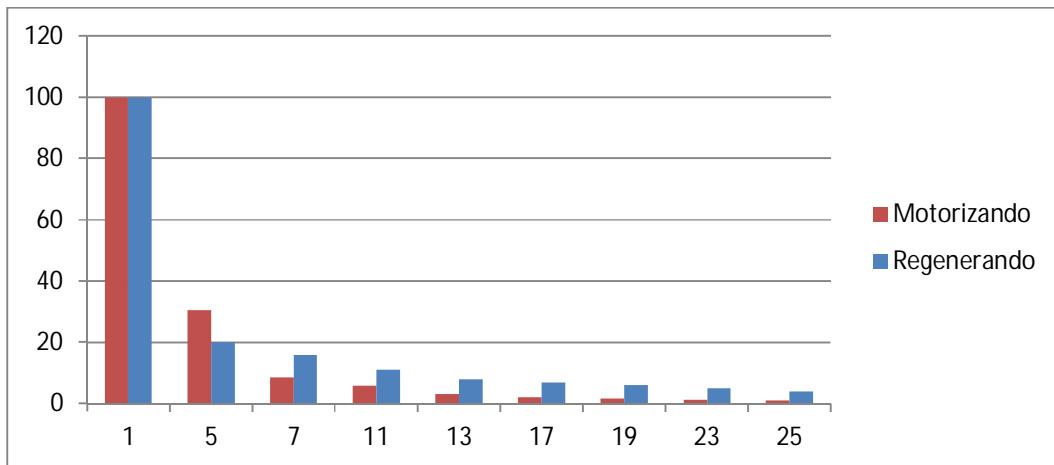


Fig. 73 - Nível de harmônicos em relação a RSC em retificador regenerativo sem AFE

Na 5^a harmônica de corrente, que é mais forte na operação em modo motor, há redução considerável em operação regenerativa. Desta forma, todas as outras harmônicas aumentam levemente, devido à redução na 5^a harmônica há redução do THD de corrente, logo, o conversor deve ser suficiente para o pior tipo de operação, neste caso a motorização.

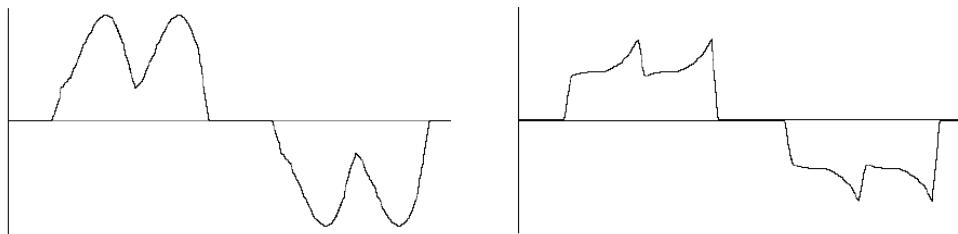


Fig. 74 - Formas de onda na motorização e regeneração

Os conversores com tecnologia AFE, filtros e retificadores de linha PWM, apresentam uma performance de THD muito menor que os outros dois, e são basicamente o modelo mais tecnicamente viável para evitar perturbações na rede:

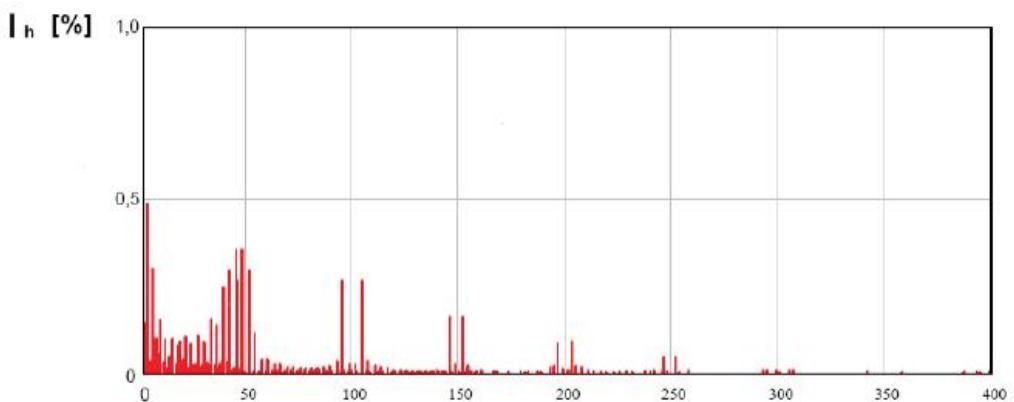


Fig. 75 - Harmônicos de corrente num conversor AFE

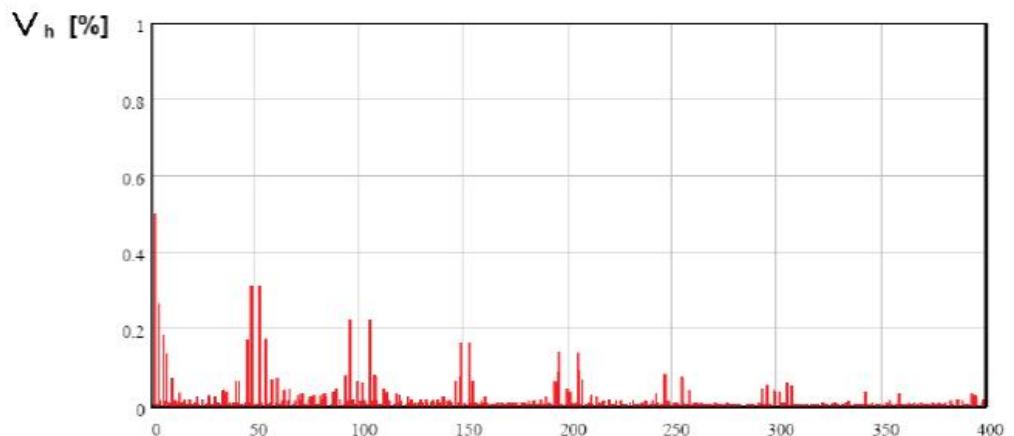


Fig. 76 - Harmônicos de tensão num conversor AFE

	THD(V)	THD(I)
RSC >> 50	4,10%	1,80%
RSC = 50	3%	2,10%
RSC = 15	2,60%	2,30%

Tabela 11 - THD em conversores regenerativos com AFE

O gráfico da fig. 76 e a tabela 10 revelam que os conversores regenerativos AFE com PWM de linha, são sem dúvida alguma a melhor alternativa para uso de conversores regenerativos nos quesitos harmônicos e perturbações de rede. Logicamente, todas as opções devem ser estudadas para a viabilização econômica do projeto para cada tipo de rede e Potencial de regeneração.

Com base nos dados de Potência aparente, potência reativa e potência reativa harmônica, é possível calcular o fator de Potência real (DPF) na linha para um projeto com conversores de frequência regenerativos.

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

Onde P é a potência ativa em [W], Q a potência reativa em [VAR], D a potência harmônica reativa em [VAR] e S potência aparente em [VA].

$$D = 3 \cdot V \cdot \sqrt{\sum_{h=2}^{h=\infty} I_h^2}$$

Onde I_h são os componentes de harmônicos de corrente, num somatório de $h=2$ até o número de harmônicos significantes para o sistema.

12. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

É certo que a regeneração já é tão antiga quanto o desenvolvimento da máquina de indução. Contudo, na era dos conversores estáticos, para uso eficiente dos mesmos, ela é uma das importantes ferramentas para o uso consciente da energia, para tal, os conversores regenerativos são essenciais.

Pudemos ver ao longo da monografia as aplicações nas quais o Potencial regenerativo é bem maior, contudo, estas são apenas aplicações básicas, outros tipos de máquinas e diversas utilizações também apresentam esta característica.

Na aplicação dos elevadores, é visível que quanto maior o número de elevadores, maior pode ser a alternância entre ciclos de subida e descida, logo, maior poderá ser a energia economizada com a regeneração. Alguns sistemas inteligentes de prédios comerciais preocupados com a confiabilidade e eficiência do uso da sua energia utilizam este conceito e o aplicam em todos os elevadores.

Na aplicação de içamento pudemos calcular quanta energia é economizada com a regeneração e pudemos ver que a quantidade de energia economizada está conectada à potência. Logo, a carga e velocidade do acionamento das pontes.

Já na aplicação de centrífugas, nosso exemplo mostra um valor de kWh de R\$ 13.450,69 / safra, contudo, consideramos a menor das centrífugas, a de 1200 Kg, se considerarmos a maior de 2000 Kg, o momento de inércia é 2 vezes maior e portanto a energia regenerada também, considerando que um conversor regenerativo do porte de uma usina custa aproximadamente R\$ 160.000,00 com impostos e serviço, com a menor das centrífugas o tempo de payback simples é de 12 anos, mas se considerarmos a de 2000 Kg, o payback simples é 6 anos. Nem todas as usinas geram sua própria energia, e isso deve ser levado em conta na quantidade de uso de energia na ponta e fora da ponta.

A vida útil de um conversor sem manutenção alguma é de cerca de 10 anos em operações críticas, se considerarmos manutenções periódicas com trocas de IGBTs, estes podem certamente retornar o investimento de forma vantajosa a partir dos 6 anos de funcionamento.

As aplicações de trens certamente impressionam com a quantidade de energia restituída para o sistema, contudo, sua implementação como retrofit, além de trabalhosa e custosa, envolve trâmites de licitações por parte dos governos.

Cada sistema de vagões possui suas características próprias em relação ao número de passageiros e fluxo. Sendo assim, uma estimativa de custos e retorno, torna-se difícil e de certa forma inexata sem uma base extensiva estatística das mesmas. O estudo descreve o Potencial de economia, que é alta e deve ser com certeza levada em consideração nos novos projetos de transporte sobre trilhos.

Os tipos de características das redes onde os conversores serão instalados é um ponto crítico dos projetos elétricos e deve ser estudado cautelosamente. A regeneração é um recurso muito viável, porém o todo deve ser analisado, um sistema regenerativo não confiável é certamente pior em termos financeiros do que um não regenerativo. Este é um dos fatores mais negligenciados na indústria, e leva à descrença do sistema de regeneração por mau uso e mau projeto dos mesmos. Os harmônicos devem ser considerados e também o tipo da rede (RSC), a fim de selecionar o tipo de conversor usado, regenerativo sem AFE ou com AFE, o que certamente entra na planilha de análise de custos de cada projeto. A maioria dos fabricantes têm planilhas de softwares de simulação de fácil acesso por engenheiros de vendas para projeto dos mesmos, estes devem ser discutidos e trabalhados em conjunto com áreas pertinentes.

O objetivo da monografia é chamar a atenção para este segmento da tecnologia de acionamentos, que há décadas já desenvolve soluções para eficiência dos acionamentos em suas diversas aplicações.

Fabricantes de máquinas também devem se atentar a esse poderoso recurso de otimização da planta de seus clientes, estes são negligenciados por aumentar o custo inicial dos projetos de máquinas. Uma análise financeira inteligente deve ser feita, não considerando apenas o quanto custa, mas qual a taxa de retorno do investimento e, dessa forma, tornar seus equipamentos mais competitivos não apenas nacional ou localmente, mas de forma global.

13. BIBLIOGRAFIA

1. ABB. **Technical guide No. 8 Electrical Braking.** [S.I.]: [s.n.]. 2011. p. 36.
2. ANEEL. **ANEEL.gov**, 11 dez. 2002. Disponível em:
<http://www.aneel.gov.br/cedoc/dec20024508.pdf>. Acesso em: 30 set. 2013.
3. ASHOK B. KULKAMI, H. N. A. E. W. G. A Comparative Evaluation of Line Regenerative and Non-Regenerative. **IEEE**, Hom Lake, MS 38637, 2000. 7.
4. BOSE, B. K. **Modern Power Electronics and AC Drives**. 1. ed. Upper Side River, NJ: Person Education LTD., 2002.
5. BOSE, B. K. **Power Electronics and Motor Drives Advances & Trends**. 1. ed. Burlington: Elsevier Academic Press, 2006.
6. C. A. FERREIRA, F. P. D. P. M. A. R. G. M. H. L. O. A. B. A. P. A. S. S. B. R. M. **Atuação da Eletrobrás, através do Procel**. THE 8th LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION - CLAGTEE 2009. [S.I.]: Eletrobrás. 2009. p. 7.
7. CHABU, P. D. I. E. **ERG-008 - FUNDAMENTOS DE MÁQUINAS ELÉTRICAS**. ESPECIALIZAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS, GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. São Paulo: [s.n.]. 2012. p. 152. Material de aula.
8. CHANG-HAN BAE DONG, J. Y.-G. K. S.-K. C. J.-K. M. **Calculation of regenerative energy in DC 1500V electric railway substations**. 7th International Conference on Power Electronics. Daegu: IEEE. 2007. p. 5.
9. DRURY, B. **The Control Techniques Drive and Control Handbook**. London: Cambridge Univeristy Press, 2001.
10. FABIÁN YAKSIC. ABINEE - Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica, São Paulo, p. 17, 18, 2012. Disponível em:
<http://www.abinee.org.br/informac/arquivos/efienerg.pdf>. Acesso em: 30 set. 2013.
11. FITZGERALD, A. E. **Máquinas Elétricas com introdução a eletrônica de potência**. 6. ed. Porto Alegre: BOOKMAN, 2006.
12. IRVING L. KOSOW, P. D. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. 15. ed. São Paulo: Editora Globo, v. 1 e 2, 2005.
13. MOHAN, N. **Power Electronics and Drives**. 1st. ed. Minneapolis, MN: MNPERE, 2003.
14. NASAR, S. A. **Electric Drives**. 2a. ed. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, v. 1, 2006.
15. NYTKO, B. J. **MODELING AND DEMONSTRATING REGENERATIVE BRAKING OF A SQUIRREL CARGE INDUCTION MOTOR WITH VARIOUS DESACCELERATION USING V BY F CONTROL**. NAVAL POST GRADUATE SCHOOL. Las Vegas, p. 149. 2000.

16. OENNING, R. ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA DE UM PROJETO DE IMPLANTAÇÃO DE VARIADORES DE VELOCIDADE EM BOMBAS CENTRÍFUGAS INDUSTRIAS , Salvador, 2011. 91.
17. RICHARD H. OSMAN, S. M. I. A. J. B. B. L. M. I. A Regenerative Centrifuge Drive Using a Current-fed inverter with Vector Control. **IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS**, Seattle, WA, November/December 1991. 5.
18. SAY, M. G. **Alternating Current Machines**. 4. ed. London: Pitman Publishing Limited, v. 1, 1976.
19. SIEMENS. **MasterDrive Application Manual**. Erlangen: [s.n.], 1999.
20. SIEMENS. **Sinamics Engineering Manual**. Erlangen: Publicis Corporate Publishing. 2011. p. 468.
21. SIEMENS LD. **Sugar Centrifuges with MasterDrives**. Large Drives Division A&D LD. [S.I.], p. 9. 2002.