



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA
PECE - PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA

MARCOS FERREIRA LOPES JUNIOR

**Oportunidades de Eficiência Energética com a
utilização de Conversores de Frequência**

MONOGRAFIA DE CONCLUSÃO

São Paulo
2015

MARCOS FERREIRA LOPES JUNIOR

Oportunidades de Eficiência Energética com a utilização de Conversores de Frequência

Monografia apresentada como forma de avaliação final do Curso de Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética na Universidade de São Paulo (USP).

Orientador: José Aquiles B. Grimoni

São Paulo
2015

Catalogação-na-publicação

Lopes, Marcos

Oportunidades de Eficiência Energética com a utilização de
Conversores de Frequência / M. Lopes – São Paulo, 2015.
55 p.

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

1.MOTORES ELÉTRICOS 2.ECONOMIA DE ENERGIA I.Universidade de
São Paulo. Escola Politécnica. PECE – Programa de Educação Continuada em
Engenharia II.t.

Dedico este trabalho a minha esposa Luciane Scariot, aos meus familiares e amigos do curso de especialização.

Agradecimentos

Um especial agradecimento a minha esposa Luciane Scariot que acompanhou e me apoiou desde a escolha até a conclusão dessa especialização, inclusive todos os momentos em que ficou privada de minha companhia.

Agradeço também aos meus pais e irmã por todo o apoio e incentivo que recebi durante todas as etapas de minha graduação como Engenheiro Eletricista.

A toda a equipe do programa de especialização.

“Não é o conhecimento, mas o ato de aprender, não a posse mas o ato de chegar lá,
que concede a maior satisfação.”

(Carl Friedrich Gauss)

Resumo

Um fornecimento seguro, confiável e acessível de energia é fundamental para a estabilidade e desenvolvimento econômico. A questão ambiental, aumento na demanda e necessidade de segurança na provisão de energia, impõem desafios para os quais uma maior eficiência na utilização dos recursos disponíveis se torna essencial.

A prática do aproveitamento racional dos recursos elétricos disponíveis traduz-se em menos investimentos na geração e infraestrutura de distribuição de energia elétrica, e menos impactos ambientais. Pelo lado do setor privado se traduz em maior competitividade e produtividade em processos com alta demanda energética.

O uso de acionadores de velocidade ajustável (AVA) para o controle de motores de indução possui um grande potencial para economia de energia, com ótimos resultados operacionais, financeiros e ambientais.

O objetivo do presente texto é demonstrar como esses resultados podem ser alcançados, apresentando as principais aplicações, oportunidades e barreiras para uma expansão na utilização dessa tecnologia, que já está disponível no mercado global, com a participação de grandes fornecedores multinacionais e alguns nacionais.

Abstract

Providing a safe, reliable and affordable energy is critical to the stability and economic development. Environmental issues, increased demand and need for security in energy supply, pose challenges for which a more efficient use of available resources becomes essential.

The practice of rational use of available electrical resources translates into less investment in electric power generation and distribution infrastructure, and lower environmental impacts. On the side of the private sector translates into increased competitiveness and productivity in processes with high energy demand.

The use of adjustable speed drives (ASD) for control induction motors has a great potential for energy saving, with excellent operational, financial and environmental results.

The objective of this paper is to demonstrate how these results can be achieved, with the main applications, opportunities and barriers to expansion in the use of this technology, which is already available in the global market, with the participation of large multinational suppliers and some national.

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Componentes de um acionamento por conversor de frequência . . .	13
Figura 1.2 – Participação estimada do uso de electricidade em sistemas motrizes mundial por aplicação final	15
Figura 1.3 – Custo de Ciclo de Vida para Motor Elétrico	17
Figura 2.1 – Esquema de um Conversor de Frequência PWM	20
Figura 2.2 – Formas de Onda e Distorção Harmônica Total de Corrente	22
Figura 2.3 – Variadores de Velocidades Mecânicos e Eletrônicos	26
Figura 2.4 – Operação em Quatro Quadrantes do plano Torque-Velocidade . . .	27
Figura 2.5 – Curva Torque-Velocidade Motor de Indução	28
Figura 3.1 – Curva de Performance Típica para uma Bomba Centrífuga	30
Figura 3.2 – Ponto de Operação do Sistema	31
Figura 3.3 – Tipos de cargas e variação do Torque com a Velocidade	32
Figura 3.4 – As Leis de Afinidade para cargas centrífugas	33
Figura 3.5 – Operação com válvula de estrangulamento (1) e variação de velocidade (2)	34
Figura 3.6 – Exemplo de curva de duração	34
Figura 3.7 – Ciclo de operação para vazões parciais	37
Figura 3.8 – Relação Potência (%) e vazão (%) sistema por estrangulamento	38
Figura 3.9 – Relação Potência (%) e vazão (%) sistema de controle de velocidade	39
Figura 3.10 – Valores calculados para potências médias	40
Figura 3.11 – Esquema exemplo da interligação do resistor de frenagem e controle	42
Figura 3.12 – Conversor de Frequência com Retificador Ativo (AFE)	43
Figura 4.1 – Fluxo de Energia Elétrica BEN 2015	48
Figura 4.2 – Participação da força motriz no consumo de eletricidade na indústria	49
Figura 4.3 – Distribuição de energia em força motriz por setor e uso final na indústria	50

Lista de Tabelas

Tabela 3.1	– Potencia necessário com relação a velocidade de rotação da bomba	33
Tabela 3.2	– Ciclo de Operação para vazões parciais	37
Tabela 3.3	– Relação entre vazão e potência para sistema por estrangulamento .	38
Tabela 3.4	– Relação entre potência e vazão sistema por controle de velocidade	39
Tabela 3.5	– Economias anuais	40

Sumário

1 Introdução.....	12
1.1 Justificativa e Motivação	12
1.2 Objetivo.....	16
1.3 Estrutura do Trabalho.....	17
2 Conceituação Básica e Aplicações sobre Conversores.....	19
2.1 Princípios de Funcionamento dos Conversores PWM	19
2.1.1 Efeitos da operação dos conversores em motores de indução e no sistema de distribuição	21
2.2 Controle de Velocidade nos Processos	25
2.3 Frenagem Dinâmica e Regenerativa.....	27
2.3.1 Operação nos quatro quadrantes	27
2.3.2 Máquina de indução funcionando como gerador	29
3 Desenvolvimento.....	30
3.1 Controles de Vazão Convencionais	30
3.1.1 Curvas de operação das bombas e do sistema.....	30
3.1.2 Tipos de cargas	32
3.2 Controle de Vazão por variação da velocidade.....	33
3.2.1 Frequência e Tempo de Operação.....	35
3.2.2 Eficiência dos motores e conversores em cargas parciais.....	36
3.2.3 Estimativa de economia de energia.....	37
3.2.4 Resultados	40
3.3 Frenagem Regenerativa.....	42
3.3.1 Frenagem elétrica	42
3.3.2 Princípios e equacionamento básico	45
3.3.3 Ponte rolante regenerativa	46
3.3.4 Resultados	48
4 Oportunidades e dificuldades	49
4.1 Oportunidades.....	49
4.2 Dificuldades e Barreiras	52
5 Conclusão.....	54

1 Introdução

1.1 Justificativa e Motivação

Segundo dados da IEA - International Energy Agency ([Waide,2011](#)) sistemas motrizes são os equipamentos de uso final, com maior demanda por energia elétrica no mundo, mais que o dobro do segundo que é a iluminação. Estima-se ([Falkner,2011](#)) que os sistemas motrizes representam de 43% a 46% de toda a energia elétrica consumida no mundo, sendo que em alguns países esse percentual é superior a 50%. Portanto o aumento de eficiência em sistemas motrizes é extremamente relevante, tendo em vista a participação expressiva desses sistemas no consumo de energia elétrica.

Um sistema eletromotriz acionado por conversor de frequência é normalmente formado por:

- Motor elétrico, que converte energia elétrica em energia mecânica;
- Um conversor de frequência, que “transforma” a energia elétrica do sistema de distribuição em uma forma controlável;
- Os equipamentos acionados também chamados de “cargas” (ventilador, bomba, elevador, correia, etc. . . .) que são os elementos que atuam nos processos.

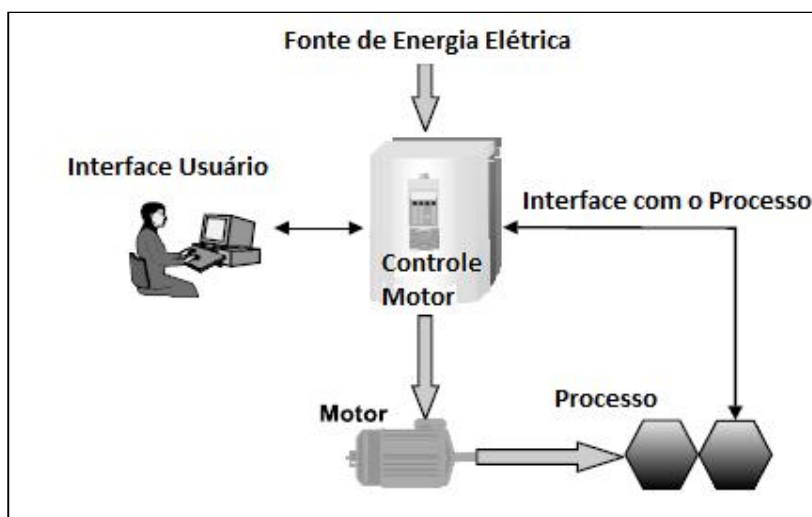


Figura 1.1 – Componentes de um acionamento por Conversor de frequência

Fonte: ABB Drives - Technical Guide Book

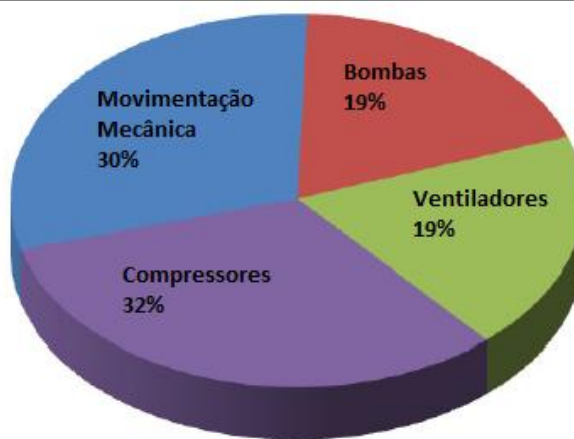
Os motores elétricos são utilizados nos diversos setores da sociedade contemporânea e dentre os vários tipos, os que tem a maior participação no consumo de energia são os motores de indução trifásicos. Esses são amplamente utilizados no setor industrial, devido as suas principais características como simplicidade de construção, que proporciona um baixo custo, eficiência e fator de potência elevados quando dimensionados corretamente para a carga.

O conceito técnico dos conversores de frequência é controlar a velocidade e torque do motor elétrico (Khalid,2014). Se a velocidade de um sistema motriz pode ser controlada para corresponder as demandas variáveis de um processo específico, podemos melhorar a eficiência do sistema.

Os motores de indução trifásicos são máquinas que funcionam com velocidade constante, sendo que a velocidade de rotação esta diretamente relacionada pela frequência de alimentação e o número de pólos magnéticos do estator. Normalmente a frequência do sistema é fixa, no caso do Brasil 60Hz, e o numero de polos no estator é definido na construção da máquina. Apesar de existirem modelos de motores de indução onde podemos variar o numero de polos no estator por meio de comutação adequada dos enrolamentos, esses são motores de construção mais trabalhosa e maiores, sendo que permitem apenas uma variação em valores discretos na velocidade de rotação. No caso dos conversores de frequência, a tensão e frequência de alimentação do motor são controladas para promover uma variação continua na velocidade.

A utilização de velocidade controlada nos sistemas motrizes pode trazer as maiores economias de energia nas aplicações de manipulação e vazão de fluidos (bombas, compressores e ventiladores), com demanda variável e que normalmente não operam na maior parte do tempo na condição nominal de projeto que é a máxima possível ou necessária para o processo. Um exemplo típico são sistemas de ar condi-onado (HVAC), onde o dimensionamento do sistema leva em consideração condições ambientais de temperatura que ocorrem com uma frequência muito reduzida na pratica.

O maior potencial de economia de energia nas aplicações de manipulação e vazão de fluidos é devido a característica de variação do torque em proporção quadrática com a velocidade de rotação, características da maioria das máquinas utilizadas nesses processos. Em (Falkner,2011) demonstra-se que acionamentos com maior consumo de energia entre os sistemas motrizes, são justamente os que possuem os maiores potenciais de economia (figura 1.2). Portanto o uso de conversores de frequência para controle de velocidade é uma aplicação com grande relevância, quando a questão é a eficiencia de sistemas eletromotrizes.



Source: De Almeida *et al.* 2008; A+B International, 2009.

Sistemas motrizes típicos, por tipo de máquina

Máquina	Serviço prestado pelo sistema motoriz
Compressores	Ar: pneumática, moldagem por sopro, aeração, material de transporte
	Refrigeração: Bombas de refrigeração / congelamento, bombas de calor Outros: liquefação de gás
Movimentação	Agitadores, misturadores, trituradores, extrusoras, têxteis, manuseio de materiais, elevadores, escadas rolantes, ferramentas
Bombas	Abastecimento e tratamento de água, bombas hidráulicas, petroquímica e alimentos. Circuladores: em refrigeração, aquecimento, torre de resfriamento
Ventiladores	Ventilação, secagem, caldeira / combustão de fornos industriais

Figura 1.2 – Participação estimada do uso de electricidade em sistemas motrizes mundial por aplicação final (Fonte: IEA - International Energy Agency)

Nos casos em que os conversores de frequência são usados no controle de vazão, substituem válvulas de controle, dampers e outros dispositivos que normalmente limitam a vazão por algum estrangulamento no sistema e consequente inserção de perdas de carga. Uma analogia muito citada em varias referência seria dirigir um automóvel com o acelerador no máximo e regularmos a velocidade pelo uso dos freios (Popovic,2012).

Além das aplicações para controle de velocidade, e devido ao grande avanço na tecnologia de controle dos conversores de frequência, existem disponíveis no mercado conversores regenerativos “Active Front-End” (AFE) que operam nos quatro quadrantes de energia. Possibilitando retornar energia de frenagem dinâmica para o sistema e com uma distorção harmônica bem abaixo dos níveis definidos na IEEE 519 (Rodrigues,2005).

Conversores de frequência regenerativos são capazes de aproveitar a energia de frenagem das cargas, reaproveitando parte da energia consumida inicialmente para acelerar as mesmas, sendo essa uma aplicação interessante do ponto de vista de reaproveitamento e conservação da energia. Processos com constantes paradas e acelerações e grande inércia como elevadores, pontes rolantes, esteiras transportadoras em declive ([Zhao,2014](#))

Na União Européia, o uso de conversores de frequência foi identificado como a tecnologia disponível para sistemas motrizes com o potencial mais significativo com relação a economia de energia ([Almeida,2005](#)). Além dos benefícios relativos a conservação de energia o uso de conversores de frequência, propícia diversos outros benefícios, entre os podemos citar:

- Melhoria na confiabilidade dos sistemas;
- Melhoria na qualidade e controle dos processos;
- Partidas e paradas suaves;
- Manutenção reduzida nos componentes e aumento da vida útil

O custo de ciclo de vida de sistemas motrizes é predominantemente devido aos custos energéticos para operação dos motores. Os valores exatos para o custo de ciclo de vida de um motor elétrico, dependem do custo da energia elétrica consumida durante o período de funcionamento, o custo do investimento, manutenção e descarte do sistema.

Os custos para todos os itens variam de acordo com o local, mas diversas referências citam que o custo referente a energia para acionamento dos sistemas motrizes representam aproximadamente 90% do custo total ([Saidur,2012](#)). Portanto, mesmo pequenos ganhos em eficiência podem ser extremamente vantajosos ao longo da vida útil de um sistema motriz.

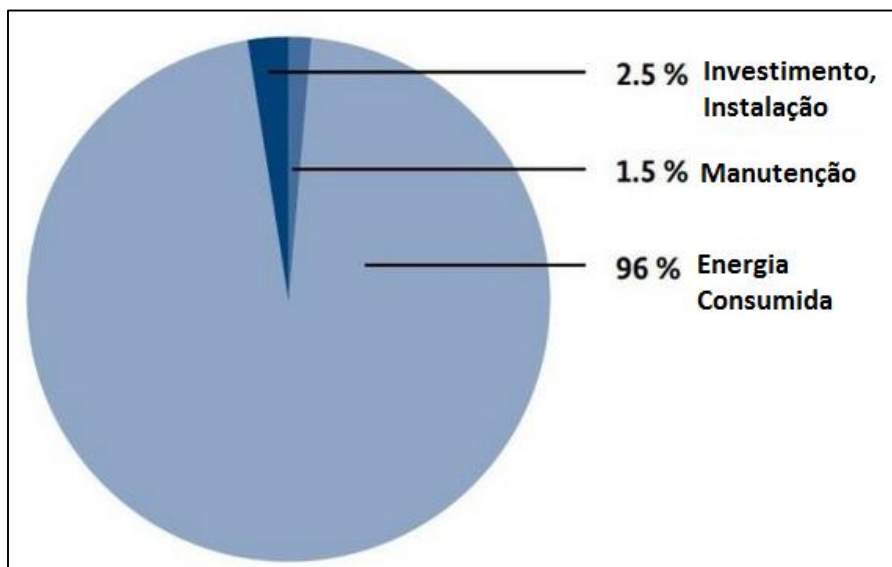


Figura 1.3 – Custo de Ciclo de Vida para Motor Elétrico
Fonte: Federal Ministry of Economic Affairs and Energy Germany

A primeira vista, parece que simplesmente utilizar um motor mais eficiente seria satisfatório. No entanto quando se avalia a eficiência econômica do sistema inteiro, percebe-se que não é essencialmente o motor que determina a eficiência ótima para cada nível da demanda de processo, mas sim a maneira na qual a velocidade do motor ou da máquina é controlada. Em síntese existem grandes potenciais de economia de energia quando olhamos o sistema completo e não apenas os motores.

A utilização de componentes mais eficientes é apenas um aspecto para a otimização de um sistema. Uma falta de adequação do sistema com as demandas do processo é uma das principais causas de perda de energia. Componentes relativamente eficientes podem ser combinados para criar um sistema altamente ineficiente (Falkner,2011)

O potencial de economia de energia no controle eletrônico de velocidade é de quatro a cinco vezes maior do que a de motores eficientes (Rooks,2003). Considerando os custos do ciclo de vida, os investimentos em economia de energia muitas vezes pode ser amortizado em apenas alguns meses.

1.2 Objetivo

O presente trabalho pretende apresentar as principais características dos conversores de frequência, analisando os princípios básicos de funcionamento, em

conjunto com os requisitos das principais aplicações que possuem potencial para economia de energia.

Será apresentado um exemplo de aplicação para controle de vazão e outro de frenagem regenerativa com os resultados estimados apresentados para uma avaliação e discussão na conclusão final, onde pretende-se estimar potências resultados na aplicação em larga escala dessas tecnologias no cenário nacional, tendo como base o Balanço Energético Nacional - 2015.

Embora a tecnologia esteja disponível e consolidada no mercado faz algum tempo, as aplicações com objetivo exclusivamente de eficiência energética são poucas e serão verificadas as principais dificuldades no sentido de aumentar a utilização dessa tecnologia.

1.3 Estrutura do Trabalho

No capítulo 1 foi apresentado a relevância dos sistemas motrizes sobre o consumo de energia elétrica no mundo e os conceitos básicos do controle de velocidade e torque em motores pelo uso de conversores de frequência; apresentação resumida das principais aplicações onde os conversores podem ser utilizados para aumento de eficiência energética e a importância da análise do sistema completo e do custo de ciclo de vida para avaliação e tomadas de decisão.

No capítulo 2 temos os princípios básicos para melhor compressão dos itens que serão apresentados na sequência. O princípio de funcionamento dos conversores de frequência PWM e os pontos a serem observados na interação entre os conversores e o sistema de alimentação e os motores de indução. Em seguida a importância do controle de velocidade para processos e o conceito de frenagem dinâmica de cargas onde o motor de indução funciona como um gerador de energia para o sistema.

No capítulo 3 apresentamos o desenvolvimento de duas possíveis aplicações, sendo uma delas o controle de vazão em um sistema de bombeamento de água, e a outra uma ponte rolante regenerativa. Em ambos os casos tentou-se apresentar informações e dados suficientes para a análise dos resultados técnicos e econômicos que são os objetivos do texto. Uma observação é que para sistemas reais o processo de dimensionamento seria mais detalhado e envolveria o levantamento e dimensionamento das informações apresentadas como ponto de partida dos exemplos apresentados.

No capítulo 4, com base nos dados do balanço energético anual 2015 e no último balanço de energia útil nacional, discutem-se as oportunidades de uma

aplicação maior no uso de variadores de velocidade no consumo de energia nacional e planejamento do sistema. Em seguida as principais barreiras e dificuldades para uma disseminação maior na aplicação dessa tecnologia.

No capítulo 5 temos as conclusões.

2 Conceituação Básica e Aplicações sobre Conversores

2.1 Princípios de Funcionamento dos Conversores PWM

Os conversores de frequência são dispositivos que convertem a frequência e tensão fixas do sistema em valores variáveis para alimentação do motor. Um motor de indução quando alimentado por uma fonte de alimentação com tensão e frequência constante (60Hz no Brasil), opera com velocidade constante, portanto por meio da variação da frequência de alimentação dos motores é possível controlar a velocidade de rotação dos mesmos.

Os conversores de frequência também regulam a tensão de alimentação em proporção à frequência para manter a condição de fluxo de entreferro constante no motor (V/Hz) de maneira que o motor consiga produzir torque constante para toda a faixa de velocidade.

Para uma frequência de 60Hz um motor de indução de 4 pólos possui uma velocidade síncrona de 1800rpm. Caso a frequência seja reduzida para 30Hz, a velocidade síncrona se reduz para 900rpm, isso ocorre pois sabe-se da teoria de máquinas elétricas que a rotação síncrona é definida por:

$$n = \frac{120f}{p} \quad (2.1)$$

Portanto a partir do momento que conseguimos variar a frequência de alimentação do motor, o mesmo se transforma em um dispositivo de velocidade variável e controlada. Hoje os conversores de frequência são a tecnologia dominante quando se torna necessário o controle de velocidade.

Um conversor de frequência consiste basicamente de um retificador, um link DC e uma unidade inversora. O primeiro estágio converte a tensão de alimentação alternada AC em tensão contínua DC por meio do retificador. O link DC mantém o valor constante e elimina o ripple nesse valor de tensão DC.

Em seguida a tensão DC é novamente convertida em AC por meio de dispositivos de chaveamento de potência como IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) por meio de um controle por largura de pulso PWM (Pulse Width Modulation) onde a tensão de saída é chaveada rapidamente nos estados ON e

OFF, com a duração dos pulsos controlada de uma tal maneira que a fundamental desses pulsos seja uma onda fundamental na frequência de saída desejada. Todo o processo de disparo dos IGBTs na unidade inversora é controlado pela unidade de controle do próprio conversor de frequência, que monitora ao mesmo tempo:

- A tensão de entrada;
- A tensão do link DC;
- A tensão e frequência de saída necessária para eliminar o erro no loop de controle;
- O valor de referência de velocidade que é determinado pelas demandas do processo.

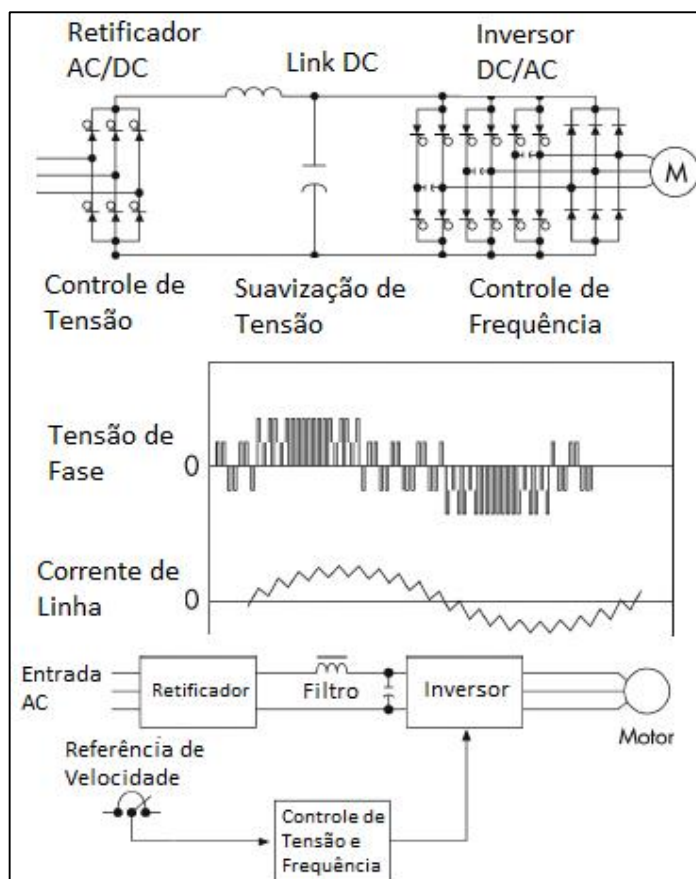


Figura 2.1 – Esquema de um Conversor de Frequência PWM

Fonte: CEATI International

Nos sistemas mais simples a velocidade de referência é apenas definida e não é necessário realimentação por encoders, no entanto em aplicações mais complexas a referência de velocidade é informada por um controlador lógico programável (CLP) via rede de processo ou encoders.

Interessante notar que apesar a tensão aplicada ao motor não ser senoidal e sim uma sequência de pulso os motores de indução conseguem trabalhar adequadamente, pois devido a característica indutiva de seus enrolamentos a corrente tem um comportamento mais suave que a tensão aplicada, isso significa um torque constante sendo que possíveis flutuações ainda são amenizadas pela própria inércia mecânica do motor, mantendo assim uma velocidade constante. Também são usados diodos “flywheel” integrados aos IGBTs para evitar sobreensão e destruição dos mesmos durante o chaveamento.

2.1.1 Efeitos da operação dos conversores em motores de indução e no sistema de distribuição

A utilização dos conversores de frequência merece considerações sobre o impacto dos mesmos tanto nos sistemas de distribuição quanto nos motores por eles controlados. Nessa seção os principais efeitos serão apresentados de maneira resumida, pois uma abordagem mais detalhada foge dos objetivos desse trabalho. De qualquer maneira o leitor que tiver maior interesse pode encontrar informações mais completas em ([NEMA – Application Guide for AC Adjustable Speed Drive Systems, 2007](#))

2.1.1.1 Efeitos no sistema de alimentação

2.1.1.1.1. Componentes Harmônicas

Componentes harmônicos de corrente são gerados pelo modulo retificador de um conversor de frequência, que em alguns casos podem afetar o sistema de distribuição e outras cargas conectadas ao mesmo. Como orientação, caso a carga de retificadores e demais cargas não lineares (Conversores, UPS, PCs) em uma instalação for menor do que 20% da capacidade total é improvável que a influência dos harmônicos seja de grande impacto ([Austin,2013](#)).

Em muitas instalações industriais a capacidade do sistema excede em muito a carga instalada, e uma grande proporção das cargas são lineares, no entanto não é o caso de instalações comerciais onde o número de computadores e UPS cresce cada vez mais, nesses casos as correntes harmônicas geradas na operação dos conversores deve ser um fator a ser considerado com as respectivas medidas mitigadoras.

No caso de ocorrerem níveis elevados de componentes harmônicos gerados pelos conversores, existem uma série de ações corretivas/mitigadoras citadas abaixo:

- Técnica de projeto (agrupando cargas não lineares por exemplo);
- Filtros de Linha;
- Topologia de retificadores de 12, 24 pulsos;
- Topologia de retificadores controlados (AFE - Active front End).

Normalmente os próprios fabricantes possuem orientação ou soluções para minimizar as componentes harmônicas de corrente geradas pelos conversores.

Abaixo uma ilustração com a forma de onda de corrente para três configurações de entrada.

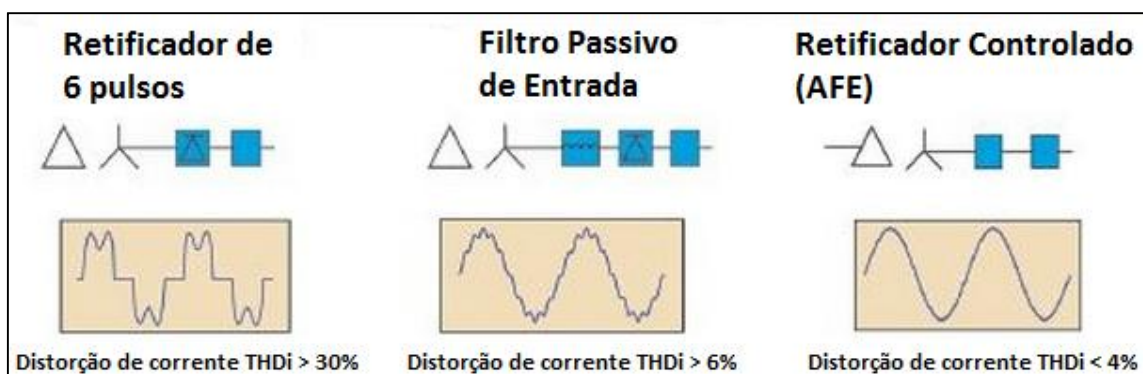


Figura 2.2 – Formas de Onda e Distorção Harmônica Total da Corrente de Entrada

Fonte: Controls, Drives and Automation

Os componentes harmônicos de corrente fluindo pela impedância do sistema, causam o surgimento de componentes harmônicos de tensão que afetam demais equipamentos conectados a rede de distribuição de energia elétrica e podem causar efeitos indesejados aos demais consumidores como por exemplo:

- Interferência no funcionamento de equipamentos sensíveis;
- Carregamento excessivos do condutor neutro;
- Torque pulsante em máquinas rotativas;
- Sobreaquecimento de condutores, transformadores e motores;
- Operação indevida de disjuntores e relés de proteção;

Atualmente existem dois tipos de regulações normativas impostas aos equipamentos e instalações quanto aos limites de componentes harmônicos admissíveis.

O primeiro tipo são limites impostos pelas distribuidoras para proteger demais consumidores dos efeitos causados por componentes harmônicos, sendo que esses limites usualmente são baseados em um nível de distorção harmônica de tensão aceitável no ponto de conexão da instalação com a rede de distribuição.

Segundo padrões do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), o THDv para tensões abaixo de 69 kV é limitado em 6% enquanto para tensões acima de 69 kV está em 3%. A IEEE 519 estabelece o limite de 5% enquanto a IEC 61000-2-2 estabelece o limite de 8% para sistemas de baixa tensão.

O segundo tipo de regulação são limites impostos aos harmônicos de corrente gerados pelos próprios equipamentos, onde permissões individuais para conexão ao sistema elétrico não seriam práticas, pode-se citar a IEC 61000-3-2, que define os limites para equipamentos até 16 A classificados em quatro classes de utilização. No caso de equipamentos com correntes acima de 16 A e abaixo de 75 A por fase, a norma IEC 61000-3-4 fixa os limites de correntes harmônicas para estes equipamentos.

Entretanto quando são usados em larga escala em uma mesma instalação ainda deve-se avaliar o distorção no ponto de conexão com a rede para conseguir autorização para conexão.

2.1.1.1.1. Fator de Potência

A definição de fator de potência é a relação entre a potência média (ativa) e a potência total (aparente) entregue para uma carga.

$$\text{Fator de potência} = \frac{\text{Potência Ativa}}{\text{Potência Aparente}} \quad (2.2)$$

As cargas indutivas, como motores de corrente alternada que operam diretamente conectadas a fonte de alimentação, causam um fator de potência indutivo que depende do nível de carregamento do motor. Devido ao retificador de entrada no conversor de frequência, esses normalmente funcionam com um fator de potência de deslocamento de 0,95 ou superior e constante.

Para ondas senoidais é de conhecimento geral que a equação (2.2) se resume ao ângulo de defasagem entre as ondas de tensão e corrente, normalmente chamado de coseno phi ($\cos \Phi$) que somente é válido para formas de onda de corrente e tensão puramente senoidais.

Infelizmente, como já apresentado, tanto a forma de tensão como de corrente não são puramente senoidais, portanto não existe uma formulação tão simples para o fator de potência total, entretanto é frequentemente utilizado a definição de fator de potência fundamental ou fator de deslocamento onde a potência aparente é calculada considerando-se apenas as formas de onda na componente fundamental.

A influência das componentes harmônicas faz que o fator de potência seja um pouco menor do que o fator de potência fundamental ou fator de deslocamento. Como a distorção de tensão é definida pela impedância do sistema para cada frequência harmônica e varia de sistema para sistema, é impraticável definir um fator de potência total para um conversor de frequência. Desta forma é importante citar que os valores informados pelos fabricantes apenas consideram o fator de deslocamento.

Apesar das consideração dos parágrafos anteriores o fator de potência para conversores comerciais normalmente fica muito próximo da unidade (condição ideal). Portanto esse é um efeito positivo do uso de conversores de frequência.

2.1.1.2 Efeitos do uso de conversores de frequência nos motores

2.1.1.2.1. Isolação dos motores

A sequência de pulsos de tensão em alta frequência de saída do conversor PWM, sofrem reflexão nos terminais dos motores provocando sobretensão. Esses picos de tensão podem causar danos ao isolamento entre espiras de bobinas aleatórias no motor, reduzindo a sua vida útil e levando a falhas de isolamento prematuras.

Os principais fatores que determinam a severidade desses picos de tensão são:

- Tempo de subida do pulso;
- Comprimento dos cabos do conversor até o motor;
- Tempo mínimo entre os pulsos;
- Frequência de chaveamento dos semicondutores de potência.

A melhor maneira de evitar os picos de tensão é tentar manter os conversores o mais próximo possível dos motores, mantendo-se o comprimento dos cabos de alimentação o mais curtos possíveis. Caso não seja possível pode-se verificar se o conversor permite a parametrização da frequência de chaveamento, o uso de filtros dV/dt na saída dos mesmos ou até motores para uso específico com conversores de frequência que possuem isolação reforçada.

Esse é um efeito bem conhecido pelos fabricantes, que possuem recomendações específicas para cada instalação.

2.1.1.2.1. Perdas adicionais e limites térmicos nos motores

Para os motores alimentados por conversores de frequência, temos perdas adicionais no motor relacionadas unicamente com as componentes harmônicas de tensão. Além disso a operação em baixas rotações provoca uma redução na ventilação e consequente perda de resfriamento em motores autoventilados, o que pode fazer com que o motor atinja temperaturas acima das máximas permitidas para a sua classe de isolação.

Normalmente são aplicados fatores de sobredimensionamento nos motores autoventilados com relação ao torque máximo disponível, esses fatores devem ser consultados com o fornecedor do motor. Em aplicações onde deve-se manter o torque constante para toda a faixa de velocidade do sistema esse é um ponto importante a ser observado.

2.2 Controle de Velocidade nos Processos

Diversos processos necessitam de alguma forma de controle de acordo com as demandas de produção ou condições do sistema. Por exemplo em um sistema de ar condicionado, a demanda para determinado fluxo de ar (m^3/s) muda constantemente de acordo com a humidade, temperatura e ocupação do ambiente. Outro caso seria um transportador de material que precisa alterar a sua velocidade de acordo com a produção necessária (aumentando ou diminuindo sua velocidade).

No caso de controle de vazão é possível utilizar alguma forma de controle mais simples como estrangulamento do sistema ou by-pass. No entanto esses sistemas não são muito flexíveis, por exemplo para qualquer aumento na demanda seria necessário reconstruir boa parte da instalação. Além disso tais sistemas consomem muita energia não permitem um controle preciso.

O melhor método de controle para a maioria dos sistemas, seria alguma maneira de controle de velocidade.

Um motorista que estivesse dirigindo um automóvel em uma estrada e entrasse em um região densamente populada, precisaria reduzir a velocidade do veículo de maneira a manter a sua segurança e das pessoas ao redor. Por meio da sua formação como condutores habilitados, o motorista sabe que a melhor maneira de fazer isso, é retirar o pé do acelerador e se necessário reduzir algumas marchas. Outra opção seria manter a mesma marcha, manter o pé no acelerador e a rotação do motor e reduzir a velocidade acionando os freios. Obviamente a segunda opção causaria um desgaste no motor e freios, mas também gastaria muito mais combustível (energia) e um controle muito mais difícil do automóvel.

O exemplo do automóvel é exatamente o que ocorre quando tentamos estabelecer um controle de vazão por meio de válvulas ou dampers de passagem, portanto fica evidente que a melhor maneira de controlar a máquina que atua no processo (ventilador, bombas, compressores e etc. . .) é por meio do controle de velocidade.

O controle de velocidade nas máquinas, pode ser feito por meio de um motor em velocidade fixa e um mecanismo mecânico para o controle da velocidade. Por exemplo acoplamento hidráulico, polias, correias de transmissão e engrenagens, no entanto esses sistemas mecânicos são utilizados entre o motor elétrico e a carga que vai atuar no processo, portanto o motor continua operando em velocidade constante. Tipicamente os sistemas mecânicos para variação de velocidade possuem algumas desvantagens com relação ao uso dos conversores de frequência ([ABB Drives,2014](#)):

- Velocidades pré-definidas que não podem ser ajustadas;
- Maiores custos de manutenção, pois não permite partidas suaves;
- Localização dos equipamentos de controle ficam entre o motor e a carga;
- Menor flexibilidade operacional para alterar a produção;
- Menor controle e integração com demais sistemas da planta.

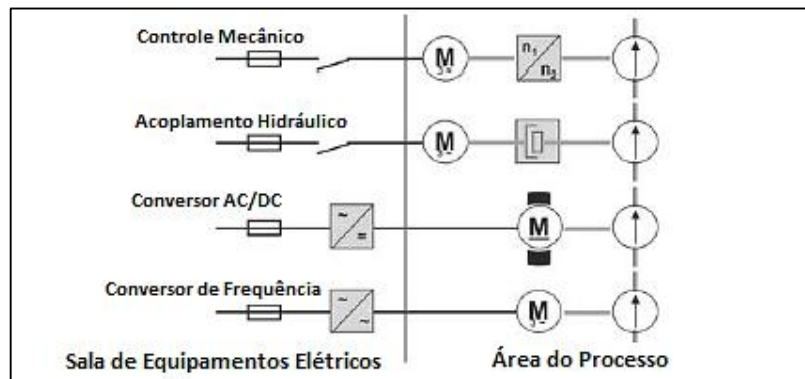


Figura 2.3 – Variadores de Velocidades Mecânicos e Eletrônico

Fonte: ABB Drives

Outra opção é o controle de velocidade por meio de conversores de frequência AC, nesse caso a velocidade do motor é controlada pelo conversor de frequência, que altera a frequência e a tensão enviada ao motor conforme já explicado anteriormente. As considerações acima são os principais motivos para que os conversores AC sejam a tecnologia dominante quando se faz necessário o controle de velocidade das cargas.

2.3 Frenagem Dinâmica e Regenerativa

2.3.1 Operação nos quatro quadrantes

As aplicações de sistemas motrizes podem exigir características entre torque e velocidade definidas em quatro quadrantes do plano definido entre essas duas grandezas.

- Quadrante I - Velocidade e Torque na mesma direção e ambos positivos (aceleração positiva)
- Quadrante II - Frenagem no sentido de rotação positivo. Velocidade positiva e Torque negativo (desaceleração ou frenagem)
- Quadrante III - Velocidade e Torque na mesma direção e ambos negativos (aceleração positiva)
- Quadrante IV - Frenagem no sentido de rotação negativo. Velocidade negativa e Torque positivo (desaceleração ou frenagem).

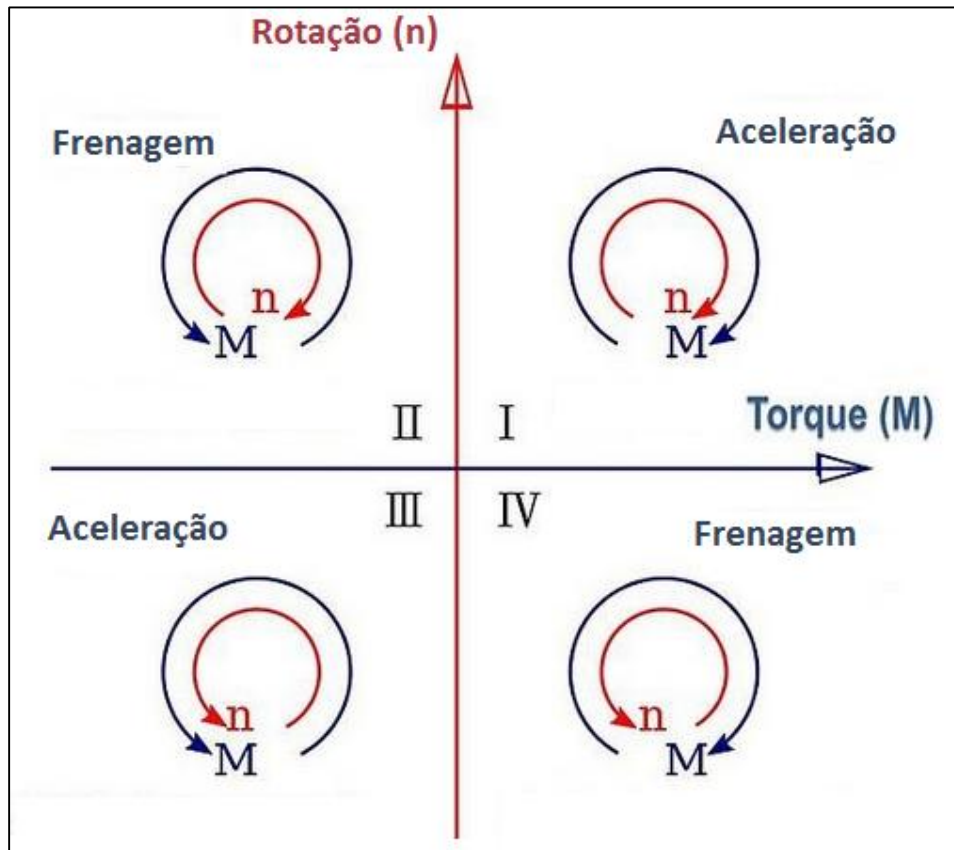


Figura 2.4 – Operação em Quatro Quadrantes do plano Torque-Velocidade

Aplicações que operam exclusivamente nos quadrantes I e III são as mais comuns, onde o torque e a velocidade possuem sempre a mesma direção e o fluxo de energia acontece do acionamento para o processo.

Um segundo tipo de aplicação exige operação em dois quadrantes, onde o sentido de rotação permanece o mesmo, porém o sentido do torque pode mudar (Adinolf,1998). Nesse caso estaríamos desacelerando ou freando a máquina ativamente e mais rápido do que ocorreria naturalmente por meio de sua própria inércia e perdas mecânicas (atrito). Nesse caso ocorre uma inversão no fluxo de energia do processo para o acionamento.

O terceiro tipo de aplicação exige capacidade para operação nos quatro quadrantes, onde o sentido de rotação e torque podem alterar independentemente, como por exemplo elevadores, guindastes, etc (Zhao,2014). Nesse caso o fluxo de energia entre processo e acionamento pode mudar constantemente dependendo do ciclo de operação da máquina.

2.3.2 Máquina de indução funcionando como gerador

Na curva de Torque-Velocidade típica de um motor de indução percebe-se que o fator decisivo em relação a direção do torque é o escorregamento, pois quando o escorregamento é positivo o torque também é positivo e vice versa.

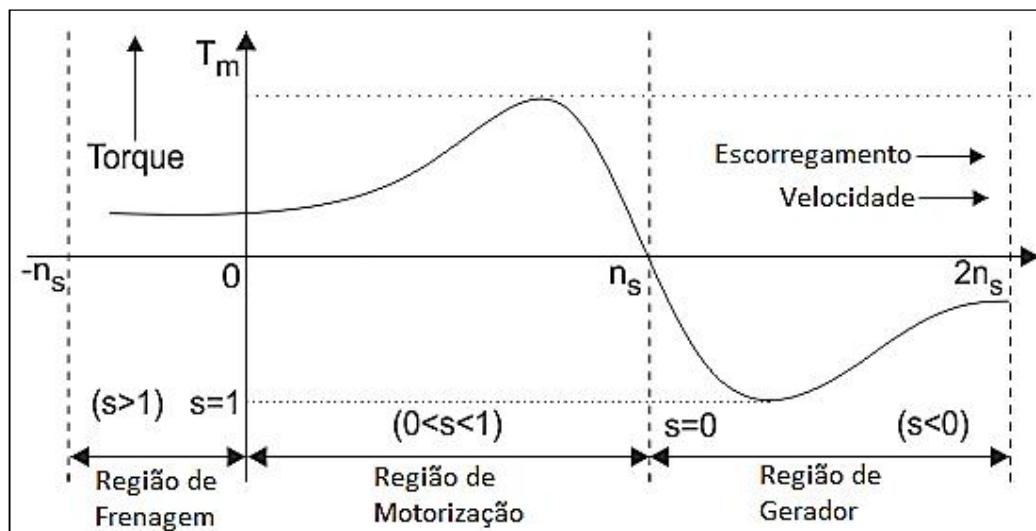


Figura 2.5 – Curva Torque-Velocidade Motor de Indução

Na máquina de indução o torque sempre se manifesta no sentido de forçar o rotor a girar com escorregamento zero, ou seja na velocidade síncrona. No caso de escorregamentos maiores que 1, o torque permanece positivo, nesse caso o motor está girando em sentido contrário ao campo girante sendo freado para então mudar a direção de rotação no mesmo sentido do campo girante. Percebe-se então que os motores de indução possuem a capacidade inerente de operarem como geradores de energia, quando a velocidade do rotor é superior a velocidade síncrona (Eq 2.1), ou seja escorregamento negativo.

A máquina exerce um torque negativo para desacelerar o rotor opondo-se a rotação, portanto para manter a operação como gerador é necessário um torque motriz aplicado no eixo pela carga de forma a manter o rotor em rotação mais rápida que o campo girante (rotação síncrona). No caso de “motores” de indução isso causa uma inversão no fluxo de energia que agora seria do processo para o acionamento.

3 Desenvolvimento

O tema central desse trabalho é entender como o uso de conversores de frequência pode proporcionar uma economia de energia e maior eficiência energética. No uso dos conversores de frequência o conhecimento das necessidades dos processos e o comportamento das máquinas acionadas é essencial.

No presente texto será apresentado sistemas de bombeamento com bombas centrífugas, uma observação é que a maioria dos conceitos também podem ser utilizados para ventiladores centrífugos apenas com algumas considerações. Na sequência os princípios e uma aplicação com frenagem regenerativa em ponte rolante.

3.1 Controles de Vazão Convencionais

Os sistemas de controle de vazão de fluidos normalmente utilizam motores em velocidades fixas e válvulas de controle (ou dampers no caso de ventiladores) para restringir ou liberar a passagem dos fluidos, controlando dessa maneira a vazão. Na seção 2 já foi explicado as principais desvantagens desse método.

Além da ineficiência características desse tipo de controle, normalmente esses sistemas são dimensionados para a condição de demanda máxima, mas quando essas situações ocorrem é em uma proporção muito reduzida se comparado com o tempo total de operação do mesmo.

Uma outra opção de controle de vazão é a recirculação. Nesse caso a bomba opera o tempo todo com a vazão máxima, e o excesso é simplesmente desviado e devolvido para a sucção da bomba. Aqui a ineficiência é evidente, pois se gasta uma energia elevando a pressão do fluido, para depois desperdiçá-la recirculando o líquido.

3.1.1 Curvas de operação das bombas e do sistema

Bombas possuem uma ampla faixa de operação. A curva de uma bomba representa os diversos pontos de operação caracterizados pela vazão de operação (m^3/s) representada normalmente no eixo horizontal e a pressão ou carga (Pa) no eixo vertical, conforme (figura 3.1). As curvas de performance são características de cada projeto de bomba e independentes das características de cada sistema na qual podem ser utilizadas.

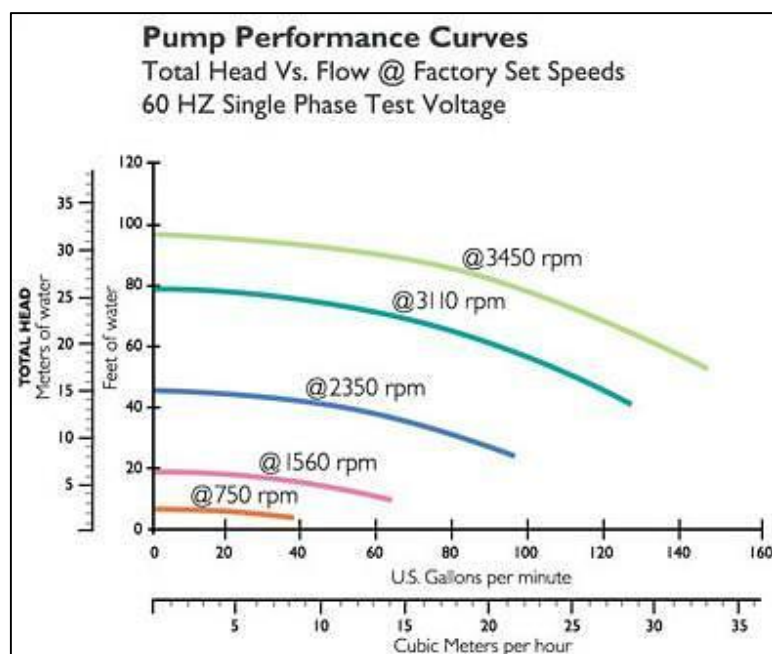


Figura 3.1 – Curva de Performance Típica para uma Bomba Centrífuga

Uma curva do sistema é uma representação da relação entre a vazão e as perdas em um sistema de tubulações, a mesma informa qual a pressão necessária para sobrepor as perdas do sistema e estabelecer a vazão desejada. As perdas de carga no sistema são função da vazão, diâmetro da tubulação, rugosidade da superfície interna, comprimento e curvas da tubulação.

A perda de carga total do sistema é composta de uma parcela estática e uma parcela dinâmica, em um sistema de bombeamento sem elevação de altura a perda de carga estática é zero. A perda de carga estática é constante e independente da vazão, enquanto a perda de carga dinâmica é normalmente proporcional ao quadrado da vazão requerida.

Em sistemas com uma alta parcela de carga estática sistemas com variação de velocidade não proporcionam grande economia de energia. Para esses sistemas uma avaliação cuidadosa deve ser feita e a potência necessária deve ser calculada ponto a ponto, além disso deve se tomar um cuidado extra no caso do uso de variadores de velocidade pois a bomba não deve operar em contrapressão.

A intersecção das curvas de performance da bomba e do sistema define o ponto de operação do sistema, o mesmo define a pressão, vazão, eficiência da bomba e a potência requerida para operação. Obviamente qualquer alteração nas características do sistema irá alterar a sua curva e um novo ponto de operação será atingido.

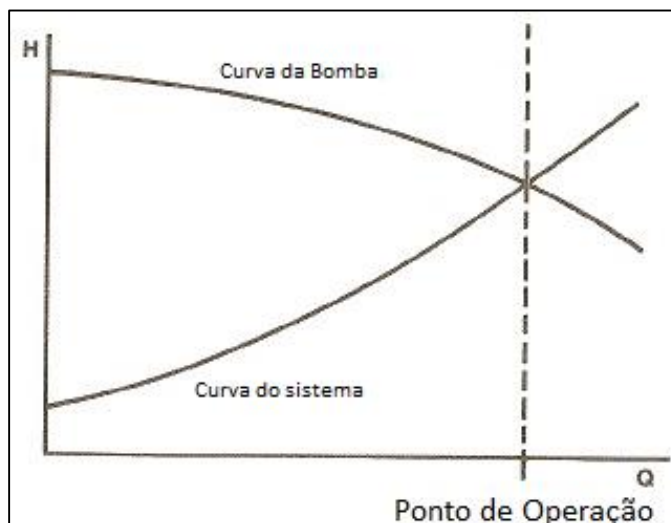


Figura 3.2 – Ponto de Operação do Sistema

A potência elétrica demandada no ponto de operação é dada por:

$$P = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{3600 \cdot \eta_M \cdot \eta_B \cdot \eta_{Conv}} \quad (3.1)$$

Onde P é a potência elétrica em (kW), Q é a vazão (m³/h), H é a pressão (m), ρ é a massa específica do fluido (kg/m³), g é a aceleração da gravidade, η_M é o rendimento do motor, η_B é o rendimento da bomba, η_{Conv} é o rendimento do conversor.

Normalmente é difícil calcular com precisão a curva do sistema, por esse motivo normalmente o levantamento da curva do sistema é feita levando-se em consideração fatores de segurança o que em operação normal do sistema irá ocasionar em sobredimensionamento dos equipamentos e demanda prevista.

3.1.2 Tipos de cargas

Sabemos pela mecânica que o torque é proporcional à potência e inversamente proporcional a velocidade, conforme equação abaixo:

$$Potência (kW) = \frac{RPM \times Torque (Nm)}{9555} \quad (3.2)$$

Podemos agrupar os principais tipos de acionamentos baseados na variação do torque necessário com a velocidade:

Cargas com Torque Constante

Típico quando os volumes manipulados são fixos, por exemplo bombas de deslocamento e transportadores são aplicações típicas de torque constante. Nesse tipo de carga o torque é constante e a energia é linearmente proporcional a velocidade.

Cargas com Torque Variável

Torque quadrático é o tipo de carga mais comum, aplicações típicas são bombas centrífugas e ventiladores. O torque é quadrático, e a potência é proporcional ao cubo da velocidade representam a maioria dos acionamentos industriais.

Cargas com Potência Constante

Normalmente, quando o material está sendo enrolado e o diâmetro muda durante a laminagem. A potência é constante e o torque é inversamente proporcional à velocidade.

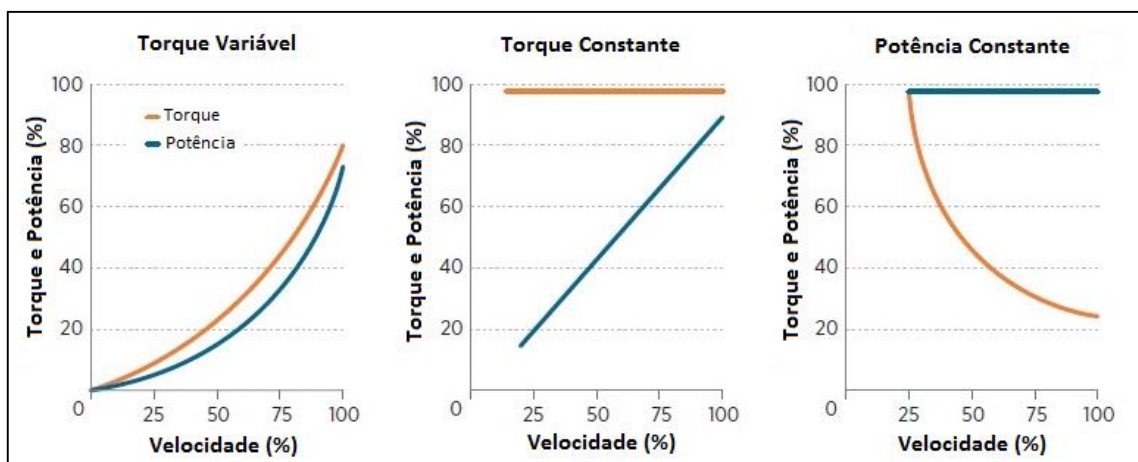


Figura 3.3 – Tipos de cargas e variação do Torque com a Velocidade

Fonte: DOE - Department of Energy USA

3.2 Controle de Vazão por variação da velocidade

Nesse método tira-se vantagem de mudança na curva de performance da bomba, que ocorre quando se altera a velocidade da máquina. No caso de bombas e demais cargas centrífugas, essas mudanças são regidas pelas chamadas “Leis de Afinidade” que estabelecem uma relação linear, quadrática e cubica da vazão,

pressão e potência, respectivamente com relação a velocidade de rotação da máquina (figura 3.4).

Nota-se que pequenos decrescimos na velocidade do sistema, resulta em uma grande redução na potência necessária no eixo do motor. Verificando apenas a relação entre a potência e a rotação, evidencia-se que operando uma bomba centrífuga a 75% da velocidade nominal, irá reduzir a vazão em 25%, e demandar apenas 42% da potência nominal. Na tabela 3.1 podemos comparar a potência mecânica necessária para algumas velocidades da máquina.

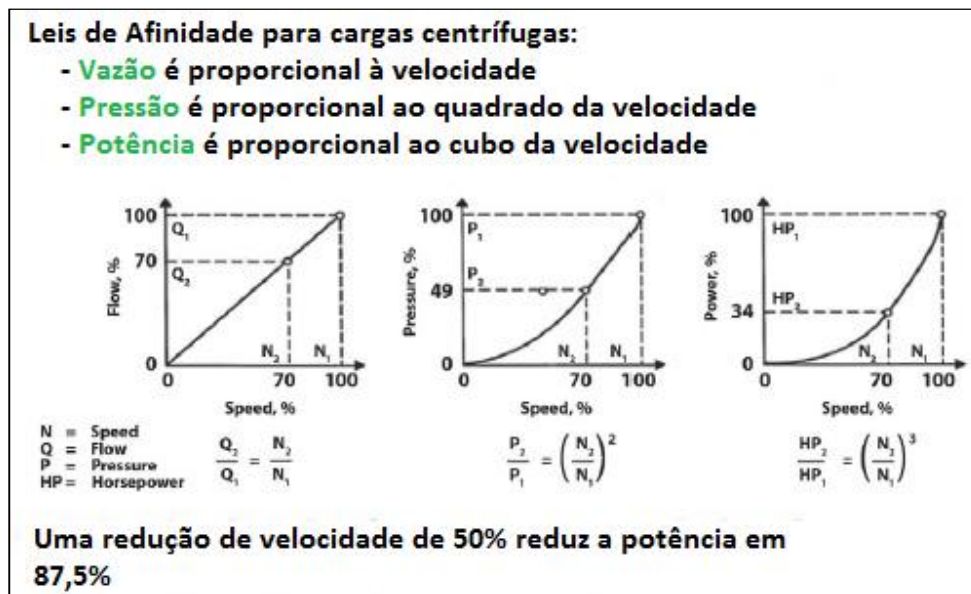


Figura 3.4 – As Leis de Afinidade para cargas centrífugas

Fonte: World of Pumps

Tabela 3.1 – Potência necessário com relação a velocidade de rotação da bomba

Velocidade	Potência Mecânica
100%	100%
90%	73%
75%	42%
50%	13%

Pode-se observar a diferença com a ajuda da figura 3.5, pois para atingir uma mesma vazão o uso de válvulas de controle altera a curva do sistema inserindo mais perdas na tubulação (**ponto 1**), enquanto a variação da velocidade altera a curva da bomba (**ponto 2**). Nota-se que o ponto de operação (**1**) esta com uma pressão maior (**H1**) comparado com o ponto de operação (**2**), e conclui-se pela por (Eq 3.1) que

isso resulta em uma maior potência demandada, sendo esse o motivo da diferença entre a demanda para atingir a mesma vazão por meio de uma válvula de estrangulamento e a variação de velocidade da máquina.

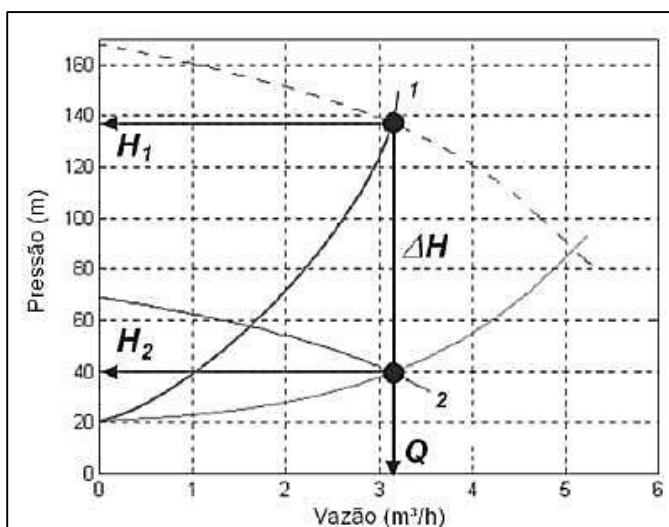


Figura 3.5 – Operação com válvula de estrangulamento (1) e variação de velocidade (2)

3.2.1 Frequência e Tempo de Operação

O tempo de operação do sistema informa a quantidade de horas que o mesmo funciona por ano. A frequência de duração é uma representação na forma de histograma, que informa como a demanda de vazão do sistema varia quando o sistema esta em operação, a mesma informa a no eixo vertical o percentual de tempo que o sistema demanda determinada vazão (figura 3.6).

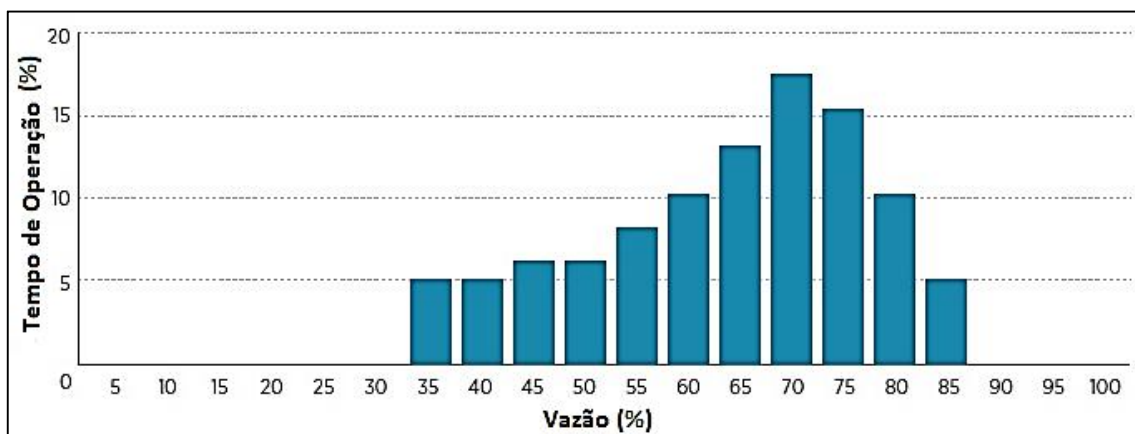


Figura 3.6 – Exemplo de curva de duração

Fonte: DOE - Department of Energy USA

Os ganhos de economia no controle de velocidade aumentam quando o sistema opera por um tempo considerável e com vazão necessária abaixo do valor nominal ou máximo de projeto. Além desses fatores, sobre o ponto de vista econômico, a relação custo-benefício da aplicação de conversores de frequência no controle de velocidade depende muito do custo da energia elétrica.

3.2.2 Eficiência dos motores e conversores em cargas parciais

Para determinarmos por meio da equação (3.1) a potência demandada pelo sistema para cada ponto de operação, é necessário conhecer a eficiência da bomba, do motor e do conversor para cada ponto de operação. A eficiência da bomba, pode ser obtida diretamente da sua curva de performance para cada ponto de operação do sistema.

A eficiência de um motor de indução varia com a carga no eixo, a boa prática define que os motores devem operar em 75% da potência nominal para um atingir um alto rendimento na operação. O rendimento dos motores podem ser obtidos das curvas de rendimento fornecidas pelos fabricantes.

No caso dos conversores de frequência as perdas são basicamente “perdas por condução” que depende da carga e “perdas por chaveamento” que depende da frequência de chaveamento. Não existe um procedimento normativo para determinar a eficiência dos conversores pois depende tanto do torque exigido pela carga como da velocidade requerida pela carga. Apesar disso sabe-se que os conversores de frequência possuem eficiências típicas acima de 97% para carga nominal que cai progressivamente quanto menor o carregamento. Tipicamente conversores acima de 8kW (10hp) possuem eficiências acima de 90% para cargas maiores que 25% da carga nominal, sendo esse normalmente a faixa de operações de interesse prático para a indústria.

No momento não existe uma norma internacional que estabelece um método para determinação ou classificação de sistemas compostos por conversores + motores ([Waide,2011](#)), mas a eficiência do sistema será menor que o produto da eficiência do motor pela eficiência do drive devido aos efeitos das componentes harmônicas de tensão nos motores.

Apesar das observações acima, devido ao fato da redução da potência mecânica necessária em cargas com torque variável ser tão abrupta com a redução da velocidade, apenas uma estimativa para a eficiência do sistema é necessária para verificarmos as potências economias no consumo de energia. Baseando-se nessa premissa ([Rouse,2009](#)) sugere que uma estimativa de 80 a 90% para eficiência de todo o sistema pode ser considerada, em aplicações com motores acima de 8kW (10hp) e cargas maiores que 25% da carga nominal.

Apesar dessa redução na eficiência dos componentes parecer desanimadora, a economia de energia é tão maior, que ainda é muito mais vantajoso operar com essa eficiência reduzida para cargas parciais, conforme o exemplo numérico a seguir ajuda a demonstrar.

Exemplo

Um sistema de bombeamento necessita de 15kW de potência mecânica no eixo do motor e um rendimento de 95% para o conjunto motor + conversor quando operado em velocidade nominal máxima, nessa condição a potência elétrica demandada seria 15,8kW. Considerando que as leis de afinidade possam ser aplicadas (sem perda de carga estática), para condição de operação com metade da velocidade precisamos de apenas 1/8 da potência mecânica original ou seja aproximadamente 1.9kW, considerando uma redução na eficiência do conjunto motor + conversor para 80%, a potência elétrica demandada será de 2,4kW ou seja uma redução de 85% da demanda elétrica original.

Caso tivessemos mantido os rendimentos superiores para o conjunto de 95%, a potência elétrica demandada seria de 2kW, ou seja, uma redução adicional de apenas 2%

3.2.3 Estimativa de economia de energia

A partir dos dados de tempo de operação, frequência de duração e as curvas de performance da bomba e do sistema, define-se todos os pontos de operação e potência necessária para cada vazão.

Para sistemas com baixa carga estática, podemos nos valer das “Leis de Afinidade” para estimar o consumo percentual para cada vazão, pois a mesma é diretamente proporcional a rotação da máquina. No caso de sistemas com controle por estrangulamento, precisaríamos das curvas do sistema e da bomba para calcular a demanda ponto a ponto.

Considerando uma bomba que em condição de vazão máxima necessita de 40kW de potência. A bomba funciona por 8000 horas no ano por sistema de recirculação, considerando um custo médio da energia no território nacional de 0,40 R\$/kWh, o custo anual de eletricidade será de:

$$(40\text{kW})(8000\text{h})(0,40\text{R\$/kWh}) = \text{R\$}128\ 000,00$$

Com a implementação do controle de vazão, precisamos agora do ciclo de operação, que definimos a seguir:

Tabela 3.2 – Ciclo de Operação para vazões parciais

Vazão (%)	Duração (%)	Horas de operação (h)
40	40	3200
60	35	2800
80	20	1600
100	5	400

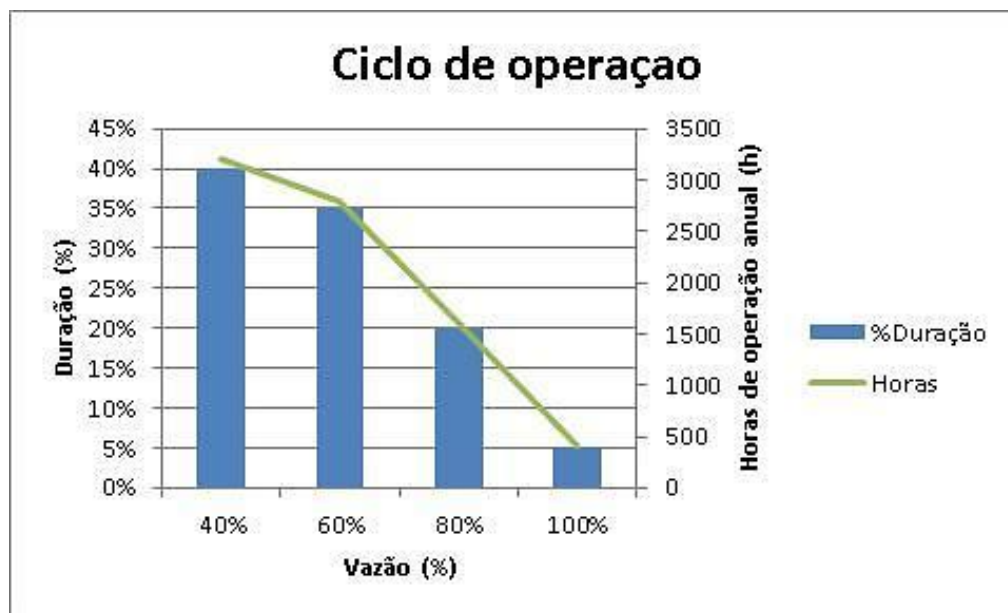


Figura 3.7 – Ciclo de operação para vazões parciais

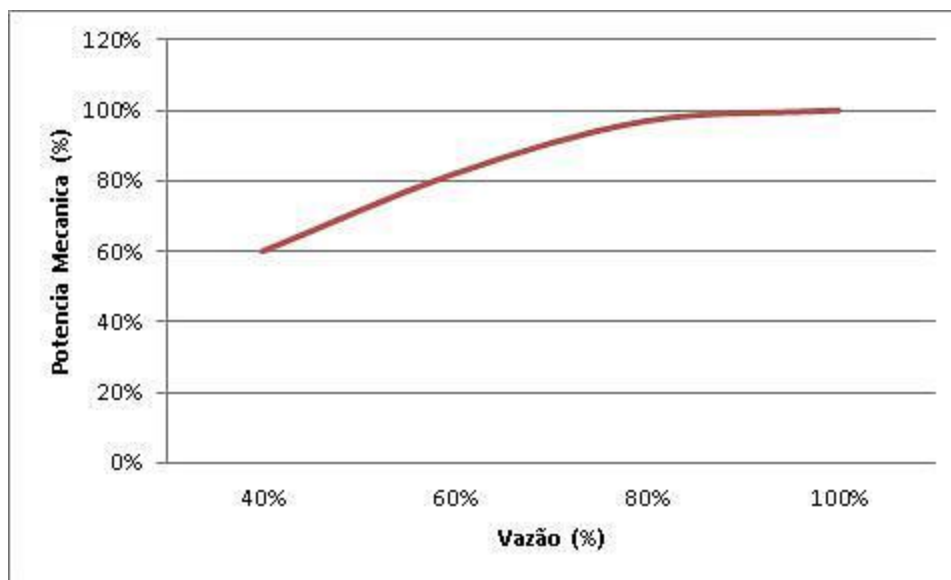
Para demonstrar o procedimento, vamos considerar a comparação de um sistema com recirculação sem controle de vazão, um sistema onde atuamos por estrangulamento e outro com controle de velocidade.

3.2.3.1. Sistema por estrangulamento

Para cada ponto de operação precisamos da potência necessária com os percentuais de potência necessária com relação a condição de vazão máxima. Definimos um sistema de estrangulamento típico com as características abaixo:

Tabela 3.3 – Relação entre vazão e potência para sistema por estrangulamento

Vazão (%)	Potência (%)
40	60
60	82
80	97
100	100

**Figura 3.8 – Relação Potência (%) e vazão (%) para um sistema por estrangulamento**

3.2.3.1. Sistema por controle de velocidade

Nesse método, vamos considerar as “Leis de Afinidade” e estimar os percentuais de potência para as vazões parciais definidas.

Tabela 3.4 – Relação entre potência e vazão sistema por controle de velocidade

Vazão (%)	Potência (%)
40	6
60	22
80	51
100	100

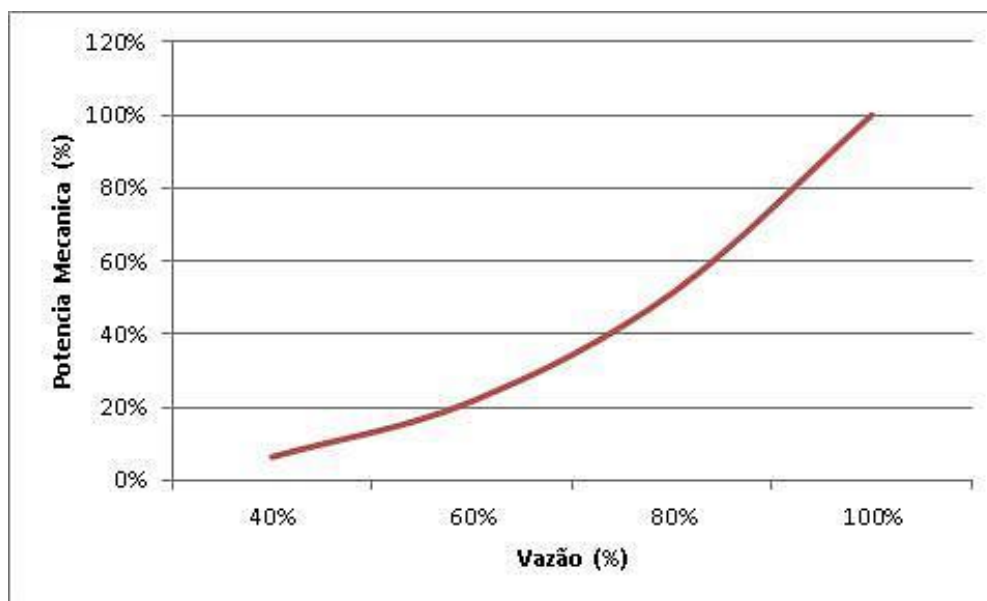


Figura 3.9 – Relação Potência (%) e vazão (%) para um sistema de controle de velocidade

3.2.4 Resultados

Com a potência nominal e os percentuais de consumo para cada faixa de operação, calculamos a potência necessária para cada condição de vazão. Próximo passo é multiplicar cada um desses valores pela proporção de tempo em que o sistema opera nessa condição, assim obtemos uma potência média ponderada que somada nos fornece uma potência média para todo tempo de operação.

Os passos descritos acima estão ilustrados na figura (3.10):

Vazão (%)	Ciclo de Operação (%)	Estrangulamento		Controle de Velocidade	
		Potência Necessária (kW)	Potência Ponderada (kW)	Potência Necessária (kW)	Potência Ponderada (kW)
40	40	40(0,60)=24	24(0,4)=9,6	40(0,06)=2,4	2,4(0,4)=0,96
60	35	40(0,82)=32,8	32,8(0,35)=11,48	40(0,22)=8,8	8,8(0,35)=3,08
80	20	40(0,97)=38,8	38,8(0,2)=7,76	40(0,51)=20,4	20,4(0,2)=4,08
100	5	40(1,00)=40	40(0,05)=2	40(1,00)=40	40(0,05)=2,00
		ΣP	30,84	ΣP	10,12

Figura 3.10 – Valores calculados para potências médias

Em resumo para os três métodos de controle, os custos anuais de energia para operação do sistema são:

Recirculação: $(40\text{kW})(8000\text{h})(0,40\text{R\$/kWh}) = \text{R\$ } 128\,000,00$

Válvula de Estrangulamento: $(30,84\text{kW})(8000\text{h})(0,40\text{R\$/kWh}) = \text{R\$ } 98\,688,00$

Controle de Velocidade: $(10,12\text{kW})(8000\text{h})(0,40\text{R\$/kWh}) = \text{R\$ } 32\,384,00$

As economias anuais com energia são representadas abaixo:

Tabela 3.5 – Economias anuais

Controle	Custo Anual	Economia
Recirculação	R\$ 128 000,00	_____
Valvula	R\$ 98 688,00	R\$ 12 912,00
Conversor	R\$ 32 384,00	R\$ 95 616,00

Verifica-se a viabilidade econômica do investimento para a solução com controle de velocidade, alcançado com o uso do conversor de frequência conforme demonstrado a seguir:

Parâmetros financeiros:

Conversor de frequência: R\$ 23 000,00 (aproximado)

Instalação e Testes: R\$ 8 000,00

Investimento Total: R\$ 31 000,00

Economia mensal: R\$ 7 968,00

Taxa de desconto mensal: 1%

Resultados financeiros:

Payback Simples: 4 meses

TIR: 22,3%

Os resultados foram muito expressivos, pois o ciclo de operação é muito favorável para o uso do controle de velocidade com uma boa parte do tempo de operação (75%) abaixo de 60% da capacidade máxima.

Normalmente alguns critérios podem antecipar uma boa oportunidade de uso de controle de velocidade:

- Funcionamento intenso, pelo menos 2000h no ano;
- Carga centrífugas preferencialmente, também se aplica a outras cargas mas com menores economias;
- Carga variável durante a operação do sistema;
- Tempo em carga reduzida elevado.

O mesmo procedimento poderia ter sido realizado com os consumos de energia e eficiências reais do sistema. No entanto para uma estimativa isso não é necessário devido a grande economia de energia alcançada.

Vários fabricantes de conversores de frequência disponibilizam softwares que realizam os procedimentos aqui citados para uma avaliação rápida de economia de energia. Obviamente que esses são recursos muito interessantes para se avaliar rapidamente as várias opções de controle, custos e resultados, no entanto é necessário que o usuário tenha os conhecimentos mínimos necessários para utilização das ferramentas.

Os mesmos passos poderiam ser considerados no acionamento de ventiladores centrífugos, que o tipo mais comum no setor industrial.

3.3 Frenagem Regenerativa

3.3.1 Frenagem elétrica

Para atender um determinado desempenho dinâmico, alguns processos podem exigir uma frenagem controlada, ou um tempo de parada específico e menor do que o alcançado normalmente pelas perdas naturais do sistema (inércia e atrito).

Objetivando atender aos requisitos nesses tipos de aplicações, existem algumas alternativas com relação a topologia dos conversores de frequência. Vamos apresentar brevemente o princípio de operação no uso de resistores de frenagem para comparação com conversores regenerativos.

3.3.1.1. Resistores de frenagem

Os estágios retificadores normalmente utilizados no primeiro estágio dos conversores de frequência não permitem fluxo de energia da carga para a fonte. No caso de uma reversão no fluxo de energia, em um processo que precisa operar nos quatro quadrantes. A energia da carga irá carregar o capacitor no link DC elevando a tensão do mesmo.

Para prevenir um aumento excessivo e destrutivo da tensão do link DC, uma alternativa seria desligar o estágio inversor no caso de se atingirem valores elevados de tensão DC. No entanto essa forma de operação não permite o controle da frenagem da máquina que dependeria exclusivamente das características mecânicas (atrito e demais perdas).

Uma alternativa para superar o inconveniente de uma frenagem não controlada é direcionar a energia excedente para um resistor de frenagem e o seu respectivo circuito de controle “chooper”. Nesse caso a energia de frenagem será dissipada na forma de calor no resistor de frenagem por efeito Joule.

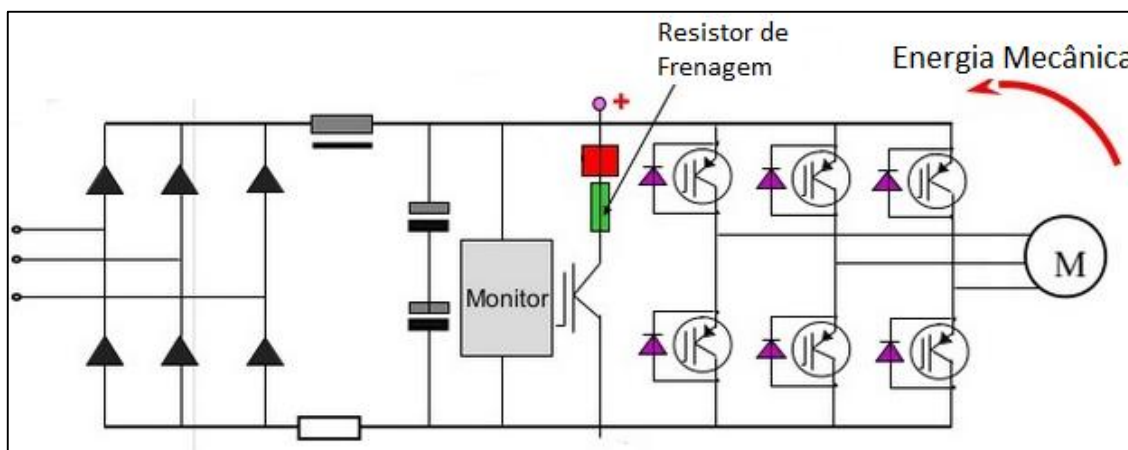


Figura 3.11 – Esquema exemplo da interligação do resistor de frenagem e controle

Quando a tensão do link DC excede um determinado limite, o dispositivo de controle aciona a chave estática que conecta o resistor de frenagem no link DC. Pressudondo que o resistor de frenagem seja dimensionado com capacidade para absorver toda a energia proveniente da carga, a tensão do link DC volta a cair e o dispositivo de controle desliga o resistor.

O resistor de frenagem é utilizado em aplicações onde é prático e aceitável dissipar uma quantidade não muito grande de energia em forma de calor e o ciclo de operação não inclui paradas constantes.

3.3.1.1. Conversores Regenerativos

O uso de resistores de frenagem não é uma medida eficiente em casos onde as paradas ou frenagens ocorrem frequentemente e uma grande quantidade de energia mecânica precisa ser controlada ou dissipada durante a frenagem. Uma solução disponível no mercado são os conversores regenerativos onde o retificador à diodos é substituído por um inversor com chaves IGBTs, isso permite que a energia mecânica da carga seja recuperada no sistema durante as frenagens.

Esse conversores regenerativos também são referenciados com a sigla AFE ou “Active Front-End”, pois o conversor de frequência atua nos dois sentidos do fluxo de energia, tanto em função motórica, como na função de recuperação de energia onde se controla o disparo dos IGBTs na ponte retificadora. O objetivo do controle no estágio retificador é garantir que a energia recuperada para a rede seja adequada as características da mesma (fator de potência e baixa distorção harmônica), mais detalhes sobre o controle do retificador ativo pode ser encontrado em (Rodriguez,2005).

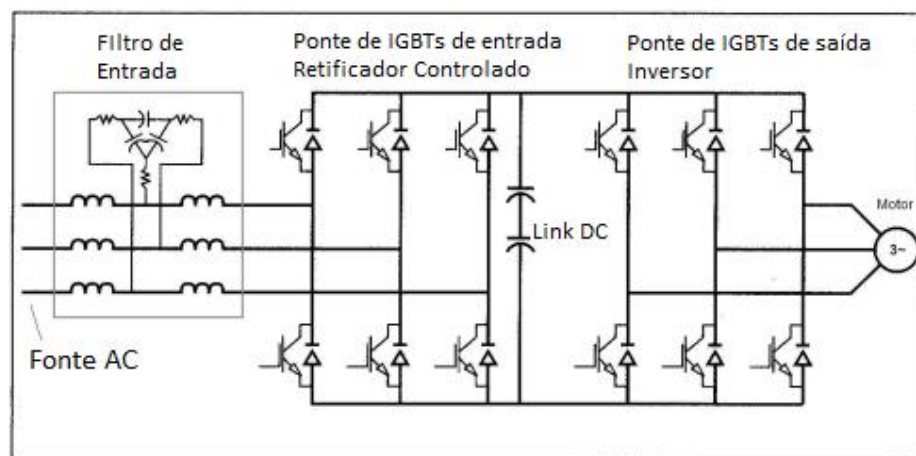


Figura 3.12 – Conversor de Frequência com Retificador Ativo (AFE)

Existem muitas aplicações onde o fluxo de energia pode ser revertido durante a operação e que podem representar economia de energia significativas, como por exemplo: Metrô ou Trens onde o percurso possui elevações e descidas, além das constantes paradas nas estações de passageiros no caso de metrô urbano (Adinolfi,1998); Esteiras transportadoras de material em declive (Rodrigues,2006); Elevadores e Guindastes (Zhao,2014). As referências citadas possuem casos de aplicações bem sucedidas com esse tipo de solução.

Algumas empresas oferecem sistemas integrados com a opção de drives regenerativos integrados aos equipamentos (elevadores, escadas rolantes e pontes rolantes) e podem ser facilmente encontrados em uma busca na internet, entretanto o custo inicial maior exige uma análise cuidadosa para se garantir bons resultados. Uma opção para reduzir o custo inicial é o uso de sistemas multidrives onde a unidade retificadora é compartilhada por vários acionamentos simultaneamente.

3.3.2 Princípios e equacionamento básico

A potência de frenagem mecânica depende do torque de frenagem e da velocidade instantânea, ou seja:

$$P_{mec} = T.\omega = T.(n/60).2\pi \quad (3.3)$$

Em uma condição de regime, o torque do motor é igual a soma do torque de aceleração, torque de atrito e torque resistente da carga, sendo que o torque resistente (ou acelerante) da carga pode ser constante ou variar como uma função da velocidade, conforme já explicado no item 3.1.2, ou seja:

$$T_{motor} = -[J.\alpha + \beta.\omega + T_{carga}(\omega)] \quad (3.4)$$

Podemos determinar o tempo de parada natural utilizando a equação anterior sem ação do motor ($T_{motor}=0$). Devido a dificuldade de se determinar o efeito exato do atrito, podemos considerar como atrito igual a zero que nos dará um tempo de parada natural maior que o real e mais conservativo, portanto:

$$T_{carga}(\omega) = J.\alpha = J.\frac{(\omega_{inicio} - \omega_{final})}{t_{parada}} = J.\frac{(n_{inicio} - n_{final}).2\pi}{t_{parada}.60} \quad (3.5)$$

Isolando para o tempo de parada temos:

$$t_{parada} = J.\frac{(n_{inicio} - n_{final}).2\pi}{60.T_{carga}(\omega)} \quad (3.6)$$

A potência média de frenagem pode ser calculada se dividirmos a energia cinética que deve ser dissipada em um tempo de parada especificado:

$$W_{cinética} = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2 = P_{Média} \cdot t_{parada} \quad (3.7)$$

ou

$$P_{Média} = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \left(\frac{n}{60} \cdot 2\pi \right)^2 \cdot \frac{1}{t_{parada}} \quad (3.8)$$

Em sistema convencional com resistores de frenagem esses são os parâmetros e fórmulas básicas necessárias ao dimensionamento. O tempo de parada será um requisito do processo e deve ser selecionado um resistor de frenagem, que tenha capacidade para dissipar a energia cinética do sistema mecânico no tempo de frenagem necessário, toda a energia cinética é dissipada em forma de calor no resistor de frenagem e portanto desperdiçada.

3.3.3 Ponte rolante regenerativa

O dimensionamento de um sistema regenerativo não difere muito de um sistema que utiliza resistor de frenagem e circuito chooper. O primeiro passo é obter informações sobre a característica da carga ou equipamento a ser acionado, por exemplo abaixo:

- Capacidade nominal da ponte rolante (M_L): 70 000 kg;
- Diâmetro do Tambor com o cabo de suspensão (d): 540mm;
- Tempo de parada (t_{parada}): 0,5 s;
- Potência nominal do motor (P_M): 30kW;
- Velocidade nominal do motor ($n_{inicial}$): 1420 rpm;
- Inércia total no eixo do motor (J_{total}): 0,144 kgm².

Em seguida calcula-se o torque que vai ser necessário para desacelerar a carga em uma parada, que é o torque máximo necessário para a aplicação. O torque

necessário para desaceleração depende da característica da carga, mudança total na velocidade, e da quantidade de tempo que a desaceleração deverá ocorrer, sendo calculado pela formula (3.5). No caso da ponte rolante devemos somar o torque que a carga sendo baixada exerce sobre o sistema que é igual a $m.g.r$, portanto o torque de frenagem máximo necessário na parada do movimento é de:

$$T_{carga} = m.g.r = (70000).(9,81).(\frac{0,54}{2}) = 132.6Nm \quad (3.9)$$

$$T_{máximo} = J_{total} \cdot \frac{(n_{inicio} - n_{final}).2\pi}{t_{parada}.60} + T_{carga} = 0,144 \cdot \frac{(1420 - 0).2\pi}{0.5.60} + 132.6 = 175Nm \quad (3.10)$$

Uma vez que o torque máximo para parada completa da carga é conhecido, a potência de pico que o sistema regenerativo precisa suportar pode ser calculada pela equação (3.3), pois a potência de pico no eixo do motor é o produto da velocidade do motor e o torque exigido para desacelerar a carga no período de tempo desejado.

$$P_{FR(Pico)} = T_{máximo}.n_{inicio} \cdot \frac{2\pi}{60} = 175.1420 \cdot \frac{2\pi}{60} = 26kW \quad (3.11)$$

Nesse ponto é importante observar se o motor e o conversor regenerativo tenham capacidade de suportar esse pico de potência. A potência de frenagem média dessa aplicação é aquela requerida enquanto abaixamos a carga com uma velocidade constante.

$$P_{FR(Média)} = \frac{T_{carga} \cdot (n_{inicio}) \cdot 2\pi}{60} = 19,7kW \quad (3.12)$$

A economia de energia pode ser calculada se o tempo total de frenagem, e os custos de energia são conhecidos.

$$Economia_{Energia} = t_{frenagem} \cdot P_{FR(Média)} \cdot (\frac{Reais}{kWh}).365 \quad (3.13)$$

Os mesmos passos podem ser considerados para análise de elevadores regenerativos, ou esteiras transportadoras em declive.

3.3.4 Resultados

Para o exemplo proposto consideramos que a ponte rolante opera 30% das horas de um ano e que 50% do tempo a carga esta descendo e a ponte rolante opera no modo regenerativo, ou seja podemos assumir que a ponte rolante opera em modo regenerativo por 3.6 horas/dia.

Com um custo médio de 0.4 R\$/kWh pela equação (3.13) temos um custo de energia evitado de R\$10 354,00 por ano. Verifica-se viabilidade econômica do investimento para regeneração nessa aplicação conforme demonstrado a seguir.

Parâmetros financeiros:

Conversor de frequência: R\$ 26 000,00 (aproximado)

Instalação e Testes: R\$ 8 000,00

Investimento Total: R\$ 34 000,00

Economia anual: R\$ 10 354,00

Taxa de desconto anual: 12%

Resultados financeiros:

Payback Simples: 3 anos e 4 meses

TIR: 27,8%

Para uma viabilidade mais atrativa com tempo de retorno menor, seria necessário um tempo de operação maior ou uma potência de frenagem superior.

4 Oportunidades e dificuldades

4.1 Oportunidades

Segundo dados do balanço energético nacional 2015 (BEN-2015) o setor industrial no ano base 2014, representou 33% do consumo de energia elétrica gerada no Brasil, ou seja pouco mais de 1/3 de toda a energia elétrica produzida e transportada no sistema brasileiro é consumida no setor industrial.

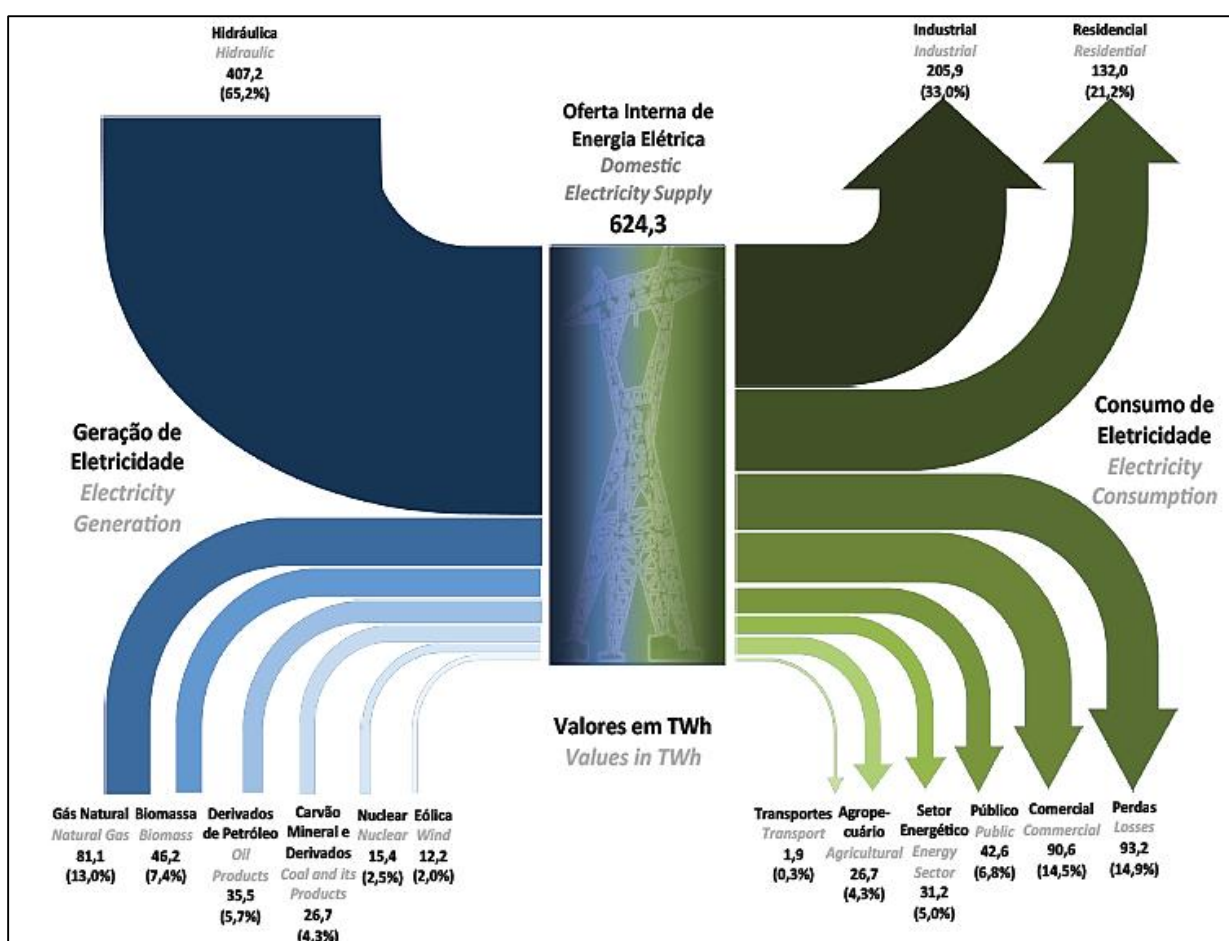


Figura 4.1 – Fluxo de Energia Elétrica BEN 2015

Fonte: MME – Ministério de Minas e Energia

Segundo (Plano nacional 2030), quando se aplicam os coeficientes de destinação de uso final de eletricidade do BEU 2005 (MME, 2005) à energia elétrica consumida por cada setor industrial o uso de energia elétrica em força motriz (incluindo os usos finais “força motriz” e “refrigeração”) corresponde a 68% da energia elétrica usada pela indústria brasileira, como se pode ver na Tabela 1 do Plano Nacional 2030 (reprentada aqui na Figura 4.2).

Setor	Total GWh/a	Força Motriz e Refrigeração	
		GWh/a	%
Cimento	3.754	3.702	99%
Ferro-gusa e aço	16.889	14.111	84%
Ferro-ligas	7.659	236	3%
Mineração e pelletização	9.292	8.586	92%
Não ferrosos	33.907	10.282	30%
Química	21.612	16.465	76%
Alimentos e bebidas	19.851	16.009	81%
Têxtil	7.776	7.582	98%
Papel e celulose	14.098	13.442	95%
Cerâmica	3.050	2.745	90%
Outros	34.173	23.750	70%
Total	172.061	116.909	68%

Figura 4.2 – Participação da força motriz no consumo de eletricidade na indústria

Observa-se que existe uma diferença para o consumo total entre as duas informações apresentadas. Essa divergência se deve ao fato que os dados do “plano nacional 2030” estão referenciados ao “balanço anual energético de 2005 - BEN2005” e o “balanço de energia útil - BEU2005” do mesmo ano. Poderíamos atualizar os dados, mas os coeficientes seriam os mesmos do BEU 2005 pois esse não sofreu atualização até a presente data, além disso seria uma atualização não muito precisa pois estaríamos considerando a demanda de 2015 com os coeficientes de utilização de 2005, como o objetivo do presente texto é apenas uma estimativa não teria ganhos significativos na precisão dos resultados.

Na mesma referência é apresentada a distribuição de energia em força motriz por setor e uso final na indústria, representada aqui na (Figura 4.3). No entanto o texto do plano nacional 2030 alerta que essa distribuição foi feita com base em um levantamento realizado em 1998 pelo DOE - US Department of Energy dos Estados Unidos para o parque industrial americano, pois o Brasil carece de dados e seria necessário um levantamento de campo do setor industrial brasileiro.

Setores	Bombas	Ventiladores	Compres- sores de ar	Refrigeração	Manuseio	Processamento	Outros	Total
Cimento	20,4%	14,5%	16,1%	0,2%	11,1%	33,3%	4,4%	100,0%
Ferro-gusa e aço	8,7%	15,3%	14,3%	0,0%	47,1%	12,6%	1,9%	100,0%
Ferro-ligas	8,7%	15,3%	14,3%	0,2%	47,1%	12,6%	1,9%	100,0%
Mineração e pelotização	8,7%	15,3%	14,3%		47,1%	12,6%	1,9%	100,0%
Não ferrosos	8,7%	15,3%	14,3%		47,1%	12,6%	1,9%	100,0%
Química	27,5%	12,5%	29,3%	2,5%	1,5%	24,9%	1,9%	100,0%
Alimentos e bebidas	18,9%	8,8%	8,9%	18,4%	7,0%	30,2%	7,7%	100,0%
Têxtil	12,3%	8,7%	9,7%	40,0%	6,7%	20,0%	2,6%	100,0%
Papel e celulose	32,9%	20,6%	4,8%	0,6%	7,7%	22,3%	11,1%	100,0%
Cerâmica	20,5%	14,5%	16,1%		11,1%	33,4%	4,4%	100,0%
Outros	18,6%	13,2%	14,7%	9,2%	10,1%	30,3%	4,0%	100,0%
Total	18,4%	13,7%	14,5%	7,4%	18,5%	23,1%	4,4%	100,0%

Figura 4.3 – Distribuição de energia em força motriz por setor e uso final na indústria

No contexto de uma planejamento nacional de energia, o uso de variadores de velocidade é enfatizado como medida de eficiência energética no acionamento de cargas centrífugas (principalmente bombas, ventiladores e compressores centrífugos). O mesmo relatório cita o uso de acionadores de velocidade como a medida de eficiência energética com o maior potencial de economia na indústria.

O plano nacional de energia 2030, estima que o setor industrial deve obter, apenas com a adoção de variadores de velocidade uma economia de 10,9% (22 TWh) no cenário de viabilidade técnica; ou 6,1% (13 TWh) no cenário de viabilidade econômica; ou 3,4% (7 TWh) no cenário de viabilidade de mercado. No cenário de viabilidade econômica seria equivalente a uma capacidade instalada adicional de 1,5GW operando 8400 horas no ano. Além dos custos de expansão temos os custos evitados de operação e a não emissão de aproximadamente 1,78MtCO₂

Importante ressaltar que todas as estimativas feitas, consideram apenas o setor industrial, pois segundo (Waide,2011) é no setor industrial que esta concentrado mais de 2/3 do consumo de eletricidade para sistemas motrizes, no entanto esse cenário esta mudando com uma participação cada vez mais expressiva do setor comercial principalmente para condicionamento do ambiente por sistemas de refrigeração.

O uso de variadores de velocidade podem apresentar economias significativas em sistemas de refrigeração, tendo em vista que os sistemas de ar-condicionado possuem uma característica muito interessante para o uso de variadores de velocidade, que é o fato de normalmente serem dimensionados para uma condição crítica que raramente ocorre e operarem por longos períodos de tempo (Lee,2014).

Atualmente os projetos de eficiência energética, podem se beneficiar do programa de eficiência energética das empresas de distribuição (PEE) estabelecido pela ANEEL. O programa determina que, as empresas concessionárias do serviço

público de distribuição de energia elétrica, são obrigadas a investir anualmente no mínimo 0,5% de sua receita operacional líquida em ações ou projetos de combate ao desperdício de energia.

Segundo dados atualizados e disponíveis no site da ANEEL até setembro de 2015 foram executados 1570 projetos com uma energia economizada de 4093 GWh/ano. O programa possui bastante material disponível no site da ANEEL e concessionárias de distribuição. Trata-se de uma ação bastante relevante em âmbito nacional e uma oportunidade que pode ser aproveitada em projetos com a utilização de conversores de frequência.

Além das questões de investimentos e custos evitados no setor de geração de energia, o uso de sistemas mais eficientes aumenta a competitividade de toda a indústria nacional, uma característica extremamente importante para a economia nos mercados atuais.

Um fator extremamente relevante é que o aumento de eficiência citado no plano nacional de energia 2030 é uma premissa inserida no planejamento do setor elétrico nacional, portanto torna-se imperativo que esses custos evitados sejam atingidos.

4.2 Dificuldades e Barreiras

Apesar do grande potencial no uso de sistemas motrizes mais eficientes, algumas barreiras dificultam uma maior atenção ao tema, isso ocorre por vários motivos, mas podemos citar:

- Necessidade de capacitação de pessoal para identificar oportunidades de eficiência energética;
- Organização das empresas que possuem orçamentos distintos para compra de equipamentos, custos de operação e manutenção e não visualizam os custos e oportunidade de maneira totalmente integrada;
- O fato que os sistemas motrizes são integrados em equipamentos produzidos por OEMs (“Original Equipment Manufactures”) para posterior venda aos usuários finais. Portanto o baixo custo inicial é uma necessidade em um cenário de alta competitividade;
- Falta de legislação específica e maiores incentivos a investimentos industriais em eficiência no uso da energia;
- Projetos de eficiência energética competem com outras prioridades de investimentos nas organizações;

Apesar do uso de conversores de frequência ter aumentado bastante nos últimos anos, a maioria das aplicações visam atender alguma necessidade de processo (maior produtividade, maior controle, melhorias de qualidade, etc.). O uso de conversores em aplicações com foco principal na eficiência energética é bem inferior, ou praticamente inexistente em vista das oportunidades.

Em muitos casos aplicações potenciais são “ignoradas”, simplesmente pelo fato de uma percepção que não vale o esforço para avaliação e implementação de sistemas mais complexos. Normalmente as empresas preferem dispendir esse esforço em sua atividade de negócio principal.

A carência de normas ou referências com relação a eficiência de sistemas motrizes impossibilita a adoção de programas de etiquetagem para sistemas eficientes, não dando aos usuários a percepção ou informação necessária para comparar diferentes alternativas.

5 Conclusão

O uso racional de energia em sistemas motrizes tem grande potencial e relevância para a sociedade, tendo em vista a grande parcela de energia e recursos que são utilizadas no acionamento de motores elétricos.

O uso de conversores de frequência já é uma realidade, ou até mesmo uma solução padrão em alguns processos, entretanto seu uso como uma medida de eficiência energética é quase inexistente ou na melhor das hipóteses inexpressivo dentro das possíveis aplicações

Nesse texto foram apresentados apenas dois exemplos de aplicações possíveis, mas existem outras com grandes potenciais de economia como por exemplo sistemas de ar-condicionado; sistemas a ar-comprimado; transportadores em declive; elevadores regenerativos, operação de acordo com a demanda e etc.. Também é importante destacar que aplicações com os maiores potenciais de economia de energia com o uso de conversores de frequência, possuem parcela significativa do consumo total de sistemas motrizes.

A pouca utilização dos conversores de frequência com objetivo de economia de energia se devem principalmente a falta de conhecimento sistêmico das aplicações possíveis; decisões de investimento baseadas em um menor custo inicial; pequena visibilidade de todos os benefícios no uso de conversores de frequência além da eficiência energética, como melhor controle e qualidade nos processos e menor desgaste dos componentes mecânicos reduzindo as despesas com manutenção.

A planejamento nacional por meio da empresa de pesquisa energética EPE já considera o uso de conversores de frequência como uma medida de eficiência energética e redução na demanda de energia elétrica, portanto torna-se essencial campanhas de conscientização, guias de aplicações e incentivos maiores para a disseminação do conhecimento e maior uso dessa tecnologia com o objetivo de eficiência energética.

Referências Bibliográficas

ABB. ABB Drives - Technical Guide Book. 2014.

ABDELAZIZ, E.; SAIDUR, R.; MEKHILEF, S. A review on energy saving strategies in industrial sector. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 15, n. 1, p. 150 – 168, 2011. ISSN 1364-0321. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211000290X>.

ADINOLFI, A. et al. Experimental assessment of energy saving due to trains regenerative braking in an electrified subway line. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 13, n. 4, Oct 1998.

AFFAIRS, F. M. for E.; ENERGY. Electrical Drives. 2015. Disponível em: <http://www.encyclopedia-germany.info/ENEFF/Navigation/EN/Energyefficiency/Industry/ElectricalDrives/electrical-drives.html>.

ALMEIDA, A. e; FERREIRA, F.; BOTH, D. Technical and economical considerations in the application of variable-speed drives with electric motor systems. Industry Applications, IEEE Transactions on, v. 41, n. 1, p. 188 – 199, Jan 2005.

AUSTIN, H.; BILL, D. Electric Motors and Drives - Fundamentals, Types and Applications. Quarta. USA: Elsevier, 2013.

BOSE, B. Global Energy Scenario and Impact of Power Electronics in 21st Century. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, v. 60, n. 7, p. 2638 – 2651, July 2013.

BOSE, B. Power Electronics and Motor Drives Recent Progress and Perspective. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, v. 56, n. 2, p. 581 – 588, Feb 2009.

CREAMER, J.; HEMERT, G. V. Energy savings VFDs and more. World Pumps, v. 2010, n. 8, p. 24 – 28, 2010. ISSN 0262-1762. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0262176210702261>.

DRURY, B. The Control Techniques Drives and Controls Handbook. Segunda. UK: Athenaem Press, 2009. (IET POWER AND ENERGY SERIES 57). ISBN 978-1-84919-101-2.

Empresa de Pesquisas Energéticas - EPE. Avaliação da Eficiência Energética (2012 - 2021). Rio de Janeiro, 2012. NOTA TÉCNICA DEA 16/12.

Empresa de Pesquisas Energéticas - EPE. Balanço Energético Nacional 2015: Ano base 2014. Rio de Janeiro: [s.n.], 2015.

FALKNER, H.; HOLT, S. Walking the Torque - Proposed Work Plan for energy-efficiency policy opportunities for electric motor-driven systems. Paris, 2011. Disponível: <<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/walking-the-torque.html>>.

FERREIRA, F.; FONG, J.; ALMEIDA, A. de. Ecoanalysis of Variable-Speed Drives for Flow Regulation in Pumping Systems. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 58, n. 6, p. 2117 – 2125, June 2011.

GAICEANU, M.; NICHITA, C. Regenerative AC drive system with the three-phase induction machine. In: Applied and Theoretical Electricity (ICATE), 2014 International Conference on. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1 – 6.

JOSE, R. et al. Regenerative drives in the megawatt range for high performance downhill belt conveyors. In: Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE. [S.l.: s.n.], 2000. v. 4, p. 2707–2712 – vol.4.

KARACA, M.; AYDIN, M. Efficient driving at variable speeds. World Pumps, v. 2013, n. 4, p. 38 – 41, 2013. ISSN 0262-1762. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0262176213701251>>.

KHALID, N. Efficient Energy Management: Is Variable Frequency Drives the Solution. Procedia - Social and Behavioral Sciences, v. 145, p. 371 – 376, 2014. ISSN 1877-0428. {INTERNATIONAL} {CONFERENCE} {ON} {CORPORATE} {GOVERNANCE} amp; {STRATEGIC} {MANAGEMENT} (ICGSM) 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042814039044>>.

KOURO, S. et al. Powering the Future of Industry: High-Power Adjustable Speed Drive Topologies. Industry Applications Magazine, IEEE, v. 18, n. 4, p. 26 – 39, July 2012.

LEE, K. et al. Energy saving HVAC system modeling and closed loop control in industrial and commercial adjustable speed drives. In: Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2014 IEEE. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1286 – 1292.

LNNBERG, M. Variable Speed Drives for energy savings in hospitals. World Pumps, v. 2007, n. 494, p. 20 – 24, 2007. ISSN 0262-1762. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0262176207703954>>.

MARTINS, A. S. Conservação de Energia - Eficiência Energética de Equipamentos e Instalações. Terceira. [S.l.]: Eletrobrás / PROCEL EDUCAÇÃO, 2006.

MECROW, B.; JACK, A. Efficiency trends in electric machines and drives. Energy Policy, v. 36, n. 12, p. 4336 – 4341, 2008. ISSN 0301-4215. Foresight Sustainable Energy Management and the Built Environment Project. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421508004461>>.

Ministério de Minas e Energia - Empresa de Pesquisa Energética. Plano Nacional de Energia 2030. Brasília, 2007.

Ministério de Minas e Energia. Balanço de Energia Util - BEU 2005. Brasília, 2005.

NEMA. Application Guide for AC Adjustable Speed Drive Systems. NEMA Application Guide, p. 1 – 79, 05 2007.

PEMBERTON, M. Variable speed pumping: myths and legends. World Pumps, v. 2005, n. 460, p. 22 – 24, 2005. ISSN 0262-1762. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0262176205004529>.

POPOVIC´-GERBER, J. et al. Power Electronics Enabling Efficient Energy Usage: Energy Savings Potential and Technological Challenges. Power Electronics, IEEE Transactions on, v. 27, n. 5, p. 2338 – 2353, May 2012.

REZA, C.; ISLAM, M. D.; MEKHILEF, S. A review of reliable and energy efficient direct torque controlled induction motor drives. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 37, p. 919 – 932, 2014. ISSN 1364-0321. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211400392X>.

RITCHIE, N.; BRIANT, M. Variable speed drives cuts 20% energy costs. World Pumps, v. 2014, n. 10, p. 18 – 19, 2014. ISSN 0262-1762. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0262176214702378>

RODRIGUEZ, J. et al. PWM regenerative rectifiers: state of the art. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, v. 52, n. 1, p. 5 – 22, Feb 2005.

ROOKS, J.; WALLACE, A. Energy efficiency of variable speed drive systems. In: Pulp and Paper Industry Technical Conference, 2003. Conference Record of the 2003 Annual. [S.l.: s.n.], 2003. p. 160 – 163.

ROUSE, S.; DEDERER, D. Variable Frequency Drives Energy Efficiency Reference Guide. [S.l.]: CEATI, 2009.

SAIDUR, R. A review on electrical motors energy use and energy savings. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 14, n. 3, p. 877 – 898, 2010. ISSN 1364-0321. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032109002494>.

SAIDUR, R.; RAHIM, N.; HASANUZZAMAN, M. A review on compressed-air energy use and energy savings. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 14, n. 4, p. 1135 – 1153, 2010. ISSN 1364-0321. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032109002755>

SAIDUR, R. et al. Applications of variable speed drive (VSD) in electrical motors energy savings. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 16, n. 1, p. 543 – 550, 2012. ISSN 1364-0321. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111004308>.

SUTIKNO, T.; IDRIS, N. R. N.; JIDIN, A. A review of direct torque control of induction motors for sustainable reliability and energy efficient drives. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 32, p. 548 – 558, 2014. ISSN 1364-0321.

Disponível em:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114000513>

TELFORD, D.; DUNNIGAN, M.; WILLIAMS, B. A comparison of vector control and direct torque control of an induction machine. In: Power Electronics Specialists Conference, 2000. PESC 00. 2000 IEEE 31st Annual. [S.l.: s.n.], 2000. v. 1, p. 421–426

– vol.1.

TOLVANEN, J. Saving energy with variable speed drives. World Pumps, 2008, n. 501, p. 32 – 33, 2008. ISSN 0262-1762. Disponível em:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0262176208701640>.

ZHANG, S.; XIA, X. Modeling and energy efficiency optimization of belt conveyors. Applied Energy, v. 88, n. 9, p. 3061 – 3071, 2011. ISSN 0306-2619.

Disponível

em:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261911001723>.

ZHAO, N. et al. Hybrid power-train for port crane energy recovery. In: Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), 2014 IEEE Conference and Expo. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1 – 6.

WAIDE, P.; BRUNNER, C. Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems. Paris, 2011. Disponível em: http://www.oecd-ilibrary.org/energy/energy-efficiency-policy-opportunities-for-electric-motor-driven-systems_5kkg52gb9gjd-en.