

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE ELETROTÉCNICA
ESPECIALIZAÇÃO EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

JOSÉ ARTHURO TEODORO

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE RECURSOS DO PROGRAMA
DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA ANEEL NA IMPLANTAÇÃO DE
CONVERSORES DE FREQUÊNCIA EM SISTEMAS DE BOMBEAMENTO**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA

2013

JOSÉ ARTHURO TEODORO

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE RECURSOS DO PROGRAMA
DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA ANEEL NA IMPLANTAÇÃO DE
CONVERSORES DE FREQUÊNCIA EM SISTEMAS DE BOMBEAMENTO**

Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Eficiência Energética do Departamento de Eletrotécnica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. M.Sc. Fábio Antônio Filipini

CURITIBA

2013



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Curitiba

Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Departamento de Pós-Graduação
Especialização em Eficiência Energética



TERMO DE APROVAÇÃO

ANÁLISE DA VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE RECURSOS DO PROGRAMA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA ANEEL NA IMPLANTAÇÃO DE CONVERSORES DE FREQUÊNCIA EM SISTEMAS DE BOMBEAMENTO

por

JOSÉ ARTHURO TEODORO

Esta Monografia foi apresentada em 18 de setembro de 2013 como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Eficiência Energética. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Luiz Amilton Peplow, M.Sc.
Coordenador do curso
Departamento Acadêmico de Eletrotécnica

Fábio Antônio Filipini, M.Sc.

Ayres Francisco da Silva Sória, M.Sc.

Severino Cervelin, Dr.

Valério José Novak, M.Sc.

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

Dedico este trabalho à minha
amada esposa Aline, que sempre
está ao meu lado e a minha filha
Maria Laura, que chegará em breve.

Dedico também este trabalho, aos
meus pais e minha irmã,
que sempre me apoiaram.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, pela graça de chegar onde nunca pensei que pudesse chegar.

A minha esposa Aline, que em todos os momentos participou de maneira, incentivando e compreendendo os momentos em que não pude estar ao seu lado.

A minha mãe Idalina e meu pai José Teodoro e a minha irmã Fernanda, que foram fundamentais para que conseguisse alcançar meus objetivos.

Ao meu orientador Prof. Msc. Fábio Filipini, pela oportunidade do aprendizado e o companheirismo nesta longa caminhada.

Ao colega Valério José Novak, que auxiliou de maneira decisiva na difícil tarefa de escolher o tema do presente trabalho.

A todos que aqui não menciono, mas que de alguma maneira participaram desta grande conquista.

“Que o teu trabalho seja perfeito para que,
mesmo depois da tua morte, ele permaneça”.
(Leonardo da Vinci)

RESUMO

TEODORO, José Arthuro. **Análise da viabilidade da utilização de recursos do programa de eficiência energética da ANEEL na implantação de conversores de frequência em sistemas de bombeamento.** 2013. 71 páginas. Especialização em Eficiência Energética - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

A força motriz tem uma participação expressiva no consumo de energia elétrica, principalmente no setor industrial, ela representa cerca de 70% o que significa 38% do consumo total brasileiro (dados do Anuário Estatístico da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) – 14/09/2012). Aliada a esta constatação temos os acionadores de velocidade ajustável, mais frequentemente conhecido como conversores de frequência, que desempenham um papel importante na eficiência energética quando se trata de motor de indução trifásico, pelos ganhos energéticos que eles podem proporcionar superiores a tão somente a substituição de motores convencionais por eficientes. O objetivo deste trabalho é evidenciar os benefícios do uso de inversores de frequência, bem como analisar a viabilidade da execução de projetos desta natureza com a utilização de recursos do programa de eficiência energética da ANEEL.

Palavras-chave: Conversores de frequência. Eficiência energética. ANEEL. COPEL. Energia economizada. Redução de demanda na ponta.

ABSTRACT

TEODORO, Jose Arturo. **Analysis of the viability of resource utilization efficiency program ANEEL in deploying frequency converters for pump systems.** 2013. 71 pages. Energy Efficiency Specialization - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

The driving force has a significant participation in the consumption of electricity, especially in the industrial sector, it represents about 70% which means 38% of total Brazilian (data from the Statistical Yearbook of Energy Research Company (EPE) - 14/09 / 2012). Coupled with this observation we have adjustable speed drives, more often known as frequency converters, which play an important role in energy efficiency when dealing with three-phase induction motor, the efficiency gains that they can provide more than merely the replacement of by efficient conventional engines. The aim of this work is to show the benefits of using AC drives, as well as analyze the feasibility of implementing such projects with resource utilization efficiency program ANEEL.

Keywords: Frequency inverters. Energy efficiency. ANEEL. COPEL. Energy saved. Reduction of peak demand.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Participação da força motriz no consumo industrial.	18
Figura 2 - Representação Lei de Faraday	25
Figura 3 - Lei de Lenz.	26
Figura 4 - Enrolamento motor trifásico.	27
Figura 5 - Gráfico de tensão e corrente alternado em um circuito trifásico.	27
Figura 6 - Rotor de um motor de indução trifásico.	28
Figura 7 - Estator do motor de indução trifásico.....	29
Figura 8 - Direção do campo girante em função do tempo.	30
Figura 9 - Rendimento do motor em função da potência nominal.	31
Figura 10 - Rendimento em função da potência aplicada ao motor.	32
Figura 11 - Curva de torque do motor de indução trifásico.	35
Figura 12 - Constituição básica de um inversor de frequência.....	37
Figura 13 - (a) Forma de onda de saída da tensão. (b) Forma de onda de saída da corrente.....	38
Figura 14 - Curva que representa a variação U/f	39
Figura 15 - Curva que representa a relação velocidade x conjugado.	39
Figura 16 - Curva que representa a potência de saída do conversor.....	40
Figura 17 - Tipo de cargas acionadas.	42
Figura 18 - Economia de energia na comparação método tradicional x inversor de frequência.....	45
Figura 19 - Bancada de teste utilizado no experimento.	56
Figura 20- Gráfico gerado a partir dos experimentos.	58

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Comparativo consumo energético.	60
Gráfico 2 - Redução de demanda em função da vazão.	68
Gráfico 3 - Consumo em função da vazão.	68
Gráfico 4 - Gráfico da RCB em função da vazão.	69

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Cálculo do benefício em um projeto de eficiência energética.	50
Quadro 2 - Cálculo dos custos anualizados totais.....	51
Quadro 3 - Cálculo custo total em equipamentos.....	51
Quadro 4 - Cálculo dos custos anualizados de cada equipamento.....	51
Quadro 5 - Cálculo fator de recuperação do investimento.	52
Quadro 6 - Especificação conversor de velocidade DANFOSS.	54
Quadro 7 - Especificação conversor de velocidade SIEMENS.	54
Quadro 8 - Especificação do motor utilizado no experimento.	55
Quadro 9 - Especificação da bomba utilizada no experimento.....	55
Quadro 10 - Fluxo de pagamentos do contrato de desempenho.	72
Quadro 11 - Fluxo de caixa.	73
Quadro 12 - Cálculo VPL.....	74
Quadro 13 - Cálculo taxa interna de retorno.	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados dos experimentos.	57
Tabela 2 - Consumo utilizando regulagem por válvula eletromecânica.	59
Tabela 3 - Consumo utilizando conversor de frequência mono/tri.....	59
Tabela 4 - Consumo utilizando conversor de frequência tri/tri.....	60
Tabela 5- Resumo dos custos para execução do projeto.	63
Tabela 6 - Valores para cálculo dos benefícios de acordo com a classificação tarifária.	65
Tabela 7 - Economia gerada pelo uso do inversor de frequência.	66
Tabela 8 - Valores de redução de demanda na ponta e energia economizada para demais vazões.	67
Tabela 9 - Cálculo da RCB para demais vazões.....	69
Tabela 10 - Valores da tarifa grupo tarifário A4 - horossazonal verde.	70
Tabela 11 - Cálculo da economia após execução do projeto de eficiência energética.	71

LISTA DE SIGLAS

CEE	Custo da Energia Evitada
CED	Custo Evitado de Demanda
CDB	Certificado de Depósito Bancário
EE	Energia economizada
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
M&V	Medição e verificação
MME	Ministério das Minas e Energia
MPEE	Manual do Programa de Eficiência Energética
PEE	Programa de Eficiência Energética
PIMVP	Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance
PNE	Plano Nacional de Energia
PNEf	Plano Nacional de Eficiência Energética
PWM	Pulse With Modulation
RCB	Relação custo benefício
RDB	Recibo de Depósito Bancário
RDP	Redução de demanda na ponta
REN	Resolução Normativa
ROL	Renda operacional líquida
SAC	Sistema de Amortização Constante
VPL	Valor Presente Líquido
TIR	Taxa Interna de Retorno

LISTA DE ACRÔNIMOS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
COPEL	Companhia Paranaense de Energia Elétrica
PROPEE	Procedimentos do Programa de Eficiência Energética
SELIC	Sistema Especial de Liquidação e de Custódia

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 JUSTIFICATIVA.....	17
1.1.1 Objetivo geral.....	19
1.1.2 Objetivos específicos	19
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO	20
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1 MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO	23
2.1.1 Lei de Faraday	23
2.1.2 Lei de Lenz	25
2.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO	26
2.2.1 Rotor	27
2.2.2 Estator	28
2.2.3 Campo girante	29
2.3 CARACTERÍSTICAS MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO.....	30
2.3.1 Rendimento.....	30
2.3.2 Velocidade síncrona	32
2.3.3 Escorregamento.....	32
2.3.4 Torque	33
2.4 VARIADORES DE VELOCIDADE	35
2.4.1 Estrutura do variador de velocidade	37
2.4.2 Controle escalar.....	40
2.4.3 Controle vetorial.....	40
2.5 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM MOTORES COM CONVERSOR DE FREQUÊNCIA.....	41
2.6 APLICAÇÃO DE CONVERSORES DE FREQUÊNCIA EM BOMBAS.....	43
2.7 PROGRAMA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA – ANEEL	46
2.7.1 Seleção e implantação de projetos.....	46
2.7.2 Análise de viabilidade de projetos.....	47
2.7.2.1 Benefícios anualizados	48
2.7.2.2 Custos anualizados.....	50
3 ESTUDO DE CASO PARA APLICAÇÃO DE RECURSOS DO PROGRAMA DE EFICIENCIA ENERGÉTICA.....	53
3.1 PROCEDIMENTO DE TESTE	56
3.2 CÁLCULO DAS ECONOMIAS.....	58

4 CÁLCULO DE VIABILIDADE SEGUNDO CRITÉRIOS ANEEL.....	62
4.1 CÁLCULOS CUSTOS ANUALIZADOS.....	62
4.1.1 Cálculo do fator de recuperação.....	63
4.1.2 Cálculo dos custos anualizados.....	64
4.2 BENEFÍCIOS ANUALIZADOS.....	64
4.3 ANÁLISE ECONÔMICA CLÁSSICA.....	70
4.3.1 Cálculo contrato de desempenho.....	71
4.3.2 Valor presente líquido.....	73
4.3.3 Taxa interna de retorno.....	74
5 PRÁTICAS PARA MEDIÇÃO E VERIFICAÇÃO APLICADA AO USO DE CONVERSORES DE FREQUÊNCIA EM SISTEMAS DE BOMBEAMENTOS	75
5.1 SELEÇÃO DE OPÇÃO DA MEDIÇÃO E VERIFICAÇÃO.....	75
5.2 AMOSTRAGEM, PERÍODO E INTERVALO DE MEDIÇÃO.....	75
5.3 EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO, PRECISÃO E INCERTEZA.....	76
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	77
REFERÊNCIAS.....	79

1 INTRODUÇÃO

É constante a necessidade da descoberta de novas formas de geração de energia, ou o aumento da produção dos modelos consolidados, como energia hidráulica, energia eólica, biomassa, energia solar, dentre outras, com intuito de atender a crescente demanda por energia elétrica. Entretanto tais modelos dependem de vultosos investimentos para sua implementação, em contrapartida ações de eficiência energética, produzem o mesmo resultado, o de fornecer energia elétrica, num tempo muito inferior e quando analisamos os custos para o desenvolvimento de tais ações frente às opções de aumento da oferta das consagradas fontes de energia, verifica-se a discrepância de valores.

O Plano Nacional de Energia Elétrica 2030 que traça as perspectivas de oferta e consumo no Brasil até o ano de 2030, estabelece que ações de eficiência energética devam ser adotadas, a fim de atender 10% da demanda prevista para o ano de 2030 seja atendida por ações de eficiência energética.

O setor industrial conhecidamente é o maior consumidor de energia elétrica, desta forma é imprescindível que ações efetivas sejam desenvolvidas a fim de utilizar a energia elétrica de maneira mais eficiente.

Dentre as principais utilizações de energia nas indústrias verificamos que a imensa maioria utiliza em seus setores produtivos, motores para transformar energia elétrica em energia mecânica, que é aplicada em algum tipo de transformação no processo em que esta inserida.

No Brasil, os rendimentos nominais dos motores vêm sendo elevados, tanto da linha padrão como da linha de alto rendimento, através da aplicação de mecanismos de etiquetagem e padronização.

Ações importantes já foram tomadas, como a lei 10.295/2001, que estabeleceu rendimentos mínimos para os motores, desta forma os fabricantes destes equipamentos precisaram desenvolver melhor seus produtos a fim de alcançar um melhor rendimento para o atendimento da norma vigente. Grandes resultados foram alcançados com o programa de etiquetagem de motores, segundo o Plano Nacional de Energia 2030 a lei de eficiência proporcionou uma economia de 1%. Entretanto esta ação tem um fator limitante que é o máximo que os equipamentos podem alcançar de rendimento.

Outras tecnologias já consagradas, como os conversores de frequência podem oferecer uma melhor utilização do insumo energética quando aplicado a motores, podem proporcionar tal economia de energia.

Diante disso o presente trabalho tem o intuito de apresentar um estudo de viabilidade, que possibilite o financiamento da aplicação deste equipamento com recursos oriundos do Programa de Eficiência Energética, onde as concessionárias de distribuição de energia tem a obrigatoriedade estabelecida nas concessões, em aplicar, meio por cento de sua receita líquida operacional, em projetos de eficiência energética.

1.1 JUSTIFICATIVA

Diversas são as formas de energia utilizadas na sociedade e energia elétrica realmente exerce um papel fundamental neste modelo de desenvolvimento. Em nível nacional, mais de 50 milhões de consumidores encontram-se diretamente acoplados ao sistema elétrico brasileiro, nas modalidades de grande, médio e pequenos consumidores, com objetivos diversos, mas com finalidades técnicas bastante específicas, como acionamento motriz, aquecimento, luz e acionamentos dos equipamentos eletroeletrônicos nas suas diversas modalidades.

A força motriz tem uma participação expressiva no consumo de energia elétrica. No setor industrial, ela representa cerca de 70% (128 TWh) e no setor comercial e público representa 48% (35 TWh). Isso significa 38% do consumo total brasileiro (dados do Anuário Estatístico da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) – 14/09/2012).

Dos diversos tipos de motores elétricos existentes, o mais significativo no mercado brasileiro é o motor de indução trifásico, que utiliza 75% do consumo total de energia elétrica para força motriz, e quando se trata de reduzir desperdícios e economizar energia, as principais recomendações incluem otimização do sistema motor-equipamento, substituição de motores superdimensionados, correção do fator de potência e redução dos picos de demanda.

A figura 1 a seguir ilustra a estratificação do uso de motores em vários segmentos industriais, obtido por meio de dados de 2009 do Plano Nacional de

Energia 2030 e de matrizes consolidadas pela Empresa de Pesquisa Energética – EPE com dados de 2005 (Revista O Setor Elétrico).

SETOR	CONSUMO (GWh/ANO)	PARTICIPAÇÃO NO TOTAL	FORÇA MOTRIZ (GWh/ANO)		PARTICIPAÇÃO FORÇA MOTRIZ	BOMBAS E VENTILADORES (GWh/ANO)	
ANO BASE	2009		2005				
LEGENDA	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Cimento	4.730	3%	99%	4.664	4%	35%	1.628
Ferro-Gusa e Aço	14.868	8%	84%	12.422	10%	24%	2.981
Ferro-Ligas	6.730	4%	3%	207	0%	24%	50
Minação e Pelotização	8.208	4%	92%	7.584	6%	24%	1.820
Não Ferrosos e Outros	36.113	19%	30%	10.951	9%	24%	2.628
Química	23.155	12%	76%	17.641	14%	40%	7.056
Alimentos e Bebidas	23.488	13%	81%	18.942	15%	28%	5.247
Têxtil	7.713	4%	98%	7.521	6%	21%	1.579
Papel e Celulose	18.271	10%	95%	17.420	14%	54%	9.320
Cerâmica	3.494	2%	90%	3.145	2%	35%	1.101
Outros	39.509	21%	69%	27.458	21%	32%	8.732
Total	186.280	100%	69%	127.957	100%	33%	42.143

Figura 1 – Participação da força motriz no consumo industrial.
Fonte: PNE 2030 e EPE 2005

Para facilitar a compreensão desses dados, segue a explicação de cada coluna:

- (1) Consumo total de cada setor
- (2) Participação de cada setor no total
- (3) Percentual de consumo da força motriz sobre o consumo total de cada setor (1)
- (4) Consumo devido à força motriz
- (5) Participação de cada setor no total de força motriz (4)
- (6) Parcela da força motriz (4) destinada a bombas e ventiladores
- (7) Consumo devido à força motriz em bombas e ventiladores

Interpretando a figura 1, podemos notar que a força motriz é o principal uso final de energia elétrica em diversos setores da indústria sendo muitas vezes quase que predominante como no caso do setor de cimento com 99%. Detalhando-se o tipo de carga acionada por esta força motriz tem-se as bombas e ventiladores, que em média, representa 33% da parcela da força motriz instalada.

Aliada a esta constatação temos os acionadores de velocidade ajustável, mais frequentemente conhecido como conversores de frequência, que desempenham um papel importante na eficiência energética quando se trata de

motor de indução trifásico, pelos ganhos energéticos que eles podem proporcionar superiores a tão somente a substituição de motores convencionais por eficientes.

Assim entendemos que é de grande valia e se justifica apresentar propostas que incentivem a aplicação de medidas de eficiência energética em bombas e ventiladores com uso de conversores de frequência, e uma oportunidade é obter recursos através do programa de eficiência energética que as distribuidoras de energia elétrica têm de executar com fiscalização da ANEEL.

Todo estudo será pautado pela resolução normativa nº 556/2013 editado pela ANEEL, que estabelece os Procedimentos do Programa de Eficiência Energética – PROPEE que regulamenta o Programa de Eficiência Energética - PEE.

O PEE propõe que as concessionárias de distribuição de energia são obrigadas segundo contrato de concessão em aplicar meio por cento de sua receita operacional líquida em ações de eficiência. O PEE sugere que equipamentos menos eficientes sejam substituídos por tecnologia mais moderna, que apresentam menor consumo de energia sem prejudicar o resultado final da aplicação. As tipologias de projetos permitidos pelo órgão regulador são: Comércio e Serviços, Industrial, Rural, Poder Público, Serviços Públicos, Residencial.

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral do presente trabalho é avaliar a possibilidade de financiamento na aplicação de conversores de frequência em motores de indução trifásicos em sistemas de bombeamento, com recursos provenientes do PEE.

1.1.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo esperado devem-se atender várias pequenas metas, tais como:

- Consolidar fundamentos teóricos sobre motor de indução trifásico;
- Detectar tecnologias consagradas para acionadores de velocidade;
- Analisar a eficiência energética em motores de indução trifásicos com aplicação de conversores de frequência;

- Analisar a viabilidade da utilização de recursos PEE na aplicação de conversores de frequência;
- Estudo de caso para avaliar a viabilidade e propor os procedimentos para adequar a ação de eficiência energética com uso de conversores de frequência em sistema básico de bombeamento hidráulico;
- Descrever procedimentos básicos para a medição e verificação segundo PIMVP – Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance (EVO, 2013).

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho será desenvolvido de modo a atingir todos os objetivos propostos, desde seus fundamentos teóricos, da análise dos procedimentos de execução de projetos dentro da metodologia do programa de eficiência energética da ANEEL, do estudo de caso de um sistema hidráulico, da medição e verificação necessária até a avaliação final da viabilidade da utilização de recursos via concessionária local de distribuição de energia elétrica.

Capítulo 1 – Introdução

Neste capítulo é demonstrada novamente a preocupação com o tema eficiência energética, bem como as iniciativas governamentais tomadas sobre o assunto.

1.1 – Justificativa

Na justificativa é demonstrada a importância dos motores elétricos no setor industrial e a participação no consumo energético, é então demonstrado a importância da utilização de equipamentos que reduzem o consumo energético como os conversores de energia.

1.1.1 – Objetivos

Neste subcapítulo demonstram-se os objetivos gerais e específicos do trabalho, com intuito de comprovar a viabilidade do projeto utilizando recursos do programa de eficiência energética regulado pela ANEEL.

1.2 – Estrutura do trabalho

Nesta parte estão descritos os resumos de cada capítulo.

Capítulo 2 – Fundamentação teórica

Este capítulo demonstra toda a base teórica do funcionamento dos equipamentos utilizados no estudo como: motores elétricos e conversores de frequência. É também abordada a utilização de conversores de frequência em sistemas de bombeamento e a influência causada pelo seu uso.

Neste capítulo também abordado os princípios que norteiam o programa de eficiência energética regido pela ANEEL.

Capítulo 3 – Estudo de caso para aplicação de recursos do programa de eficiência energética

Neste capítulo foi descrito todos os procedimentos para realização dos testes e obtenção das economias com o uso de conversores de frequência em sistemas de bombeamento.

Capítulo 4 – Cálculo de viabilidade segundo critérios ANEEL

Este capítulo aborda detalhadamente os cálculos realizados para obtenção do fator de viabilidade proposto pela ANEEL, que diz se um projeto é ou não viável segundo seus critérios.

Este capítulo também realizou os cálculos hipotéticos segundo critérios da COPEL, numa projeção do contrato de desempenho que deveria ser realizado caso o projeto analisado neste trabalho fosse realizado, bem como uma análise econômica utilizando métodos consagrados de viabilidade.

Capítulo 5 – Medição e verificação aplicada ao uso de conversores de frequência em sistemas de bombeamento

Neste ponto do presente trabalho, foram detalhadas as corretas técnicas que devem adotadas para aferição das economias obtidas após a realização do projeto.

Capítulo 6 – Considerações finais

Nas considerações finais são discutidos se os objetivos listados no item 1.1.1 foram atingidos ou não e quais os benefícios adquiridos.

Capítulo 7 – Referências Bibliográficas

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão abordados os principais conceitos referentes aos materiais e tecnologias empregadas no desenvolvimento desta monografia, tais como o motor de indução trifásico, inversor de frequência, programa de eficiência energética regulado pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL.

2.1 MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

O motor está para indústria assim como o coração esta para a sobrevivência dos seres humanos, ele é uma das mais importantes engrenagens da construção da riqueza de um país. É raro relatar processos industriais, por mais simples que sejam, que não se utilizam de motores em seus processos.

Os motores trifásicos de corrente alternada nada mais são do que conversores eletromagnéticos de energia, ou seja, eles convertem energia elétrica em energia mecânica, operando como um motor. O motor de indução trifásica apresenta-se como uma excelente opção para acionamentos controlados. Além disso, são máquinas construtivamente robustas, apresentam elevado rendimento e custo inicial baixo. Sua vida útil é projetada para um período de aproximadamente 20 anos, desde que obedecido todos os critérios de manutenção preventiva e preditiva, e sua aplicação for adequada as especificações de projeto.

Segundo ALMEIDA (2005), o motor de indução trifásico, basicamente é composto por duas partes, uma fixa, conhecida por estator e outra parte móvel conhecida por rotor.

2.1.1 Lei de Faraday

Para o perfeito entendimento sobre o funcionamento de um motor trifásico é fundamental a familiarização com duas importantes leis da física a Lei de Faraday e a Lei de Lenz.

A primeira diz que um condutor percorrido por uma corrente elétrica gera ao seu redor um campo magnético, a intensidade deste campo é proporcional à

corrente por ele percorrida, é de conhecimento que um campo magnético é capaz de produzir corrente elétrica.

Faraday realizou diversos experimentos a fim de comprovar seus estudos, estes o levaram à dedução da Lei de Indução de Faraday, a corrente que circula por uma espira é denominada corrente induzida, que é produzida a partir de uma força eletromotriz (fem) induzida V_e . Faraday ainda concluiu que a força eletromotriz é proporcional ao negativo da variação do fluxo magnético no tempo, como pode ser observado pela equação abaixo:

$$V_e = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (1)$$

Onde:

V_e – Força eletromotriz induzida;
 $d\Phi_B$ – Variação do fluxo magnético;
 dt – Variação no tempo.

Se, no lugar de uma espira, for considerada uma bobina de N espiras suficientemente compactas para desprezar-se a distância entre elas, a *fem* é dada por:

$$V_e = -\frac{Nd\Phi_B}{dt} \quad (2)$$

Onde:

V_e – Força eletromotriz induzida;
 N – Número de espiras;
 $d\Phi_B$ – Variação do fluxo magnético;
 dt – Variação no tempo.

Os enunciados acima propostos por Faraday podem ser observados na figura 2 que segue.

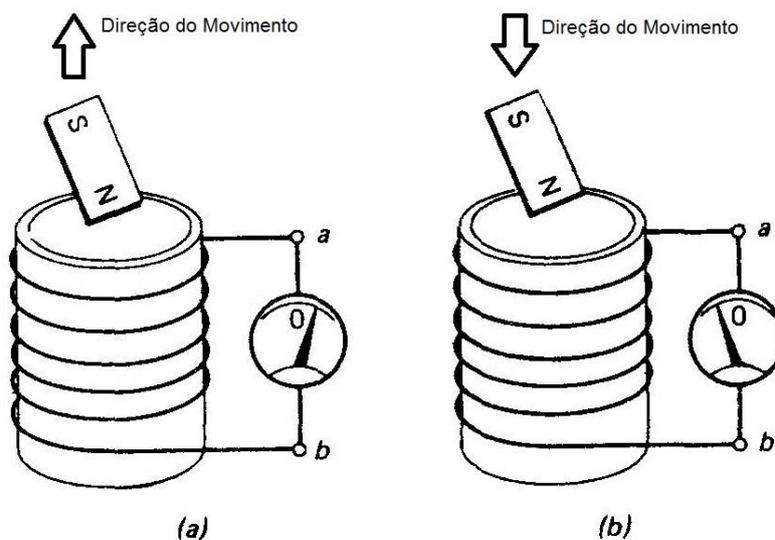


Figura 2 - Representação Lei de Faraday

2.1.2 Lei de Lenz

Como já mencionado anteriormente outra importante lei que explica o funcionamento de um motor de indução trifásico é a Lei de Lenz, esta lei diz que a corrente induzida ocorre sempre de forma a contrariar a variação da grandeza que a produziu, com o enunciado desta lei o sentido da corrente induzida é claramente definido.

A passagem de corrente elétrica através de um fio cria um campo magnético em torno dele, como pode ser visto nas ilustrações abaixo. O direcionamento do campo magnético depende do sentido em que a corrente circula, e que pode ser definido pela regra da *mão direita*. Desta forma, se tivermos um eletroímã, a sua polaridade vai alternar de acordo com o sentido da corrente.

Com o uso desses conceitos é possível determinar o sentido da corrente induzida. Da mesma forma que um ímã, uma espira de corrente tem um polo norte, de onde emergem as linhas de campo magnético, e um polo sul. Para que o campo da espira contrarie o movimento do ímã, a face da espira deve ter o mesmo sinal da face do ímã que se aproxima. Assim haverá repulsão entre ambos.

A ação de empurrar o ímã é a alteração que produz a corrente induzida, que atuará no sentido de opor-se à aproximação. Se o ímã for puxado, a corrente

induzida tendera a opor-se a esse movimento, criando um polo sul para atrair o íma, como pode ser observado nas ilustrações abaixo.

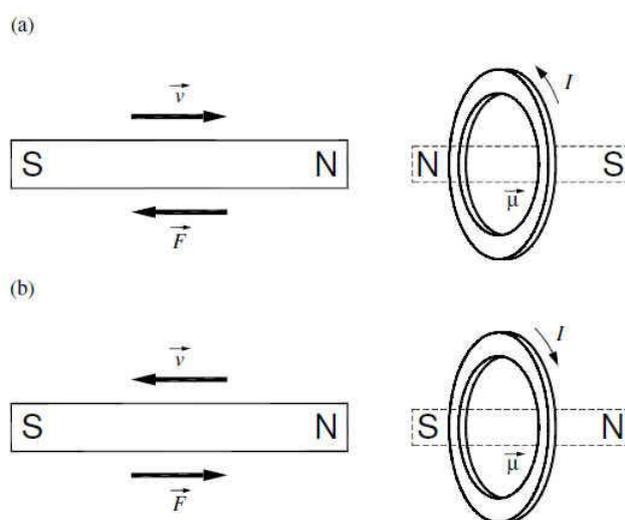


Figura 3 - Lei de Lenz.

2.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

Quando uma bobina é percorrida por uma corrente elétrica, como já analisado a partir da lei de Faraday, cria-se um campo magnético dirigido conforme o eixo da bobina e com seu valor proporcional a corrente.

A figura 4 ilustra o enrolamento trifásico realizado a partir de 3 enrolamentos monofásicos defasados entre si de 120° . Se esse enrolamento for alimentado por um sistema trifásico, as correntes I_1 , I_2 e I_3 criarão do mesmo modo os seus próprios campos magnéticos H_1 , H_2 e H_3 , sendo esses campos também separados por 120° . Se a corrente I é alternada, o campo H também é e o seu valor, a cada instante, inclusive invertido o sentido a cada meio ciclo.

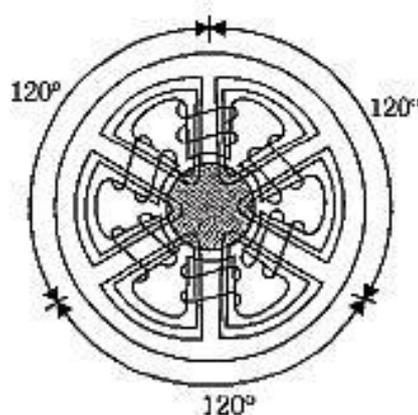


Figura 4 - Enrolamento motor trifásico.
Fonte: Acionamentos Elétricos, Claiton Moro Franchi, 2008.

O campo total resultante a cada instante é igual à soma gráfica dos três campos H_1 , H_2 e H_3 num dado instante.

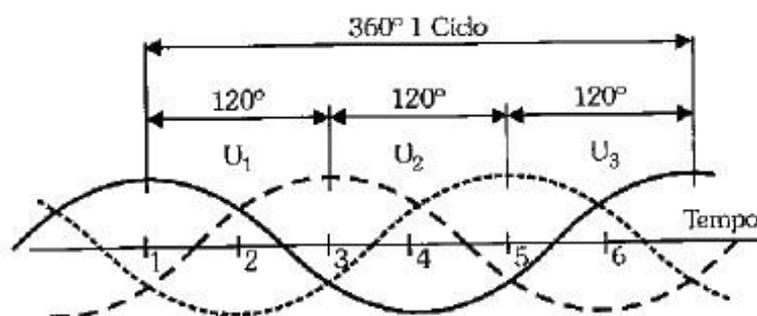
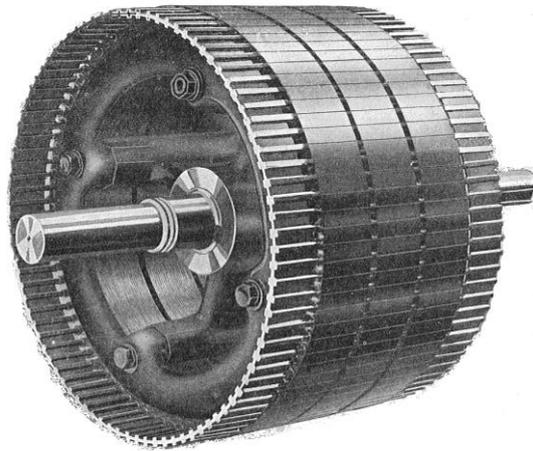


Figura 5 - Gráfico de tensão e corrente alternado em um circuito trifásico.
Fonte: FRANCHI (2008)

A corrente de partida pode atingir cerca de sete vezes o valor da corrente nominal FRANCHI (2008). À medida que o campo girante arrasta o rotor, aumentando sua velocidade, a corrente diminui até atingir a corrente nominal, no tempo em que a rotação atinge seu valor nominal.

2.2.1 Rotor

Segundo SOLAK (2012) o rotor do motor é constituído por um pacote de chapas de silício, unidas por barras de alumínio ou cobre em sua periferia, de maneira semelhante a uma gaiola de esquilo, fato este que dá nome ao motor. As barras são então conectadas mecânica e eletricamente em suas extremidades. A variação nas barras do rotor reflete na alteração das características do motor, tais como torque e corrente.



**Figura 6 - Rotor de um motor de indução trifásico.
Fonte: KENEDY Rankin (1909).**

2.2.2 Estator

O estator do motor de indução, também conhecido como parte fixa ou carcaça, é o local onde está localizada a caixa de ligação, destinada à conexão dos cabos de alimentação. O estator é composto por chapas construídas em liga de ferro com baixa densidade de perdas magnéticas de cerca de 0,5 mm. As chapas possuem o formato de coroa circular e possuem ranhuras em sua borda interna que abrigam o enrolamento trifásico. Todas as chapas são cobertas por uma camada de verniz e as ranhuras destinam-se a alojar os enrolamentos das bobinas do estator. Dependendo do número de ranhuras e da disposição das espiras, pode haver motores de 2, 4, 6 ou 8 polos magnéticos. Em máquinas elétricas de grande porte, as bobinas do estator são formadas por condutores de cobre rígidos, isolados por materiais sintéticos (SOLAK, 2012).



Figura 7 - Estator do motor de indução trifásico.
Fonte: Voges Motores (2010).

2.2.3 Campo girante

Segundo Del Toro (1999), inicialmente, consideram-se três bobinas independentes, montadas defasadas de 120° . Ao serem alimentadas, as bobinas geram um campo magnético girante, como se houvesse um único par de polos girantes com intensidade constante. Esse campo girante, criado pelo enrolamento trifásico do estator, induz tensões nas barras do rotor (linhas de fluxo cortam as barras do rotor) as quais geram correntes e, conseqüentemente, campo no rotor de polaridade oposta à do campo girante. Como polos de sinais opostos se atraem e o campo girante do estator é rotativo, o rotor tende a acompanhar a rotação desse campo, desenvolvendo um conjugado motor que faz com que o rotor gire.

Segundo Del Toro (1999), considerando-se N espiras em cada uma das bobinas, podem-se expressar as forças magnetomotrizes pelas equações que seguem abaixo.

$$F_a = N \cdot i_a = N \cdot I_m \cdot \text{sen } \omega t \quad (3)$$

$$F_b = N \cdot i_b = N \cdot I_m \cdot \text{sen } (\omega t - 120^\circ) \quad (4)$$

$$F_c = N \cdot i_c = N \cdot I_m \cdot \text{sen}(\omega t - 240^\circ) \quad (5)$$

Onde

F_a - Força magnetomotriz na fase a;

F_b - Força magnetomotriz na fase b;

F_c - força magnetomotriz na fase c;

- I_a – Corrente na fase a;
- I_b – Corrente na fase b;
- I_c – Corrente na fase ;
- N – Número de espiras;
- I_m – Corrente de fase.

Há uma variação senoidal da força magnetomotriz em um determinado eixo no tempo. Assim, há um campo magnético que gira em função do tempo, com velocidade angular que varia de acordo com a frequência das correntes aplicas às bobinas (DEL TORO, 1999).

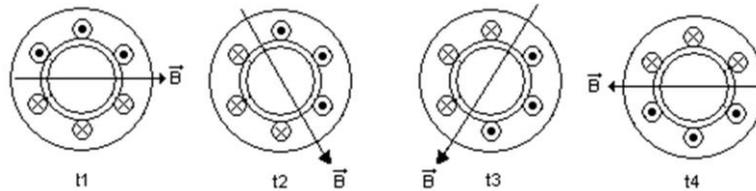


Figura 8 - Direção do campo girante em função do tempo.
Fonte: ABB (2002)

2.3 CARACTERÍSTICAS MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

2.3.1 Rendimento

O rendimento expressa a relação entre a potência ativa fornecida pelo motor e a potência ativa solicitada pelo motor à rede (FRANCHI, 2008), que é dada pela seguinte expressão:

$$\eta = \frac{\text{Potência}_{\text{Saída}}}{\text{Potência}_{\text{Entrada}}} \quad (6)$$

Onde:

- η – Rendimento;
- $\text{Potência}_{\text{Saída}}$ – Potência de saída;
- $\text{Potência}_{\text{Entrada}}$ – Potência de entrada;

Com pouca carga no motor, o rotor possui baixíssimo escorregamento, fazendo com que as correntes induzidas no enrolamento retórico sejam de pequenas intensidades e as perdas, sejam pequenas. A massa de ferro do rotor, apesar de apreciável, quando sob pequenos escorregamentos, conduz a pequenas perdas. Então, podemos concluir que, quando a máquina está em vazio, as perdas presentes devem-se, unicamente, ao estator.

Se a potência nominal da máquina for pequena, comparativamente, tem perdas elevadas, conduzindo a rendimentos relativamente menores. Desta forma, podemos dizer, que de maneira geral o rendimento aumenta quando a potência nominal aumenta, conforme podemos observar na figura 9.

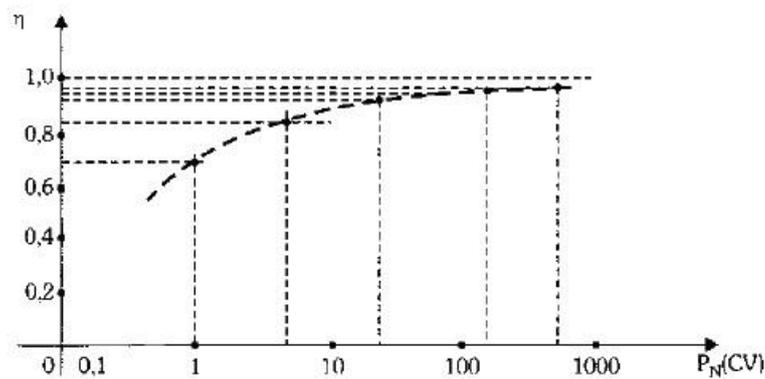


Figura 9 - Rendimento do motor em função da potência nominal.
Fonte: FRANCHI (2008).

À medida que se aplica carga ao eixo do motor, temos aumento no seu rendimento. Assim, quanto mais próximo da carga nominal, maior é o rendimento da máquina. O figura 10 ilustra a curva rendimento x potência no eixo para um motor de indução trifásico de 5CV e 3470 rpm.

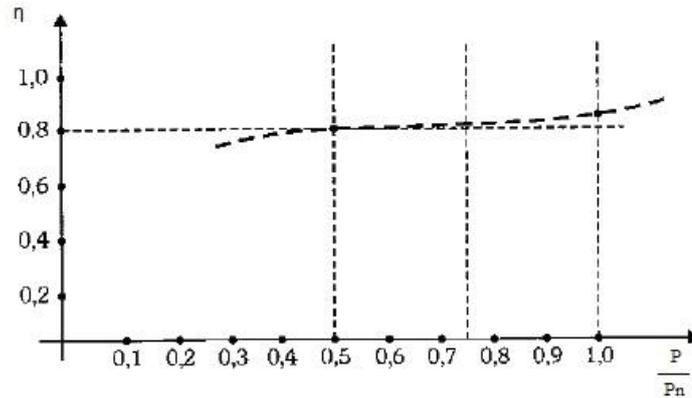


Figura 10 - Rendimento em função da potência aplicada ao motor.
Fonte: FRANCHI (2008).

2.3.2 Velocidade síncrona

A velocidade síncrona pode ser definida pela velocidade da rotação de seu campo girante, velocidade esta que é determinada pelo número de pólos do motor bem como pela frequência da rede de alimentação, dada em hertz.

Os enrolamentos podem ser construídos com um ou mais pares de polos, que se distribuem sempre aos pares, norte e sul, ao longo da periferia do núcleo magnético. O campo girante percorre um par de polos a cada ciclo. Desta forma dizer que para um motor que tem p pares de polos, sua velocidade será determinada pela equação 7 que segue.

$$n = \frac{60 \times f}{p} = \frac{120 \times f}{2p} \text{ (rpm)} \quad (7)$$

Onde:

n – Velocidade síncrona;

f – Frequência;

p – Número de polos do motor.

2.3.3 Escorregamento

Se o motor gira a uma velocidade diferente da velocidade síncrona, ou seja, diferente da velocidade do campo girante, o enrolamento do rotor corta as linhas de

força magnética do campo e, pelas leis do eletromagnetismo, circulam correntes induzidas (FRANCHI, 2008).

Quanto maior a carga, maior terá de ser o conjugado necessário para acioná-la. Para obter o conjugado, a diferença de velocidade precisa ser maior para que as correntes induzidas e os campos produzidos sejam maiores. Portanto, à medida que a carga aumenta, cai a rotação do motor (FRANCHI, 2008).

Quando a carga do motor é zero (motor vazio), o rotor gira praticamente com a rotação síncrona.

Outra importante característica, é que o escorregamento diminui à medida que a potência nominal do motor aumenta.

Segundo FRANCHI (2008), a diferença entre a velocidade do campo girante e do rotor é conhecida como escorregamento, que pode ser expresso pela equação abaixo.

$$S = \frac{(n_s - n_r)}{n_s} \quad (8)$$

Onde:

S – Escorregamento (%);

n_s – Velocidade síncrona (rpm);

n_r – Velocidade do rotor (rpm).

2.3.4 Torque

Para um condutor de comprimento L percorrido por uma corrente I , imerso em um campo de densidade B , com direção perpendicular ao condutor, observa-se uma força F , tal força pode ser expressa pela Equação 9 abaixo (SOLAK, 2012),

$$F = Il.B \quad (9)$$

Caso o condutor não esteja perpendicular a B , a força será determinada de acordo com o ângulo Θ . Assim, pode-se expressar a força através da relação que se segue.

$$F = Il.B.\text{sen}\theta \quad (10)$$

Onde:

F – Força (N);

Il – Corrente em um condutor (A);

B – Campo magnético (A/m);

θ - Ângulo.

Uma espira de fio condutor, percorrida por uma corrente i , solidária a um cilindro magnético, atravessada por um campo magnético girante, pode ser considerada como um rotor elementar. Se este rotor estiver livre para girar em torno de seu eixo e se houver um campo magnético girante com a direção de B variando em função do tempo, o rotor será arrastado pelo campo girante, pois a força F atua nos condutores longitudinais da espira, exercendo um torque que faz o motor girar. O torque desenvolvido pelo motor pode ser pela equação abaixo,

$$T = k_1 \cdot \phi m \cdot I_2 \quad (11)$$

O fluxo magnetizante pode ser expresso pela seguinte relação:

$$\phi m = k_2 \cdot \frac{V_1}{f_1} \quad (12)$$

Onde:

T – torque disponível no eixo (N.m);

k_1 e k_2 – constantes que dependem do material e projeto do motor;

ϕm – fluxo de magnetização (Wb);

I_2 – corrente do rotor – depende da carga (A);

V_1 – tensão (V);

f_1 – frequência (Hz).

Deste modo, verifica-se que o torque disponível no eixo do motor depende do seu material construtivo e da carga aplicada, mas também da tensão e frequência aplicada nos terminais do estator. A curva característica do motor de indução trifásico, para sua tensão e frequência máxima pode ser visualizada pela figura 11.

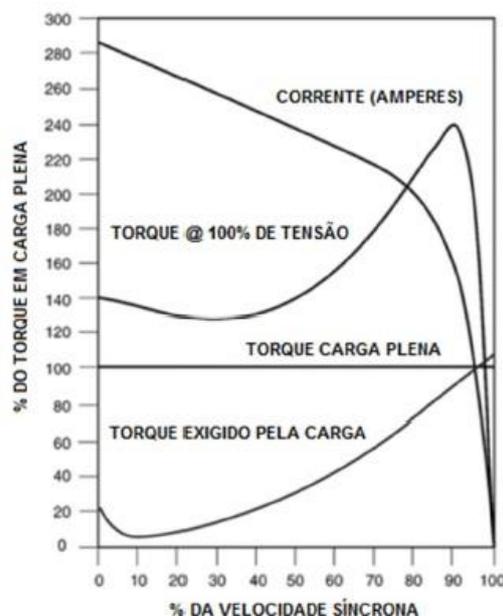


Figura 11 - Curva de torque do motor de indução trifásico.
Fonte: Barr et al.(2008)

2.4 VARIADORES DE VELOCIDADE

A utilização de variadores de frequência representa um importante componente no setor produtivo, quer pelo seu emprego em processos que requeiram a variação da velocidade do processo, ou mesmo pela característica de redução de consumo energético proporcionado pelo seu uso (FRANCHI, 2008).

Existe um considerável gama de sistemas que podem realizar a variação da velocidade nos processos, distribuídos em variadores mecânicos (sistemas de polias fixas, sistema de polias cônicas, sistema de polias variadoras e moto-redutores), variador hidráulico (motor hidráulico), variador hidráulico ou hidrodinâmico, variador eletromagnético (embreagens eletromagnéticas), conversores eletroeletrônicos (acionamento com motor comutador de corrente alternada e acionamento com motor assíncrono de anéis).

Mas indiscutivelmente, o equipamento mais utilizado para função de variar a velocidade de motores são os conversores estáticos de frequência, popularmente chamados de inversores de frequência, o qual o presente estudo fará uma discussão de suas particularidades e principalmente as benesses geradas pelo seu uso no quesito redução do consumo de energia (FRANCHI 2008).

O conceito de variação da velocidade baseada na “mudança” da frequência da fonte alimentadora, se mostra como sendo o método mais eficiente quando observado as perdas geradas pelo seu uso. Sinteticamente, seu funcionamento consiste em prover um ajuste contínuo de velocidade e conjugado em relação à carga mecânica (FRANCHI, 2008).

De acordo com o equacionamento da máquina assíncrona, inferimos que para o conjugado desenvolvido pelo motor assíncrono vale a equação 13.

$$C = \phi_m \cdot I_2 \quad (13)$$

O fluxo depende da relação U_1/f_1 , desprezando-se a queda de tensão na resistência R_1 e na reatância de dispersão X_{d1} do estator, pode-se dizer então que:

$$\theta_m = \frac{U_1}{f_1} \quad (14)$$

Onde:

C - Conjugado;

ϕ_m - Fluxo de magnetização do motor;

I_2 - Corrente do rotor;

U_1 - Tensão estatórica;

f_1 - Frequência da rede.

Para possibilitar a operação do motor com torque constante para diferentes velocidades, deve-se fazer a variar a tensão U_1 proporcionalmente com a variação da frequência f_1 mantendo desta forma o fluxo constante.

É de conhecimento que a potência consumida pelo motor depende de seu torque e da sua rotação, uma vez diminuída sua rotação diminui-se conseqüentemente a potência requerida para o funcionamento do motor, culminando assim com a redução do consumo elétrico.

Sabe-se que em diversas aplicações industriais, é possível reduzir a rotação de um acionamento sem qualquer prejuízo ao processo e com considerável redução do consumo de energia elétrica. Sabendo-se que os modernos inversores de frequência possuem rendimentos próximos aos 97% e que os motores comercializados frequentemente possuem eficiência superior a 95%, pode-se então concluir que este será um método de partida e controle bastante interessante do ponto de vista de eficiência energética (SUNDARAM, 2003).

2.4.1 Estrutura do variador de velocidade

A maioria dos inversores disponíveis no mercado atualmente é o que utiliza a modulação por largura de pulsos, e basicamente são compostos dos seguintes blocos:

- Fonte de tensão contínua elaborada a partir de uma ponte retificadora (diodos) alimentada por uma rede monofásica ou trifásica;
- Filtro capacitivo (link DC);
- Inversor constituído de transistores de potência.

Abaixo a figura 12 ilustra a constituição básica de um inversor de frequência,

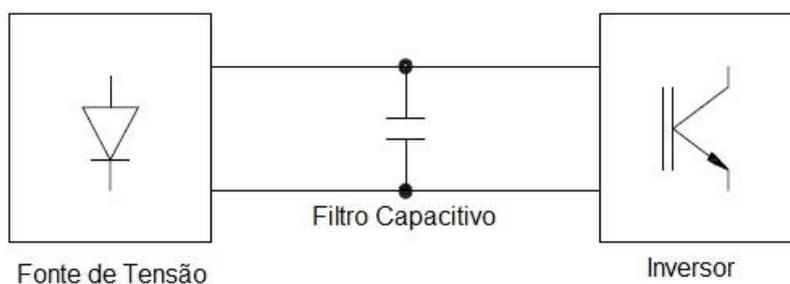


Figura 12 - Constituição básica de um inversor de frequência.
Fonte: Manual eficiência energética WEG.

A ponte retificadora de diodos transforma a tensão alternada de entrada em uma tensão contínua que é filtrada por um banco de capacitores. O circuito de corrente contínua é chamado de circuito intermediário. Esta tensão contínua alimenta uma ponte inversora formada por transistores de potência e diodos de roda livre. O comando das bases dos transistores, feito pelo circuito de comando (que utiliza um microcontrolador), permite a geração de pulsos para o motor com tensão e frequência controladas. O formato dos pulsos obedece ao princípio de modulação denominado PWM (*Pulse Width Modulation*) Senoidal, que permite um acionamento com corrente praticamente senoidal no motor (WEG, 2012).

O termo inversão de frequência se dá pela taxa de chaveamento a que os transistores são submetidos, a partir de sinais gerados externamente, por um microcontrolador digital. Aumentando-se ou diminuindo-se a taxa de variação de chaveamento, pode-se alterar a frequência do sistema trifásico gerado, inclusive aumentando a frequência acima do valor da rede, desta forma “alterando” a tensão de fornecimento no motor. A partir da figura 13 é possível observar as formas de onda de saída do inversor da tensão e corrente.

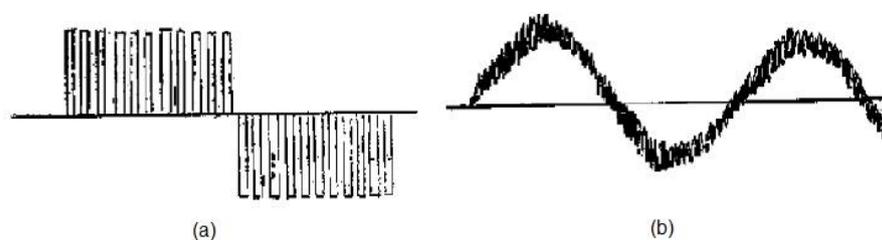


Figura 13 - (a) Forma de onda de saída da tensão. (b) Forma de onda de saída da corrente.
Fonte: Manual eficiência energética WEG.

A variação U/f é feita linearmente até a frequência nominal do motor (50/60 Hz), acima desta, a tensão que já é a nominal permanece constante e há então apenas a variação da frequência que é aplicada ao enrolamento do estator. Abaixo figura 14 ilustra a variação U/f .

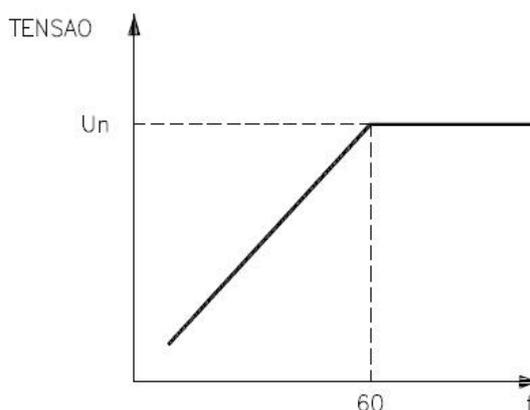


Figura 14 - Curva que representa a variação U/f .
Fonte: Manual eficiência energética WEG.

Com isto determinamos uma área acima da frequência nominal que é denominada região de enfraquecimento de campo, ou seja, uma região onde o fluxo começa a decrescer e, portanto, o torque também começa a diminuir.

Assim a curva característica conjugado versus velocidade do motor acionado com inversor de frequência pode ser representado pela figura 15.

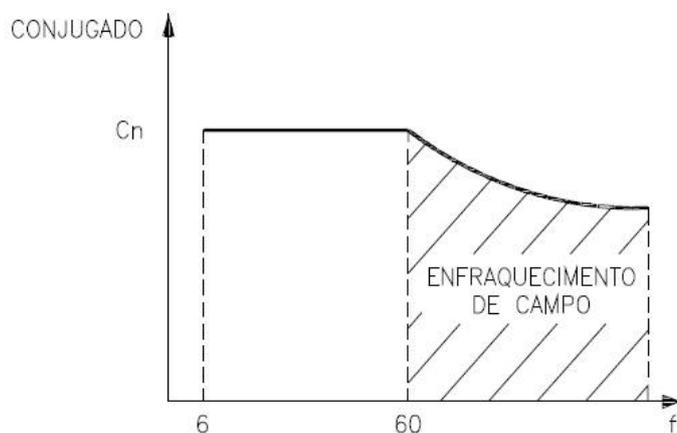
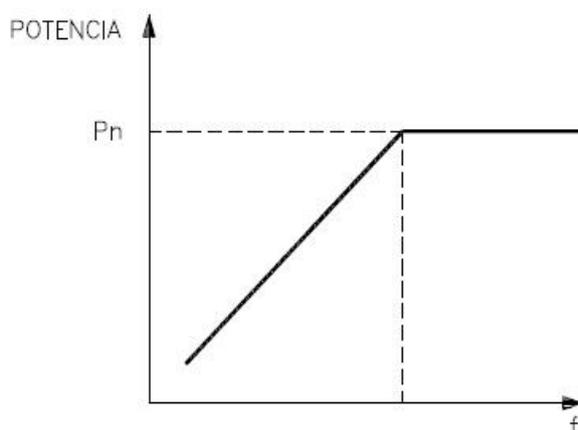


Figura 15 - Curva que representa a relação velocidade x conjugado.
Fonte: Manual eficiência energética WEG.

Podemos notar então, que o conjugado permanece constante até a frequência nominal e, acima desta, começa a decrescer. A potência de saída do conversor de frequência comporta-se da mesma forma que a variação U/f , ou seja, cresce linearmente até a frequência nominal e permanece constante acima desta.



**Figura 16 - Curva que representa a potência de saída do conversor.
Fonte: Manual eficiência energética WEG.**

2.4.2 Controle escalar

O método de controle escalar atua diretamente na relação U/f da saída do inversor. Deste modo, o motor funcionará com fluxo constante. Este método de controle é aplicado geralmente em cargas onde não é exigido elevado torque em baixas rotações, particularmente em cargas centrífugas, como ventiladores e alguns tipos de bombas. O controle escalar é largamente utilizado, devido à sua simplicidade e ao custo reduzido do equipamento.

2.4.3 Controle vetorial

Com este método de controle é possível atingir grande precisão e rapidez nos controles de torque e velocidade. O método é chamado de vetorial, pois o algoritmo de controle decompõe a corrente do motor e um vetor que representa o fluxo de magnetização do motor e em outro que representa o torque. Deste modo é possível controlar separadamente o torque e o fluxo do campo girante (GHOZZI; JELASSI; ROBOAM, 2004).

O controle vetorial pode ser do tipo *sensorless*, ou seja, sem realimentação por *encoder*. Este é um método de controle em malha aberta, já que o inversor não recebe informações de posição ou velocidade do motor. Este método apresenta-se bastante eficiente, porém há limitações, principalmente em caso de operação em baixas frequências.

No controle em malha fechada, um sensor de rotação, ou seja, um encoder é conectado ao eixo do motor e fornece realimentação de velocidade ao inversor. Este método permite excelente controle de torque e velocidade, chegando a ser utilizado em aplicações antes restritas a motores de corrente contínua.

2.5 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM MOTORES COM CONVERTOR DE FREQUÊNCIA

É um conhecimento já sedimentado, que de acordo com o tipo de carga a ser acionado, o emprego de motores em conjunto com inversores de frequência pode gerar uma significativa economia no consumo de energia elétrica.

Segundo LIMA (2013) estudos revelam que, no acionamento de bombas e ventiladores, utilizados em conjunto com o inversor de frequência é possível obter um ganho aproximado de 30%.

Isto é possível, pois o inversor permite a variar a frequência com que o motor é alimentado, desta forma variando a rotação do mesmo o que gera a economia de energia. Entretanto, é preciso garantir o mesmo torque ao motor a uma rotação diferenciada, isso se torna possível se mantivermos constante a relação entre a tensão e a frequência, demonstrada pela equação abaixo, conseqüentemente o fluxo magnético também permanece constante, logo o isso se refletirá no torque no eixo do motor que não será alterado (LIMA, 2013).

$$\Phi_m \times n^{\circ} \text{ espiras} = \frac{\text{Tensão}}{(\text{Frequência} \times 4,44)} \quad (15)$$

Onde:

Φ_m – Fluxo magnético.

O tipo de carga que é acionada pelo motor, pode ser resumido basicamente em dois tipos:

- Cargas de torque constante: São cargas que desde o princípio da operação exigem um torque para serem movimentadas (ex.: ponte rolante, elevador, etc.).

- Cargas de torque variável: São cargas que necessitam de um maior torque à medida que ocorre o aumento da rotação (ex.: bombas, ventiladores, etc.).

Isto pode ser mais bem observado pela figura 17, que demonstra graficamente o comportamento dos dois tipos de carga.

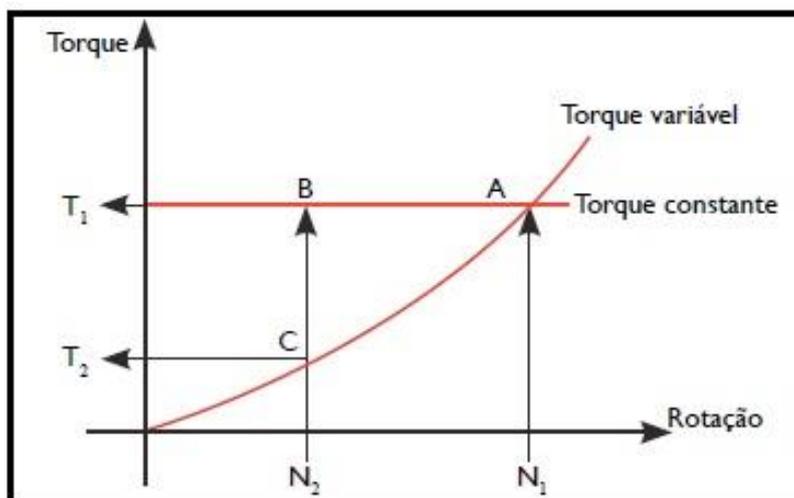


Figura 17 - Tipo de cargas acionadas.
Fonte: Revista O Setor Elétrico

Com base no gráfico acima é possível concluir que para cargas que demandam um torque constante a variação da potência é função única da rotação, e podemos calculá-la da seguinte maneira (LIMA, 2013).

$$\Delta W = T_1 \times (N_2 - N_1) \quad (16)$$

Onde:

ΔW – Variação da potência;

T_1 – Torque no ponto 1;

N_2 – Rotação no ponto 2;

N_1 – Rotação no ponto 1;

Já para cargas que exigem um torque variável do motor, a variação da potência pode ser dada pela seguinte equação,

$$\Delta W = (T_1 \times N_1) \times (T_2 \times N_2) \quad (17)$$

Onde:

ΔW – Variação da potência;

T_1 – Torque no ponto 1,

T_2 – Torque no ponto 2,

N_2 – Rotação no ponto 2,

N_1 - Rotação no ponto 1.

2.6 APLICAÇÃO DE CONVERSORES DE FREQUÊNCIA EM BOMBAS

Os conversores de frequência são dispositivos elétricos que convertem a tensão da rede alternada em tensão contínua e finalmente convertem esta última, em uma tensão de amplitude e período variáveis (frequência).

A denominação Inversor ou Conversor é bastante controversa, sendo que alguns fabricantes utilizam Inversor e outros Conversor. Inerentemente ao projeto básico de um Conversor de Frequência, teremos na entrada o bloco retificador, o circuito intermediário composto de um banco de capacitores eletrolíticos e circuitos de filtragem de alta frequência e finalmente o bloco inversor, ou seja, o inversor na verdade é um bloco composto de transistores IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), dentro do conversor. Assim, neste trabalho estaremos adotando então a nomenclatura de conversores de frequência. Na indústria, entretanto, ambos os termos são imediatamente reconhecidos, fazendo alusão ao equipamento eletrônico de potência que controla a velocidade ou torque de motores elétricos.

Em processos que demandam a utilização de bombas, como por exemplo, em concessionárias de fornecimento de água e tratamento de esgoto, é frequentemente necessária à variação da vazão, é possível a realização deste procedimento lançando mão de artifícios mecânicos, como a utilização de válvulas de estrangulamento. Entretanto estes métodos geram alguns inconvenientes como a

perda de carga, já o conversor de frequência realizaria esta tarefa satisfatoriamente sem, entretanto gerar inconvenientes.

Segundo LIMA (2013), Em processos que utilizam bombas a potência é função do produto entre a vazão e a pressão.

$$W = Q \times P \quad (18)$$

Onde:

W – Potência,

Q – Vazão,

P – Pressão.

Antes disso, é preciso dizer que a vazão é diretamente proporcional à rotação.

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \left(\frac{N_2}{N_1} \right) \quad (19)$$

Onde:

Q_2 – vazão a 50%, por exemplo,

Q_1 – vazão a 100%, por exemplo,

N_2 – Rotação no ponto 2,

N_1 - Rotação no ponto 1,

Já a pressão estática é proporcional ao quadrado da rotação.

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 \quad (20)$$

Onde:

P_2 – Pressão referida na rotação no ponto 1,

P_1 – Pressão referida na rotação no ponto 2,

N_2 – Rotação no ponto 2,

N_1 - Rotação no ponto 1,

Relacionando-se as equações acima demonstradas, temos então que potência será proporcional ao cubo da rotação, provando teoricamente que a redução da rotação no motor, influenciada pelo uso do inversor de frequência diminui ao cubo o consumo de energia em processos onde é possível que se faça a variação de velocidade, temos então que:

$$\frac{W_2}{W_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^3 \quad (21)$$

Onde:

W_2 – Potência referida na rotação no ponto 2,

W_1 – Potência referida na rotação no ponto 1,

N_2 – Rotação no ponto 2,

N_1 - Rotação no ponto 1,

Exemplificando a fórmula demonstrada acima, se reduzirmos a rotação do motor em 50% da nominal, esta redução proporcionará um economia de energia de aproximadamente 87,5%, o gráfico abaixo correlaciona a economia de energia gerada utilizando-se válvulas de restrição mecânicas e inversores de frequência,

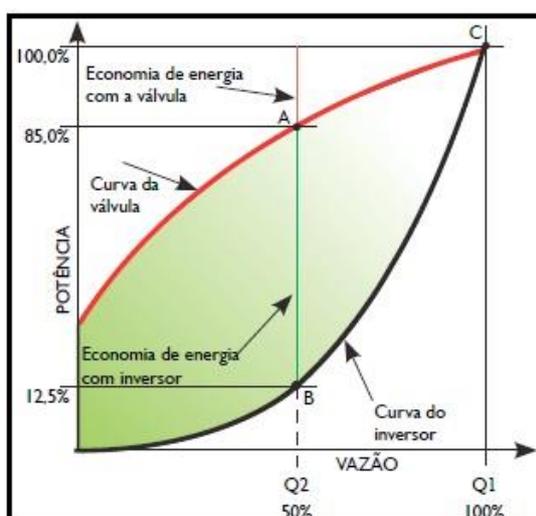


Figura 18 - Economia de energia na comparação método tradicional x inversor de frequência.
Fonte: Revista O Setor Elétrico

Analisando-se figura 18, é possível perceber nitidamente que o trecho AB, representa a perda de energia provocada pela válvula, neste ponto também a economia de energia gerada pelo uso de inversor é de aproximadamente 72,5%.

2.7 PROGRAMA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA – ANEEL

Conforme determina a legislação específica, em particular a Lei nº 9.991/2000, as empresas concessionárias ou permissionárias de distribuição de energia elétrica, devem obrigatoriamente aplicar no mínimo 0,5% de sua receita operacional líquida (ROL) em Programas de Eficiência Energética, de acordo com a regulamentação proposta pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL.

O principal objetivo do PEE é promover o uso eficiente e racional de energia elétrica em todos os setores da economia, a melhoria da eficiência energética de equipamentos, processos e usos finais de energia. Para isso, busca-se maximizar os benefícios públicos da energia economizada e da demanda evitada no âmbito desses programas.

O PEE integra o Plano Nacional de Energia – 2030, neste contexto o plano evidencia a importância da implementação de ações de eficiência uma vez que tais ações deverão contribuir com 10% da demanda de energia em 2030.

2.7.1 Seleção e implantação de projetos

Segundo estabelece a resolução normativa ANEEL nº 556/2013, toda concessionária de distribuição de energia elétrica deverá acolher os projetos de eficiência energética através da abertura de editais de chamada pública, exceto projetos desenvolvidos com consumidores atendidos pela tarifa social de energia e projetos de cunho educacional que é de responsabilidade exclusiva da concessionária.

Segundo entendimento do órgão o procedimento de acolhimento de projetos via chamada pública, visa dar maior transparência ao programa bem como dar acesso aos recursos a todos os interessados em desenvolver projetos de eficiência energética.

Ainda segundo a recente publicação do órgão regulador, dando novas regras ao programa de eficiência energética, durante o período de vinte e quatro meses as concessionárias deverão realizar ao menos uma chamada pública divididos por tipologias (industrial, comércio e serviços, poder público, etc.) para sedimentar o conhecimento a cerca do novo procedimento.

A ANEEL estabelece ainda doze critérios para avaliar projetos de eficiência energética apresentados no chamamento público, ao final da avaliação estes projetos são pontuados numa escala que vai de 0 a 100 pontos. Serão executados os projetos que obtiverem as melhores notas até atingir o valor disponibilizado pela concessionária para realização da chamada pública.

O valor reservado para chamada pública, excluindo-se os percentuais de outras obrigações legais, como o investimento de 60% do recurso em consumidores atendidos pela tarifa social, 50% do saldo deverá ser investido de maneira igualitária nos dois maiores mercados da concessionaria, o valor residual poderá ser destinado às demais tipologias. Caso o chamamento público seja infrutífero, a concessionária deverá elaborar projetos para cumprir a obrigação legal da aplicação dos recursos.

2.7.2 Análise de viabilidade de projetos

O principal fator que indica a viabilidade técnico/econômica para execução de um projeto de eficiência energética, dentro dos critérios estabelecidos pela ANEEL, é a Relação Custo Benefício – RCB. Este fator é limitado a 0,8, isto significa dizer que a ação de eficiência proposta é cerca de 25% mais vantajosa do que expandir a disponibilidade do sistema elétrico em suas várias componentes.

O cálculo da RCB é expresso por (Manual PROPEE, 2013),

$$RCB = \frac{CA_T}{BA_T} \quad (22)$$

Onde:

RCB – Relação custo benefício;

CA_T – Custos anualizados totais;

BA_T – Benefícios anualizados totais.

2.7.2.1 Benefícios anualizados

Os benefícios gerados pela implementação de um projeto de eficiência energética pode ser mensurado por dois parâmetros:

- Redução de demanda na ponta – kW/ano;
- Energia economizada – MWh/ano.

A redução de demanda na ponta significa dizer o quanto à ação de eficiência colaborou para “desafogar” o sistema elétrico no horário de ponta, ou seja, no período em que o sistema elétrico é mais exigido, período este compreendido em dias úteis das 18hs às 21hs.

Já a energia economizada, é um conceito mais facilmente compreendido, pois, trata-se da diferença de consumo obtida pela troca do equipamento.

É importante salientar que para cada uso final, a ANEEL estabelece cálculos que devem ser seguidos para se obter os valores de energia economizada, bem como de redução de demanda na ponta. O presente trabalho tratará detalhadamente dos cálculos relacionados a ações de eficiência em sistema que utilizam força motriz, em item específico.

Para cálculo dos benefícios propriamente ditos, é necessário antes o cálculo de duas constantes:

- Custo evitado de energia – CEE;
- Custo evitado de demanda – CED.

Estes valores variam entre as concessionárias e dependem do segmento de tensão em que estão inseridos. O CEE é dado pela seguinte equação (Manual PROPEE, 2013),

$$CEE = \frac{(C_3 \times LE_1) + (C_4 \times LE_2) + (C_5 \times LE_3) + (C_6 \times LE_4)}{LE_1 + LE_2 + LE_3 + LE_4} \quad (23)$$

Onde:

CEE – Custo unitário evitado de energia (R\$/MWh);

C_3 – Custo unitário de energia no horário de ponta de períodos secos (R\$/MWh);

C_4 – Custo unitário de energia no horário de ponta de períodos úmidos (R\$/MWh);

C_5 - Custo unitário de energia no horário fora de ponta de períodos secos (R\$/MWh);

C_6 - Custo unitário de energia no horário fora de ponta de períodos úmidos (R\$/MWh);

LE_1 – Constante de perda de energia no posto de ponta de períodos secos considerando 1kW de perda de demanda no horário de ponta;

LE_2 - Constante de perda de energia no posto de ponta de períodos úmidos considerando 1kW de perda de demanda no horário de ponta;

LE_3 - Constante de perda de energia no posto fora de ponta de períodos secos considerando 1kW de perda de demanda no horário de ponta;

LE_4 - Constante de perda de energia no posto fora de ponta de períodos úmidos considerando 1kW de perda de demanda no horário de ponta.

Já o CED é dado pela seguinte expressão (Manual PROPEE, 2013).

$$CED = (12 \times C_1) + (12 \times C_2 \times LP) \quad (24)$$

Onde:

CED – Custo unitário evitado de energia;

12 – doze meses;

C_1 – Custo unitário da demanda no horário de ponta;

C_2 - Custo unitário da demanda no horário fora de ponta;

LP – Constante de perda de demanda no posto fora de ponta, considerando 1kW de perda de demanda no horário de ponta.

A resolução tarifária a ser utilizada no cálculo dos custos unitários evitados, com base na tarifa (horossazonal) azul, deve ser a resolução vigente na data da primeira apresentação do projeto ou aquela vigente até 30 dias antes da data de apresentação do projeto.

A expressão final então apurada pela realização do projeto de eficiência energética é dada por (Manual, PROPEE 2013).

$$BA_T = (EE \times CEE) + (RDP \times CED) \quad (25)$$

Onde:

BA _T	Benefícios Anualizados Totais	R\$/ano
EE	Energia anual economizada	MWh/ano
CEE	Custo unitário de energia	R\$/MWh
RDP	Demanda evitada na ponta	kW/ano
CED	Custo unitário evitado de demanda	R\$/kW ano

**Quadro 1 - Cálculo do benefício em um projeto de eficiência energética.
Fonte: Módulo VII PROPEE**

2.7.2.2 Custos anualizados

Basicamente os custos previstos na execução de um projeto de eficiência baseado nos critérios propostos pela ANEEL, se resumem principalmente a:

- Custos dos equipamentos;
- Custos com de mão de obra para instalação;
- Custos para medição e verificação.

O custo anualizado total é dado por:

$$CA_T = \sum_n CA_n \quad (26)$$

Onde:

CA_T	Custo anualizado total	R\$/ano
CA_n	Custo anualizado de cada equipamento incluindo custos relacionados (mão de obra, etc).	MWh/ano

Quadro 2 - Cálculo dos custos anualizados totais.
Fonte: Módulo VII PROPEE

Temos ainda que,

$$CE_T = \sum_n CE_n \quad (27)$$

Onde:

CE_T	Custo total em equipamentos	R\$
CE_n	Custo de cada equipamento	R\$

Quadro 3 - Cálculo custo total em equipamentos.
Fonte: Módulo VII PROPEE

Os custos anualizados de cada equipamento são dados por,

$$CA_n = CE_n \times \frac{CT}{CE_T} \times FRC_u \quad (28)$$

Onde:

CA_n	Custo anualizado dos equipamentos incluindo custos relacionados (mão de obra, etc)	R\$
CE_n	Custo de cada equipamento	R\$
CT	Custo total do projeto	R\$
CE_T	Custo total em equipamentos	R\$
FRC_u	Fator de recuperação do capital para u anos	1/ano
u	Vida útil dos equipamentos	ano

Quadro 4 - Cálculo dos custos anualizados de cada equipamento.
Fonte: Módulo VII PROPEE

A vida útil dos equipamentos influi diretamente no resultado da relação custo benefício, uma vez que o fator de recuperação do capital compõe a parcela dos custos do projeto, o fator é dado por,

$$FRC_u = \frac{i(1+i)^u}{(1+i)^u - 1} \quad (29)$$

Onde:

FRC_u	Fator de recuperação do capital para u anos	1/ano
u	Vida útil dos equipamentos	Ano
i	Taxa de desconto	1/ano

Quadro 5 - Cálculo fator de recuperação do investimento.

Fonte: Módulo VII PROPEE

A taxa de desconto considerada atualmente é de 8%, já a vida útil deverá ser definida com base nos dados fornecidos pelo fabricante do equipamento.

3 ESTUDO DE CASO PARA APLICAÇÃO DE RECURSOS DO PROGRAMA DE EFICIENCIA ENERGÉTICA

Para calcular a viabilidade na instalação de inversores de frequência em motores de indução trifásicos, utilizou-se como base o experimento realizado e publicado na edição 86 da revista O Setor Elétrico.

Como já discutido anteriormente, é possível reduzir a rotação do motor utilizando recursos mecânicos para este fim, o mais comum é o controle do fluxo pela regulagem do registro, procedimento este que já se mostrou menos eficiente do que a utilização dos inversores de frequência, com o uso dele, quando se reduz a rotação do rotor da bomba e, conseqüentemente a vazão, reduz-se também a altura manométrica, ao contrário do que acontece na regulagem no registro que quando se reduz a abertura do registro e, conseqüentemente a vazão, ocorre uma elevação na altura monométrica do sistema.

A altura manométrica de um sistema elevatório representa a altura de elevação (desnível) mais as perdas distribuídas e localizadas na canalização. Ela representa a energia necessária por unidade de peso de líquido, expressa em metros de coluna de líquido, para proporcionar uma determinada vazão por meio do sistema (VASCONCELLOS, 2013).

O estudo resultado sempre foi à comparação do sistema utilizado inversor de frequência em relação ao tradicional sistema de regulagem da válvula. Foram utilizados dois tipos de inversor, um com entrada e saída trifásica e outro modelo com entrada monofásica e saída trifásica, abaixo segue as características dos inversores utilizados, do motor e da bomba,

Configuração	Conversor de velocidade Trifásico/Trifásico
Marca	DANFOSS
Modelo	VLT 2800
Entrada F1	1 x 200 – 240V – 15,2A
Entrada F3	3 x 200 – 240V – 7,6A
Saída	6,8A – 2kVA
Motor	1,5 kW
Proteção	IP 20
Temperatura máxima	45°C/113°F

Quadro 6 - Especificação conversor de velocidade DANFOSS.

Fonte: Revista O Setor Elétrico

Configuração	Conversor de velocidade Monofásico/Trifásico
Marca	SIEMENS
Modelo	SINAMICS G110 COM 110 A/N
Entrada V	200 – 240 VAC \pm 10%
Entrada I	1F AC: 19,7A – 47 a63 Hz
Saída V	3F AC: 0 – 230V
Saída I	3F AC: 7,8A 0 a 650Hz
Motor	1,5kW
Proteção	IP 20

Quadro 7 - Especificação conversor de velocidade SIEMENS.

Fonte: Revista O Setor Elétrico

MOTOR WEG STANDARD	
Potência	1,5 cv
Frequência	60Hz
Corrente	4,28A
Rendimento	78,5%
Fator de Potência	0,86
Rotação	3.370 RPM
Temperatura	40°C
Ip/In	7,5
CAT	N

**Quadro 8 - Especificação do motor utilizado no experimento.
Fonte: Revista O Setor Elétrico**

BOMBA CENTRÍFUGA	
Marca	MARK
Modelo	DB
Potência	2cv
Rotação	3.500 RPM
Vedação	Selo
Roscas	BSP

**Quadro 9 - Especificação da bomba utilizada no experimento.
Fonte: Revista O Setor Elétrico**

3.2 PROCEDIMENTO DE TESTE

De acordo com VASCONCELLOS (2013) o experimento consistiu basicamente na elevação da água de um reservatório para outro, a diferença entre eles era de 2,6 m, havia ainda uma canalização de retorno do reservatório superior para o inferior.

Foram realizados medições e registros das grandezas elétricas e das vazões de água proporcionadas pelos acionamentos distintos. Primeiro foi acionado o motor da bomba do sistema via contator, abrindo-se uma válvula eletromecânica computadorizada, existente na canalização do sistema, variando a abertura de 10% em 10% a partir de 20% até 100%. O tempo entre uma variação e outra da abertura da válvula foi de 10 minutos. Posteriormente, foram feitos mais dois experimentos com o motor da bomba do sistema sendo acionado, primeiro, com conversor de frequência tri/tri e variando-se a frequência de operação do conversor de 5Hz em 5Hz de 20Hz a 60Hz, o tempo entre as variações também foi de 10 minutos. Na sequência o mesmo procedimento foi realizado utilizando-se o inversor mono/tri. De posse dos dados foi possível elaborar a seguinte tabela com os resultados obtidos através das simulações,



Figura 19 - Bancada de teste utilizado no experimento.
Fonte: Revista O Setor Elétrico

Após a realização dos experimentos os resultados obtidos foram os seguintes:

Tabela 1 - Resultados dos experimentos.

Vazão (m ³ /h)	Potência ativa solicitada na regulação da válvula (Registro (kW))	Potência ativa solicitada na regulação na rotação da bomba com conversor mono/tri (kW)	Potência ativa solicitada na regulação na rotação da bomba com conversor tri/tri (kW)	Percentual de redução da potência ativa com conversor mono/tri (%)	Percentual de redução da potência ativa com conversor tri/tri (%)
2,5	1,190	0,170	0,140	85,714	88,235
5	1,345	0,250	0,235	81,413	82,528
7,5	1,553	0,410	0,400	73,599	74,243
10	1,670	0,680	0,710	59,281	57,485
12,5	1,750	1,085	1,170	38,000	33,143
15	1,800	1,440	1,835	20,000	-1,944

Fonte: Revista O Setor Elétrico

Com base nos resultados acima, foi elaborado um gráfico onde os benefícios pela utilização do inversor de frequência se mostrou bastante eficiente em relação à tradicional solução do controle de vazão pela regulação da válvula do registro.

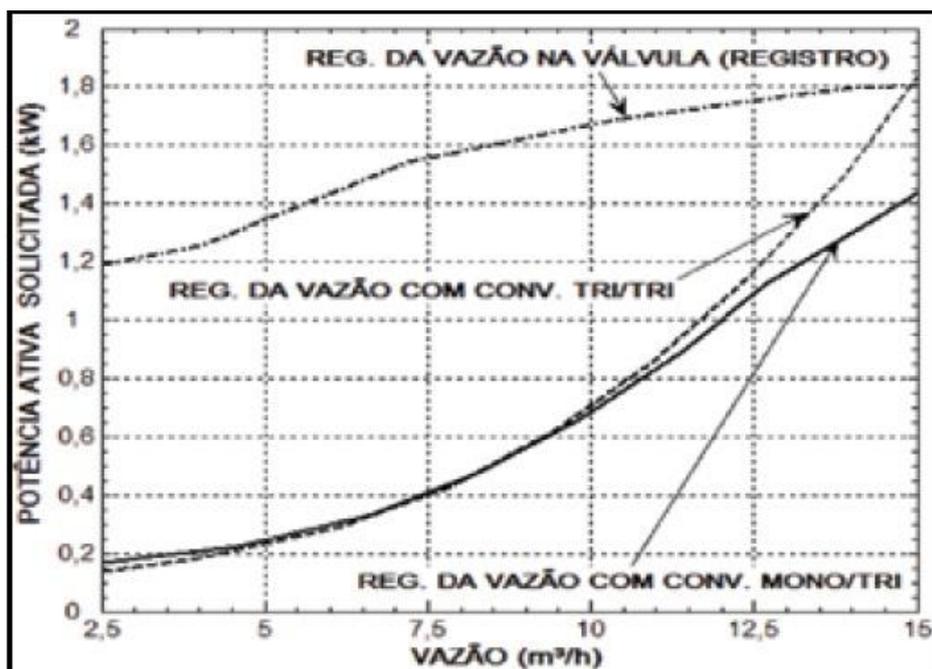


Figura 20- Gráfico gerado a partir dos experimentos.
Fonte: Revista O Setor Elétrico

A partir dos resultados apresentados acima, é possível concluir ainda que a utilização do inversor do tipo mono/tri se mostrou mais eficiente do que o tipo tri/tri para grandes vazões.

3.3 CÁLCULO DAS ECONOMIAS

Para cálculo das economias utilizou-se o perfil de uso de 18 horas diárias, com operação apenas em dias úteis, ou seja, 22 dias no mês durante o ano, logo a utilização do sistema ao longo de um ano será de 4.752 horas, de acordo com este perfil de utilização obtemos as tabelas abaixo para cada tipo de regulação da vazão nas diversas vazões em que o teste foi realizado,

- Regulagem utilizando válvula eletromecânica

Tabela 2 - Consumo utilizando regulagem por válvula eletromecânica.

Vazão (m ³ /h)	Potência ativa solicitada na regulagem da válvula (Registro (kW))	Horas de Utilização do Sistema Anual	Consumo Anual (MWh/ano)
2,5	1,190	4752	5,6549
5	1,345	4752	6,3914
7,5	1,553	4752	7,3799
10	1,670	4752	7,9358
12,5	1,750	4752	8,3160
15	1,800	4752	8,5536

Fonte: Autoria própria.

- Regulagem utilizando conversor de frequência com entrada monofásica e saída trifásica

Tabela 3 - Consumo utilizando conversor de frequência mono/tri.

Vazão (m ³ /h)	Potência ativa solicitada na regulagem na rotação da bomba com conversor mono/tri (kW)	Horas de Utilização do Sistema Anual	Consumo Anual (MWh/ano)
2,5	0,170	4752	0,8078
5	0,250	4752	1,1880
7,5	0,410	4752	1,9483
10	0,680	4752	3,2314
12,5	1,085	4752	5,1559
15	1,440	4752	6,8429

Fonte: Autoria própria.

- Regulagem utilizando conversor de frequência com entrada monofásica e saída trifásica

Tabela 4 - Consumo utilizando conversor de frequência tri/tri.

Vazão (m ³ /h)	Potência ativa solicitada na regulagem na rotação da bomba com conversor tri/tri (kW)	Horas de Utilização do Sistema Anual	Consumo Anual (MWh/ano)
2,5	0,140	4752	0,6653
5	0,235	4752	1,1167
7,5	0,400	4752	1,9008
10	0,710	4752	3,3739
12,5	1,170	4752	5,5598
15	1,835	4752	8,7199

Fonte: Autoria própria.

A partir do cálculo foi possível elaborar o gráfico 1 que demonstra o consumo de energia das opções de controle da vazão

Comparativo consumo energético

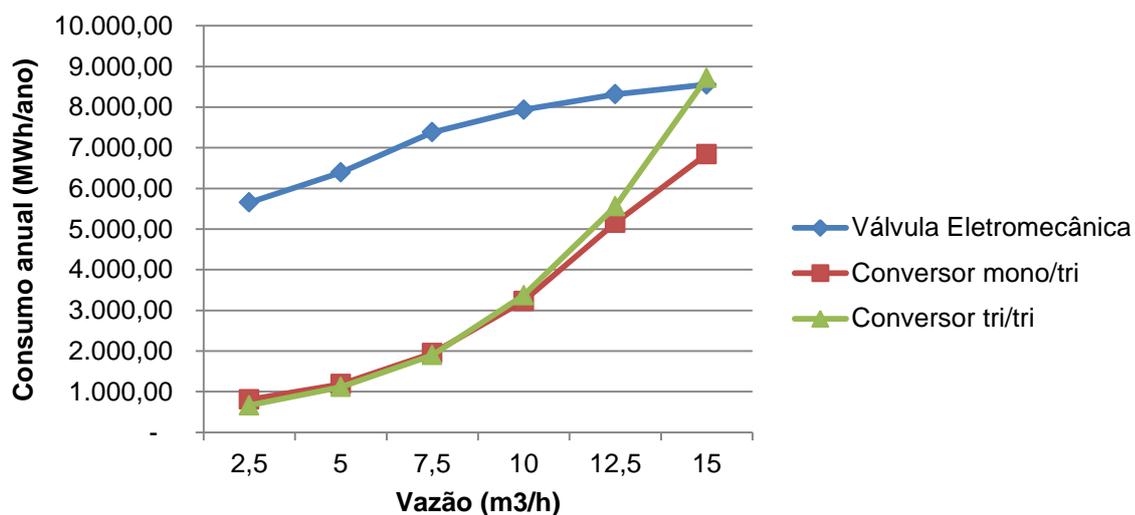


Gráfico 1 - Comparativo consumo energético.
Fonte: Autoria própria

A partir do gráfico acima para este caso, é possível observar que o conversor de frequência com entrada monofásica e saída trifásico é o que apresenta a maior economia de energia a partir de 10 m³/h.

Vale ressaltar que a economia gerada pela utilização do conversor de frequência esta diretamente ligada ao carregamento do motor, ou seja, quanto mais próximo ao carregamento máximo do motor, melhor será seu rendimento consequentemente melhor será os resultados dos equipamentos que otimizem o uso do motor.

Para determinação da viabilidade da execução do projeto dentro das diretrizes propostas pela ANEEL, definiu-se por utilizar o consumo quando a vazão é de 10 m³/h, ponto este em que o inversor mono/tri se torna mais atrativo que a opção tri/tri.

Agora de posse dos dados será possível calcular de acordo com os requisitos propostos pela ANEEL se é possível implementar projetos de eficiência energética utilizando-se de recursos provenientes do programa.

Neste momento é necessário expor que na prática devemos ter um histórico de uso do sistema a ser avaliado com demanda, consumo, vazão e pressão. Basicamente podemos obter histórico correlacionando demanda e consumo com uma função dependente de vazão e pressão.

Em alguns casos, conforme condições de operação, podemos ter um valor de pressão fixa e obter demanda e consumo em função da vazão, conforme equação 30 e 31.

$$P = P(P, Q) \quad (30)$$

$$C = C(P, Q) \quad (31)$$

Assim quando na obtenção de dados em campo devemos nos atentar as particularidades de cada caso para melhor formatar dados de demanda e consumo em função de pressão e vazão. Uma vez definida adequadamente as correlações de tais premissas são incorporadas na medição e verificação do projeto a ser desenvolvido.

4 CÁLCULO DE VIABILIDADE SEGUNDO CRITÉRIOS ANEEL

Após obter os valores da economia gerada pela utilização de conversores de frequência em substituição ao tradicional método de controle de vazão pelo registro de válvulas, será possível calcular a viabilidade e a execução do projeto utilizando-se recursos provenientes do programa de eficiência energética regulado pela ANEEL.

Antes do início dos cálculos, será preciso especificar o modelo do inversor que será utilizado. Com a especificação fechada, poderemos então ter acesso a alguns dados que serão necessários para o cálculo de viabilidade como: vida útil do equipamento e preço do equipamento. Outro importante ponto a ser considerado, são os custos de mão de obra para instalação, como também os valores que serão gastos com medição e verificação das economias, a fim de comprovar o sucesso da ação de eficiência, de posse desses dados, será possível determinar os custos anualizados totais, um dos fatores que determinam a relação custo benefício, como já discutido anteriormente é o principal indicador de viabilidade de projetos de eficiência energética.

4.1 CÁLCULOS CUSTOS ANUALIZADOS

Para cálculo dos custos anualizados é necessário à determinação de dois fatores, a vida útil do equipamento e o custo.

Como não existem dados do fabricante em relação a vida útil do equipamento como um todo, apenas de alguns componentes como os capacitores do link DC, estimou-se a vida útil do inversor de frequência em 10 anos.

Já para determinação do custo do equipamento, o fabricante foi consultado e para uma unidade o preço foi de R\$ 850,00, para encomendas com quantidades maiores o preço pode sofrer redução o que beneficia a viabilização do projeto. A mão de obra para instalação do equipamento foi estimada em R\$ 850,00.

Os custos com medição e verificação das economias que é realizado em duas etapas antes da execução do projeto para se obter o consumo antes e após a conclusão para se obter o consumo depois para que se possa chegar a economia gerada pela economia, este procedimento foi orçado em R\$ 1000,00.

Em projetos executados dentro do programa de eficiência energética controlados pela ANEEL, é permitida a concessionária a inclusão de custos com pessoal próprio que executam tarefas de fiscalização do projeto, neste estudo de caso este valor foi estimado em R\$1.000,00. Vale ressaltar que o presente trabalho objetivou calcular as economias para implantação de apenas um conversor de frequência, sendo assim os custos com mão de obra de instalação, medição e verificação na instalação de vários equipamentos terá uma participação bem inferior. Abaixo segue quadro resumo com os gastos para implementação do projeto.

Tabela 5- Resumo dos custos para execução do projeto.

Origem do gasto	Valor R\$
Equipamento	850,00
Mão de obra de terceiros	850,00
Medição e Verificação	1.000,00
Mão de obra da concessionária	1.000,00
Total custo	3.700,00

Fonte: Autoria própria

4.1.1 Cálculo do fator de recuperação

Segundo Módulo VII do PROPEE, a equação para cálculo do fator de recuperação já discutido anteriormente (equação 29) é apresentado novamente abaixo,

$$FRC_u = \frac{i(1+i)^u}{(1+i)^u - 1}$$

O órgão regulador define que a taxa de desconto que deve ser adotada é de 8%, abaixo segue o cálculo para definição do fator para o projeto em questão,

$$FRC_u = \frac{0,08(1+0,08)^{10}}{(1+0,08)^{10} - 1}$$

Logo:

$$FRC = \frac{0,1727}{1,1589} = 0,1490$$

4.1.2 Cálculo dos Custos Anualizados

Conforme feito anteriormente para o cálculo do fator de recuperação, é preciso determinar os custos anualizados para determinação da RCB,

$$CA_n = CE_n \times \frac{CT}{CE_T} \times FRC_u$$

$$CA_n = 850,00 \times \frac{3.700,00}{850,00} \times 0,1490$$

$$CA_n = 850,00 \times 4,352 \times 0,1490$$

$$CA_n = 551,30$$

Portanto, após os cálculos acima foi possível determinar a parcela referente aos custos anualizados, para conseqüentemente determinar a relação custo benefício.

4.2 BENEFÍCIOS ANUALIZADOS

O último passo para determinação da relação custo benefício é a determinação dos benefícios alcançados com o emprego do inversor de frequência na regulação da vazão em sistemas bombeados.

Cada segmento de tensão no fornecimento de energia tem valores distintos para os parâmetros CEE e CED, o que significa dizer, que a energia economizada e a retirada de demanda na ponta geram benefícios diferentes para cada segmento.

Para esta análise adotou-se o fornecimento de energia no segmento A4 (2,3 a 25 kV). Abaixo tabela com os valores de CEE e CED para cada segmento de tensão, disponibilizada pela concessionária de energia do Paraná – COPEL, durante as chamadas públicas realizadas para o acolhimento de projetos de eficiência energética.

Tabela 6 - Valores para cálculo dos benefícios de acordo com a classificação tarifária.

Classificação Tarifária	CEE	CED
A1 – acima de 230kV	144,98	26,04
A2 – de 88 à 138 kV	144,98	112,78
A3 – 69 kV	144,98	115,24
A3a – de 30 à 44 kV	144,98	251,96
A4 – de 2,3 à 25 kV	144,98	251,96
AS – Subterrâneo	144,98	387,77
Baixa Tensão – B1	144,98	375,11
Baixa Tensão – B2	91,34	246,76
Baixa Tensão – B3	144,98	441,43

Fonte: COPEL

O cálculo do benefício, como já discutido anteriormente (equação 25) é dado pela equação abaixo:

$$BA_T = (EE \times CEE) + (RDP \times CED)$$

Adotaremos o modelo mono/tri, pois o que gerou a maior economia, de acordo com os cálculos de economia realizados no capítulo anterior, o emprego do inversor de frequência do tipo mono/tri gerou os seguintes resultados.

Adotaremos como economia gerada pelo uso do inversor a diferença entre o consumo obtido no sistema que utiliza a válvula eletromecânica para regulação no ponto em que a vazão é de 10 m³/h e o valor do consumo neste mesmo ponto com o sistema que utiliza o inversor de frequência do tipo mono/tri, o valor obtido da economia está detalhado na tabela 7.

Tabela 7 - Economia gerada pelo uso do inversor de frequência.

Tipo Entrada Inversor	Energia Economizada (MWh/ano)	Redução de Demanda (kW)
Mono/Tri	4,704	0,99

Fonte. A autoria própria.

Logo o benefício alcançado será:

$$BA_T = (4,704 \times 144,98) + (0,99 \times 251,96)$$

$$BA_T = 681,98 + 249,44$$

$$BA_T = 931,42$$

Assim sendo, é possível calcular a relação custo benefício de acordo com a equação abaixo:

$$RCB = \frac{CA_T}{BA_T}$$

$$RCB = \frac{551,30}{931,42}$$

$$RCB = 0,5918$$

De acordo com o resultado acima, verifica-se que é possível implementar o projeto dentro das regras impostas pela ANEEL, uma vez que para projetos realizados em entidades com fins lucrativas, onde modelo contratual exigido é o contrato de desempenho, permite-se uma relação custo benefício igual ou inferior a 0,9. Já em entidades sem fins lucrativos o índice máximo permitido é de 0,8, ou seja, qualquer que seja a instituição onde será desenvolvido o projeto, ele poderá ser custeado com verbas do projeto de eficiência energética.

É importante contextualizar o presente trabalho, no sentido de que os resultados apresentados foram obtidos a partir de um ambiente laboratorial com todas as variáveis sobre controle, é de fundamental importância consolidar as técnicas para obtenção das economias. Outro ponto que vale destaque é de que existem limitadores para as diversas rubricas em um projeto de eficiência, como mão de obra de terceiros, medição e verificação, entre outros em comparação ao valor

total do projeto, segundo as regras estabelecidas pela no chamamento público, ou seja, não poderemos ter uma participação superior a 5% do total do projeto destinado a medição e verificação.

É importante ressaltar que existem outros valores de RCB para os demais níveis de vazão utilizados no experimento, abaixo segue a variação do RCB baseado nas demais vazões, sempre considerando a diferença do valor do consumo no sistema que utiliza a válvula eletromecânica e o sistema que utiliza o inversor mono/tri para regulação da vazão.

Os valores da redução de demanda na ponta e energia economizada estão demonstrados na tabela 8.

Tabela 8 - Valores de redução de demanda na ponta e energia economizada para demais vazões.

Vazão (m ³ /h)	Redução de demanda na ponta (kW)	Energia Economizada (MWh/ano)
2,5	1,02	4,8470
5	1,10	5,2034
7,5	1,14	5,4315
12,5	0,67	4,7045
15	0,36	3,1601

Fonte: Autoria Própria

O gráfico abaixo ilustra a redução de demanda em função da variação da vazão, é possível notar que para vazões superiores a 10 m³/h a redução se torna menor e se aproxima da demanda no sistema de regulação clássica.

Redução de demanda

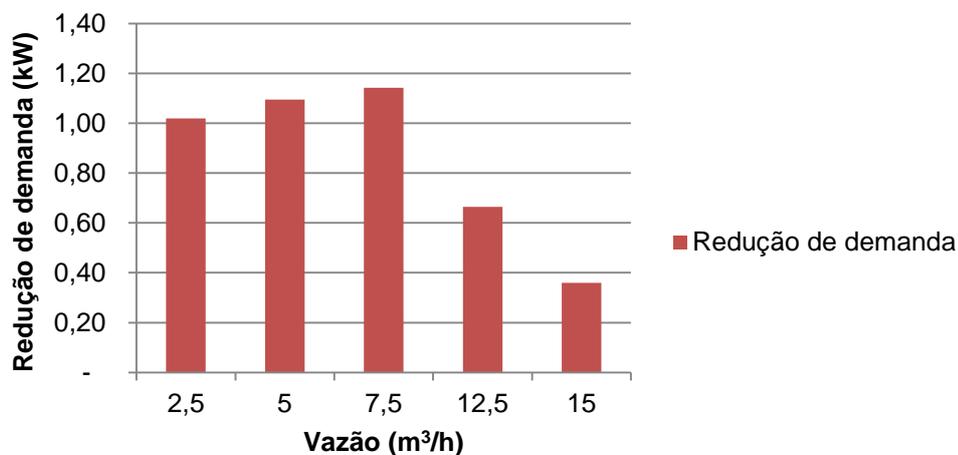


Gráfico 2 - Redução de demanda em função da vazão.
Fonte: Autoria própria

Abaixo também é possível analisar o consumo em função da vazão, o comportamento da redução de consumo é semelhante ao comportamento apresentado para redução de demanda, como pode ser visto abaixo,

Consumo

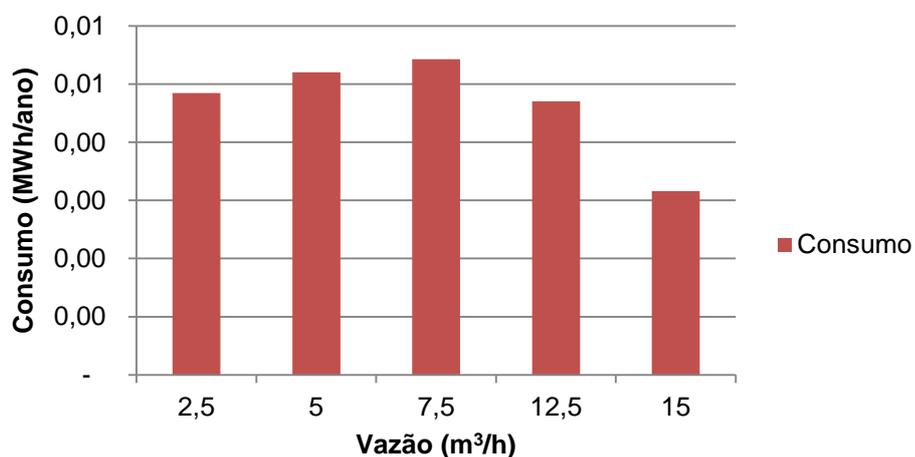


Gráfico 3 - Consumo em função da vazão.
Fonte: Autoria própria.

De acordo com os resultados obtidos é possível calcular a RCB para os demais níveis de vazão, os custos anualizados permanecem os mesmos de quando calculado para a vazão de 10 m³/h.

Tabela 9 - Cálculo da RCB para demais vazões.

Vazão	Redução de Demanda (kW)	Consumo (MWh/ano)	Benefício	Custos	RCB
2,5	1,02	4,8470	959,72	551,3	0,5744
5	1,10	5,2034	1030,29	551,3	0,5351
7,5	1,14	5,4315	1075,45	551,3	0,5126
12,5	0,67	4,7045	849,61	551,3	0,6489
15	0,36	3,1601	548,85	551,3	1,0045

Fonte: Autoria própria.

Com base na tabela 9 foi possível elaborar o gráfico abaixo que retrata o comportamento do RCB para diversas vazões,

Relação Custo Benefício

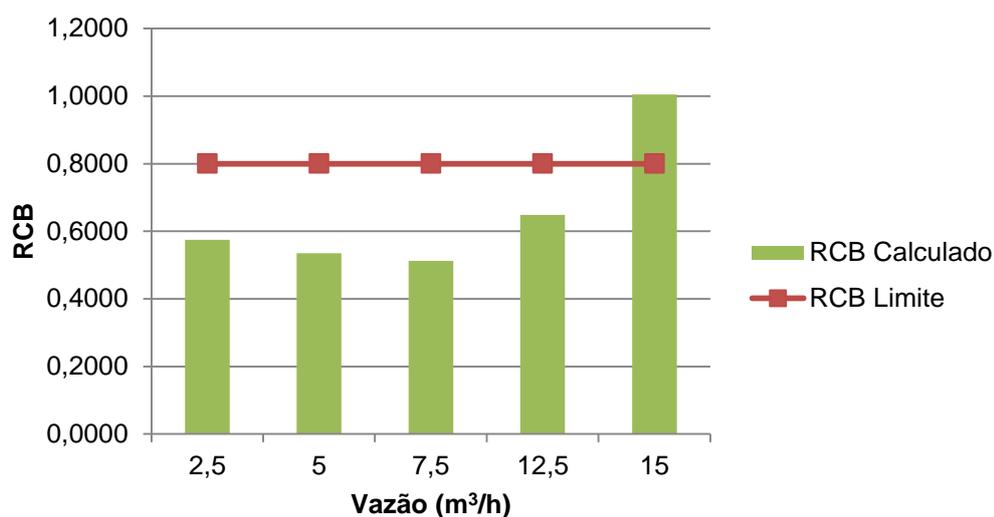


Gráfico 4 - Gráfico da RCB em função da vazão.

Fonte: Autoria própria.

Com base na tabela 9 e no gráfico 4 é possível concluir que a aplicação do inversor de frequência é viável para este experimento além da vazão de 10 m³/h abordada anteriormente. É possível notar que o desempenho em alguns casos é até superior ao da vazão anteriormente mencionada.

O único valor em que segundo as regras propostas pela ANEEL o projeto se tornaria inviável é o patamar em que o sistema tem uma vazão de 15 m³/h, entretanto pode-se observar que mesmo neste nível de vazão temos redução tanto do consumo energético como redução da demanda.

4.3 ANÁLISE ECONÔMICA CLÁSSICA

Após comprovar a viabilidade técnica da aplicação de inversores de frequência em sistemas de bombeamento, bem como a possibilidade da execução do projeto com recursos oriundos do PEE da ANEEL, é fundamental analisar as condições financeiras em que se dão a disponibilização deste dinheiro.

Segundo a resolução vigente do órgão regulador, projetos desta natureza desenvolvidos em entidades com fins lucrativos, neste caso onde a maiores possibilidades de implementação destas práticas, é exigida a celebração de um contrato de desempenho sem a cobrança de juros apenas com a recomposição monetária do valor financiado.

Atualmente na COPEL, este tipo de financiamento a parcela a ser paga do financiamento é calculada com base no Sistema de Amortização Constante – SAC, e a taxa que baliza correção monetária é a utilizada no Sistema Especial de Liquidação e Custódia – SELIC, atualmente em 9% a.a.

De acordo com os cálculos de economia realizados baseados na tarifa indicada na tabela 6 do grupo A4 horossazonal verde, poderemos calcular a economia financeira obtida com a realização do projeto.

Tabela 10 - Valores da tarifa grupo tarifário A4 - horossazonal verde.

Demanda (R\$/kW)	Valor (R\$)
Demanda	8,25
Ultrapassagem Demanda	16,51
Consumo (R\$/kWh)	Valor (R\$)
Ponta	1,0049
Fora de Ponta	0,22597

Fonte: COPEL.

O cálculo das economias será baseado nas considerações feitas abaixo:

1. Considera-se a utilização dos equipamentos constante durante as 18 horas do dia, ou seja, sem acréscimo ou decréscimo produtivo;

2. A utilização dos equipamentos não tem influencias sazonais, ou seja, o consumo se mantem constante durante o ano.
3. Cálculo do benefício somente no consumo de energia elétrica conforme diretriz da ANEEL para contrato de desempenho.

A tabela 11 a seguir representa a economia financeira mensal alcançada após a execução do projeto,

Tabela 11 - Cálculo da economia após execução do projeto de eficiência energética.

Período do consumo	Consumo (kWh/mês)	Valor kWh (R\$)	Total Fatura Mês (R\$)
Consumo Ponta	65,27	1,00493	65,59
Consumo Fora da Ponta	326,26	0,22597	73,72
TOTAL			139,31

Fonte: Autoria Própria.

4.3.1 Cálculo contrato de desempenho

Como já mencionado anteriormente a COPEL, o tipo de instrumento contratual firmado entre a concessionária e o consumidor é o contrato de desempenho, segundo determina a ANEEL. A mesma exige este tipo de prática com o propósito de aumentar o montante destinado a projetos de eficiência energética.

A parcela do investimento reembolsável a concessionária é composto pelos gastos com: equipamentos, medição e verificação, mão de obra para execução do projeto e descarte de materiais.

O valor da parcela do contrato de desempenho não poderá ser superior ao valor de economia obtido com o projeto de eficiência energética, diante disso, o cálculo para se determinar o tempo de financiamento, será pautado pelo limitador da economia alcançada, os cálculos abaixo no quadro 10 se basearam nos resultados descritos na tabela 6.

Parcela	Data prevista Vencimento	Valor Monetários		Valore corrigidos				Valor Total pago (R\$)
		Saldo devedor (R\$)	Amortização constante	Juros Simples	Valor de Juro (R\$)	Parcela de Pagamento (R\$)	Limite de Pagamento pela economia (R\$)	
0		2.700,00						
1	01/10/2013	2.587,50	112,50	0,75%	20,25	132,75	139,31	132,75
2	01/11/2013	2.475,00	112,50	0,75%	19,41	131,91	139,31	131,91
3	01/12/2013	2.362,50	112,50	0,75%	18,56	131,06	139,31	131,06
4	01/01/2014	2.250,00	112,50	0,75%	17,72	130,22	139,31	130,22
5	01/02/2014	2.137,50	112,50	0,75%	16,88	129,38	139,31	129,38
6	01/03/2014	2.025,00	112,50	0,75%	16,03	128,53	139,31	128,53
7	01/04/2014	1.912,50	112,50	0,75%	15,19	127,69	139,31	127,69
8	01/05/2014	1.800,00	112,50	0,75%	14,34	126,84	139,31	126,84
9	01/06/2014	1.687,50	112,50	0,75%	13,50	126	139,31	126,00
10	01/07/2014	1.575,00	112,50	0,75%	12,66	125,16	139,31	125,16
11	01/08/2014	1.462,50	112,50	0,75%	11,81	124,31	139,31	124,31
12	01/09/2014	1.350,00	112,50	0,75%	10,97	123,47	139,31	123,47
13	01/10/2014	1.237,50	112,50	0,75%	10,13	122,63	139,31	122,63
14	01/11/2014	1.125,00	112,50	0,75%	9,28	121,78	139,31	121,78
15	01/12/2014	1.012,50	112,50	0,75%	8,44	120,94	139,31	120,94
16	01/01/2015	900	112,50	0,75%	7,59	120,09	139,31	120,09
17	01/02/2015	787,5	112,50	0,75%	6,75	119,25	139,31	119,25
18	01/03/2015	675	112,50	0,75%	5,91	118,41	139,31	118,41
19	01/04/2015	562,5	112,50	0,75%	5,06	117,56	139,31	117,56
20	01/05/2015	450	112,50	0,75%	4,22	116,72	139,31	116,72
21	01/06/2015	337,5	112,50	0,75%	3,38	115,88	139,31	115,88
22	01/07/2015	225	112,50	0,75%	2,53	115,03	139,31	115,03
23	01/08/2015	112,5	112,50	0,75%	1,69	114,19	139,31	114,19
24	01/09/2015	0	112,50	0,75%	0,84	113,34	139,31	113,34
		TOTAL	2.700,00	TOTAL	253,13	2.953,13	TOTAL	2.970,46

Quadro 10 - Fluxo de pagamentos do contrato de desempenho.

Fonte: Autoria própria.

De acordo com o apresentado no quadro 10, o pagamento do contrato se deu num prazo de 24 meses, o valor total pago com correção monetária baseada na taxa SELIC de 9% a.a, foi de R\$ 2.970.46.

4.3.2 Valor presente líquido

O valor presente líquido (VPL) é utilizado para calcular a atratividade de investimentos. O VPL nada mais é do que a diferença entre o valor investido e o valor resgatado ao fim do investimento, trazidos ao valor presente.

Sua interpretação é bem simplificada, caso o cálculo do VPL for positivo, concluímos que o valor investido será recuperado, caso o VPL for negativo significa dizer que o investimento realizado não trouxe ganhos financeiros, vale aqui lembrar que esta análise se limita apenas a analisar o retorno financeiro, não considerando ganhos de produtividades ou ganhos no processo.

Desta forma aplicamos o conceito do VPL com auxílio de uma planilha eletrônica e analisar sua viabilidade econômica, abaixo podemos observar o fluxo do investimento realizado, dentro da expectativa de vida útil do conversor de frequência. Nos dois primeiros, prazo em que o investimento será pago, considerou-se no primeiro o valor do projeto mais o retorno de pagamentos do primeiro ano do contrato, no segundo ano considerou-se apenas as parcelas pagas do financiamento, do terceiro ano ao décimo ano, computou-se o ganho financeiro anual com a implementação do projeto, como pode ser visto no quadro abaixo.

Ano	Investimento
0	R\$ (4.254,65)
1	R\$ (1.415,81)
2	R\$ 1.671,72
3	R\$ 1.671,72
4	R\$ 1.671,72
5	R\$ 1.671,72
6	R\$ 1.671,72
7	R\$ 1.671,72
8	R\$ 1.671,72
9	R\$ 1.671,72
10	R\$ 1.671,72

Quadro 11 - Fluxo de caixa.
Fonte: Autoria própria

De posse do fluxo de caixa (quadro 10), foi possível calcular o VPL, com pode ser observado no Quadro 12.

Taxa	9%
VPL Corrigido	R\$ 3.641,28

Quadro 12 - Cálculo VPL.

Fonte: Aatoria própria

Podemos então concluir, com base nos dados apresentados acima que o projeto é viável economicamente, pois, o cálculo do valor presente líquido foi positivo.

4.3.3 Taxa interna de retorno

A taxa interna de retorno – TIR é outra ferramenta para analisar a viabilidade econômica de projetos, diferentemente do VPL a TIR não retorna um valor monetário, mas sim um valor percentual que traduz a viabilidade ou não de um projeto. Novamente com auxílio de uma planilha eletrônica, efetuamos o cálculo da TIR baseados nas informações contidas no quadro 11 de fluxo de caixa, abaixo podemos analisar o resulta do cálculo no quadro 12,

Taxa Interna de Retorno	21%
-------------------------	-----

Quadro 13 - Cálculo taxa interna de retorno.

Fonte: Aatoria própria.

É possível então concluir por mais um indicador econômico, que a execução do projeto é viável, pois a TIR é de 21%, bem superior às taxas verificadas em qualquer investimento de renda fixa.

5 PRATICAS PARA MEDIÇÃO E VERIFICAÇÃO APLICADA AO USO DE CONVERSORES DE FREQUÊNCIA EM SISTEMAS DE BOMBEAMENTOS

A ANEEL através do PROPEE – Procedimentos do Programa de Eficiência Energética, módulo 8 – Procedimentos para medição e verificação, estabelece diretrizes a serem seguidas para as atividades de medição e verificação que estão fundamentadas no PMIVP - Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance.

Para o trabalho apresentamos os resultados das premissas básicas da medição e verificação a ser utilizados em projetos de eficiência com aplicação de conversores de frequência.

5.1 SELEÇÃO DE OPÇÃO DA MEDIÇÃO E VERIFICAÇÃO

A opção da medição e verificação é a alternativa escolhida no PMIVP que define a forma da medição da energia e da variável independente, e aplicando ao projeto com conversor de frequência em sistemas de bombeamento deduzimos que é a Opção B onde se mede todos os parâmetros envolvidos, tanto energia como variáveis independentes.

Os parâmetros mínimos de energia são demanda e consumo, e da variável independente, ou melhor, das variáveis independentes são vazão e pressão.

A fronteira de medição deve ser definida de modo que isole todo o sistema onde esta recebendo a ação de eficiência afim de que possamos ter o pleno controle da medição dos parâmetros envolvidos.

5.2 AMOSTRAGEM, PERÍODO E INTERVALO DE MEDIÇÃO

A amostragem deve ser calculada segundo o PMIVP, e sempre que possível com 95% de confiabilidade, sendo a mesma para o período de referência (antes - *baseline*) e para o período de pós-retrofit (após).

O período da medição deve ser o suficiente para caracterizar o ciclo de funcionamento do sistema que recebe a ação de eficiência energética, que para este caso recomendamos seguir um período mínimo de sete dias.

O intervalo de medição deve obedecer ao aplicado pela concessionária local, que no Brasil é de quinze minutos, e quando necessário reduzir o intervalo a fim de melhor registrar a curva de carga.

5.3 EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO, PRECISÃO E INCERTEZA

Com relação à incerteza os erros ocorrem em três formas: modelagem, amostragem e medição.

A incerteza no modelo advém dos erros na modelagem matemática, ou seja, regressão de valores em função das variáveis independentes, neste caso pressão e vazão, e devem buscar a melhor correlação possível. Isto irá variar em função da especificidade de cada ação de eficiência energética adotada e depende diretamente da complexidade do sistema em análise devendo ser avaliado caso a caso.

A incerteza da amostragem pode ser minimizada nestes casos medindo, quando possível, todos os sistemas.

O medidor de energia recomendado é do tipo polifásico com memória de dados e precisão de 1,5% para potência, sendo indicado um valor de 3% para medidores de vazão e pressão (Documento ABRADDEE, 02/2011).

A boa prática da medição e verificação recomenda uma precisão final de 10% e deve ser perseguida neste caso, principalmente, na melhor modelagem matemática possível – por exemplo, R^2 superior a 0,75 (PMIVP, 01/2012).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

É de fundamental importância a constante busca por inovações tecnológicas que resultem em equipamentos ou práticas que melhorem desempenho dos processos, conseqüentemente economia no consumo de energia.

Este trabalho, após a consolidação dos fundamentos teóricos necessários, comprovou o objetivo geral que é possível eficientizar sistemas de bombeamentos utilizando conversores de frequência, com recursos oriundos do programa de eficiência energética regulado pela ANEEL.

A dificuldade perene nesta tipologia de projeto é a obtenção de dados em campo com as variáveis independentes (vazão e pressão) que terá sua particularidade em cada caso a ser estudado. A melhor prática até então é obter dado de energia elétrica em função da vazão considerando um ponto médio de pressão em que o sistema opera.

Além disso, foi possível observar os benefícios gerados com a utilização de conversores de velocidade, principalmente no tocante a economia do consumo de energia, que como demonstrou o estudo chegou a aproximadamente 60% de redução.

Não podemos deixar de destacar também os efeitos colaterais que a execução de um projeto de eficiência energética produz, como a conscientização dos usuários a adotarem práticas saudáveis na utilização da energia elétrica, bem como em muitas oportunidades a otimização do processo produtivo que por si só pode gerar muitos benefícios.

Outro importante aprendizado do presente estudo, foi à demonstração, segundo métodos clássicos de viabilidade econômica de projetos, que o financiamento do projeto de eficiência energética com recursos da concessionária, é atrativo, com uma taxa de retorno que supera a grande maioria dos investimentos, como títulos do governo federal, renda fixa (CDB e RDB), entre outros.

As concessionárias de energia elétrica devem sempre buscar a implementar novas tipologias de projeto dentro do programa de eficiência energética, principalmente os projetos que são desenvolvidos no segmento industrial, uma vez que este é o que responde pela maior demanda de energia. No caso da aplicação de conversores de frequência a economia obtida é maior que as práticas usuais de simples troca de motores convencionais por motores eficientes.

Foi evidenciada também, a importância de boas práticas para aferição dos resultados do projeto, um plano de medição e verificação mal elaborado pode não refletir a realidade das ações de eficiência implantadas, podendo gerar resultados acima ou abaixo do real.

Enfim, além da importância antes da execução de um projeto de eficiência energética em analisar a rentabilidade ou viabilidade econômica, deve-se também dar grande peso a benefícios secundários que o projeto trará, como postergação de investimentos na expansão do sistema, como construção de novas usinas hidrelétricas ou outras fontes de energia, como também na preservação do meio ambiente por vezes tão afetado pela necessidade em expandir a oferta de energia elétrica.

REFERÊNCIAS

ABB LTD. **Induction Motors Handbook**. Finland, 2002.

ABB LTD. **Reducing AFD-caused Harmonics at Partial Load Conditions**. New Berlin, 2005.

ABB LTDA. **Manual de Instalação e Colocação em Serviço: Soft Starter PST**. Suécia, 2006. 204 p.

ABB LTDA. **Manual do Usuário: Medidor Multigrandezas MGE**. Osasco, SP, 2008. 18 p.

ABB LTDA. **Manual do Utilizador: Conversor de Frequência ACS550**. Portugal, 2009. 326 p.

ALMEIDA, A.T.L. **Máquinas Elétricas para Automação**. Itajubá: UNIFEI, 2004.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (a). **Manual do Programa de Eficiência Energética 2008**. Brasília - DF: ANEEL, 2008.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (b). **Procedimentos do Programa de Eficiência Energética - PROPEE**. Brasília - DF: ANEEL, 2013.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 63**, de 12 de maio de 2004 - Aprova procedimentos para regular a imposição de penalidades aos concessionários, permissionários, autorizados e demais agentes de instalações e serviços de energia elétrica, bem como às entidades responsáveis pela operação do sistema, pela comercialização de energia elétrica e pela gestão de recursos provenientes de encargos sociais. Brasília - DF: ANEEL, 2004.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 176**, de 28 de novembro de 2005 - Estabelece critérios para aplicação de recursos em Programas de Eficiência Energética. Brasília - DF: ANEEL, 2005.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 300**, de 12 de fevereiro de 2008 - Estabelece critérios para aplicação de recursos em Programas de Eficiência Energética, e dá outras providências. Brasília - DF: ANEEL, 2008.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 556**, de 18 de junho de 2013 - Aprovar os Procedimentos para o Programa de Eficiência Energética - PROPEE. Brasília - DF: ANEEL, 2013.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.833:2010 - Manufatura Reversa - Aparelhos de Refrigeração**. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ISSO 50001 - Sistemas de Gestão de Energia - Requisitos com Orientação para Uso**. ABNT NBR ISO 50001:2011. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

BARR, H.; BONNETT, A; YUNG, C. **Understanding the Design of Stators and Rotors of Squirrel Cage Induction Motors**. Petroleum and Chemical Industry Technical Conference, p. 1-11, 2008.

BRASIL. **Lei nº 9.991**, de 24 de julho de 2000 e alterações - Dispõe sobre realização de investimentos em pesquisa e desenvolvimento e em eficiência energética por parte das empresas concessionárias, permissionárias e autorizadas do setor de energia elétrica, e dá outras providências. Brasília - DF: Presidência da República, 2000.

BRASIL. **Lei nº 11.465**, de 28 de março de 2007 e alterações - Altera os incisos I e III do caput do art. 1º da Lei nº 9.991, de 24 de julho de 2000, prorrogando, até 31 de dezembro de 2010, a obrigação de as concessionárias e permissionárias de serviços públicos de energia elétrica aplicarem, no mínimo, 0,50% (cinquenta centésimos por cento) de sua receita operacional líquida em programas de eficiência energética no uso final. Brasília - DF: Presidência da República, 2007.

BRASIL. **Lei nº 12.212**, de 20 de janeiro de 2010 - Dispõe sobre a Tarifa Social de Energia Elétrica; altera as Leis nºs 9.991, de 24 de julho de 2000, 10.925, de 23 de julho de 2004, e 10.438, de 26 de abril de 2002; e dá outras providências. Brasília - DF: Presidência da República, 2010.

BRASIL. **Lei nº 12.305**, de 02 de agosto de 2010 - Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília - DF: Presidência da República, 2010.

DEL TORO, V. **Fundamentos de máquinas elétricas**. Rio de Janeiro: LTC, 1999.

EVO - EFFICIENCY VALUATION ORGANIZATION. **Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance** - Conceitos e Opções para a Determinação de Economias de Energia e de Água - Volume 1 - EVO 10000 - 1:2012 (Br). Sofia: EVO, 2012.

EL HAGE, Fábio S.; FERRAZ, Lucas P. C.; DELGADO, Marco A. P. **A Estrutura Tarifária de Energia Elétrica** - Teoria e Aplicação. Brasília - DF: ABRADDEE, 2011.

GHOZZI, S.; JELASSI, K.; ROBOAM, X. **Energy optimization of induction motor drives**. IEEE conference on Industrial Technology, p. 602-610, 2004.

MME - MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. **PNEf - Plano Nacional de Eficiência Energética** - Premissas e Diretrizes Básicas na Elaboração do Plano. Brasília - DF: MME, 2010.

MME/EPE - MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA/EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Decenal de Expansão de Energia - PDE 2020**. Brasília - DF: MME/EPE, 2011.

MME/EPE - MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA/EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Nacional de Energia 2030 - PNE 2030**. Brasília - DF: MME/EPE, 2007.

FRANCHI, Claiton Moro. **Acionamentos Elétricos**. São Paulo: Érica, 2008.

FRANCHI, Claiton Moro. **Inversores de Frequência Teoria e Aplicações**. São Paulo: Érica, 2008.

RANKIN, Kennedy. *Electrical Instalations*, vol. II, 1909. Disponível em: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rotor_for_squirrel_cage_induction_motor_%28Rankin_Kennedy,_Electrical_Installations,_Vol_II,_1909%29.jpg. Acesso em 06 ago. 2013.

LIMA, Antonio Sergio Alves. **Eficiência energética no uso de conversores em motores**. REVISTA O SETOR ELÉTRICO. São Paulo: Ed. Março, n. 85, 2013.

VASCONCELLOS, Arnulfo Barroso, et. al. **Oportunidades de eficiência energética em motores e em acionadores de velocidade ajustável (AVAs)**. REVISTA O SETOR ELÉTRICO. São Paulo: Ed. Abril, n. 86, 2013.

SOLAK, Erik. **Aplicação de acionamentos de velocidade variável em sistemas de refrigeração para aumenta da eficiência energética**. Curitiba: LACTEC, 2012. Tese (Mestrado em Desenvolvimento de Tecnologia), Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, Instituto de Engenharia do Paraná.

SUNDARAM, A. **Design and operation considerations for energy conservation in process industries**. Student conference on research an development, p. 267-272, 2003.

VOGES MOTORES. **Motores Trifásicos**. Caxias do Sul, set. 2010. Disponível em: <http://www.voges.com.br>. Acesso em 06 ago. 2012.

WEG. **Manual de Eficiência Energética**. Jaraguá do Sul, 2012.