

Universidade Federal de Santa Catarina
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Produção (PPGEP)

João Claudio Menezes Scotti

**ESTUDO DO *DRIVE* MODULADOR DE ENERGIA COMO
FERRAMENTA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM MOTOR
ELÉTRICO DE INDUÇÃO**

Dissertação de Mestrado

Florianópolis

2003

João Claudio Menezes Scotti

**ESTUDO DO *DRIVE* MODULADOR DE ENERGIA COMO
FERRAMENTA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM MOTOR
ELÉTRICO DE INDUÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina,
como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em
Engenharia de Produção.

Área de Concentração: Gestão de Negócios

Orientador: Prof. Luiz Veriano Oliveira Dalla Valentina, Dr..

Florianópolis

2003

João Claudio Menezes Scotti

**ESTUDO DO *DRIVE* MODULADOR DE ENERGIA COMO
FERRAMENTA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM MOTOR
ELÉTRICO DE INDUÇÃO**

Esta Dissertação foi julgada e aprovada para a obtenção do grau de **Mestre em Engenharia de Produção**, no **Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção** da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 26 de agosto de 2003

Edson Pacheco Paladini, Dr.
Coordenador do Programa

BANCA EXAMINADORA:

Prof., Luiz Veriano O.Dalla Valentina, Dr.,
Orientador, UDESC.

Prof., Osmar Possamai, Dr., UFSC.

Prof., Hari Bruno Mohr, Dr., UFSC.

*Aos meus pais Ary e Amália Scotti,
a meus queridos filhos: Matheus e Raiza.
A todos minhas escusas,
porquanto deixei de lhes prestar a devida atenção,
não obstante, tenho a convicção que de me acompanham,
orientam-me na busca do bem,
e motivam-me a avançar.
A todos a minha gratidão.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela certeza de nos ter acompanhado e estendido a sua mão, tanto nos momentos de dificuldade como nos de alegria, para a conclusão desta pesquisa.

Ao orientador, Prof. Luiz Veriano Oliveira Dalla Valentina, Dr., pela inquestionável contribuição e qualidade na orientação e ajuda para o êxito deste trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da UFSC, pela dedicação e incentivo.

Ao Instituto Isabela Hendrix, aos professores, aos funcionários, ao coordenador do Programa de Pós-Graduação, professores e funcionários.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, pelo apoio.

Ao Senai/MG, Centro Tecnológico de Eletroeletrônica “César Rodrigues”, pelo irrestrito apoio e disponibilização de equipamentos e funcionários, tão necessários para a consecução da pesquisa.

À Cimentos Davi, que tão bem nos acolheu, disponibilizando seu parque produtivo e apoio técnico, para a realização dos testes.

À Embaterra, Siemens, QI Indústria e Comércio Ltda, por disponibilizar informações técnicas e equipamentos Moduladores de Energia.

Aos fabricantes de motores, Eberle, Kohlback e WEG, por disponibilizar informações técnicas.

À Minipa Indústria e comércio Ltda, por disponibilizar informações técnicas e equipamento.

A todos, que contribuíram para este trabalho.

RESUMO

SCOTTI, João Claudio Menezes. **Estudo do *drive* modulador de energia como ferramenta de eficiência energética em motor elétrico de indução**. 2003. 119 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

Este trabalho propõe-se a avaliar o impacto dos *Drives* Moduladores de Energia (controle eletrônico de energia) em termos de eficiência energética, os correspondentes efeitos econômico-financeiros da sua adoção, associados aos motores elétricos de indução em um processo produtivo. A energia foi inicialmente abordada sob a óptica da física clássica, passando-se às dimensões sociais e político-econômicas, quando se constatou que, no sistema produtivo nacional, o motor elétrico de indução é considerado o maior consumidor. Teorias que relacionam a importância e a necessidade de se poupar energia elétrica foram levantadas, bem como as tecnologias, o estado da arte, que visam tornar os sistemas de conversão eletromecânica mais eficientes, dentre essas, a mais recente, o *Drive* Modulador de Energia. Para a análise da eficiência do desse equipamento, desenvolveu-se um modelo que permitiu quantificar a possível energia poupada em kWh, a qual é transposta para valores percentuais, monetários e indicadores de desempenho: Valor Líquido Presente, Taxa Interna de Retorno, *Payback* e Relação Benefício/Custo. Com a realização de um ensaio na empresa Cimentos Davi, os resultados foram confrontados com o modelo e demarcada a sua validade. O *Drive* mostrou eficiência energética com ressalvas, pois esta se dá para o motor operando a baixos carregamentos, em média inferior a 50%, valor normalizado, do montante de horas de trabalho (próximo ou superior a 8.000 horas por ano), do momento do levantamento dos custos, uma vez que tanto o equipamento como a energia variam no tempo e, de algum modo, estão vinculados ao câmbio e outros.

PALAVRAS-CHAVE

Drive Modulador de Energia, motor de indução, controle de energia elétrica.

ABSTRACT

SCOTTI, João Claudio Menezes. **Estudo do *drive* modulador de energia como ferramenta de eficiência energética em motor elétrico de indução**. 2003.119 p. Dissertation (Master's degree in Engineering of Production) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

This work intends to identify necessary operational aspects for the use of *Drive* Modulator of Energy, in the productive situations, to get reduction of the electric power consumption, that takes and guarantee technical and economical advantages. To beginning with Classic physical vision about energy, passing by social and political-economical panorama until the importance of the motor induction, actually considered the largest electric power consumer. Theories have been described and related the importance and the needed to save electric power. Getting up the state of the art and the technologies that seek to turn the conversion systems more efficient eletromecanic like the recent *Drive* Modulator of Energy. Was grow up, for the analysis of the efficiency of Modular *Drive* of Energy, a model that allowed to quantify the possible energy saved in kWh, and after it was exchanged by values percentile, monetary and acting indicators as the Present Liquid Value, to Rate Interns of Return, Payback and Relationship between Benefit/Cost. With the accomplishment of the test in the company Cimentos Davi and it's comparation with model, the efficiency of *Drive* Modulator of Energy was detected. In the end it's economical viability become variable in agreement with the conditions of work of the motor, mainly with relationship to the regime of load of the motor (on average inferior to 50%), working hours near or superior to 8000 hours per year, and other. It's important considering the rising moment, because it is dependent from the exchange rate, as soon as in the equipment costs as in the energy costs.

WORD-KEY

Drive Modulator of Energy, induction motor, electric power control

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	9
1 INTRODUÇÃO.....	11
1.1 Contextualização	11
1.2 Problema, relevância e justificativa	13
1.3 Objetivos do trabalho	14
1.4 Metodologia.....	14
1.5 Delimitação da pesquisa.....	15
1.6 Estrutura do trabalho	16
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	17
2.1 A Energia.....	17
2.1.1 Recursos energéticos, formas e leis das conversões	20
2.1.2 Balanço energético.....	27
2.1.3 A crise de energia elétrica no Brasil.....	29
2.2 Conversor eletromecânico	33
2.2.1 Motores elétricos.....	33
2.2.2 Classificação dos isolamentos e categorias dos motores.....	38
2.2.3 Rendimento de um motor elétrico	41
2.2.4 Motores de alto-rendimento ou (A)	42
2.2.5 Curvas características do motor de indução	47
2.2.6 Dimensionamento de motores elétricos	48
2.2.7 Avaliação das condições de operação da máquina	50
2.3 Acionamentos (<i>Drives</i>) eletrônicos.....	53
2.3.1 Fundamentos	53
2.3.2 Chaveamento eletrônico.....	55
2.3.3 Classificação dos acionamentos eletrônicos.....	56
2.3.4 Acionamentos eletrônicos para motores CC.....	57
2.3.5 Acionamentos eletrônicos para motores CA.....	58
2.3.6 Acionadores (<i>Drives</i>) moduladores, variadores, gradadores	62
2.3.7 Partida-parada suaves, <i>softstart-softstop</i>	65
2.3.8 <i>Drives</i> , tensão variável e frequência da rede	66
2.3.9 Efeitos adversos dos acionamentos eletrônicos.....	69
2.4 Considerações	69
3 FERRAMENTAL, MATERIAIS E MÉTODOS	70
3.1 Quantificação da capacidade de poupar energia dos <i>Drives</i> Moduladores de Energia.....	70
3.1.1 Mensurações da energia em laboratório.	70
3.1.2 Mensurações da energia em um processo (unidade consumidora)	71
3.2 Análise econômica em conservação de energia.....	73
3.2.1 Engenharia econômica para seleção de alternativas	74
3.2.2 Critérios para tomada de decisão	75
3.2.3 Análise de sensibilidade e dados de entrada (<i>input</i>)	76
3.2.4 Cômputo do benefício auferido.....	77
3.3 Considerações	79

4 MODELO PROPOSTO.....	80
4.1 1ª Etapa– Seleção dos parâmetros, avaliação do carregamento, (potências demandadas e energia consumidas em unidades específicas).....	82
4.2 2ª Etapa – Avaliação do carregamento em percentual.....	83
4.3 3ª Etapa - Estimativa da energia poupada (para a condição <i>off-line</i>).....	84
4.4 4ª Etapa - Análise econômica.....	89
4.5 Considerações.....	91
5 APLICAÇÃO DO MODELO.....	92
5.1 Caracterização do ambiente e condições para o ensaio.....	92
5.2 Definição da empresa/processo para a realização do ensaio.....	93
5.3 Aplicação do modelo.....	95
5.3.1 1ª Etapa – Seleção dos parâmetros, avaliação do carregamento, (potências demandadas e energia consumida em unidades específicas).....	95
5.3.2 2ª Etapa – Avaliação do carregamento em percentual.....	96
5.3.3 3ª Etapa - Estimativa da energia poupada (para a condição <i>off-line</i>).....	96
5.3.4 4ª etapa - Análise econômica.....	100
5.4 Considerações.....	103
6 CONCLUSÕES.....	104
6.1 Conclusões.....	104
6.2 Sugestões para trabalhos futuros.....	107
REFERÊNCIAS.....	109
BIBLIOGRAFIA.....	113
ANEXO A: Tabelas: Relatório de ensaios powerboss compact – UFMG.....	115

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1: Sistema energético (adaptado de NOGUEIRA, 2001, p.20).	21
Figura 2.2: Manifestações da energia, representações e formas de Potência. Potência = Esforço x Fluxo = (J/s) = (W).	23
Figura 2. 3: Sistema energético genérico.	27
Figura 2. 4: Balanço global de energia CEMIG em 1999, em tEP (CEMIG).....	29
Figura 2. 5: Participações das diversas fontes de energia em Minas Gerais (CEMIG, 1999)..	29
Figura 2. 6: Evolução dos motores elétricos (BORTONI e SANTOS, 2001, p.350).	34
Figura 2. 7: Classes de Isolamento, Temperaturas e Materiais Constituintes. (SANTOS apud OLIVEIRA, 1999, p.17).....	38
Figura 2. 8: Foto termo sensível de motores (SOMAR, 2001).....	39
Figura 2. 9: Classes de Isolamento e Temperaturas Admissíveis (adaptado Eberle, 2001, p.20).	39
Figura 2. 10: Curvas de conjugado x velocidade, categorias: D, H e N, (TABOSA, 1998, p.19).	40
Figura 2. 11: Discrepâncias de resultados entre normas (BORTONI e SANTOS, 2001, p.352).	42
Figura 2. 12: Rendimentos nominais, motores da linha Padrão (B), e da linha alto- rendimento (A), (BORTONI e SANTOS., 2001, p.360).	44
Figura 2. 13: Comparação das curvas de conjugado: índice (A) para alto-rendimento, (B) para o Padrão, n é a rotação e M conjugado (BORTONI e SANTOS, 2001, p.358)...	46
Figura 2. 14: Tem e Ir, em funções de velocidade. Regiões: linear → linhas contínuas,	47
Figura 2. 15: Torque de aceleração disponível (Tacc = Tem - Tload).	48
Figura 2. 16: Curvas características motor de indução do modelo 90S4. (EBERLE, 2001). .	49
Figura 2. 17: Linearizações: curva de conjugado e de curva de corrente.	51
Figura 2. 18 Corrente em vazio percentual. Io/IN (%) em função da potência	52
Figura 2. 19: Motor ligado diretamente à rede de energia elétrica, (on-line), tensão (V) e frequência (f) constantes.	53
Figura 2. 20: Motor na condição <i>off-line</i> , controlado por <i>Drive</i> , conversor eletrônico, tensão (V) e/ou frequência (f) variáveis.	54
Figura 2. 21: Características das chaves eletrônicas (AMÉRICO, et al.; 1998, p.23).....	56
Figura 2. 22: Classificação dos acionamentos eletrônicos (AMÉRICO, et al.,1998, p.24).....	56
Figura 2. 23: Esquema simplificado do Chopper.	57
Figura 2. 24: Retificador a tiristores (Monofásico e Trifásico).	58
Figura 2. 25: Esquema básico dos acionamentos com malha intermediária.	58
Figura 2. 26: Princípio do VSI-PAM (<i>Pulse Amplitude Modulation</i>).	59
Figura 2. 27: Princípio do VSI-PWM (<i>Pulse Width Modulation</i>).	60
Figura 2. 28: Princípio do acionamento (CSI - Current Source Inverter).	61
Figura 2. 29: Estrutura de um Cicloconversor monofásico a partir de tensão trifásica (3Φ / 1Φ).	62
Figura 2. 30: Curvas de torque x velocidade (Categoria N), operando com carga centrífuga.	63
Figura 2. 31: Curvas de torque x velocidade (Categoria D), operando com carga constante. 63	
Figura 2. 32: Circuito de controle da tensão do estator de um motor de indução.	64
Figura 2. 33: Formas de ondas, tensão e corrente.....	64
Figura 2. 34: Funcionamento, variação de tensão: a) softstart , b) softstop (SIEMENS, 2001).	65
Figura 2. 35: Diagrama da seqüência das operações do <i>Drive</i> (SIEMENS, 2001).	67

Figura 3. 1: Diagrama utilizado no levantamento de consumo de energia do MI, para duas condições: <i>on-line</i> , alimentado diretamente pela rede de energia, e <i>off-line</i> , alimentado via Modulador de Energia.	70
Figura 4.1 Diagrama do modelo proposto.....	81
Figura 4. 2: Relatório gráfico gerado pela saída da 1ª tapa, potência demandada em Watt e energia consumida em Wh.....	82
Figura 4. 3: Curva de carregamento da potência instantânea demandada em percentual (em relação à potência nominal) e de energia consumida em Wh, em função do tempo (saída da 2ª etapa).....	84
Figura 4. 4: demandas de potências em função da carga em (%), para as condições <i>on-line</i> e <i>off-line</i>	85
Figura 4. 5: Demandas de Potência em (W) do MI, nas condições; <i>on-line</i> , e <i>off-line</i> ,.....	85
Figura 4. 6: Percentual de economia de energia em relação ao consumo com alimentação direta da rede em função do carregamento.....	86
Figura 4. 7: Níveis de carregamento em (%), versus Economia de energia em (%), passo de 2,5% do carregamento.....	87
Figura 4. 8: Curvas de potência e energia para as duas condições; <i>on-line</i> , medida e <i>off-line</i> , avaliada.....	88
Figura 5. 1: Relatório gráfico gerado pela 1ª etapa , curva de carregamento do motor acionando a correia transportadora em período de produção de 40 minutos.	95
Figura 5. 2: Relatório gerado pela 2ª etapa, carregamento percentual do motor, em relação à potência nominal, e consumo de energia, em período de produção de 40 minutos.	96
Figura 5. 3: 3ª etapa, relatório gráfico, curvas de potências e energia para as duas condições; <i>on-line</i> valores medidos e <i>off-line</i> valores estimados.	97
Figura 5. 4: Relatório gráfico, curvas de demanda de potência e consumo de energia para condições <i>off-line</i> efetivamente medida.	99
Figura 5. 5: Economias em valores monetários, (em Real), para o 1º ano, (VPfc).....	101
Figura 5. 6: Valor Presente líquido (VPL), com taxa acima da taxa de oportunidade.	101
Figura 5. 7: Tempo de retorno de capital para taxas resultante acima da taxa de oportunidade.	101
Figura 5. 8: Taxa interna de retorno (TIR), para taxas resultante acima da taxa de oportunidade.	102
Figura 5. 9: Índice Benefício/Custo (B/C), com taxa resultante acima da taxa de oportunidade.	102
Figura 5. 10: indicadores para taxa resultante de 0%.	102
Figura 5. 11: indicadores para taxa resultante de 2,5%.....	103
Figura 5. 12: indicadores para taxa resultante de 5%.	103

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

No Brasil, tem-se a crise de energia elétrica, de cunho conjuntural, que vem se prolongando e de desfecho hesitante. Teve seu ápice no ano de 2001, quando, houve racionamento compulsório, e a sociedade viu-se obrigada a economizar, racionalizar e adquirir-la a preço elevado. Surgiram: cotas, MAE (Mercado Atacadista de Energia), seguro apagão, dolarização das tarifas, cortes etc. Cerca de dois anos após o racionamento, vive-se situação contraditória, baixos preços no MAE, tarifas elevadas, consumo ténue, acalentado pela recessão econômica, aumento da geração a partir de fonte energética não hídrica, boa distribuição e bom nível pluviométrico, aliada a ações de racionalização, resultando em excedentes. Atualmente a questão é financeira, de rentabilidade, que garanta a expansão do sistema, donde vislumbra-se, para os próximos anos, nova escassez, com provável acréscimo no preço do kWh (quilowatt-hora) (SANTOS, 2003). Este quadro instável traz preocupações à cadeia produtiva, pode inviabilizar compromissos, planejamentos, investimentos, tornar sem competitividade e inexecutáveis processos e produtos já existentes ou a serem instalados/produzidos.

O mercado tem imposto às empresas redução de preços e minimização de custos como forma de se viabilizarem. Aquelas, que conseguem diminuir custos, obterão vantagem competitiva, usar este diferencial, e poderá obter uma maior margem de lucro. A eficiência econômica passa pela produtiva que, por sua vez, passa pela energética. Eficiência econômica denota produzir e distribuir os bens e serviços da economia com o melhor uso possível dos insumos necessários à produção e distribuição. Melhorar a eficiência energética é produzir o mesmo bem ou serviço, com a mesma qualidade, consumindo menos energia (AUGUSTO, 2001, p.25). Os insumos que compõem um produto devem ser atacados para a minimização dos custos, sendo a energia elétrica, um dos mais básicos. Segundo Viana (2001, p.213), isso pode ser alcançado “diminuindo-se as perdas de energia dos processos, especificando equipamentos com maior eficiência e operando no ponto de máxima eficiência energética”.

Ações que visam o uso racional e eficiente de energia estão sendo tomadas com o objetivo de estimular a conservação e combater qualquer tipo de desperdício. Economia e redução do desperdício são preocupações do plano estratégico, preparado pelo Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), para um horizonte de dez anos, com revisões periódicas decorrentes da dinâmica dos fatos. Destacam-se as metas: - obter economia progressiva de energia elétrica que deverá alcançar 130 milhões de MWh no ano de 2015

(produção aproximada de duas usinas de Itaipu), - redução de 11% de energia elétrica em função do aumento da eficiência energética dos aparelhos.

Pesquisa do Instituto Nacional de Tecnologia (INT), revelou que, em 1998, o Brasil consumiu 287,5 bilhões de kWh de energia elétrica e grande parte dessa energia foi desperdiçada, seja por hábitos inadequados de consumo, aparelhos ineficientes, falta de conhecimento técnico. A aplicação de medidas de economia de energia elétrica pode resultar, em média, na redução de 33% no consumo, (<http://www.eletrobras.gov.br/procel>).

Diferentes medidas, produzem diferentes economias, e a sinergia entre elas aumenta o benefício final. Diminuir a relação custo de energia consumida por unidade produzida e disponibilizada ao consumidor, talvez tenha sido no passado, estrategicamente, um diferencial, um qualificador. No quadro atual, trata-se de uma condição *sine qua non*, trata-se de sobrevivência.

Quando se necessita de energia na forma mecânica, o conversor utilizado, desde sua invenção, há cerca de cem anos, e que permanecerá como fonte de energia mecânica é o motor elétrico de indução (SOMAR, 2001). Trabalhando próxima ou a plena carga, um motor de indução é relativamente eficiente, alcançando 70% a 92%, que cai rapidamente à medida que a carga no eixo diminui. Segundo Augusto (2001, p.61), no Brasil existe grande quantidade de motores operando com cargas inferiores a 50% da potência nominal e, muitas vezes, por longos períodos, praticamente sem carga, o que pode levar a rendimentos médios baixos.

Segundo Kotler (2000, p.50), “as empresas enfrentam três grandes desafios e oportunidades: a globalização, os avanços tecnológicos, e a desregulamentação”. Os avanços tecnológicos manifestam-se sobre a forma de identificar, equacionar, planejar e executar as intrincadas questões da produção, dos custos e da produtividade.

Dos avanços na eletrônica, microeletrônica e computação, surgiram os controladores (*drives*) para os motores de indução, visando melhorias nos controles de velocidade/torque, e no rendimento energético. São conhecidos por: *Variable Frequency Drives* (VFDs), conversor estático Tensão/Freqüência, motor *Drive*, e outros, (MOHAN et al., 1995, p.309-342), (AMÉRICO et al., 1998, p.3-58). Instalados entre a rede de energia elétrica e o motor, manipulam a energia a ser fornecida ao motor, por meio da modificação da tensão e/ou da freqüência aplicadas ao motor que aciona um processo, que necessitem ou aceitem variações de velocidade, permitido que cargas centrífugas, como as bombas, ventiladores e outras, se acomodem à flutuação da demanda, pela variação da rotação. Funcionando com rotações mais baixas, gastam menos energia, (JANNUZZI, 1997, p.10), (SOUZA, et al., 1998, p.4-7), (AMÉRICO et al., p.49, 1998) e (MOHAN, et al., 1995, p.309-342). Segundo o Centro de Aplicação de Tecnologias Eficientes (CATE) e o Centro de Pesquisa de Energia Elétrica

(CEPEL), o potencial de economia de energia é de 25% a 30%, embora em algumas aplicações já se tenha obtido resultados superiores.

Com o objetivo de controlar a energia dispensada ao motor de indução, vê-se surgir no mercado os *Drives* Moduladores de Energia, que serão objeto de estudo desta pesquisa.

1.2 Problema, relevância e justificativa

Segundo Tabosa, (1998, p.i), “...no Brasil, o motor de indução é o mais importante consumidor, (...) a quantidade de energia por eles processada é superior a 30% da energia elétrica total”. Sobre motores de indução trifásicos, Bortoni e Santos (2001, p.349) dizem:

[...] embora sejam máquinas intrinsecamente eficientes, esses na prática se mostram com grande potencial de melhoria de eficiência e conservação de energia. Isto se deve principalmente a [...] grande quantidade de motores instalados; [...] aplicação e utilização inadequada dos mesmos, muitas vezes sobredimensionados. [...] os motores elétricos constituem-se nas cargas mais significativas das indústrias. [...] pesquisa recente mostrou que, em média, cerca de 50% das cargas industriais são compostas por motores de indução, chegando a 70% em algumas regiões do país.

Oliveira, (1999, p.1), enuncia "qualquer iniciativa que se desenvolva para aumentar o rendimento destes equipamentos trará grande economia ao país”.

Segundo Augusto (2001, p.54-58), maior eficiência dos motores tem sido obtida por meio da melhoria de suas características construtivas:- Chapas Magnéticas de melhor qualidade (aço silício), reduzem a corrente magnetizante;- Maior volume de cobre reduz a resistência ôhmica e a temperatura de operação;- Rotores, tratados termicamente, reduzem as perdas suplementares, etc. Dessas melhorias, surgiram os motores de Alto-rendimento (A), que têm seus valores específicos mínimos de rendimento estipulados pela Norma Brasileira Reguladora NBR 7094/1996, Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Apesar dessas melhorias, ao se especificar um motor, sucessivas e excessivas margens de segurança são aplicadas nas diversas etapas dos projetos, para coibir situações eventuais e as não previstas, levando ao sobredimensionamento (TABOSA, 1998, p.16). As causas são: “[...] desconhecimento das cargas, tamanhos padronizados ou preferenciais dos motores comerciais, e requisito de elevado conjugado de partida” (AUGUSTO 2001, p.61).

Na busca por melhorias na eficiência energética, além dos *Drives* Inversores Estáticos, surgem os *Drives* Moduladores de Energia, uma tecnologia ainda incipiente em termos mundiais, que permite controlar a energia disponibilizada ao motor, por meio da modulação, do valor eficaz da tensão ($V_{ef} = V_{rms} \rightarrow \text{root mean square}$ - valor médio quadrático), a ser aplicada ao motor, na mesma frequência da rede, em função das necessidades magnéticas (do torque magnético), que depende da carga no eixo do motor.

A expressiva participação do motor de indução no consumo da energia justifica o direcionamento desta pesquisa para este tipo de motor e a busca de maior eficiência dos sistemas conversores, que poderá ser alcançada pela utilização dos Acionadores (*Drives*) Moduladores de Energia.

É na perspectiva de se investigar, de forma científica, a tecnologia dos *Drives* Moduladores de Energia, suas características, especificidades técnicas, aplicabilidade, viabilidade econômica, como forma de obter menor custo operacional e melhorar a produtividade, que se efetuará esta pesquisa, justificando-a.

Assim, pode-se indagar: Existem ganhos técnico-econômicos advindos da associação do *Drive* Modulador de Energia aos motores elétricos de indução? De quanto é melhorada a eficiência dos sistemas? De quanto é melhorada a produtividade? Quais, quantos e em qual tempo são os ganhos monetários?

Hipoteticamente, pode-se responder com a afirmação de que a eficiência dos *Drives* Modulares de Energia encontra-se na capacidade de dosar a energia elétrica para o motor de indução, em função do torque requisitado (técnico), e diminuição dos custos operacionais decorrentes do menor consumo de energia elétrica (econômico).

1.3 Objetivos do trabalho

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o impacto dos *Drives* Moduladores de Energia em termos de eficiência energética e os efeitos econômico-financeiros da sua adoção, quando associados aos motores elétricos de indução em um processo produtivo.

E como objetivos específicos:

- Identificar características operacionais dos motores elétricos de indução, em atendimento a necessidades energéticas de um processo produtivo;
- Identificar características operacionais do *Drive* Modulador de Energia;
- Analisar aspectos operacionais resultantes da associação *Drive*/motor;
- Identificar a operacionalidade, condições e procedimentos capazes de viabilizarem a associação *Drive*/motor nos processos produtivos;
- Avaliar aspectos econômico-financeiros que viabilizem a adoção do *Drive* Modulador de Energia.

1.4 Metodologia

Com base nos objetivos propostos, é plausível classificar a metodologia adotada como explicativa, uma vez que a preocupação central é ‘identificar os fatores que determinam ou que

contribuem para a ocorrência dos fenômenos. Este é o tipo de pesquisa que mais aprofunda o conhecimento da realidade, porque explica a razão, o porquê das coisas” (GIL, 1996, p.45).

A coerência da pesquisa explicativa com a abordagem central deste trabalho, a aplicabilidade do *Drive* Modulador de Energia em motores de indução presentes nos processos produtivos, está na necessidade de se identificar a oportunidade de seu uso, com vista a economias no consumo de energia elétrica e redução de custos operacionais.

No que concerne às informações conceituais e teóricas necessárias para explicar e apresentar conteúdos relativos ao tema, utilizou-se a pesquisa bibliográfica e documental, baseada em livros, dissertações, teses, artigos científicos e em relatórios técnicos de centros de pesquisas e empresas que desenvolvem e comercializam os equipamentos, como: Eletrobrás, CEPEL, PROCEL, CEMIG, Siemens, Somar, os quais desenvolvem e acompanham estudos de efficientização de motores elétricos em diversos países, e, em particular, o caso brasileiro, pois foi necessário consubstanciar características dos motores de indução, dos regimes das cargas por eles acionadas e do equipamento de controle de energia (*Drive*).

Empregou-se a pesquisa experimental, tanto para avaliar a quantidade em kWh que pode ser economizada, que depende das condições das instalações, do regime ou ciclo de trabalho (*duty cycle*), que foram identificados, discretizados, quantificados e recebeu um peso proporcional à percentagem de sua ocorrência, quanto para avaliar o investimento em conservação e eficiência energética, por meio da clássica Engenharia Econômica que fornece critérios para comparações entre benefícios e investimento. Utilizaram-se os seguintes indicadores de desempenho: Valor Presente Líquido (VPL), Tempo de Retorno de Capital (*Payback*), Taxa Interna de Retorno (TIR) e Índice Benefício/Custo (B/C).

1.5 Delimitação da pesquisa

A pesquisa foi delimitada ao estudo e análise da melhoria da eficiência e racionalização energética dos sistemas de conversão eletromagnética, pela associação de *Drive* Modulador de Energia ao motor elétrico de indução, trifásico, 4 pólos, da linha comercial, em regime de funcionamento permanente, e não abordará regime de carga intermitente, com seqüências de: acelerações-frenagens-paradas, e respectivas possibilidades de recuperação e economia de energia.

Na determinação dos indicadores de desempenho, VPL, *Payback*, TIR, e B/C, será considerada apenas a economia direta de energia elétrica, nas condições da concessionária local, CEMIG, não se cogitando outros ganhos marginais, de difícil mensuração como: diminuição da manutenção, maior vida útil, menor quantidade de calor/temperatura, disponibilização do sistema de potência para uso por outro equipamento.

1.6 Estrutura do trabalho

O presente trabalho foi estruturado em seis capítulos.

O Capítulo **2 - Fundamentos teóricos**, apresenta as bases para o desenvolvimento de um modelo para a determinação da economia de energia.

No Capítulo **3 - Ferramental, materiais e métodos**, descrevem-se as ferramentas, métodos, critérios, materiais, recursos e procedimentos, a serem empregados no modelo proposto.

No Capítulo **4 - Modelo proposto**, expõe-se o desenvolvimento do modelo para estimativa da economia em kWh, transpor e apresentar estes resultados na forma de valores monetários e indicadores de desempenho (Análise econômica).

No Capítulo **5 - Aplicação do modelo**, descreve-se uma aplicação do modelo proposto, o ambiente/processo, as condições e apresentam-se os resultados e economias em kWh e em valores monetários e indicadores de desempenho.

E no Capítulo **6 - Conclusões**, discutem-se os dados obtidos na pesquisa, em especial os da aplicação do modelo, quando se compara a situação anterior e posterior à implantação do *Drive* Modulador, bem como as sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 A Energia

No decorrer da evolução humana, identificam-se diferentes fases de utilização dos recursos energéticos. Primitivamente, o homem dispunha de sua própria força muscular, do calor do sol, em seguida da tração animal e do calor da lenha, e isso durou milênios. Em outra fase, a captação do movimento das águas e dos ventos, outros milênios. Veio o uso do carvão mineral, do vapor, do petróleo e da eletricidade que se contam em séculos, até chegar à forma nuclear que conta decênios.

Independente de qual tipo, a energia sempre foi e será um dos fatores determinantes da sobrevivência, do desenvolvimento, das conquistas e dos desejos humanos, pois suas atividades demandam um correspondente consumo de energia, mesmo que seja sob a forma de alimentos. A dependência de energia se acentua em função das diferentes facilidades e processos que se incorporaram à vida do homem moderno, a saber: iluminação, transportes, comunicação, computação, processos de produção de bens e serviços.

Energia é utilizada na cadeia produtiva, seja na manufatura, na estocagem e armazenagem, no transporte e distribuição, no comércio e/ou nos serviços associados, na forma, no tempo e nas quantidades. Para Chaves (1999, p.74) “a sociedade contemporânea, forjada pelas conquistas das ciências e da tecnologia, depende de um consumo intensivo de energia em suas variadas formas”. Dentre as várias formas de energia utilizadas pela sociedade moderna, a elétrica ocupa destaque, apresenta-se, técnica e economicamente, como de relativa facilidade de ser produzida, primordialmente a obtida a partir de recursos hídricos, de ser transportada, manipulada, utilizada e consumida.

Sobre a energia elétrica, Chaves (1999, p.83), tece os seguintes comentários:

A energia na forma elétrica irá assumir cada vez mais a posição de outros energéticos [energia secundária ou derivada] como: gases combustíveis, combustíveis líquidos, etc. [...] é o energético mais flexível, podendo ser obtido pelas mais diferentes fontes primárias de energia como: potencial hidráulico, petróleo, carvão, nuclear de fissão e fusão, geotérmico, mare-motriz, eólico, solar, etc. É um energético absolutamente limpo, não obstante a poluição originada do seu processo de produção; seu transporte é econômico, confiável, prático e permanente. É insubstituível em: comunicação, eletrônica, processos eletrolíticos, e nos aparelhos elétricos, [...] os equipamentos têm vida útil maior e menor custo de manutenção; tem baixa taxa de acidentabilidade.

No Brasil o consumo de energia elétrica anual, per capita, evoluiu de 300 KWh/ano, em 1970, para 1.188 KWh/ano, em 1984, para 1.339 KWh/ano, em 1995, devendo alcançar 2.000 KWh/ano, no início do novo milênio, quando, em países desenvolvidos, este valor já ultrapassa há tempos, a casa dos 10.000 KWh/ano, sendo estimado: Canadá 16.000

KWh/ano, U.S.A. 12.500 KWh/ano, segundo o Instituto de Desenvolvimento Estratégico, (CHAVES, 1999, p.74), (INSTITUTO..., 2003).

Crescimento do consumo de energia implica a necessidade de maior produção, aliada à constante busca de alternativas para a redução do desperdício e aumento da eficiência dos equipamentos. Para Mohan et al., (1995, p.7), a combinação dos constantes incrementos dos custos da energia elétrica, com a preocupação para com o meio ambiente, faz da conservação de energia uma prioridade.

Augusto (2001, p.25), explica que a eficiência energética é atingida com um conjunto de políticas e ações fundamentais que tem por finalidade a redução dos custos com energia, efetivamente utilizada ou, ainda, aumente a quantidade da energia oferecida sem aumento da geração. Segundo Augusto (2001, p.25), a eficiência e a conservação da energia, pelo lado da demanda, são de responsabilidade do usuário final, que deve ser informado e incentivado a utilizá-la de modo racional e despertado para a oportunidade de ganho financeiro que se oferece por se reduzir o consumo de energia. A conservação de energia é a prestação do mesmo serviço ou mesma quantidade de produtos produzidos com o menor consumo de energia, desde a sua geração até o consumo final.

O campo dos estudos energéticos é vasto, cobrindo desde o uso dos recursos naturais até os aspectos relacionados ao desempenho das modernas tecnologias, permitindo uma abordagem de caráter técnico específico, mas sempre envolvendo componentes ambientais, econômicos e sociais, inclusive quanto à sua evolução histórica e suas perspectivas futuras, (NOGUEIRA, 2001, p.1). Nesta parte do capítulo, levantam-se os elementos para o estudo na área energética, em particular, buscando-se fundamentar a eficiente utilização dos fluxos de energia no processo de conversão eletromecânica, o balanço energético, as dimensões da energia e a crise de energia elétrica no Brasil, sempre à luz de critérios técnicos e econômicos e políticos.

Segundo HADAD et al., (2001, p.1), poucas palavras suportam tantos sentidos e definições como energia. “[...] já no Século IV A.C., Aristóteles, em sua obra *Metafísica*, identificava energia (*energeia*) como uma realidade em movimento”. Na acepção moderna, energia corresponde essencialmente a um conceito desenvolvido a partir de meados do Século XIX, tendo sido criado juntamente com a termodinâmica e utilizado para descrever uma ampla variedade de fenômenos físicos. É largamente difundido que energia é a capacidade de efetuar trabalho. Entretanto, esta proposição aplica-se apenas a alguns tipos de energia, como a mecânica e a elétrica que, em princípio, são totalmente conversíveis em outras formas de energia. “Este modo de se definir energia perde o sentido ao ser aplicado ao calor, pois esta

forma de energia é apenas parcialmente conversível em trabalho. Quando há temperaturas próximas à do ambiente, o calor pouco vale como trabalho”, (NOGUEIRA, 2001, p.1).

Segundo Nogueira (2001, p.2), "Maxwell, em 1872 propôs: energia é aquilo que permite uma mudança na configuração de um sistema, em oposição a uma força que resiste a esta mudança". Este conceito refere-se a mudanças de condições, alterações do estado de um sistema e inclui duas idéias importantes: as modificações de estado implicam vencer resistências e é justamente a energia que permite obter estas modificações de estado.

Para elevar uma massa até uma determinada altura, aquecer ou esfriar um volume de gás, transformar uma semente em planta, converter minério em ferramentas, jogar futebol, ler este texto, sorrir, enfim, qualquer processo que se associe a alguma mudança, implica em se ter fluxos energéticos, (NOGUEIRA, 2001, p.2).

Na termodinâmica, denomina-se sistema à região de interesse, delimitada por uma fronteira, que pode existir fisicamente ou ser uma região idealizada, que a separa do ambiente, que, neste caso, significa tudo aquilo que está fora da região de interesse. Desta forma, o universo, o todo, resulta da soma dos sistemas. Para Nogueira (2001, p.2), “definir energia é sem dúvida mais difícil e menos importante do que sentir e perceber sua existência, como a causa e origem primeira de todas as mudanças”.

Boas partes das leis físicas que governam o mundo são variantes das leis básicas dos fluxos energéticos, as eternas e inescapáveis leis de conservação e dissipação, que estruturam todo o universo, desde o micro ao macrocosmo. Potência corresponde ao fluxo de energia no tempo, de enorme importância ao se tratar de processos humanos e econômicos, onde o tempo é essencial. Por isso, a taxa de variação no tempo ($\partial/\partial t$) = v (velocidade), na qual um material é oxidado, pode levar a uma grande diferença, desde representar a possibilidade de sua utilização econômica, como combustível, como é caso da queima de madeira ou apenas a formação lenta de um resíduo, como é o caso da formação da ferrugem. Ambos são processos energéticos, mas de sentido totalmente diverso, devido às distintas taxas de variação no tempo ou velocidades nas quais ocorrem. Em geral, se está preocupado em atender uma determinada necessidade de consumo de energia, medida em kWh, kJ ou kcal, mas sob uma imposição do tempo, com dado requerimento de potência, avaliada em kW, (NOGUEIRA, 2001, p.3).

Nos sistemas energéticos, em particular no caso dos sistemas elétricos, são adotados alguns parâmetros que expressam o nível de utilização destes sistemas, devendo-se observar que é prática comum referir-se à demanda enquanto potência, avaliada em kW e a consumo enquanto requerimento energético, avaliado em kWh (NOGUEIRA, 2001, p.21). “Em princípio, qualquer capacidade instalada poderia atender qualquer necessidade de energia, desde que lhe seja dado tempo suficiente, o que evidentemente não atende às necessidades

impostas pela realidade”, (NOUEIRA, 2001, p.3). A sociedade moderna busca atender suas demandas energéticas de forma rápida, e é tão ávida por energia quanto por potência. A taxa de utilização dos fluxos energéticos é tão importante quanto sua disponibilidade.

“A demanda elétrica é a média das potências elétricas ativas ou reativas, solicitadas ao sistema elétrico pela parcela da carga instalada em operação na unidade consumidora, durante um intervalo de tempo especificado”, (HADDAD e GAMA, 2001, p.119). Esta potência média, expressa em watts (w), pode ser calculada dividindo-se a energia elétrica absorvida pela carga em um certo intervalo (Δt) de tempo, (expressa em Wh), por este intervalo de tempo Δt , (expresso em hora). Para efeito de tarifação, a potência não é instantânea, sendo que no Brasil, de acordo com o Decreto nº 62.724 de 17 de maio de 1968, os medidores operam com intervalo de tempo $\Delta t = 15$ minutos. Como a energia elétrica é medida em (kWh), em intervalos de quinze minutos, a demanda de potência solicitada, nesse intervalo, é numericamente igual ao consumo de energia neste intervalo, multiplicado por quatro (SHOEPS, 1994, p.83).

2.1.1 Recursos energéticos, formas e leis das conversões

Denominam-se recursos energéticos as reservas ou fluxos de energia disponíveis na natureza e que podem ser usados para atender às necessidades e desejos humanos. (NOGUEIRA, 2001, p.16).

Os recursos energéticos podem ser classificados como:

a) Fontes não renováveis ou recursos fósseis: referem-se aos estoques de materiais que armazenam energia química, acumulada primariamente a partir da radiação solar em épocas geológicas, como é o caso do petróleo, carvão mineral, turfa, gás natural, xisto betuminoso, bem como podendo acumular energia atômica na forma de material físsil, por exemplo o urânio e o tório. Quer sejam medidas, indicadas ou estimadas, são necessariamente finitas e, portanto, se reduzem à medida que são consumidas (NOGUEIRA, 2001, p.16). Para Jannuzzi, (1997, p.9), fontes de energia são, não renováveis se suas reposições naturais levarem muitos séculos ou milênios sob condições muito particulares, tais como para o petróleo, a sua reposição artificial é absolutamente impraticável, envolvendo processos com gastos de energia igual ou maior que a quantidade de energia obtida, ou com custos proibitivos.

b) Recursos, ou fontes renováveis: são dados por fluxos naturais, como ocorre na energia solar, em suas distintas formas, na energia hidráulica, na energia eólica e na energia da biomassa, bem como nos fluxos energéticos dependentes do movimento planetário, por

exemplo, a energia talassomotriz, associada à variação do nível do mar nas marés e à energia geotérmica, que, na escala das realizações humanas existe como potência disponível (NOGUEIRA, 2001, p.16). Para Jannuzzi, (1997, p.9), fontes renováveis, são aquelas em que o uso pela humanidade não causa uma variação significativa nos seus potenciais e se suas reposições em curto prazo são relativamente certas.

A classificação da energia como renovável ou não-renovável pode gerar controvérsias. A inadequada utilização de alguns potenciais energéticos renováveis pode determinar sua exaustão, como acontece em reservatórios geotérmicos sobreexplorados ou nos recursos de biomassa, quando explorados além de sua taxa natural de reposição, (NOGUEIRA, 2001, p.16). “A princípio, nenhuma fonte pode ser considerada absolutamente inesgotável, [...] a energia solar é considerada renovável, embora ela seja originada de reações de fusão nuclear que, por sua vez, são irreversíveis”, (Jannuzzi, 1997, p.9).

Nem sempre uma disponibilidade energética está na forma como se necessita e, algumas vezes, pode-se convertê-la e armazená-la. Na acepção mais geral, os sistemas energéticos constituem-se de uma seqüência de processos; obtém-se da natureza, converte-se progressivamente e eventualmente armazena-se, visando sua adequada disponibilidade em termos de tempo, quantidade e local, para atender aos diversos usos na sociedade, (NOGUEIRA, 2001, p.20). Conforme sua posição nesta seqüência de processos, podem ser definidos alguns tipos de energia, como se apresenta na figura 2.1.

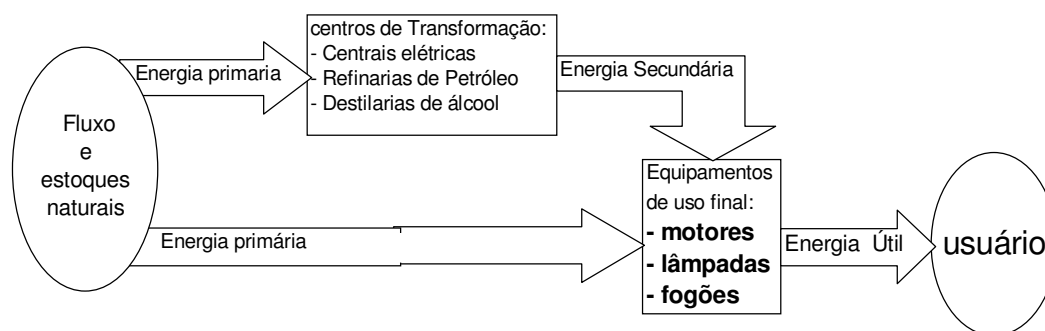


Figura 2. 1: Sistema energético (adaptado de NOGUEIRA, 2001, p.20).

- Energia Primária: energia fornecida pela natureza, como a energia hidráulica, petróleo, lenha e cana-de-açúcar, podendo ser usada diretamente ou convertida em outra forma energética (JANNUZZI, 1997, p.9), (NOGUEIRA, 2001, p.20).

- Energia Secundária, Derivada, Vetor ou Energético: corresponde à energia resultante de processos de conversão, visando aumentar sua densidade energética, facilitar o transporte, armazenamento e adequação ao uso, como a eletricidade, combustíveis derivados

de petróleo, álcool, carvão vegetal, etc. Eventualmente a energia secundária pode ser novamente convertida em outras formas de energia secundária, como é o caso do óleo diesel utilizado em centrais elétricas, (JANNUZZI, 1997, p.9), (NOGUEIRA, 2001, p.20), (CHAVES, 1999, p.83).

Energia Útil: significa a forma energética última, efetivamente demandada pelo usuário, devendo ser algum fluxo energético simples, como calor de alta e baixa temperatura, iluminação, potência mecânica, etc. A relação entre a energia útil e a demanda de energia secundária correspondente, depende do uso final, tecnologia e eficiência do equipamento (NOGUEIRA, 2001, p.20), (JANNUZZI, 1997, p.9).

Das unidades básicas do Sistema Internacional de Unidade (SI), tem-se: para o comprimento, o metro (m), para a massa, o quilograma (Kg), para o tempo, o segundo (s), e para a carga elétrica, o Coulomb (C). Para a força requerida para acelerar uma massa de 1Kg a 1 metro por segundo por segundo (1m/s^2), tem-se o Newton (N), para a quantidade de calor, trabalho e energia, o joule (J), que é o trabalho realizado por uma força de 1 N aplicada pela distância de 1m, ($1\text{ J} = 1\text{ N.m}$), para fluxo de energia, a potência, tem-se o watt (W), que é a velocidade na qual a energia é dissipada, ($1\text{ W} = 1\text{ J/s}$). Estas são as mais importantes nos estudos de energia (JOHNSON, 1994, p.2-3), (INMETRO, 2002).

A energia, entendida como a capacidade de promover mudanças de estado, pode apresentar-se fisicamente de diversas formas. Para Nogueira (2001, p.3) tem-se que:

“Um Potencial Energético corresponde ao produto entre uma variável extensiva, cujo módulo depende da quantidade considerada, e uma variável de desequilíbrio, expressando uma disponibilidade de conversão entre formas energéticas”.

Trabalho mecânico pode ser entendido como o processo análogo à elevação de um peso e “reconhecer que o trabalho corresponde a uma variação ordenada de energia, enquanto por calor podemos entender como o fluxo energético decorrente de diferença de temperatura, e apresenta-se desordenado”, (NOGUEIRA, 2001, p.3).

Nos processos de conversão se identifica à existência da energia, que então se apresenta, na fronteira do sistema, como calor ou trabalho. Segundo Doebelin, (1998, p.83-86), a interação entre duas variáveis genéricas identificadas como; variável de esforço [*effort variable*], que atua sobre, e a variável de fluxo [*flow variable* - circulação] que atua através, denota uma energia em um intervalo de tempo, resultando em uma potência, que expressa a velocidade com que o trabalho é realizado, e é obtido pelo produto dessas variáveis. Assim tem-se: Potência = Esforço x Fluxo = (J/s) = (W). Na figura 2.2, tem-se exemplos de manifestações da energia, representações e formas de Potência.

Potência =	Variável de Esforço [Sobre]	Variável de Fluxo [Através]	Unidades
Hidráulica	P (Pressão)	Q (Vazão)	$N/m^2 \cdot m^3/s = J/s = W$
Mecânica (translação)	F (Força)	V (Vel. linear)	$N \cdot m/s = J/s = W$
Mecânica (rotação)	T (Torque)	W (Vel. angular)	$N.m \cdot rad/s = J/s = W$
Elétrica	V (Tensão)	I (Corrente)	$J/C \cdot C/s = W = J/s$

Figura 2.2: Manifestações da energia, representações e formas de Potência.

$$\text{Potência} = \text{Esforço} \times \text{Fluxo} = (J/s) = (W).$$

(Adaptado de Doebelin, 1998, p.83-86).

A energia mecânica, pode ser potencial ou cinética. A energia potencial mecânica associa-se diretamente a uma força estática e pode ser potencial elástico, tal como se acumula em molas ou em gases comprimidos, ou gravitacional, dependendo da posição de uma massa em um campo gravitacional, como a energia hidráulica nas quedas d'água em uma cachoeira ou uma represa. A potência associada à utilização da energia hidráulica pode ser definida pela expressão; $Phidr = Q \cdot \Delta h \cdot \gamma$, onde: γ corresponde ao peso específico da água, Δh à altura disponível da queda e Q à vazão volumétrica. A energia mecânica cinética, que se associa à inércia das massas em movimento (velocidades lineares), como é a energia eólica, ou movimentos rotacionais, como dos volantes de inércia (NOGUEIRA, 2001, p.7).

A energia térmica apresenta-se essencialmente de duas formas: radiação térmica ou energia interna. O calor corresponde a um fenômeno observável apenas na fronteira de um sistema onde existe uma diferença de temperaturas. A energia térmica resulta da conversão da energia química mediante uma reação de combustão. Um fluxo de calor pode resultar tanto de uma variação térmica como de outra forma de energia. A energia interna corresponde à capacidade de promover mudanças, associadas à agitação térmica de um material, que pode ser medida por sua temperatura, (NOGUEIRA, 2001, p.6). A transferência de energia interna de um corpo para outro se dá mediante os processos de condução de calor, quando a energia flui através de meios estáticos, ou processos de convecção térmica, quando o fluxo de energia está necessariamente associado à movimentação de um fluido, que pode ocorrer de modo forçado ou natural, neste último caso, com o escoamento sendo uma decorrência das variações de densidade do fluido em função da temperatura.

A energia química apresenta grande interesse por sua extensa aplicação. Dependendo de reações químicas e da liberação da energia acumulada na forma de ligações entre os átomos e moléculas, pois a energia dos combustíveis é, na realidade, energia química.

Pode-se, de forma sucinta, explicar que, nas reações espontâneas, as ligações químicas existentes nas moléculas dos reagentes, contêm mais energia do que as ligações observadas nas moléculas dos produtos. Sua aplicação típica associa-se aos processos de combustão nos motores, fornos e caldeiras, onde a energia química de materiais como gasolina, álcool, óleo combustível e lenha são convertidos em energia térmica, na forma de gases, sob altas temperaturas, (NOGUEIRA, 2001, p.4-5). O conteúdo energético dos combustíveis é medido por seu poder calorífico, um parâmetro que fornece a quantidade de calor disponível por unidade de massa ou de volume do combustível. Também nas pilhas e nas baterias elétricas se observam processos conversão químico-elétrico.

No nível do átomo, a energia nuclear resulta da fusão dos núcleos de átomos leves, como do hidrogênio, em um processo físico onde ocorre uma diferença (déficit) de massa entre os reagentes e os produtos de reação, que corresponde a significativas quantidades de energia liberada. “Trata-se de um processo de sedutoras possibilidades para a geração de energia comercial, mas de difícil controle e, na atualidade, na escala das realizações humanas, sua única aplicação tem sido destrutiva, nas bombas de hidrogênio”, (NOGUEIRA, 2001, p.4). Enquanto a energia atômica relaciona-se com processos de fissão de átomos pesados, como urânio, tório e plutônio, em decorrência da instabilidade natural ou provocada de alguns isótopos destes materiais, tendem a converter-se em outros materiais com número atômico mais baixo, com liberação de energia devido à perda de massa observada. A energia resultante é elevada e se apresenta, essencialmente, na forma de calor, o controle das reações tem sido conseguido, e “[...] além das bombas atômicas, a energia da fissão tem sido empregada como fonte energética para geração de energia elétrica e para mover navios e submarinos, mediante ciclos térmicos”, (NOGUEIRA, 2001, p.4). A dependência entre a variação de massa, observada nos processos de fusão e de fissão, e energia liberada, foi proposta em 1922 por Einstein, $E = mc^2$, onde: (E) refere-se à energia obtida, (m) à diferença de massa na reação e, (c) à velocidade da luz. Observar-se que a velocidade da luz é bastante elevada, (3×10^8 m/s), e pequenas variações de massa correspondem a grandes disponibilidades de energia.

Segundo Johnson, (1994, p.4-5), forças de natureza elétrica aparecem pela presença de cargas elétricas, cargas positivas ou negativas, resultando em atração para cargas diferentes e repulsão para cargas iguais. A matéria é formada de átomos eletricamente neutros: as cargas positivas dos prótons são contrabalançadas pelas negativas dos elétrons. A carga ‘q’ de um elétron é de $1,6021 \times 10^{-19}$ Coulomb (C), e um Coulomb é a carga de $6,24 \times 10^{18}$ elétrons. O movimento ordenado da cargas caracteriza uma corrente elétrica (i), de *intensité*, que é a taxa de variação da carga no tempo ($i = \partial q / \partial t$), cuja unidade é o *Ampère* ($A=C/s$). Elétrons livres

em um material condutor movem-se aleatoriamente, mas, ao se forçar um movimento orientado, ter-se-á uma corrente elétrica, para isso deve-se aplicar uma força-eleto-motriz (FEM) para realizar um trabalho [mudança de estado] sobre as cargas. Johnson (1994, p.5) define a tensão (V) ‘sobre um elemento com o trabalho realizado para mover uma unidade de carga (+1C) através do elemento de um terminal ao outro’, A tensão é o número de joules desenvolvido sobre um coulomb, $1V = 1J/C$. Se sobre um elemento tem-se uma tensão $V(J/C)$ e uma carga ‘q’ se move $\rightarrow \Delta q.(C)$ através de um elemento, $V(J/C) \cdot \Delta q(C) = \Delta W(J)$, que caracteriza uma energia (W) em um tempo (Δt). A os se tomar $\Delta t \rightarrow 0$, tem-se:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta w / \Delta t = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} V \cdot \Delta q / \Delta t \quad \Rightarrow \quad \partial w / \partial t = V \cdot \partial q / \partial t = V \cdot I = P \quad (\text{Eq. 2. 1})$$

O que vai de encontro a Nogueira (2001, p.5), para o qual a energia elétrica está associada à circulação de cargas através de um campo de potencial elétrico e a Potência resulta do produto entre a tensão (sobre) dois pontos, ($V=J/C$) e a corrente (através) que circula, ($A=C/s$). Ainda, segundo Nogueira (2001, p.5-6), os dois tipos básicos de corrente elétrica são a corrente contínua (CC), quando seu valor é constante com o tempo, como ocorre nas baterias, ou a corrente alternada (CA), que varia tipicamente de modo senoidal com o tempo, no caso brasileiro com frequência de 60 Hz, enquanto na Europa e Argentina e Paraguai adota-se 50 Hz. A energia na forma alternada é mais usada por ser a forma mais simples e eficiente para se produzir, transportar e utilizar.

De acordo com Nogueira (2001, p.5), além das tecnologias de combustão, para disponibilizar a energia química dos combustíveis, existem, na atualidade, perspectivas promissoras para as "técnicas de conversão direta, aplicadas nas chamadas células de combustível, que produzem diretamente energia elétrica a partir de combustíveis, com alta eficiência, mediante reações isotérmicas a temperaturas relativamente baixas". Reações similares são realizadas nos músculos dos animais e do homem, permitindo a transformação da energia química dos alimentos, uma espécie de combustível, em energia mecânica nos músculos para suas atividades vitais, em processos de baixa temperatura.

As formas apresentadas não esgotam todas as maneiras de se considerar a energia, que existirá sempre que houver possibilidade de promover alguma mudança de estado, em uma ampla acepção. Poderiam, ser citadas: a energia magnética, acumulada na forma de campos magnéticos e utilizada na transformação de energia elétrica em transformadores, a energia elástica associada à tensão superficial de um líquido e que se mostra na formação de bolhas de sabão, a energia difusiva decorrente da diferença de concentrações entre gases, líquidos e sólidos solúveis, e diversas outras formas (NOGUEIRA, 2001, p.7-8).

Uma característica essencial dos potenciais energéticos, sempre entendidos como os potenciais para a promoção de mudanças, é a sua possibilidade de interconversão. Isto é, uma forma energética, eventualmente, pode ser convertida em outra, de modo espontâneo ou intencional, permitindo neste último caso adequar-se a alguma utilização desejada. ‘Frequentemente se empregam as expressões ‘processos de geração de energia’ ou ‘sistemas de consumo de energia’, quando o correto, a rigor, seria falar em processos de conversão de energia’ (NOGUEIRA, 2001, p.10).

Quaisquer que sejam os sistemas considerados e as formas de energia envolvidas, todos processos são regidos por duas leis físicas fundamentais, que constituem efetivamente o arcabouço essencial da ciência energética. Estas relações físicas se sustentam apenas pela observação de processos reais desde o microcosmo até a escala cósmica.

Primeira lei básica é a Lei da Conservação da Energia. Energia não se cria nem se destrói, salvo nos casos em que ocorrem reações atômicas ou nucleares e então podem se observar transformações de massa em energia. Pode-se mostrar que a soma da energia e da massa do universo é uma constante. Como na grande maioria das situações, tal dualidade massa-energia não precisa ser considerada, é suficiente afirmar que, em um dado período de tempo, a somatória dos fluxos e estoques energéticos em um processo ou sistema é constante, como se apresenta na equação 2.2;

$$\sum E_{entrada} = \sum E_{saida} + \Delta E_{sistema} \quad (\text{Eq. 2. 2})$$

Para um processo em regime permanente, no qual não ocorrerão variações de estoque no tempo, $\Delta E_{sistema}$, é naturalmente, a soma dos fluxos energéticos na entrada e na saída devem ser iguais. Esta situação tem grande interesse prático, pois, na maioria dos casos, se está interessado em sistemas operando em condição normal ou estável.

A Lei da Conservação de Energia também é conhecida como Primeira Lei da Termodinâmica e foi formalmente estabelecida em torno de 1840 por Joule e Meyer, trabalhando de modo independente. Ela permite efetuar balanços energéticos, quantificar e determinar perdas, fluxos energéticos (NOGUEIRA, 2001, p.11).

Com base na Lei da Conservação de Energia, o conceito de desempenho, chamado de rendimento ou eficiência energética de um sistema energético (η), pode ser mensurado pela razão entre o efeito energético útil e o consumo energético no sistema, válida para um sistema em regime permanente, como pode ser visto na figura 2.3 e equação 2.3.

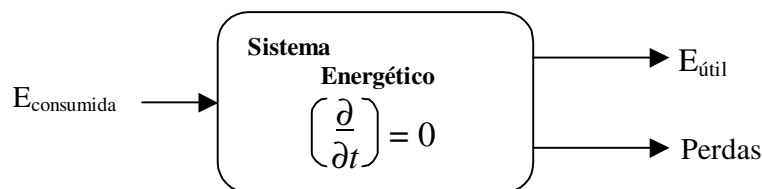


Figura 2. 3: Sistema energético genérico.

$$\eta_{\text{energetico}} = \frac{E_{\text{util}}}{E_{\text{consumida}}} = \frac{E_{\text{consumida}} - \text{Perdas}}{E_{\text{consumida}}} = 1 - \frac{\text{Perdas}}{E_{\text{consumida}}} \quad (\text{Eq. 2. 3})$$

A outra relação física básica é a Lei da Dissipação da Energia, segundo a qual, em todos os processos reais de conversão energética, sempre existirá uma parcela de energia térmica como produto. Se o objetivo é transformar energia mecânica em calor, tal conversão pode ser total, ocorre nos freios, se o propósito for o inverso, a conversão de energia térmica em mecânica será sempre parcial, uma parcela dos resultados sempre será calor. Existem inevitáveis perdas térmicas nos processos de conversão, que se somam às outras perdas inevitáveis, decorrentes das limitações tecnológicas/econômicas dos sistemas reais, tais como isolamento imperfeito, atrito, perdas de carga e inércias, entre outras (NOGUEIRA, 2001, p.12).

As imperfeições nos processos de conversão energética determinam o incremento líquido da entropia no universo. A entropia tende sempre a aumentar no mundo real, já que apenas nos processos energéticos idealmente perfeitos ou reversíveis, não ocorre esta geração. Esta, Segunda Lei da Termodinâmica, apresenta especial relevância no caso dos ciclos térmicos de potência, nos quais a conversibilidade dos fluxos de calor em energia mecânica depende da temperatura da fonte térmica, conforme a expressão do rendimento máximo das máquinas térmicas, desenvolvida por Carnot em 1824: $\eta_{\text{revers}} = (1 - T_2/T_1)$. Como o trabalho pode ser conversível em qualquer forma de energia e o calor sempre mostra esta limitação, considera-se que aquelas energias diretamente conversíveis em trabalho são energias nobres, enquanto as energias térmicas correspondem a energias de baixa qualidade. (NOGUEIRA, 2001, p.12).

2.1.2 Balanço energético

Um balanço de energia é um sistema de contabilidade que descreve o fluxo de energia em uma economia (regional, estadual ou nacional), durante dado período, geralmente um ano ,(JANNUZZI, 1997, p.13). Este conjunto de informações é a mais completa fonte disponível de estatísticas de energia oficiais sobre produção, conversão e consumo de energia. O principal objetivo do balanço energético é prover informação para pesquisas, planejamentos

dos diferentes setores do sistema, indicar onde realizar investimentos e desenvolvimento para usos mais eficientes, e mesmo modificações no mercado consumidor de energia.

O balanço energético é feito em uma matriz, na qual todas as formas de energia, suas conversões, perdas e usos, em um dado período, são registradas em uma mesma unidade de medida. “Alguns autores usam a expressão ‘matriz energética’, se referindo a um ‘balanço energético’ ideal, que está sendo proposto pelos planejadores. Balanço energético se refere a uma contabilidade presente ou do passado”, (JANNUZZI, 1997, p.14).

Existe uma variedade de quantidades físicas nas quais os fluxos de energia podem ser expressos, e muitas vezes essas quantidades não necessariamente são compatíveis entre si. Por exemplo, gasolina e etanol são geralmente medidos em litros, consumo de eletricidade em quilowatt-hora (kWh), carvão em toneladas, petróleo em barris etc. É necessário expressar as diferentes formas de energia através da mesma unidade de medida. O conteúdo energético térmico de cada combustível é a forma usada para a contabilização das quantidades de energia, que podem ser expressas como calorias (cal), Joules (J), toneladas equivalentes de petróleo (tEP) ou toneladas equivalentes de carvão (tEC), ou terawatt-hora (TWh).

O conteúdo térmico ou poder calorífico de um combustível, é medido por meio de um calorímetro, que pode determinar o Poder Calorífico Superior (PCS), quando se inclui a quantidade de calor liberada pela condensação do vapor d' água formado durante a combustão ou o Poder Calorífico Inferior (PCI), quando este componente é excluído do poder calorífico. O PCS é usado para estimar a quantidade de energia disponível para o usuário, na maioria dos países das Américas do Norte e do Sul e nas conversões necessárias nas contabilidades de energia nacional e nas tabelas do balanço energético. Para expressar o conteúdo térmico de um combustível, estabelece-se uma unidade de medida, mas é sempre desejável indicar o valor em unidades no sistema (SI) . O nome "balanço" se refere ao fato de que quantidades de energia primária produzidas devem ser necessariamente iguais às quantidades consumidas, depois de contabilizadas por mudanças nos estoques, importações e exportações e o valor usado para a conversão em produtos de energia secundário, incluindo perdas.

A figura 2.4 mostra o balanço global de energia das Centrais Energéticas de Minas Gerais, CEMIG, em 1999. Para a composição da demanda total de energia no Estado de Minas Gerais, todos os energéticos aparecem, convertidos para tEP, em suas formas primárias. A importação de energéticos em Minas Gerais ocorre em função, principalmente, da necessidade de suprimento de petróleo, carvão mineral e derivados. A exportação inclui a energia elétrica e alguns derivados de petróleo.

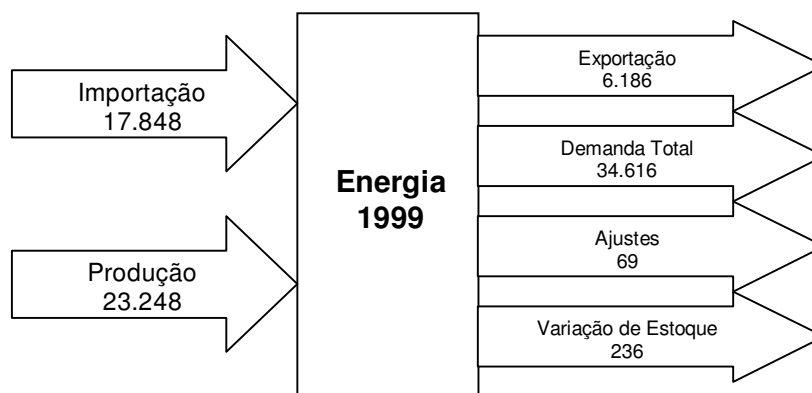


Figura 2. 4: Balanço global de energia CEMIG em 1999, em tEP (CEMIG).

A demanda total inclui, além do consumo final, o consumo no setor energético, as perdas na distribuição e armazenagem e os energéticos que, apesar de darem entrada nas unidades industriais, não puderam ser devidamente aproveitados. A demanda total de energia, alcançou 34,62 milhões de tEP, valor equivalente a 13,6% da demanda total de energia no Brasil. (CEMIG, 1999). O potencial hidráulico ocupa destacada posição no balanço ('matriz'), as usinas hidrelétricas foram responsáveis por 98,6% da energia elétrica gerada em 1999, confirmando-se como a mais importante fonte energética do Estado, respondendo por 37,8% da demanda total de energia, conforme apresentado na figura 2.5.

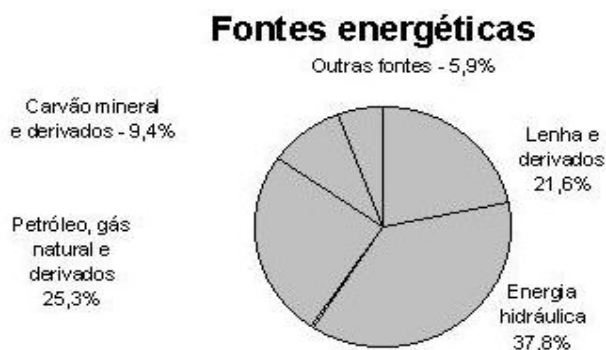


Figura 2. 5: Participações das diversas fontes de energia em Minas Gerais (CEMIG, 1999).

2.1.3 A crise de energia elétrica no Brasil

A energia pode ser vista pela sociedade de várias formas, dependendo da necessidade, interesse e influência, do nível de decisão inerentes dos diferentes grupos sociais e econômicos. Perceber essas diferenças é relevante, porque elas condicionam a maneira de realizar o planejamento energético. A energia pode ser tratada como uma mercadoria *commodity*, (CHAVES, 1999, p.XII), como necessidade social, ou um recurso estratégico e ecológico. À parte dos aspectos técnicos, a tomada de decisão energética é mais influenciada

pelo modo como ela é compreendida pelos agentes que participam do processo. (JANNUZZI, 1997, p.11). A visão da energia como mercadoria *commodity* aparece em alguns setores e agentes importantes da economia, que manipulam ou dependem da produção, da venda ou compra de energia, como os representados por companhias energéticas e grandes consumidores, indústrias eletro-intensivas, que somente consideram as vendas de kWh, ou barris de petróleo, como fonte de receita. Esse enfoque reflete uma gama de valores baseada no relacionamento comprador-preço-vendedor e exclui em geral outros aspectos, não relacionados à transação comercial. No caso do setor elétrico, essa filosofia tem influenciado as iniciativas de expansão da oferta e estímulos ao aumento do mercado de consumo, (JANNUZZI, 1997, p.11).

No caso brasileiro, dois anos após a escassez (acionamento), o sistema de energia elétrica passou a um quadro de excedente e, na mesma rapidez, inclina-se novamente a escassez. Durante audiência pública, a ministra de Minas e Energia, Dilma Rousseff, (apud SANTOS, 2003), declarou sobre o pêndulo: escassez, sobreoferta e nova escassez, "Essa dinâmica precisa ser rompida". Segundo a ministra, houve a redução do mercado provocada pelo racionamento e entrada de novas usinas, criou-se uma sobreoferta conjuntural de 7,5 mil MW médios, dos quais 4 mil MW médios pela diminuição do mercado e 3,5 mil MW médios de energia nova. O país vive uma situação contraditória, com a indicação de tarifas elevadas; preços do MAE (Mercado Atacadista de Energia) baixos; energia hídrica despachada, mas sem contrato; e energia térmica com contrato, mas não sendo despachada. É preciso equacionar a crise financeira e de rentabilidade do setor e garantir a reprodução da capacidade de expansão do sistema e as condições de equilíbrio para o mercado.

A história do setor elétrico teve início nos anos vinte do século passado, quando até os anos quarenta, pela falta de planejamento e de uma política tarifária sensata, quanto por efeito das crises internacionais, (1929 e II guerra), os investimentos não aconteceram. Nos anos cinquenta, era JK, surgiram os primeiros projetos, as estatais e a construção de grandes hidroelétricas: usina de Três Marias (CEMIG), seguida de Furnas, tudo na perspectiva da industrialização. Na década de sessenta, vieram novas estatais e grandes projetos, como Paulo Afonso. Com o período militar deu-se o apogeu, São Simão, Itaipú e Tucuruí, e também o início do declínio do modelo existente à época, colocado à disposição das equipes econômicas, ávidas pelos dólares que a eletricidade trazia de fora. Foi um círculo diabólico: a ampliação da geração hidrelétrica criou formidável dívida externa e alimentou a inflação, que levou o governo a deprimir as tarifas e os investimentos em geração, numa política que permitiu o saneamento das contas públicas, que serviu de base para o crescimento, mas que

agora esbarra na escassez de energia. Na década de oitenta, governos sucessivos não implementaram os planejamentos, não investiram, as tarifas continuaram artificialmente baixas para conter a inflação, afinal sobrava energia elétrica e inflação. O resultado foi inadimplência entre distribuidoras e geradoras, administrável pelo fato de serem ambas estatais, e houve a estagnação e a descapitalização do setor. No início da última década do século passado, houve leis que fizeram renascer a indústria "energia elétrica", porém, em seguida, veio o modelo neoliberal, privatizante, a favor de regras e lógicas que se mostraram pouco eficazes (MARQUES 2003). O autor ainda acrescenta que não se conseguiu atrair os “investimentos sonhados e cantados em prosa e verso pelos arautos do novo modelo” [...] é consenso “que a crise resultou de um conjunto de fatores, acrescido de falta de regras claras para regular o funcionamento do setor elétrico”.

Segundo Costa (2003), nos contratos de concessão do setor elétrico, a fórmula de cálculo do índice de reajuste anual ordinário indexa parte da tarifa (a de maior peso), os chamados custos gerenciáveis (folha de pagamentos, contratos de empresas terceirizadas entre outros), à variação acumulada nos últimos 12 meses do Índice Geral de Preços do Mercado - IGPM, que sofre forte influência do dólar. A outra parte, correspondente aos custos não gerenciáveis (à compra de energia, ao uso do sistema de transmissão e conexão, aos encargos do setor elétrico, entre outros) é repassada integralmente à concessionária. Na prática, constata-se que o atual contrato provoca a ‘dolarização’ nas tarifas pagas pelo consumidor. Os artífices do programa neoliberal, que privatizaram e mercantilizaram o setor de energia elétrica, defendem que a medida contratual que vincula a tarifa ao câmbio é para proteger as concessionárias da oscilação do dólar. “Estes contratos de concessão são lesivos aos interesses de toda a população e o atrelamento dessas tarifas ao dólar deve ser repudiado e visto como inconstitucional pois, no Brasil, a moeda oficial ainda é o Real”, (COSTA, 2003).

A complexidade para sair de um modelo exclusivamente estatal e aderir a um modelo preferencialmente privado, como foi intenção, superou qualquer expectativa. Ao mesmo tempo, as empresas foram abalroadas por uma crise cambial intensa, que elevou as dívidas tomadas em dólar, com receitas em reais e sem previsão de crescimento, devido à redução de consumo após o racionamento, faltou dinheiro do caixa, (COSTA, 2003).

Segundo Santos (2003), a ministra Dilma Rousseff declarou que energia é um serviço e não uma produção de mercadoria, exige do concessionário responsabilidade pública, modicidade, qualidade e continuidade do fornecimento do serviço, o governo não voltará atrás em nenhum processo de privatização, não existe a hipótese de privatizar a geração federal. A geração hídrica vai permanecer nas mãos do governo. A geração nova pode ser pública ou

privada, com o uso do conceito de concessionário de serviço público de energia elétrica. É preciso ter parceria entre o poder público e privado para estabilizar o setor e conseguir o crescimento da expansão em longo prazo. Também é preciso criar mecanismos para acabar com esta visão de retorno de curto prazo do setor elétrico. Esta visão está descasada do ciclo de desenvolvimento dos negócios do setor. A crise pós-acionamento está apresentando os "restos a pagar" do desajuste de 2001. Provavelmente, a atual situação seja mais grave do que a própria penúria energética, uma vez que ela é destruturante das empresas do setor, cada vez mais ameaçadas em seus equilíbrios econômico-financeiros. O suprimento futuro está sob risco, já que é a capacidade de investimento de hoje que garante a energia de amanhã. Portanto, por incrível que isso possa parecer, talvez estejamos, hoje, plantando o racionamento de 2005 ou 2006. Também Hollanda (2002), enuncia, "Engana-se quem pensa que estamos livres de uma nova crise".

A Associação Brasileira da Infra-Estrutura e Indústrias de Base, (Abdib, 2003) tem reunido com constância os agentes dos setores de geração, transmissão, distribuição, regulação, comercialização, financiamento, construção e montagem, para equacionar a conta, que não bate faz tempo. O problema é gigantesco, o esforço pela solução está sendo equânime e a saída está longe de ser, isoladamente, uma solução de mercado ou de Estado.

Costa (2003) divulga que somados reajustes ocorridos desde a privatização, houve uma elevação no valor da conta de energia elétrica de aproximadamente 63%, maior que o dobro da inflação do período de março/2000 a março/2003 e concessionárias continuam reclamando por mais e mais aumentos em nome do seu equilíbrio econômico-financeiro. Segundo o Instituto de Desenvolvimento Estratégico do Setor Elétrico "[...] o que mais se viu nos últimos anos foi o direito do consumidor ser vilipendiado! De 1995 a 2002 a tarifa média residencial no Brasil subiu 166% contra uma inflação de 85%" (INSTITUTO..., 2003).

2.2 Conversor eletromecânico

2.2.1 Motores elétricos

O motor elétrico, é um conversor eletromecânico que, baseado em princípios eletromagnéticos, converte energia elétrica em energia mecânica, ou vice-versa, quando passa a se chamar gerador. (BORTONI e SANTOS, 2001, p.350).

Os motores elétricos subdividem-se em duas categorias básicas: os motores de corrente contínua (CC) e os motores de corrente alternada (CA). Os motores de corrente contínua são, em geral, utilizados em serviços que requerem controle preciso de torque e/ou da velocidade. Esse motor possui a grande virtude de ajustes da velocidade e do torque, independentes em amplas faixas e por vários métodos (ajuste de fluxo, ajuste da resistência de armadura ou ajuste da tensão de armadura), garante o bom desempenho em certas atividades específicas, (OLIVEIRA, 1999, p.16). Por outro lado, sua eficiência energética é acanhada, requer a instalação de retificadores, operam em baixas velocidades e apresentam de 20 a 40% a mais de massa, para uma mesma potência, o que eleva o custo de aquisição, e manutenção, relativamente aos motores equivalentes CA, (POMILIO, 2000, p.10-1). Os motores de CA estão divididos em: - síncrono, - assíncrono, sendo este mais conhecido como de indução.

a) Motor síncrono

O motor síncrono é de velocidade constante, composto de um enrolamento estatórico, parte estacionária da máquina, quando alimentado, (sistema trifásico), devido à distribuição espacial, resulta em um campo magnético girante, sincronizado à frequência da rede de energia elétrica que o alimenta. Um ímã permanente ou outro enrolamento, na parte girante chamada de rotor (de pólos salientes ou lisos), é excitado por uma tensão CC, deve gerar um outro campo estacionário, no rotor que, interagindo com o campo girante produzido no estator, produz torque no eixo com uma rotação igual à do próprio campo girante. O maior conjugado que o motor pode oferecer está limitado pela máxima potência que pode ser cedida antes da perda de sincronismo, isto é, quando a velocidade do rotor se torna diferente da velocidade do campo girante, ocasionando a parada do motor (tombamento). A excitação determina também as porcentagens de potência ativa que o motor retira da rede, para cada potência mecânica solicitada pela carga.

A rotação do eixo de um motor síncrono (rotação síncrona) é dada por:

$$n = 120 \cdot f / p \quad (\text{Eq. 2.4})$$

onde: n = rotação síncrona (rpm), f = frequência (Hz), p = número de pólos.

No Brasil, a frequência de rede é padronizada, 60 Hz, e comumente é encontrado no mercado n (rpm) = 3600, 1800, 1200, e 900, correspondentes a $p = 2, 4, 6$ e 8 , (WILK, 1999, p.3). Os motores síncronos apresentam bom rendimento relativamente aos outros motores e fator de potência ajustável (podendo ser unitário). No entanto, o preço deste tipo de motor é relativamente elevado, principalmente quando se trata de motores de pequena potência. Sua aplicação fica restrita a acionamentos especiais, a equipamentos de grande potência que requerem velocidades invariáveis em função da carga.

b) Motor assíncrono ou de indução

- Histórico do motor de indução

Desde o descobrimento do campo girante pelo croata-americano, Nicolas Tesla, em 1887, e do motor de indução pelo Eng^o Michael Von Dobrovolsky, existe uma longa história de desenvolvimento. Inicialmente com objetivo de conseguir potências e conjugados que atendessem às mais diversas condições de carga e, posteriormente, na competição dos mercados, o desenvolvimento tecnológico produziu motores com menores quantidades de materiais e de custos reduzidos. Atualmente os esforços são focados para redução das perdas, aumento do rendimento e conseqüente redução de consumo de energia, Augusto (2001, p.19). Um bom exemplo é a relação peso/potência que, em 1891, era da ordem de 88 kg/kW, e passou para 5,7 kg/kW nos dias atuais, como mostrado na figura 2.6. Esta redução de peso se deve principalmente à novas tecnologias de matérias, em especial, e na redução da secção dos condutores, obtendo-se a mesma potência. (BORTONI e SANTOS, 2001, p.350).

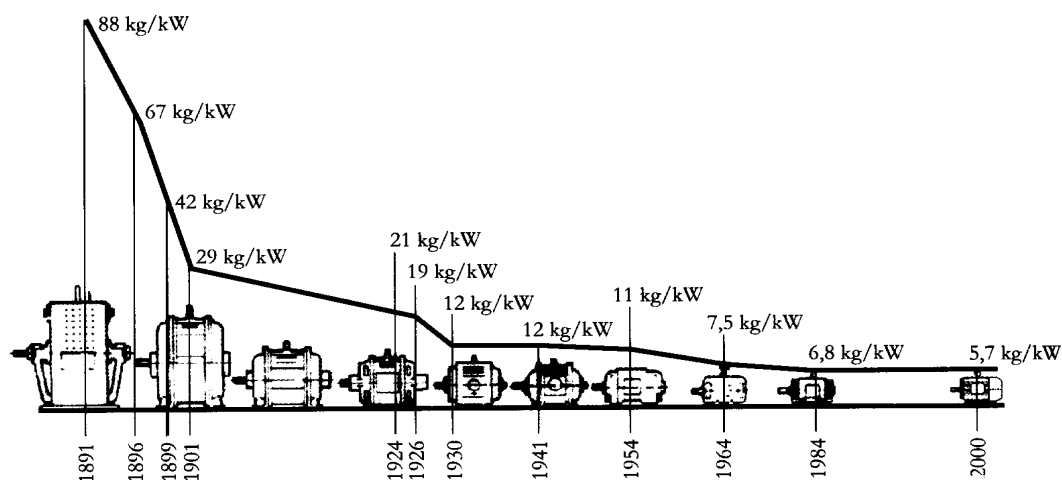


Figura 2. 6: Evolução dos motores elétricos (BORTONI e SANTOS, 2001, p.350).

O motor de indução tornou-se o mais utilizado equipamento para o acionamento e é certo que permanecerá com principal fonte de energia mecânica [conversor de energia elétrica

para mecânica] em um futuro previsível. Isso se deve à sua simplicidade de construção, pouca manutenção, confiabilidade, eficiência relativamente alta para a condição de plena carga, pouco volume e baixo custo, (SOMAR, 2001).

Segundo Suemitsu (2000, p.4), “os motores de indução trifásicos continuam sendo os mais utilizados na indústria, não só devido à sua simplicidade e robustez, mas também porque os fabricantes já possuem uma infra-estrutura de fabricação que possibilita a construção de motores de melhor desempenho com menor custo”, confiabilidade e boa eficiência relativa sob certas condições de trabalho.

“Coletivamente aos motores de indução é atribuído o título de maior consumidor de energia elétrica do mundo”, SOMAR (2001). É quem mais consome energia ao longo da cadeia produtiva e o custo da energia elétrica por eles consumida é um significativo componente do custo final dos produtos.

Este quadro torna-se importante, pois:- Motores são dimensionados por critérios onde o conjugado máximo motor é sempre maior que o conjugado resistente em regime, incluindo uma margem de segurança de 20%, (AUGUSTO, 2001, p.73).- Para Oliveira (1999, p.13), é comum encontrar motores acionando cargas inferiores à sua capacidade nominal, sobredimensionados, acarretando baixos rendimentos, o que agrava o quadro de desperdício. Em muitas instalações, os motores, por requisito do processo, operam em regimes de cargas variáveis, alternam momentos de carga plena ou quase plena, com momentos de pouca carga ou mesmo a vazio (nenhuma carga) ou em ciclo de trabalho (*duty cycle*).

- Características

Os motores assíncronos, por serem robustos e mais baratos, são os motores mais largamente empregados. Nestes motores, o campo girante, desenvolvido nos enrolamentos situados no estator como, nas máquinas síncronas, tem a velocidade síncrona e seus enrolamentos são alimentados pela rede de energia elétrica. Esse campo induz corrente em um outro enrolamento (efeito do transformador), no rotor, que sua vez, cria um campo magnético que, interagindo com o campo magnético do estator, dá origem ao torque necessário ao funcionamento da máquina. Teoricamente, para o motor girando em vazio e sem perdas, o rotor teria também a velocidade síncrona. Entretanto, devido às perdas inerentes ao processo de conversão e ao conjugado externo, a velocidade do rotor diminuirá, na justa proporção necessária, para que, a corrente induzida pela diferença de rotação entre o campo girante (síncrono) e o rotor, passe a produzir um conjugado eletromagnético igual e oposto ao conjugado aplicado. Este tipo de motor possui várias características próprias, que são definidas e demonstradas em diversas obras dedicadas a esse assunto. A rotação do motor, ou seja do rotor que está montado sobre o mancal eixo é dada por:

$$n_t = \{120.f(1-s)\}/p, \quad (\text{Eq. 2. 5})$$

onde, n_t = rotação de trabalho (assíncrona) em (rpm), f = frequência (Hz), p = número de pólos e s = escorregamento, que é a diferença relativa entre a rotação do campo girante, ou seja, a síncrona n_s , e a rotação de trabalho (n_t) $\rightarrow s = (n_s - n_t) / n_s$ (EBERLE, 2001, p.14). Portanto os motores assíncronos operam em velocidade ligeiramente inferior à do motor síncrono correspondente, tipicamente cerca de 2% ou 3%, com pequenas variações em função de detalhes construtivos, do nível de carregamento, e em geral, apresenta rendimento considerado bom, porém inferior ao síncrono.

Os motores assíncronos se subdividem em dois tipos principais: - Rotor de barras ou de gaiola, comumente chamado de motores de Gaiola de Esquilo, pois seu enrolamento retórico é formado por barras curtocircuitadas, assemelhando-se a uma gaiola. - Rotor bobinado (de anéis), possui as mesmas características construtivas com relação ao estator, mas o seu rotor é bobinado com enrolamento trifásico, acessível através de três anéis com escovas coletoras no eixo. Esse tipo permite o ajuste da curva conjugado x rotação, pela variação da resistência retórica, inclusão de resistores externos. É largamente utilizado no acionamento de sistemas de elevada inércia e nos casos em que os conjugados resistentes em baixas rotações sejam altos, comparativamente ao conjugado nominal. (WILK, 1999, p.5).

Existem várias pesquisas sobre novos motores, a nível mundial, mas nenhum motor desenvolvido até o momento tem condições de suplantarem o motor de indução, em termos de relação custo/desempenho, em aplicações gerais. (SUEMITSU, 2000, p.4).

O estudo das perdas, embora tenha sido objeto de investigação por mais de 70 anos, ainda apresenta dificuldades consideráveis, segundo Luz et., al. (2001, p.1) "todos são baseados em métodos simplificados e, geralmente, difíceis de serem aplicados, seja por causa dos parâmetros empíricos relacionados ao tipo de material, ou pela necessidade de conhecimento rigoroso de todo o espectro harmônico da indução". Em um motor de indução, as perdas podem ser agrupadas da seguinte forma:

a) Perdas no ferro (estator e rotor)

São devidas às correntes induzidas no interior do material magnético, que, ao circularem, produzem perdas na forma de calor, são funções da frequência de operação e por isso podem ser desprezadas no rotor, uma vez que nesse, em regime, a frequência é baixa, e cerca de 2 ou 3% da frequência do estator, ficando as perdas no ferro restritas praticamente a este. Segundo Tabosa, (1998, p.9), representam de 15% a 30% das perdas totais, e Bortoni e Santos, (2001, p.351), fazem referência a 20%.

- Perdas por correntes parasitas (*Foucault*): Numa massa metálica sujeita à variação de fluxo, geram-se F.E.M. que induzem correntes na própria massa metálica condutora, chamada correntes parasitas. Essas correntes produzem uma Força Magneto-Motriz (F.M.M.) que, pela Lei de Lenz, se opõe à causa que a produz, isto é, ao movimento. O efeito destas correntes constitui uma perda de potência. A fim de se reduzir esta perda, o pacote magnético é construído com lâminas de ferro isoladas entre si. Com essa construção, o valor da F.E.M. produzida em cada lâmina é pequeno e atua sobre um circuito elétrico de pequena seção, o que reduz, consideravelmente, o valor das correntes parasitas e a correspondente perda.

- Perdas por histerese magnética: Resulta da constante reorientação do campo magnético sobre o pacote de lâminas de aço-silício do núcleo magnético, que se sujeita a magnetizar-se, percorre um ciclo de histerese todas as vezes que o campo magnetizante varia de $+\beta$ a $-\beta$ e deste novamente para $+\beta$, sendo a potência perdida proporcional à área da curva do ciclo.

b) Perdas por Efeito Joule no estator e rotor (no cobre)

As perdas por efeito Joule são as que se verificam nos condutores estatórico e rotórico, por efeito da passagem da corrente elétrica. Segundo Tabosa, (1998, p.10), “são denominadas por perdas ($I^2.R$), onde R é a resistência do enrolamento e I a corrente” Para Tabosa, (1998, p.10), e as perdas no rotor respondem por cerca de 15% a 25% e no estator por 25% a 50% das perdas totais “; enquanto Bortoni e Santos, (2001, p.351), fazem referência a 20% para o rotor e 40% para o estator. Para Augusto (2001, p.36) são responsáveis à plena carga por cerca 40% das perdas e variam com o quadrado da potência desenvolvida no motor .

c) Perdas mecânicas

As perdas mecânicas são devidas aos atritos nos mancais e a ventilação, dependem do tipo de mancal, dos processos de lubrificação, dos sistemas de ventilação e da velocidade de rotação do rotor. Segundo Tabosa, (1998, p.10), entre 2% e 15% das perdas totais, e Bortoni e Santos, (2001, p.351) referem-se a 7,5%.

d) Perdas suplementares, adicionais ou extraviadas (*SLL-Stray Load Losses*)

Outras perdas se verificam no decorrer do funcionamento da máquina, devido a alguns fatores como fluxo de dispersão, distribuição não uniforme da corrente, imperfeições mecânicas e irregularidades no entreferro. Segundo Tabosa, (1998, p.11) “variam, aproximadamente, com o quadrado da corrente de carga” e representa entre 5% e 20% das perdas totais, enquanto Bortoni e Santos (2001, p.351) referem-se a 12,5%.

As perdas e o ruído têm sido investigados por várias décadas, porém, dúvidas persistem ao longo dos anos, bem como abordagens analíticas de modelos não permitem a obtenção de resultados satisfatórios, já que utilizam formulas baseadas em geometria simplificada, tanto no aspecto das variáveis eletromagnéticas, como variáveis mecânicas. Em termos de estado da arte, segundo Luz, (2001, p.1) ‘busca-se desenvolver modelos mais representativos e gerais, e que não sejam tão dependentes de parâmetros empíricos, busca-se utilizar métodos numéricos, tais como o Método de Elementos Finitos (MEF) e o Método de Elementos de Contorno (MEC)’.

2.2.2 Classificação dos isolamentos e categorias dos motores

Na conversão da energia elétrica em mecânica, tais perdas se manifestam na forma de energia térmica, ocasionando o aquecimento das diversas partes da máquina. A maior temperatura deve ser limitada para garantir o adequado desempenho do sistema isolante dos enrolamentos, pois todos os materiais isolantes começam a deteriorar-se a uma determinada temperatura. A máxima potência disponível em dado motor é limitada pela máxima temperatura permissível para os materiais isolantes empregados. Os sistemas de isolamento elétrico são agrupados em Classes de Isolamento, segundo sua temperatura característica, que limita a temperatura superior que o material pode suportar continuamente, sem que seja afetada sua vida útil. As classes de isolamento são apresentadas na figura 2.7. ‘As classes B e F são as mais utilizadas em motores de indução, atualmente. A utilização de materiais de classe H em motores de indução é restrita, devido ao aumento de custo que o uso deste tipo de isolamento acarreta’, (OLIVEIRA, 1999, p.18).

Classe	Temperatura Max de Operação	Materiais ou Combinação de Materiais.
Y	90°C	Algodão, seda, papel e materiais similares, não impregnados nem imersos em dielétricos líquidos.
A	105°C	Algodão, seda, papel e materiais similares, imersos, ou impregnados em dielétricos líquidos como o óleo.
E	120°C	Fibras orgânicas sintéticas e outros materiais.
B	130°C	Materiais à base de poliéster e poliimídicos aglutinados ou impregnados com materiais orgânicos.
F	155°C	Materiais à base de mica, amianto e fibra de vidro aglutinado com materiais sintéticos como o silicone, poliéster ou epóxi.
H	180°C	Materiais à base de mica, amianto e fibra de vidro aglutinados com silicones de alta estabilidade térmica.
C	< 180°C	Mica, vidro, cerâmica e quartzo sem aglutinante.

Figura 2. 7: Classes de Isolamento, Temperaturas e Materiais Constituintes. (SANTOS apud OLIVEIRA, 1999, p.17).

Segundo Oliveira (1999, p.18), “Observa-se que especificamente, no caso de motores elétricos de indução, a temperatura não se distribui uniformemente ao longo de todas as partes do motor”. A figura 2.8 mostra uma foto termo sensível (SOMAR, 2001), e diferentes temperaturas internas em um banco de motores de induções.



Figura 2. 8: Foto termo sensível de motores (SOMAR, 2001).

A temperatura do ponto mais quente do enrolamento deve ser mantida abaixo do limite da classe. A temperatura total é equivalente à soma da temperatura ambiente, da elevação de temperatura Δt e da diferença entre a temperatura média do enrolamento e o seu ponto mais quente. As normas de motores fixam a máxima elevação de temperatura Δt , de maneira que a temperatura do ponto mais quente fica limitada, considerando-se:

- A temperatura ambiente é, no máximo, 40°C, por norma, e acima disso as condições de trabalho são consideradas especiais. “A diferença entre a temperatura média e a do ponto mais quente não varia muito de motor para motor e seu valor estabelecido em norma, baseado na prática é: 5°C para as classes A e E, 10°C para a classe B e 15°C para as classes F e H”, (OLIVEIRA, 1999, p.18).

As normas de motores estabelecem um máximo para a temperatura ambiente e especificam uma elevação de temperatura máxima para cada classe de isolamento, limitando indiretamente a temperatura do ponto mais quente do motor. Os valores numéricos, bem como a composição da temperatura admissível do ponto mais quente, são indicados na figura 2.9.

Classe de Isolamento	A	E	B	F	H
Temperatura ambiente (°C)	40	40	40	40	40
Elevação de temperatura $\alpha \dots t$ (°C)	60	75	80	100	125
Diferença até o ponto mais quente(°C)	5	5	10	15	15
Temperatura do ponto mais quente (°C)	105	120	130	155	180

Figura 2. 9: Classes de Isolamento e Temperaturas Admissíveis (adaptado Eberle, 2001, p.20).

Os motores de indução trifásicos com rotor de gaiola são classificados em categorias, segundo a norma NBR 7094, conforme suas características de conjugado em relação à velocidade e corrente de partida (figura 2.10), (TABOSA, 1998, p.19).

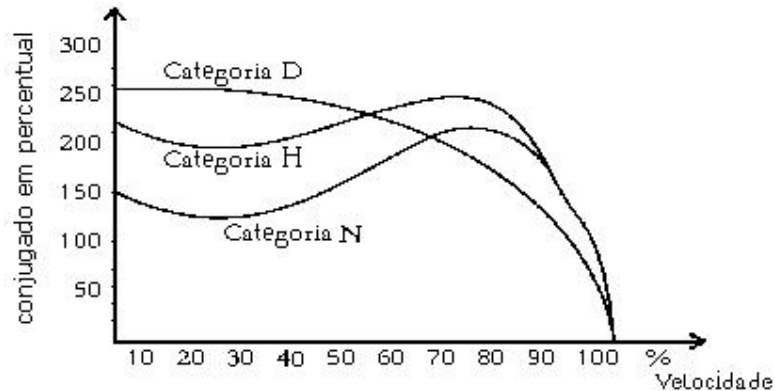


Figura 2. 10: Curvas de conjugado x velocidade, categorias: D, H e N, (TABOSA, 1998, p.19).

Tabosa, (1998, p.19), destaca alguns pontos:

- Conjugado nominal é o conjugado desenvolvido pelo motor à potência nominal, sob tensão e frequência nominais;
- Conjugado de partida ou com rotor bloqueado é o conjugado mínimo desenvolvido pelo motor quando o seu eixo está bloqueado;
- Conjugado mínimo é o menor conjugado desenvolvido pelo motor ao acelerar desde a velocidade zero até a velocidade correspondente ao conjugado máximo;
- Conjugado máximo é o maior conjugado desenvolvido pelo motor, sob tensão e frequência nominais, sem queda brusca de velocidade (*pull-out torque*);
- Escorregamento (s) nominal refere-se à diferença entre a velocidade do motor a plena carga e a velocidade síncrona.

Ainda segundo Tabosa, (1998, p.19), cada categoria é adequada a um tipo de carga:

- Categoria N - Possui conjugado de partida normal, corrente de partida normal e baixo escorregamento. Constituem a maioria dos motores encontrados no mercado e presta-se ao acionamento de cargas normais, como bombas, máquinas operatrizes e ventiladores;
- Categoria H - Possui conjugado de partida alto, corrente de partida normal e baixo escorregamento. Usados para cargas que exigem maior conjugado de partida, como peneiras, transportadores, carregadores, cargas de alta inércia, britadores, etc;
- Categoria D - Possui o mais alto conjugado de partida, corrente de partida normal e alto escorregamento (+ de 5%). Usados em prensas excêntricas, onde a carga apresenta picos periódicos e em elevadores e cargas que necessitam na partida de conjugados altos e corrente limitada.

2.2.3 Rendimento de um motor elétrico

Rendimento ou eficiência (η) de um motor elétrico expressa a habilidade com que é feita a conversão energética. O motor elétrico absorve e transforma energia elétrica da rede e tem em energia mecânica e disponibiliza no eixo. Rendimento (η) é o parâmetro que expressa a “relação entre a Potência Mecânica [Pu(W)] disponível no eixo do motor e a Potência Elétrica [Pa(W)] ativa que ele consome”, Tabosa, (1998, p.7). Tem-se a equação 2.6:

$$\eta = \frac{Pu(W)}{Pa(W)} = \frac{736 * P(CV)}{\sqrt{3} * V * I} = \frac{1000 * P(kW)}{\sqrt{3} * V * I} \quad (\text{Eq. 2. 6})$$

Onde: Pu(W) = Potência útil em Watt (potência mecânica disponível no eixo).

Pa(W) = Potência absorvida em Watt (potência elétrica que o motor retira da rede).

Na norma ABNT; NBR 5383, - Máquinas polifásicas de indução - Métodos de ensaio, constam diversos métodos para determinação do rendimento que podem ser divididos em dois grupos principais:

a) Métodos diretos

- Ensaio através de freio mecânico
- Ensaio através de dinamômetros
- Ensaio com máquina calibrada
- Ensaio de oposição elétrica e mecânica(*back-to-back*),

b) Métodos indiretos

- Determinação das perdas separadamente para sua adição
- Determinação das perdas totais
- Circuito equivalente
- Diagrama circular

Segundo Oliveira, (1999, p.19), nos métodos diretos, “o rendimento é calculado por meio de medições das potências elétrica e mecânica. Já nos métodos indiretos, o mesmo é obtido por meio de cálculo das perdas, normalmente, a partir da medição dos parâmetros do motor nos ensaios de rotor livre e bloqueado”. Detalhes sobre procedimentos e utilização dessa Norma podem ser obtidos em, Augusto (2001, p.45-54).

Bortoni e Santos (2001, p.352), observam que, dentre diferentes “métodos normalizados, algumas discrepâncias podem ocorrer entre os resultados, quando aplicados a um mesmo motor”, como é mostrado na figura 2.11

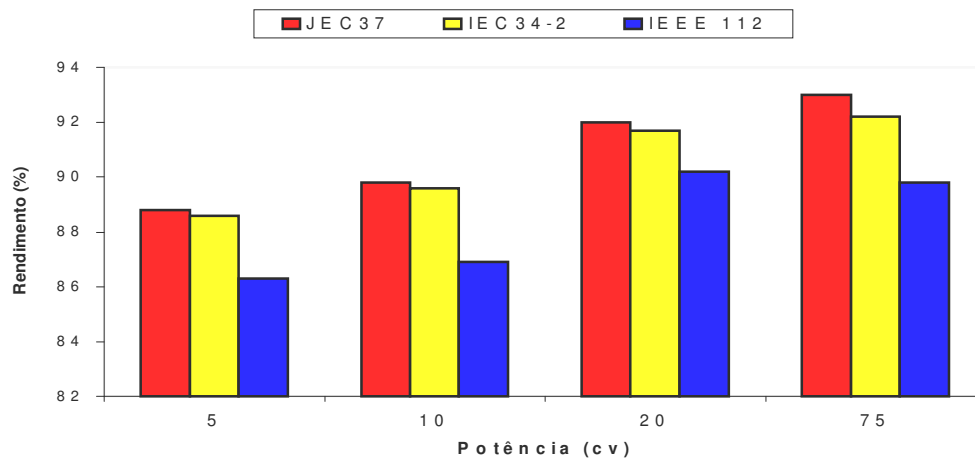


Figura 2. 11: Discrepâncias de resultados entre normas (BORTONI e SANTOS, 2001, p.352).
Nota: JEC37 - padrão no Japão; IEC34-2 - padrão na Europa; IEEE112 - padrão nos USA.

De acordo com Ferreira (2002), a quantificação exata e universal do rendimento de um motor elétrico continua a apresentar alguma divergência a nível mundial. Isto se deve à “existência de diferentes normas e procedimentos *standard*.” Este domínio é ainda alvo de investigação, principalmente no que cabe à quantificação desagregada das perdas envolvidas nos motores elétricos. Ainda, segundo Ferreira (2002), “Está em curso no ISR-Coimbra um estudo sobre as perdas extraviadas (*SLL-Stray Load Losses*), envolvendo dados laboratoriais de vários países europeus, americanos e asiáticos”. FERREIRA, (2002), apregoa que, no âmbito das normas, “está em desenvolvimento um sistema avançado de quantificação do rendimento e desagregação das perdas, com base na Norma IEEE112B (...) projeto é desenvolvido em ambiente LabView”.

Segundo Tabosa, (1998, p.17), “no Brasil, a norma NBR 5383, está sendo revisada para se basear no método de segregação das perdas com dinamômetro da norma Canadense CSA C390-M1985”.

2.2.4 Motores de alto-rendimento ou (A)

2.2.4.1 Comparação entre motor padrão (B) e alto-rendimento (A)

Numa primeira fase, a evolução dos motores era direcionada para oferecer produtos cada vez mais baratos, mais leves, menos volumosos, e não havia preocupação com a melhoria do rendimento. Há algum tempo, os fabricantes vêm desenvolvendo esforços para a redução das perdas. Hoje, “...a Indústria de motores coloca no mercado duas linhas de produtos denominados de: motores da linha-padrão, convencional, ou *Standard* e a linha de Alto-rendimento”, (TABOSA, 1998, p.i). No motor de alto-rendimento, trabalhou-se na redução das perdas, com o objetivo de se obter um rendimento superior ao do motor padrão, e

os rendimentos mínimos são definidos na Norma ABNT – NBR 7094/1996, (AUGUSTO, 2001, p.54) e (TABOSA, 1998, p.9). Possuem projeto otimizado, materiais e processos de fabricação melhores. Busca-se a redução em cada uma das parcelas que compõem as perdas, até o limite de viabilidade econômica, não sendo possível a redução sistemática das perdas acima de limites físicos e que se tornem proibitivo pelos acréscimos nos custos, Augusto (2001, p.54). A redução de cada uma das parcelas de perdas é conseguida no projeto e fabricação dos motores com as inovações tecnológicas e procedimentos:

- Perdas no ferro: são reduzidas com o uso de chapas de aço de baixas perdas magnéticas. Procura-se reduzir a densidade magnética pelo aumento do pacote magnético e outras melhorias no circuito magnético (TABOSA, 1998, p.10). O núcleo dos motores da linha de alto-rendimento possui maior volume de ferro ativo (AUGUSTO, 2001, p.55).

- Perdas por efeito Joule: -no estator, são reduzidas pela diminuição da resistência ôhmica por meio do aumento da seção dos condutores e redução das cabeças de bobinas. Normalmente o aumento de seção de cobre nos motores de alto-rendimento é de aproximadamente 10%, quando comparado com os dos motores *Standard*. São construídas bobinas que permitem excelente ventilação e contribuem para reduzir a temperatura de operação. No rotor: também são reduzidas de modo semelhante ao do estator. A excessiva diminuição da resistência do rotor compromete o conjugado de partida o que é um limitador para este procedimento. A fim de contribuir com a dissipação térmica e melhorar a ventilação, as barras do rotor são prolongadas de forma adequada, (TABOSA, 1998, p.10), (AUGUSTO, 2001, p.54), (BORTONI e SANTOS, 2001, p.357).

- Perdas mecânicas: Por possuírem menores perdas requerem ventiladores com menor capacidade, pode-se otimizar a refrigeração. A redução das perdas do atrito pelo uso de rolamentos de baixas perdas e com uma melhor lubrificação (lubrificantes sintéticos), melhor ajustamento, evitando esforços desnecessários. Como consequência indireta, tem-se a redução das vibrações, do nível de ruído produzido, (TABOSA, 1998, p.10), (AUGUSTO, 2001, p.54-5), (BORTONI e SANTOS, 2001, p.357).

- Perdas suplementares, adicionais ou extraviadas (*SLL-Stray Load Losses*): São minimizadas pelo desenho de enrolamentos que visam reduzir os fluxos dispersos nas ranhuras e dentes do estator e rotor e reduzir a pulsação do fluxo na região do entreferro. Os entreferros são menores e contribuem para a redução das correntes de magnetização e melhoria no fator de potência. Possuem maior precisão de montagem e mais criteriosa centralização do conjunto estator/rotor, (AUGUSTO, 2001, p.57), (BORTONI e SANTOS, 2001, p.357). Segundo Tabosa, (1998, p.11), “essas perdas são um importante componente

das perdas totais do motor, são as mais difíceis de serem reduzidas, entretanto podem apresentar uma grande contribuição para o aumento da eficiência do motor”. Elas podem ser reduzidas pela adoção de um projeto otimizado e cuidados de qualidade na fabricação.

Ações para redução das perdas são conflitantes; aumentar o comprimento do pacote de lâminas, para redução das perdas magnéticas, provoca aumento no comprimento dos condutores o que, por sua vez, aumenta suas perdas por efeito Joule. O projeto final desses motores deve ser fruto de um balanço das várias ações sobre os tipos de perdas, de modo a se alcançar uma melhoria de rendimento, mas mantendo-se os níveis de conjugado de partida, capacidade de sobrecarga, corrente de partida e fator de potência (TABOSA, 1998, p.8).

A figura 2.12 mostra uma comparação entre o rendimento nominal de motores com potências equivalentes das linhas: Padrão (B), e alto-rendimento (A).

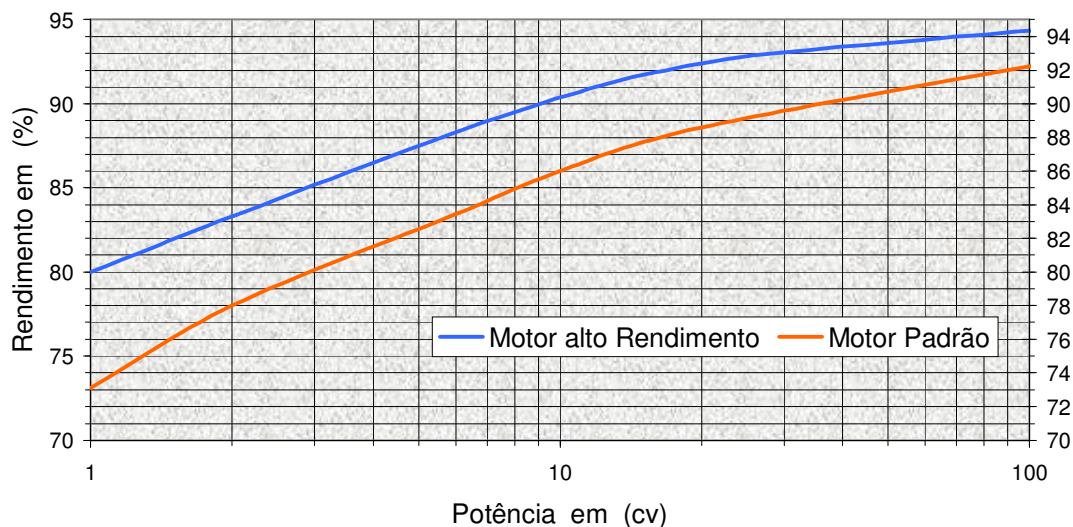


Figura 2. 12: Rendimentos nominais, motores da linha Padrão (B), e da linha alto-rendimento (A), (BORTONI e SANTOS., 2001, p.360).

A contínua busca de maiores rendimentos é limitada pelos substanciais acréscimos dos custos de fabricação, que alongam os retornos de investimentos, a que os usuários não estão dispostos a absorver. “No futuro pode -se esperar melhores rendimentos, proporcionados pelo desenvolvimento tecnológico e redução dos custos de fabricação”, (AUGUSTO, 2001, p.57).

2.2.4.2 Justificativa para utilização de motores alto-rendimento (A)

Os motores alto-rendimento (A) possuem valores de aquisição mais elevados, cerca de 30% a 50% para motores pequenos e alcançando percentagens bem maiores para motores grandes, do que os motores da linha *Standard*, e os rendimentos são de 2% a 6% superiores,

mesmo nas condições de baixos valores de carga. Ao longo da vida útil, o custo inicial de aquisição do motor de alto-rendimento deve ser compensado pelo menor consumo de energia em operação, (AUGUSTO, 2001, p.59). Para Tabosa (1998, p.11), “após algum tempo de operação, a economia obtida deverá compensar e até ultrapassar a diferença entre o seu preço e o do equivalente da linha padrão”. A economia no consumo de energia e o tempo de retorno do investimento, ao se optar por um motor alto-rendimento, ao invés de outro da linha padrão, “são funções dos seus rendimentos, do tempo de operação, da potência solicitada pela carga, da tarifa de energia elétrica e dos seus preços iniciais”.

Alguns softwares, de análise e estudo de viabilidade, são oferecidos pelos fabricantes. Porém, neles, “é considerado que o motor opera no regime de carga constante e possui rendimento único e igual ao nominal” (AUGUSTO, 2001, p.59). Quando a operação é sob cargas variáveis estima-se um fator de carga constante para todo o ciclo de operação. “Nos ciclos de operação com cargas extremamente variáveis, incorre-se em erro, quando da determinação da energia consumida nos carregamentos menores que 50 % do valor nominal, pois o rendimento não é constante e substancialmente inferior ao rendimento nominal”, (AUGUSTO, 2001, p.59).

As melhorias inseridas nos motores de alto-rendimento implicam vantagens adicionais em relação aos da linha padrão ou *Standard*, de difícil avaliação econômica, destacando-se: maior expectativa de vida útil, os fabricantes estimam em até 15 anos, contra 10 anos, apresentam menos defeitos, menor custo de manutenção, apresentam elevada reserva térmica, operam mais frios e disponibilizam maiores fatores de serviço, maior duração dos rolamentos e dos materiais de isolamento, operam com menores vibrações, mais silenciosos, introduzem menores aquecimentos no ambiente, e os períodos de troca ou de relubrificação dos rolamentos são maiores, as perdas (queda de tensão) nas instalações são menores por apresentarem em geral menores correntes de operação, (AUGUSTO, 2001, p.58).

A fim de se reduzir perdas, o rotor de um motor de alto-rendimento possui reduzido valor resistência (Ôhmica). Isto irá provocar uma menor inclinação da curva de conjugado na região de operação, resultando em maior rotação em condições nominais. Na figura 2.13, tem-se uma comparação das curvas de conjugado: o índice (A) para um motor de alto-rendimento, (B) Padrão, n é a rotação e M conjugado, (BORTONI e SANTOS, 2001, p.358).

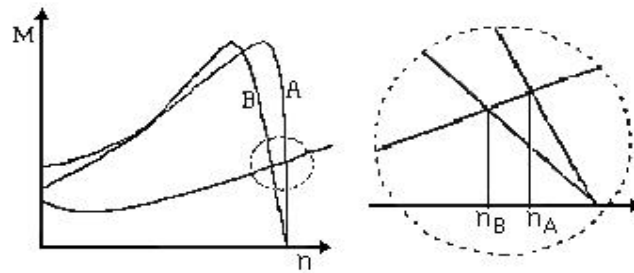


Figura 2. 13: Comparação das curvas de conjugado: índice (A) para alto-rendimento, (B) para o Padrão, n é a rotação e M conjugado (BORTONI e SANTOS, 2001, p.358).

Os motores de alto-rendimento (A) se apresentam como uma boa alternativa, muito embora não sejam as soluções definitivas para todos os problemas energéticos relacionados aos motores de indução, posto que são tão suscetíveis a fatores exógenos (condições do alimentador, método de partida, ambiente de trabalho, etc.), quanto os motores de projeto padronizado (BORTONI e SANTOS, 2001, p.357).

A substituição de um motor Padrão por um de alto-rendimento deve ser alvo de estudo acurado. Bortoni e Santos, (2001, p.353), chamam a atenção para algumas situações:

a) Acionamento de cargas centrífugas, bombas, sopradores e ventiladores, em uma planta em que os dutos e/ou outros componentes já são o limitador de vazão, pode resultar em aumento de consumo de potência manifestada por uma elevação de temperatura, que poderá refletir em uma redução da vida útil do equipamento. A razão disso é que a vazão na carga centrífuga é proporcional ao quadrado da velocidade, enquanto o acionamento irá solicitar uma potência proporcional ao cubo da rotação, conforme leis e equações de afinidade, (BORTONI e SANTOS, 2001, p.358), que estão detalhadas em, (AMÉRICO et al., 1998, p.53), (SOUZA, 1998, p.5), (VIANA, 2001, p.213-244) e (CATE/CEPEL, 2001).

b) Acionamentos de cargas com elevada inércia dependendo do ciclo de operação, as perdas decorrentes das freqüentes acelerações-desacelerações, sujeitas ao momento de inércia do conjunto (transitório), podem inviabilizar o motor de alto-rendimento, (BORTONI e SANTOS, 2001, p.359).

c) Pode-se observar que, dependendo do projeto do motor, a elevação do rendimento tende a reduzir o fator de potência. Isto pode ser parcialmente explicado, posto que as perdas contribuem com uma parcela significativa da potência ativa absorvida da rede; logo, a sua redução resulta em uma redução do fator de potência, (BORTONI e SANTOS, 2001, p.358).

2.2.5 Curvas características do motor de indução

A figura 2.14 mostra as características típicas de um motor de indução sob tensão e frequência nominais, valores de placa, onde $T = T_{em}/T_{rated}$ (torque de trabalho normalizado) e $I = I_r/(I_r)_{rated}$ (corrente de trabalho normalizado), plotados em funções: da velocidade do rotor $W = W_r/W_s$ (normalizado), do escorregamento (S) e da frequência f_{sl} .

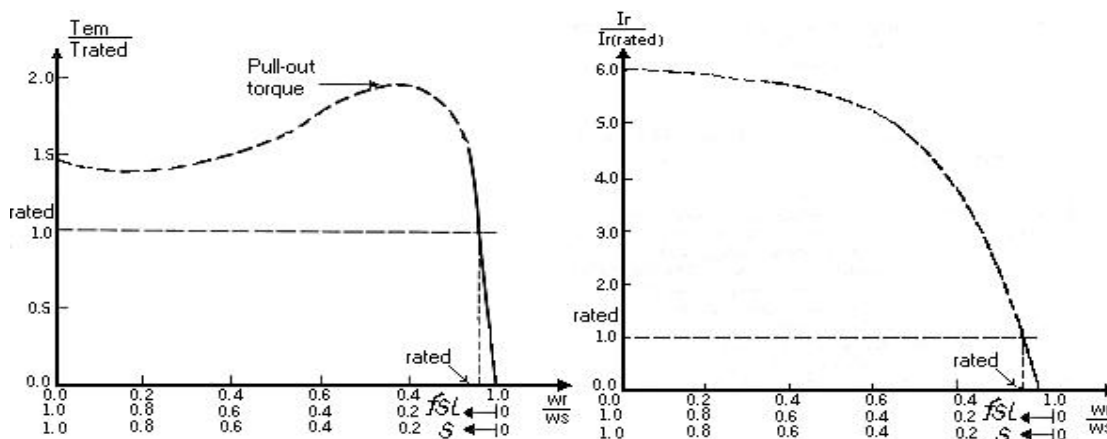


Figura 2. 14: T_{em} e I_r , em funções de velocidade. Regiões: linear \rightarrow linhas contínuas, e, não linear \rightarrow linhas pontilhadas. (MOHAN et al., 1995, p.405).

Para valores de T e I menores que a unidade, linhas contínuas, esses variam linearmente com S , W e f_{sl} , para valores maiores que a unidade, linhas pontilhadas as funções não são lineares. Mohan et al (1995, p.405), explicam e listam as razões da existência das regiões; linear e da não linear, em referência ao modelo desenvolvido nas páginas 400-404. Mohan et al., (1995, p.405) enfatiza “que no motor indução típico [...] s é mantido pequeno e, conseqüentemente, as porções pontilhadas das curvas características de torque e corrente não são usadas, quando em regime de operação” (permanente).

Apesar de todas as qualidades e pontos favoráveis, os motores de indução também possuem deficiências, as principais são:

- “Se um motor de indução é partido com tensão de linha [...] puxaria 6 a 8 vezes a corrente nominal como mostrado na figura. 2.15. (MOHAN et al., 1995, p.405), o que vai de encontro ao enunciado pela SOMAR, que acrescenta, “... o que pode causar instabilidade no sistema de suprimento de energia elétrica”.

- Inabilidade ao desenvolver torque muitas vezes maior do que o solicitado pela carga, “em especial durante a partida, quando chega a produzir 150% a 200% de torque necessário, impondo a carga, velocidade máxima em um pequeno intervalo de tempo, o que pode causar danos mecânicos ao equipamento que está sendo acionado”, (SOMAR, 2001, p.4).

A figura 12.15 mostra o torque de aceleração disponível, ($T_{acc} = T_{em} - T_{load}$), para o motor acionando uma carga, em que a interseção da característica do motor com a da carga determina o ponto de operação (estável), (MOHAN et al.,1995, p.406).

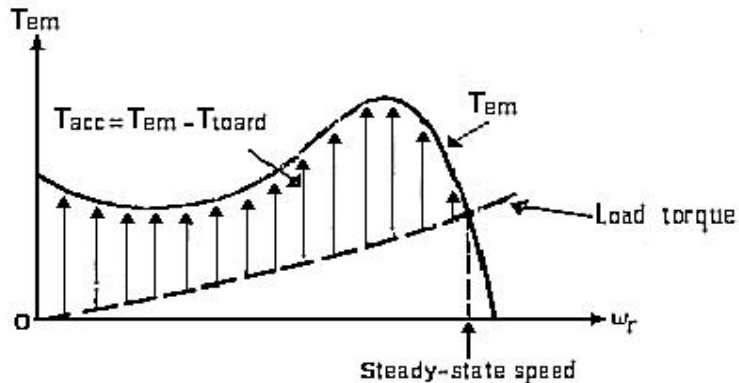


Figura 2. 15: Torque de aceleração disponível ($T_{acc} = T_{em} - T_{load}$).

Tipicamente os motores operam alimentados diretamente por uma rede elétrica (*on-line*), onde a tensão é idealmente constante, o que implica circulação de corrente de magnetização fixa, responsável pelo fluxo magnético. Para cargas leves, este fluxo assume a dimensão de um sobrefluxo (*over-fluxing*), uma vez que este se torna relativamente maior para o particular torque requerido (carga parcial). Segundo os dados da SOMAR, esse efeito pode ser responsável por algo ao redor de 30 a 50% das perdas totais dos motores, o que leva a baixo rendimento para operação com cargas leves. Este efeito torna-se especialmente importante nas instalações onde o motor possui carga leve, ou um regime (ciclo de trabalho) de carga variada.

As deficiências apresentadas podem ser mitigadas com a utilização da tecnologia dos controlados eletrônicos de energia elétrica, que devem ser associados ao motor elétrico de indução. A terceira parte deste capítulo é dedicada aos controlados eletrônicos de energia.

2.2.6 Dimensionamento de motores elétricos

Segundo Oliveira (1999, p.13), é comum encontrar motores acionando cargas muito inferiores à sua capacidade nominal, ou seja, sobredimensionados, acarretando baixos rendimentos e fator de potência. “Agravando ainda mais o quadro de desperdício característico dos sistemas de força motriz, há uma tendência generalizada de se especificar motores com potências significativamente superiores às necessárias, em nome de uma suposta reserva de potência, que, em contrapartida, iria aumentar a confiabilidade do equipamento, mas tais ações aumentam os gastos com energia elétrica”.

Para Tabosa (1998, p.16), no Brasil, o superdimensionamento de motores é uma das causas mais comuns de operação ineficiente e, as razões mais freqüentes são:

- Desconhecimento das características da carga;
- Desconhecimento de métodos para um dimensionamento adequado;
- Aplicação de sucessivos fatores de segurança nas várias etapas de um projeto
- Expectativa de aumento futuro de carga;
- A não especificação de fator de serviço maior que 1,0 para motores que esporadicamente apresentam picos de carga.

A figura 2.16 mostra a curvas características típica de um motor de indução, curva de rendimento (η), fator de potência (FP), rotação (rpm) e corrente (A) em função da carga instalada no eixo. Independentemente da potência nominal do motor, observa-se que, quanto menor for o carregamento, menos eficiente será a sua operação.

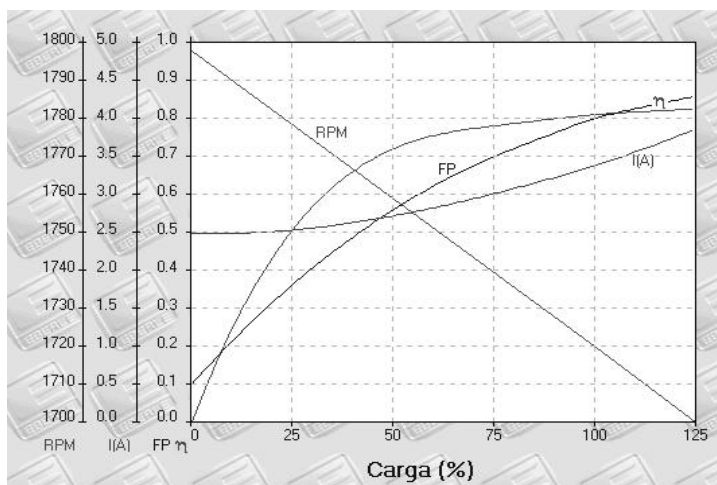


Figura 2. 16: Curvas características motor de indução do modelo 90S4. (EBERLE, 2001).

Para cargas pequenas, em relação a sua potência nominal, o rendimento é baixo, já que as perdas fixas tornam-se grandes, comparadas com a potência fornecida. É importante notar também o Fator de Potência (FP), ou seja, esse reflete o carregamento do motor.

Segundo Bortoni e Santos (2001, p.352), nem sempre é possível ajustar a potência do motor àquela efetivamente necessária para acionar uma determinada carga. “Primeiro, porque os motores oferecidos no mercado têm valores de potência padronizados, segundo, porque, em alguns casos, o regime de funcionamento e o carregamento das máquinas são variáveis”. A especificação adequada dos motores depende do tipo de trabalho ao qual o mesmo estará submetido. Quando o regime de trabalho for contínuo, deve-se especificar o motor para operar entre 75% e 100% da carga, o que corresponde à faixa de rendimento

máximo, Oliveira (1999, p.20) e Tabosa (1998, p.18). Bortoni e Santos (2001, p.366), comentam “[...] observe-se que o carregamento de um motor bem dimensionado deve se situar acima de 75% da potência nominal”, o que vai de encontro a Tabosa, (1998, p.16). Para Shoeps (1994, p.25), “... escolher o motor de modo que seu carregamento seja, no mínimo, superior a 50%, dando preferência a que ele seja maior que 75%”.

Nos casos de regime de cargas variável, existem vários métodos, dentre eles merece destaque o método quadrático, calculando-se a potência em regime contínuo equivalente que produz a mesma imposição térmica ao motor. Detalhes sobre procedimentos e utilização dos métodos podem ser obtidos em Augusto (2001, p.61-87).

2.2.7 Avaliação das condições de operação da máquina

2.2.7.1 Métodos de avaliação

Para Bertoni e Santos (2001, p.365), “A identificação de potenciais de conservação de energia em motores elétricos deve partir da avaliação das reais condições de operação da máquina. O carregamento de um motor pode ser entendido como a potência da carga instalada em relação à potência nominal do motor”.

A avaliação das condições de carregamento dos motores elétricos deve ser feita a partir das características elétricas, mecânicas e térmicas que exprimem o comportamento do motor sob várias condições operativas. Os métodos para a obtenção destas características podem ser classificados em dois grandes grupos, ou seja, os métodos normalizados e os métodos expeditos.

a) Métodos normalizados

Face à complexidade do ferramental necessário e das condições excepcionais para a sua realização, exigem a utilização de sofisticados equipamentos em ambiente de laboratório. Conforme apresentado item 2.2.3, Rendimento de um motor elétrico (p.43), os métodos normalizados apresentam muitas dificuldades de ordem operacional e alguma discrepância pode ocorrer entre os resultados quando aplicados a um mesmo motor.

b) Método expedito

De fácil execução, destacam-se: diagrama circular inverso, circuito equivalente, obtido por meio de dados de catálogos e o método da linearização, Bortoni e Santos (2001, p.353). Estes métodos utilizam-se de equipamentos menos sofisticados: amperímetros e wattímetros alicate, tacômetros digitais e, se disponível, um de sistemas aquisição/análise de dados, são menos trabalhosos e devem ser executados em campo, nas condições operacionais.

Bortoni e Santos (2001, p.353), ressaltam

[...] que na aplicação destas metodologias [método] não se está interessado na determinação precisa do rendimento [...], mas sim, do carregamento, para a classificação do regime de carga e um eventual sobre-dimensionamento. Outras variáveis também devem ser avaliadas para a correta aplicação dos motores, pois [...] existem várias situações impostas pelo regime da carga que torna obrigatório o uso de motores com potências superiores à da carga para que estes consigam superar as demandas instantâneas da carga e também para que o motor não danifique.

Nestes casos, deve-se efetuar uma análise térmica, procurando avaliar o perfil de elevação de temperatura do motor durante o ciclo de trabalho. Observe-se que esta nunca deve ultrapassar a temperatura limite definida pela sua classe de isolamento, sob pena de redução da vida útil. Como regra prática, é aceita a chamada lei de Montsinger: operação de 8 a 10 graus acima da temperatura limite permitida pela classe de isolamento, reduz a vida útil do motor pela metade, (BORTONI e SANTOS, 2001, p.353).

2.2.7.2 Método da linearização

De acordo com Bortoni e Santos (2001, p.366), é simples e confiável “... este método se baseia no fato de que a curva de conjugado versus rotação, dentro da região de operação do motor, poder ser aproximada por uma reta”, o que vai de encontro a Mohan, et al., (1995, p.405), “... a baixos valores de fsl, (frequência de escorregamento), T_{em} (torque de trabalho) e I_t (corrente de trabalho), variam linearmente com fsl” (figura 2.17).

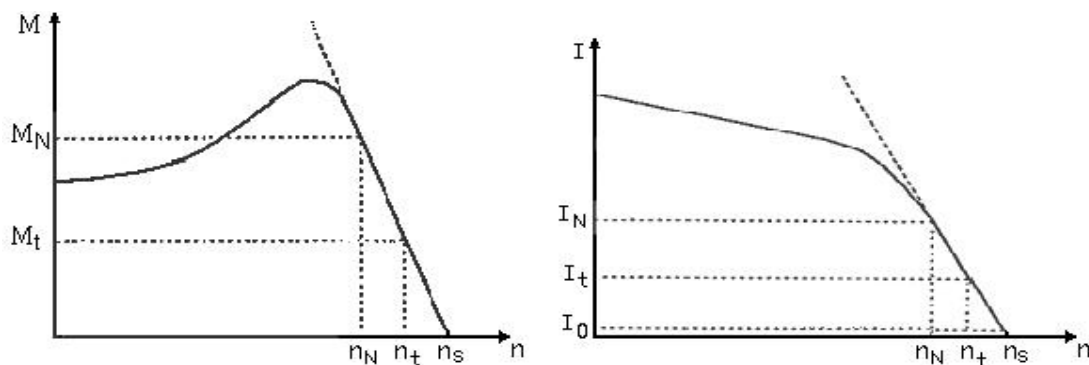


Figura 2. 17: Linearizações: curva de conjugado e de curva de corrente.

Nestas condições;

a) Se for possível o acesso ao eixo do motor, mede-se a sua rotação de trabalho nt , e obtém-se o conjugado, de trabalho Mt (equação 2.7):

$$M_t = M_N \cdot \left(\frac{ns - nt}{ns - n_N} \right) \quad (\text{Eq. 2.7})$$

Onde M é o conjugado (cv/rpm) e n é a rotação (rpm), os índices t , N e s correspondem a: trabalho, Nominal e síncrono. O conjugado nominal é dado pela equação 2.8:

$$M_N = \frac{P_N}{n_N} \quad (\text{Eq. 2.8})$$

A potência de trabalho (P_t) será dada pela equação 2.9:

$$P_t = M_t \cdot n_t \quad (\text{Eq. 2.9})$$

b) Na impossibilidade da medição da rotação, mas podendo-se operar com o motor a vazio, onde seja possível desacoplar a carga, pode-se estimar o seu valor de n_t a partir da linearização da curva corrente versus rotação do motor e das medições por meio de um amperímetro alicate, das correntes; - trabalho (I_t), - corrente em vazio (I_o). A rotação de trabalho será calculada conforme a equação 2.10:

$$n_t = ns - \left(\frac{I_t - I_o}{I_N - I_o} \right) (ns - n_N) \quad (\text{Eq. 2.10})$$

c) No entanto, nem sempre é possível desacoplar o motor da carga. A figura 2.18 apresenta um levantamento efetuado em motores de diversas potências e de diversos fabricantes nacionais, Bortoni e Santos (2001, p.368), onde a corrente a vazio percentual poderá ser obtida a partir da equação 2.11:

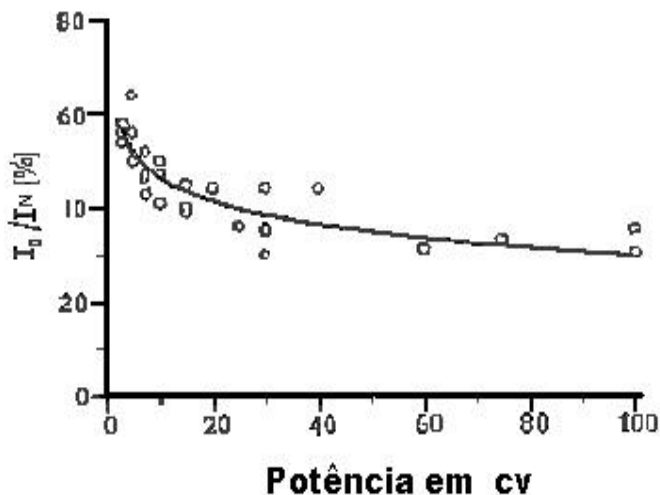


Figura 2. 18 Corrente em vazio percentual. I_o/I_N (%) em função da potência.

$$I_o (\%) = 63,6 - 7,4 * Ln(P_N) \quad (\text{Eq. 2.11})$$

onde: $Ln(P_N) \Rightarrow$ Logaritmo natural da Potência Nominal em cv.

2.3 Acionamentos (*Drives*) eletrônicos

Segundo Mohan et al., (1995, p.13-14) o tema [acionamentos eletrônicos] possui natureza interdisciplinar, envolve muitos campos dentro de engenharia, incluindo sistemas de potência, eletromagnetismo, máquina elétrica, eletrônica de estado sólido, conversores analógico/digitais e processamento de sinal, e outros, e que a combinação desse conhecimento nos conduz a um interessante e desafiante estudo.

2.3.1 Fundamentos

Tradicionalmente o motor de indução é ligado diretamente à rede de suprimento de energia elétrica (*on-line*), operando com tensão e frequência, impostas pelo sistema de energia elétrica conforme figura 2.19.

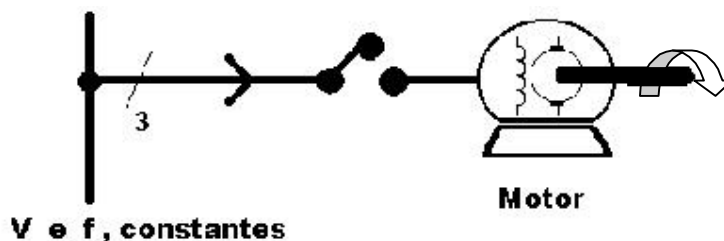


Figura 2. 19: Motor ligado diretamente à rede de energia elétrica, (*on-line*), tensão (V) e frequência (f) constantes.

Alguns dispositivos eletromecânicos como, chaves de partida, autotransformadores, etc, eram e/ou são inseridos, visando mitigar surto de corrente e/ou golpe mecânico. Existem também sistemas de servo-controle, capazes de modificar a característica de funcionamento do motor para melhor adequá-lo à necessidade da carga, (Ward-Leonard), controlar velocidade, torque, aceleração e a posição angular, mas estas ações tipicamente resultavam em menor eficiência energética (AMÉRICO, et al., 1998, p.3).

A comunidade científica investiu e vem investindo muito no desenvolvimento de sistemas de conversão de energia mais eficientes. Novos materiais e novas tecnologias surgiram, melhorando a eficiente mecânica e elétrica dos motores. Em termos elétrico e mecânico, muito pouco seja economicamente viável de ser feito. Os conhecimentos foram bastante expandidos, uma volumosa documentação foi gerada e uma grande variedade de motores, dispositivos semicondutores e conversores eletrônicos foram pesquisados. Como resultado, “.. acionamentos eletrônicos dos motores elétricos tiveram um acentuado desenvolvimento nos últimos anos, seus custos diminuíram e suas aplicações se popularizaram”, (SUEMITSU, 2000, p.1).

Acionamento eletrônico viabilizou-se pela significativa evolução dos dispositivos semicondutores, na década de 80, o surgimento dos microprocessadores e microcontroladores de alta velocidade e de novas técnicas de controle digital. Das dezenas de acionamentos pesquisados, apenas uma pequena fração tomou-se comercialmente viável, (SUEMITSU, 2000, p.1). Surgem os primeiros controladores eletrônicos, conversor estático, *softStart*, em substituição aos dispositivos eletromecânicos, agora também visando à eficiência energética. Nos anos 90, novos avanços tecnológicos, na microeletrônica com a integração em um único chip do microprocessador e seus periféricos como: conversores A/D, memórias RAM e ROM, saídas PWM, interface para comunicação serial com dispositivos síncronos e assíncronos, dentre outros, além de o custo total também ter decrescido. Surgem os DSPs ou ASICs, que são microcontroladores muito rápidos, e viabilizando novas técnicas de controle como Controle Direto de Torque (*Direct Torque Control* - DTC) e a utilização da lógica difusa ou lógica *fuzzy* e as redes neurais artificiais, (SUEMITSU, 2000, p.3).

Essas tecnologias viabilizaram os: *Drives*, acionadores eletrônicos que manipulam, que para MOHAM, processam, a energia a ser entregue aos motores, visando controle de velocidade e/ou torque e a eficiência energética. Mohan et al., (1995, p.367-447), dedicam-se e fazem estudo detalhado dos controles de velocidade e/ou torque e eficiência em motores, *chapter* 12, 13, 14, 15, sendo o 12, *Introduction to Motor Drives*, e o 14 dedicado ao *Induction Motor Drives*. *Drives* são interfaces colocadas entre a entrada de energia e o motor. "São três tipos *Drives*: dc motor *Drives*, *induction motor Drives*, *synchronous motor Drives*". (MOHAN et al., 1995, p.367). Na figura 2.19, o motor foi alimentado diretamente pela rede, condição (*on-line*), agora, com o *Drive* intercalado, entre rede de alimentação e o motor, figura 2.20, com a função de controlar, variando a tensão (V) e/ou frequência (f), condição (*off-line*), (AMÉRICO et al., 1998, p.3). Mohan et al., (1995, p.399), comentam "... o uso de *Drive* no motor de indução resulta em conservação de energia".



Figura 2. 20: Motor na condição *off-line*, controlado por *Drive*, conversor eletrônico, tensão (V) e/ou frequência (f) variáveis.

2.3.2 Chaveamento eletrônico

Os *Drives*, acionadores eletrônicos, são compostos por chaves eletrônicas, que são dispositivos semicondutores, possuem reduzidos tempos de comutação, (tempos de troca do estado ligado para o desligado e vice-versa) de décimos de milésimos a nanosegundos, reduzidas perdas, que permitem a conversão de tensão CC em CA e vice-versa e CA em CA. As pesquisas continuam para aproximar os dispositivos de chaveamento do modelo ideal, que devem possuir pequeno tempo de comutação (zero), pequena potência necessária para o comando, e: - quando em estado de condução; elevada (infinita) capacidade de condução de corrente, com queda de tensão desprezível (zero); - quando em estado de bloqueio, elevada (infinita) capacidade de suportar tensão de bloqueio, com corrente de fuga desprezível (zero).

As pesquisas concentram-se também no desenvolvimento de técnicas de comutação com tensão ou corrente zero (conversores ressonantes), (AMÉRICO, et al., 1998, p.6-9).

À medida que a tecnologia possibilite chaves cujas perdas e tempos de comutação sejam cada vez menores, torna-se possível uma maior quantidade de chaveamento por unidade de tempo, e correspondente aumentado da frequência de chaveamento. Esse aumento da frequência traz embutidos benefícios, tais como: -diminuição do conteúdo harmônico em baixas frequências; -diminuição do nível de ruído audível; -diminuição do tamanho e peso dos transformadores e filtros e dos custos, (AMÉRICO, et al., 1998, p.6-9).

Um dos dispositivos mais utilizados é o tiristor, que possui a característica de conduzir quando um pulso é aplicado em sua entrada de comando (*gate*), e assim permanece até que a corrente pelo dispositivo cai a zero, efeito que é chamado comutação natural ou própria. Américo et al., (1998, p.34) registra que o ponto de bloqueio fica determinado unicamente pela característica da carga e da fonte de alimentação. Na comutação forçada, o dispositivo semicondutor é desligado ainda que esteja conduzindo, quando o bloqueio independe das características da carga, e a corrente é assumida por outro dispositivo, geralmente um diodo.

Dentre os tipos de chaves eletrônicas, além do Tiristor, Américo et al., (1998, p.10), menciona: - Diodo, - GTO (*Gate Turn-Off Thyristor*), - *Bipolar Junction Transistor* (BJT), - FET (*Field Effect Transistor*), - IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*).

A figura 2.21 apresenta, graficamente, um resumo, comparando as características das principais chaves eletrônicas.

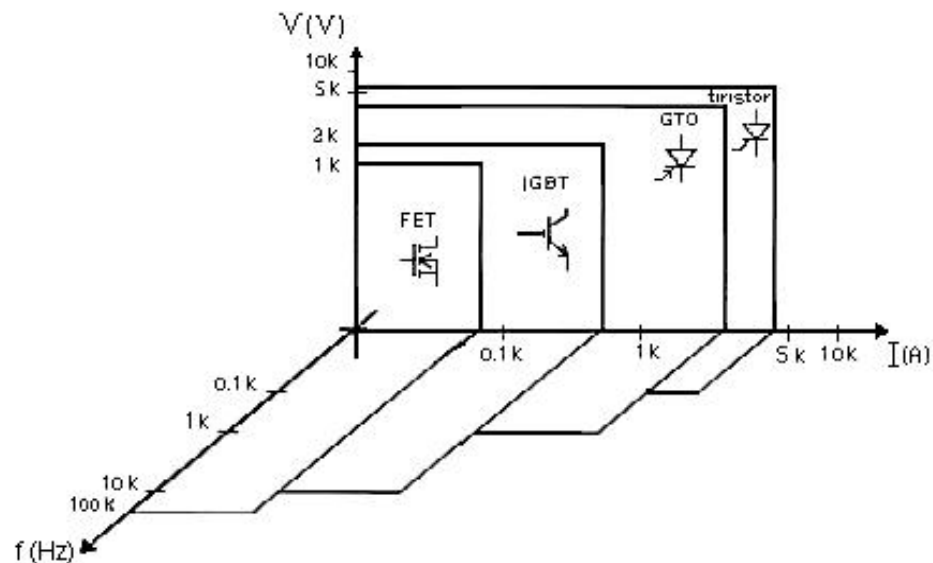


Figura 2. 21: Características das chaves eletrônicas (AMÉRICO, et al.; 1998, p.23).

Segundo Américo et al., (1998, p.9-10), a evolução tecnológica, possibilitou grandes avanços, e “Atualmente, deposita-se uma grande expectativa nos dispositivos semicondutores à base de diamantes, e em outros ainda pouco usados, tais como o MCT (*Mos Controlled Thyristor*), SIT (*Static Induction Transistor*) e SITH (*Static Induction Thyristor*)”.

2.3.3 Classificação dos acionamentos eletrônicos

Américo et al., (1998, p.23), propõem que os acionamentos eletrônicos sejam divididos em dois grandes grupos: -acionamentos para motores CC e para motores CA. Existem subdivisões em cada grupo. Para motores CC, são apenas dois tipos principais, Retificador e *Chopper*. Acionamentos para motores CA, são subdivididos em: -Acionamentos com e sem malha intermediária. A figura 2.22 esquematiza esta classificação

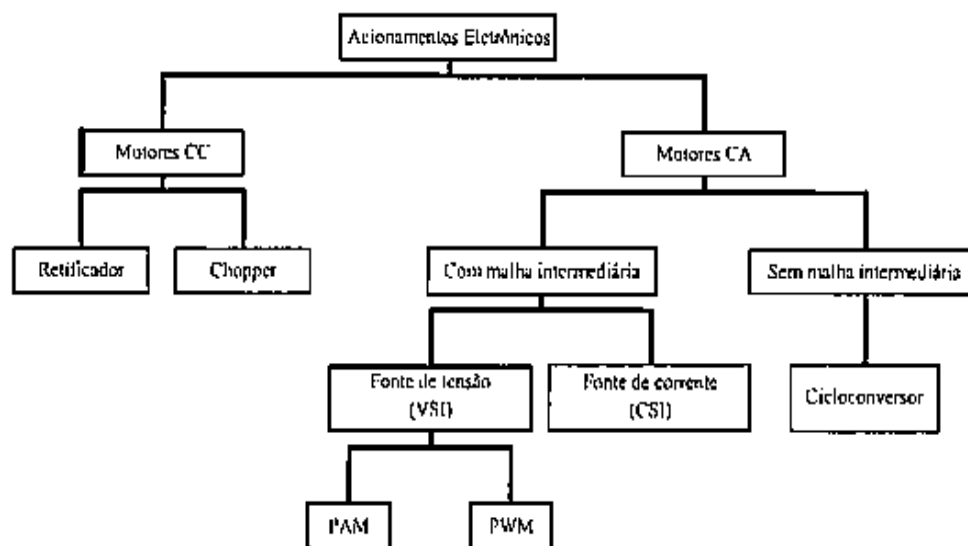


Figura 2. 22: Classificação dos acionamentos eletrônicos (AMÉRICO, et al.,1998, p.24)

O acionamento com malha intermediária subdividi-se: Fonte de Tensão (VSI- *Voltage Source Inverter*) e Fonte de Corrente (CSI-*Current Source Inverter*). Acionamento Fonte de tensão (VSI) pode ser subdividido sem PAM (*Pulse Amplitude Modulation*) e PWM (*Pulse Width Modulation*). A seguir descrê-se cada um, resumidamente.

2.3.4 Acionamentos eletrônicos para motores CC

Para Suemitsu (2000, p.3), “embora os acionamentos em CC ainda ocupem um certo espaço na indústria, a tendência é que desapareçam gradualmente, na medida em que acionamentos de CA, de maior desempenho, diminuam os custos”. O controle motor CC, velocidade/torque é feito por meio da variação da tensão CC aplicada na armadura e/ou no campo. A alimentação disponível define o tipo específico de acionamento eletrônico.

a) Chopper (CC-CC)

É o conversor usado quando a fonte de alimentação disponível já é CC. Essa tensão pode vir de uma bateria ou de um retificador a diodos. A tensão CC de saída V_o pode ser controlada desde zero até o valor da tensão CC de entrada V_i . O *Chopper* utiliza uma ou mais chaves para fazer esse tipo de controle. A tensão V_o é alterada por meio do controle do tempo em que a chave fica aberta ou fechada (T_{on} e T_{off}). Para ilustrar esse conceito de chaveamento, consideremos o circuito da figura 2.23.

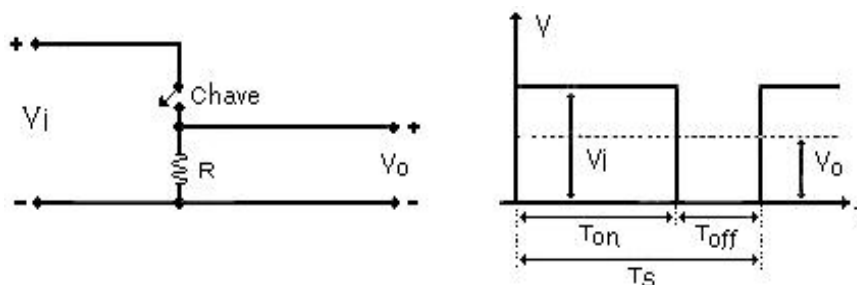


Figura 2. 23: Esquema simplificado do Chopper.

A tensão média de saída V_o é calculada da seguinte forma:

$$V_o = \frac{V_i \cdot T_{on}}{T_{on} + T_{off}} = \frac{V_i \cdot T_{on}}{T_s} = D \cdot V_i \quad (\text{Eq.2.12):}$$

onde, $D = \text{Duty cycle}$:

$$D = \frac{T_{on}}{T_s} \quad (\text{Eq. 2.13})$$

Em termos práticos, o tempo T_s é menor que 1 ms, o que corresponde à frequência de chaveamento do Chopper é maior que 1 kHz, tipicamente maior que 20kHz.

b) Retificador a tiristores (CA-CC)

No caso de a fonte de alimentação ser uma tensão CA, é usado industrialmente um retificador a tiristores. A figura 2.24 mostra estrutura do trifásico e do monofásico, com o controle de velocidade/torque feito por meio da variação do ângulo de disparo dos tiristores

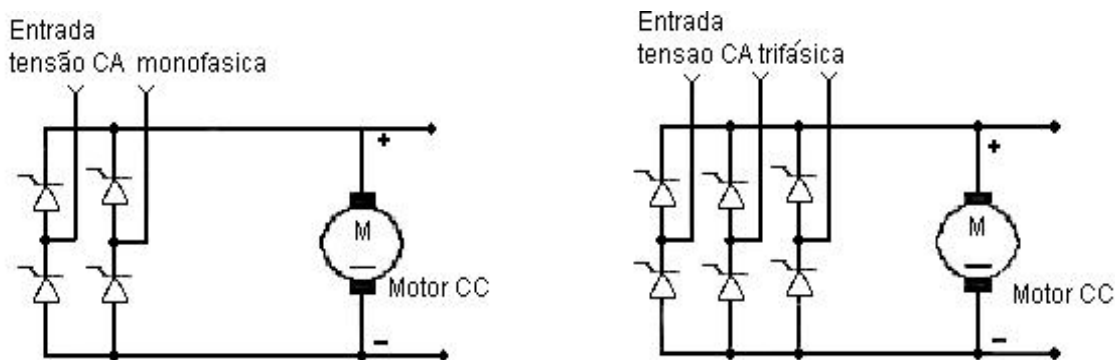


Figura 2. 24: Retificador a tiristores (Monofásico e Trifásico).

2.3.5 Acionamentos eletrônicos para motores CA

Neste caso, a gama de possibilidades de controle é maior. Conforme proposta de Américo et al., (1998, p.24) na figura 2.22 (p.59), esses acionamentos foram subdivididos em:

2.3.5.1 Acionamentos com malha intermediária

Esse tipo de acionamento eletrônico funciona por meio de uma conversão indireta (CA-CC-CA), ou seja, converte a tensão alternada da rede em uma tensão/corrente contínua, em seguida, converte novamente em uma tensão/corrente alternada. São basicamente constituídos de quatro unidades principais, como mostrado na figura 2.25.

- Retificador - unidade que recebe a tensão CA da rede e a converte em uma tensão/corrente CC. Esse retificador pode ser controlado ou não.
- Malha intermediária - unidade onde a tensão e/ou corrente CC é filtrada.
- Inversor - unidade que converte a tensão/corrente CC em uma tensão/corrente CA.
- Unidade de controle - fornece os sinais de controle para as unidades, que pode ser implementado usando diferentes princípios e técnicas, dependendo do tipo de acionamento.

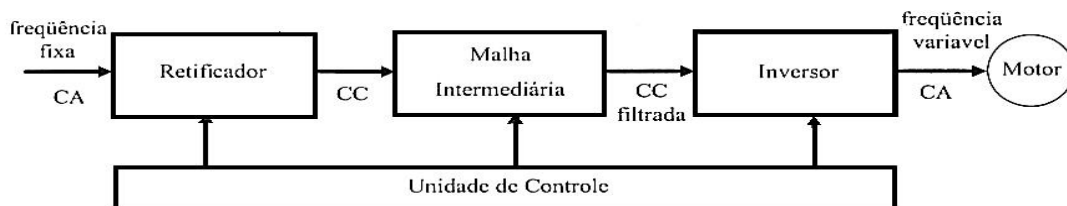


Figura 2. 25: Esquema básico dos acionamentos com malha intermediária.

O equipamento que exerce esta função, genericamente é referenciado como: Inversor Estático, o Inversor estático Tensão/Freqüência, *Variable Frequency Drives* (VFDs), usados para variar a velocidade de motores de indução a partir da variação de sua freqüência e tensão de operação. Quando tensão e a freqüência são modificadas proporcionalmente, o torque é mantido constante em toda a faixa de velocidade. Apresenta custo inicial elevado, mas a economia com energia pode proporcionar retorno satisfatório, (OLIVEIRA, 1999, p.24).

A malha intermediária comportando-se como uma fonte: - de tensão (VSI-*Voltage Source Inverter*). Fonte de tensão ideal caracteriza-se por impor uma tensão fixa sobre a carga conectada a seus terminais. Na prática, a fonte de tensão é constituída de um retificador em paralelo com um capacitor de elevado valor, ou - de corrente (CSI-*Current Source Inverter*). Fonte de corrente ideal caracteriza-se por impor uma corrente fixa independente da impedância da carga. A fonte de corrente é constituída de um indutor de elevado valor em série, com um retificador de tensão, (AMÉRICO, et al., 1998, p.26).

a) Fonte de Tensão (VSI - *Voltage Source Inverter*)

A malha intermediária funciona como uma fonte de tensão. A tensão CA oriunda da rede de alimentação é retificada para se obter uma fonte de tensão CC. A malha intermediária possui um capacitor de valor elevado. O retificador carrega o capacitor, fornecendo a ele a tensão CC. O capacitor carregado, atua como fonte de tensão CC para o inversor. A amplitude da fundamental da tensão CA de saída do inversor deve ser variável, assim como a sua freqüência. Surgem então duas possibilidades para fazer o controle da amplitude da tensão:

- Acionamento VSI-PAM

Constituído por tiristores, o retificador faz o controle da amplitude da tensão, enquanto que o inversor faz o controle da freqüência. Esse acionamento é denominado como VSI-PAM (*Pulse Amplitude Modulation*). A figura 2.26 ilustra o funcionamento desse

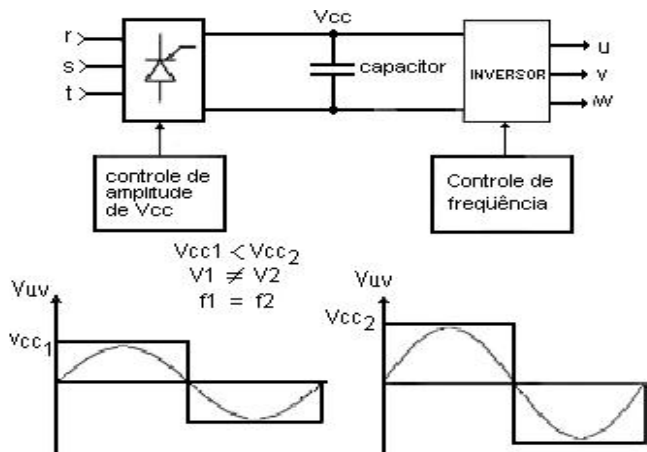


Figura 2. 26: Princípio do VSI-PAM (*Pulse Amplitude Modulation*).

acionamento e duas formas de tensão de saída entre fases V_{uv} , com a mesma frequência, ($f_1 = f_2$), e amplitudes diferentes ($V_1 \neq V_2$), (AMÉRICO, et al., 1998, p.26).

- Acionamento VSI-PWM

Trata-se do tipo mais difundido comercialmente, (AMÉRICO, et al., 1998, p.28). As variações:- amplitude da tensão CA e,- frequência, ocorrem no inversor. O retificador fornece ao capacitor uma tensão CC com a amplitude da rede. O inversor é responsável pelo controle da amplitude e da frequência da tensão CA de saída. Na figura 2.27 é ilustrado o princípio de funcionamento do VSI-PWM (*Pulse Width Modulation*). Observar-se duas formas de onda de tensão que mantêm a relação tensão/frequência constante, enquanto o valor da tensão do capacitor permanece constante.

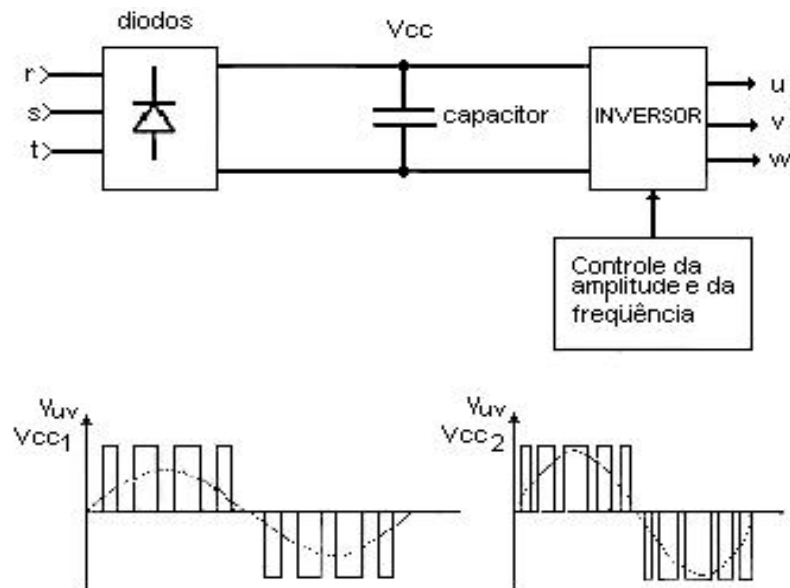


Figura 2. 27: Princípio do VSI-PWM (Pulse Width Modulation).

b) Fonte de Corrente (CSI - *Current Source Inverter*).

Agora a malha intermediária faz o papel de uma fonte de corrente. A tensão da rede de alimentação é retificada e com o auxílio de um indutor (L), tem-se a fonte de corrente. O acionamento CSI opera com uma ponte retificadora a tiristores na entrada. Na figura 2.28, é ilustrado o princípio de funcionamento e formas de onda de corrente por fase na saída do inversor. O inversor pode ser de comutação forçada, usando IGBT's, para baixas e médias potências ou de comutação natural, usando tiristores, no caso de potência elevada. Pode-se observar que o somatório das correntes de fase é sempre zero, enquanto a amplitude da corrente pelo indutor (L) é constante (I_{cc}).

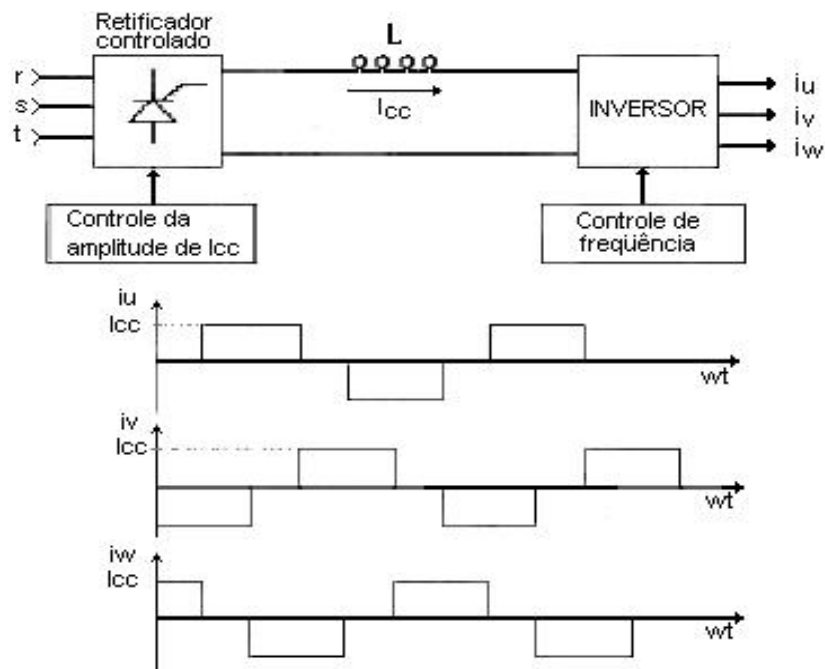


Figura 2. 28: Princípio do acionamento (CSI - Current Source Inverter).

2.3.5.2 Acionamentos sem malha intermediária

É a conversão “direta CA-CA. Nesse tipo de acionamento, a tensão CA e a frequência de saída são obtidas diretamente da tensão CA de entrada, sem a necessidade da etapa de corrente contínua CC”, (AMÉRICO, et al., 1998, p.36-7).

a) Cicloconversor

Para Barbi (2000, p.201), Cicloconversor é destinado a converter “uma tensão alternada de uma determinada frequência, numa tensão alternada com frequência inferior, sem passagem por estágio intermediário de corrente contínua. A conversão de uma frequência em outra é portanto direta”, e cita que os Cicloconversores são utilizados nos acionamentos de motores de corrente alternada e na produção de frequência constante a partir de um alternador de velocidade variável, (aeronaves e geração eólica).

Apresenta-se uma estrutura de um Cicloconversor monofásico a partir de tensão trifásica, constituída de duas pontes retificadoras a tiristores em antiparalelo, na figura 2.29. O sistema de controle, é obtido da tensão de entrada, comparada adequadamente com a referência, e determina os pontos de disparo dos tiristores dos conversores positivo ou negativo. A tensão de saída fica composta por parcelas da tensão de entrada, e sua frequência fundamental é igual à frequência de referência. (AMÉRICO, et al., 1998, p.36).

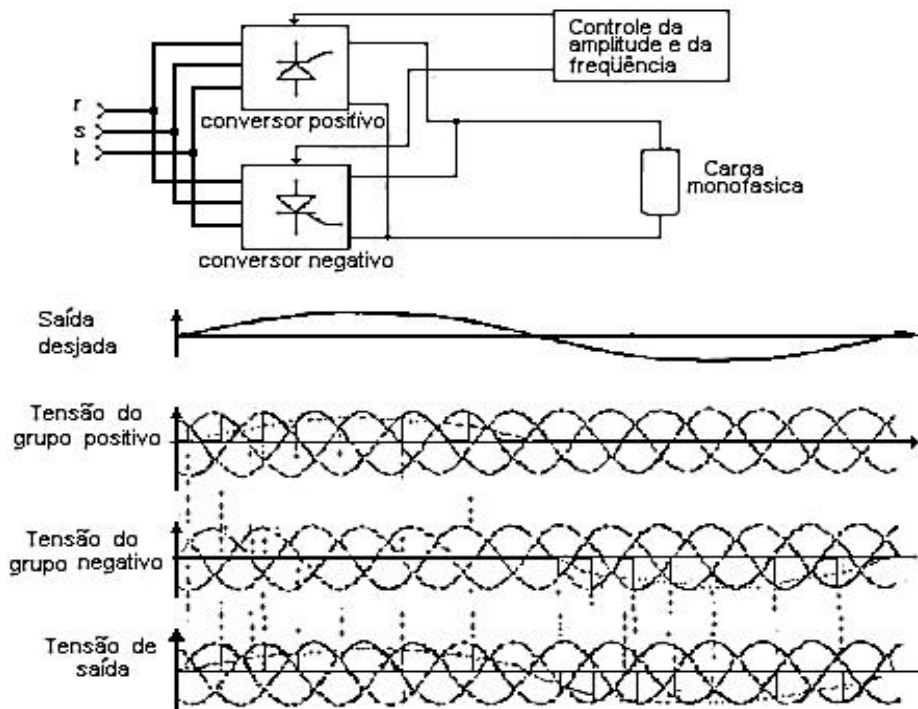


Figura 2. 29: Estrutura de um Cicloconversor monofásico a partir de tensão trifásica ($3\Phi / 1\Phi$).

Segundo Américo et al., (1998, p.23), o Cicloconversor é o acionamento eletrônico para motores AC sem malha intermediária mais empregado industrialmente. Américo et al (1998), encerram, com esse tipo de conversor, enquanto Pomilio (2000, p.10-1), enuncia “existem dois tipos de conversores CA-CA, que a partir de uma tensão de entrada alternada, produzem na saída uma tensão também alternada, mas de características distintas, seja em valor eficaz, seja em frequência, ou em ambas”. O cicloconversor permite produzir em sua saída frequência distinta daquela presente na entrada, enquanto no Variador de tensão, a saída possui a mesma frequência, mas o valor eficaz da tensão distinta daquela presente na entrada.

2.3.6 Acionadores (*Drives*) moduladores, variadores, gradadores

De acordo com Pomilio (2000, p.10-1), “... aplicações alimentadas em corrente alternada CA [tensão e frequência de rede], nas quais deseja-se alterar o valor eficaz da tensão e da corrente na carga, é usual o emprego dos chamados Variadores de Tensão”. Barbi (2000, p.225), designa esta estrutura de Gradadores. Segundo Pomilio (2000, p.10-1), recebe ainda outras designações: Contatores Estáticos, (Labrique e Santana), Controladores (Rashid e Sen). Mohan et al., (1995, p.428), faz referência a *Line-frequency variable-voltage Drives* e segundo ele, apesar de os conversores *variable-frequency variable-voltage Drives* serem “versáteis e proporcionarem um modo eficiente do uso da energia no controle de velocidade de motor de indução de gaiola, em algumas aplicações, pode ser mais barato usar *Drive* que utilizam a frequência de linha e tensão variável”.

Como aplicações típicas, Barbi (2000, p.225) e Pomilio (2000, p.10-1), citam: controle de temperatura; reguladores de tensão; acionamento de motores CA; partida suave de motores de indução; compensação de reativos em sistemas de potência.

Mohan et al., (1995, p.429), apresenta família de curvas de torque, para várias percentagens de V_s (tensão nominal), em função da percentagem da velocidade síncrona, e mostra como pode ser controlada a velocidade por meio da variação de V_s . De acordo com a categoria do motor, tem-se:

- Motor categoria N (Normal), de baixa resistência rotórica, operando com carga centrífuga, no qual o conjugado resistente varia aproximadamente com o quadrado de velocidade como em ventilador ou bomba (figura 2.30). O ponto de operação (A) é sempre o cruzamento das curvas, resultando em variação de velocidade, em decorrência da variação de V_s . Alerta que a operação seria instável caso a carga fosse de conjugado constante.

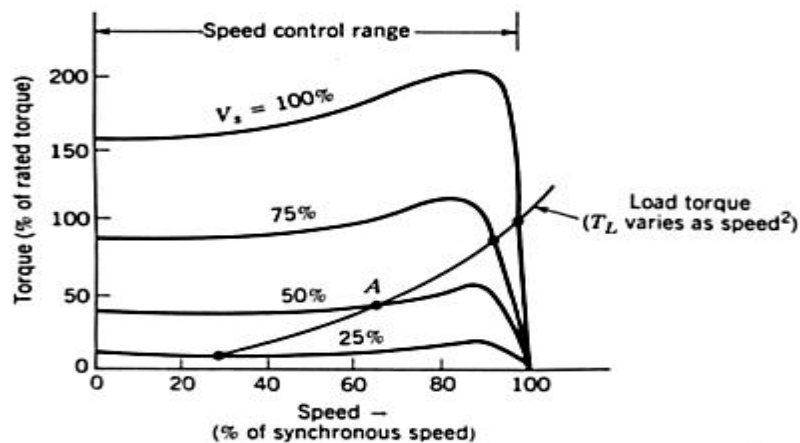


Figura 2. 30: Curvas de torque x velocidade (Categoria N), operando com carga centrífuga.

- Motor categoria D, de alta resistência rotórica, operando com conjugado resistente constante, o que é comum em máquinas de atrito, como esmeris e lixadeiras (figura 2.31).

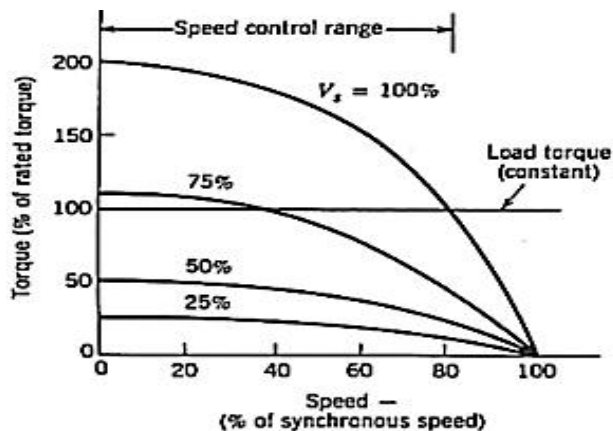


Figura 2. 31: Curvas de torque x velocidade (Categoria D), operando com carga constante.

Mohan et al., (1995, p.429), ressalta que esse procedimento ‘resulta em uma eficiência de energia muito pobre a baixas velocidades’ por causa dos grandes escorregamentos para baixas velocidades e o conseqüente aumento das perdas por efeito Joule, sendo que isso ocorre juntamente com a diminuição da ventilação, o que pode afetar a integridade do motor. Ainda segundo Mohan et al., (1995, p.429), ‘esta técnica é usada em motores fracionários para ventiladores e bombas. Motores fracionários geralmente são de fase única, mas essa análise é aplicável’. Também é usada para guindastes e levantamentos que têm velocidade independente do conjugado de carga, e opera com alto escorregamento requerido em uma porção pequena do ciclo de operação.

Os dispositivos semicondutores de potência empregados nesses conversores são, segundo Pomilio (2000, p.10-11), ‘... tipicamente, tiristores, uma vez que se pode contar com a ocorrência de comutação natural’. Em aplicações de baixa potência, pode-se fazer uso de TRIACs, enquanto para potência mais elevada utilizam-se 2 SCRs em antiparalelo, (POMILIO, 2000, p.10-1) e (BARBI, 2000, p.225). Um circuito prático para o controle da tensão do estator de um motor de indução é mostrado na figura 2.32.

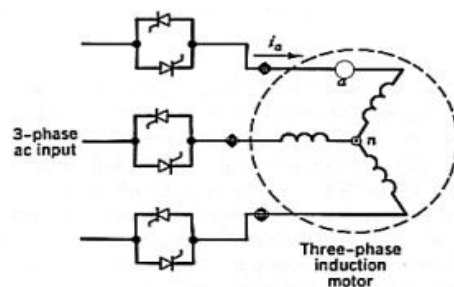


Figura 2. 32: Circuito de controle da tensão do estator de um motor de indução.

Consiste de três pares de tiristores em antiparalelo. Devido à interação entre as fases, não é possível analisar este circuito por fase. Em cada fase do motor pode ser representada por uma FCEM (Força Contra Eletro-motriz) em série com a indutância. As formas de onda da tensão de fase (V_{an}), e da corrente (i_a) são apresentadas na figura 2.33.

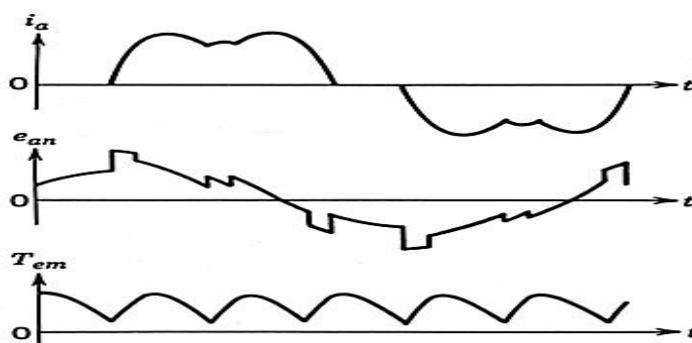


Figura 2. 33: Formas de ondas, tensão e corrente.

Mohan et al., (1995, p.430) alerta que a corrente do motor não é senoidal e seus componentes harmônicos dão origem a conjugado pulsante e altas perdas no circuito do rotor, comparando com uma alimentação senoidal, e que essas correntes não senoidais fluem também no sistema de alimentação.

2.3.7 Partida-parada suaves, *softstart-softstop*

Se em um motor de indução é partido com tensão de linha, condição *on-line*, puxaria 6 a 8 vezes a corrente nominal. Esta severa solitação de corrente de partida pode trazer danos tanto para o conjunto mecânico, quanto para a rede elétrica de alimentação (MOHAN et al., 1995, p.430). Para se reduzir esta corrente de partida, a valores aceitáveis, pode-se fazer-lo com tensão reduzida, a qual pode ser obtida com o circuito da Figura 2.32.

“*Softstarters*, são equipamentos projetados para suavizar a partida de motores, reduzindo correntes de partida, torções bruscas, vibração e outros”, (BORTONI e SANTOS, 2001, p.361). Com base no fato do torque do motor ser proporcional à tensão aplicada, seu aumento ou diminuição pode ser suave, o que vai assegurar uma partida ou parada suave para o motor e carga por ele dirigida. Começando o disparo dos tiristores com um pequeno ângulo de condução e aumentando este ângulo progressivamente, durante um período de tempo previamente selecionado, a tensão aplicada aos terminais do motor, vai de um baixo valor, aumentando suavemente até atingir a tensão plena da rede (*SoftStart*, figura 2.34-a). De forma análoga, podemos reduzir progressivamente o ângulo de condução, durante um período de tempo selecionado previamente, e a tensão aplicada aos terminais do motor, até um baixo valor, o que significa que o motor terá uma desaceleração suave (*SoftStop*, figura 2.34-b).

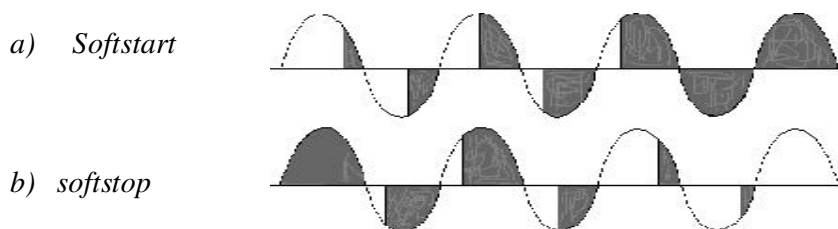


Figura 2. 34: Funcionamento, variação de tensão: a) softstart , b) softstop (SIEMENS, 2001).

Na partida a tensão pode ser reduzida, desde que o conjugado de partida seja suficiente para arrancar e acelerar a carga (tensão de pedestal). Após partir, com a aceleração, o escorregamento decresce de 1 (um) até um valor reduzido, o que faz que a corrente do motor se reduza até o valor nominal.

Em regime permanente, cada tiristor conduz por um ciclo inteiro, e podem ser curto-circuitados por contator eletromecânico, com os contatos ser em paralelo aos tiristores, e o *softstart* pode ser utilizado por outro motor (multiplex), em um sistema de partida

seqüencial de motores, com vistas à redução de perdas no sistema alimentador. É uma medida de baixo custo que leva a uma solução de compromisso entre os custos de operação e as restrições impostas pelo processo industrial, (BORTONI e SANTOS, 2001, p.361).

2.3.8 *Drives*, tensão variável e freqüência da rede

Em acionamentos com velocidades constantes, para minimizar as perdas do motor, pode-se utilizar o mesmo circuito de chaves de potência para variar V_s durante a operação em regime, sendo necessário acrescentar apenas um circuito de controle (MOHAN et al., 1995, p.430-1). Segundo Tabosa (1998, p.24), estando um motor superdimensionado, “[...] talvez seja possível aumentar o seu fator de potência e sua eficiência, alimentando-o com tensão reduzida”. Bortoni e Santos (2001, p.354-5), fazem um estudo do desempenho de motores de indução em função da tensão de alimentação. Constataram que: operando a 90% da tensão nominal e a 50% da carga nominal: o rendimento aumentou de 1 a 2 pontos e o fator de potência aumentou. Mais à frente, Bortoni e Santos (2001, p.361), comentam “[...] os controles aplicados a motores também são muito úteis no sentido de se reduzir o fluxo e conjugado, e conseqüente demanda de potência, quando da operação em baixas cargas”. Segundo Mohan et al., (1995, p.430), “...em um motor de indução mono ou trifásico, para a produção de um dado torque, as perdas do motor variam com a tensão do estator V_s ”. Assim é possível usar o circuito da figura 2.32 a para se “... obter a tensão de estator V_s de menor valor, na qual ocorrem as mínimas perdas, isso quando da redução da carga e, dessa forma, economizar energia” (MOHAN et al., 1995, p.430).

Em aplicações em que a velocidade do motor pode ou deve ser mantida constante, o *Drive* eletrônico Modulador de Energia, associado ao motor de indução, controla a potência aplicada ao motor em função das necessidades da carga. Para determinar as necessidades da carga, um microcontrolador com software de otimização, alimentado com dados sobre o fator de potência, gera os pulsos que comandam o conjunto de tiristores, por meio da variação do ângulo de disparo, atuando diretamente sobre o valor eficaz da tensão e da corrente, com isso, da potência, com a mesma freqüência da rede. A cada interstício do ciclo de rede, cerca de $1/60\text{Hz} \cong 1,66$ milissegundos, o controlador detecta o fator de potência e estima a carga demandada no eixo, ajustando adequadamente a tensão nos terminais do motor, modulando a corrente de magnetização que corresponda a um fluxo magnético suficiente apenas para vencer o torque requisitado no eixo. Quando o motor estiver na condição de carga leve, o sistema formado pelo modulador/motor pode salvar (deixar de gastar) alguma energia que era desperdiçada com excesso de corrente de excitação magnética e perda na forma de calor, vibração e ruídos (SOMAR, 2001), (ENERGYSMART, 2002), (SIEMENS, 2001). Na figura

2.34, tem-se o diagrama (SIEMENS, 2001) da seqüência das operações do *Drive*. Fazem uso dos sistemas de variação de tensão, modulando o valor eficaz da tensão e corrente e, portanto, da potência, aplicadas ao motor, buscando manter o $\cos \phi$ próximo a um valor ótimo.



Figura 2. 35: Diagrama da seqüência das operações do *Drive* (SIEMENS, 2001).

Perdas e, portanto, as economias de energia destacam-se se o motor estiver sobredimensionado, em regime de cargas parciais, ainda que por pequenos intervalos de tempo. Com o motor é alimentado diretamente pela rede de energia elétrica (*on-line*) que possui pressão elétrica, (tensão) idealmente constante, no Brasil tipicamente: 127V, 220V, 380V e 440V, e outras, o motor é levado a absorver uma corrente de magnetização maior, responsável pelo fluxo magnético maior para atender a um excesso de massa do pacote magnético, (maior massa de ferro). Este fluxo torna-se um *over-fluxing*, relativamente para o particular e pequeno torque requisitado pela pequena carga. Esta maior (excesso) corrente necessária à magnetização, implica uma perda por efeito Joule maior, e que, tipicamente para cargas leves, são responsáveis por algo ao redor de 30% a 50% das perdas totais dos motores (SOMAR, 2001). Nesta situação pode-se poupar (economizar) uma parcela de energia, que é desperdiçada, dissipada na forma de calor, vibração e ruídos. “A totalidade de energia economizada é significativa comparada com as perdas extras no motor, devidas às correntes harmônicas e devidas as suas quedas de tensão nos tiristores, apenas se o motor operar com cargas muito leves durante um período significativo”, (MOHAN et al., 1995, p.430).

Nos últimos anos, surgiram no mercado equipamentos para melhorar a eficiência energética dos motores de indução, cuja principio é o do *Drives* modulador de energia. Sendo produtos de alta tecnologia, quando do estabelecimento da estratégia de preços para seu lançamento e comercialização, (único dentre os elementos do mix de marketing que produz receita), no primeiro estágio do ciclo de vida, o de introdução do produto, tipicamente adotam a supervalorização, que Kotler (2000.p.329,478), denomina de *skimminig*, “extraíndo o máximo da camada mais alta, antes de baixar para atender aos demais níveis”.

A *EnergySmart*, uma divisão CEM (*Coast Energy Management*), projeta, fabrica, distribui e comercializa produtos para a economia de energia, disponibiliza o *Power Planner*, que é um controlador de energia para o motor de indução. “O mesmo foi inventado nos Estados Unidos, é usado em plantas industriais, fábricas, comércio e residências, em todo o mundo” (ENERGYSMART, 2002). Dados de catálogos apresentam ganhos práticos de 12% a 27%. São fornecidas aplicações típicas e formas de ondas.

A *Somar Environmental Systems* desenvolve e comercializa tecnologia para a administração, conservação e eficiência energética e meio ambiente, colocou no mercado o *Powerboss*, versões *Single* ou *Three Phase*, do *Intelligent Motor Controllers*, que monitora a energia demandada no eixo e atua reduzindo ou aumentando a energia elétrica disponibilizada ao motor, de acordo com a necessidade da carga. Segundo a Somar, o *Powerboss* proporciona um motor mais eficiente, com menores perdas por efeito Joule (menos quentes), mais silencioso, resultando no aumento da vida útil e reduzidos custos de manutenção. Cita exemplos práticos com economias variando de 5% a 40%. (SOMAR, 2002)

A Siemens possui na linha de *Softstar* um denominado **SIKOSTART**: *Siemens Ksquirrel-cage-rotor Optimization STARTer*, (SIEMENS, 2001), contendo a função Otimização, ou economia de energia, para atuar durante a operação em regime, e salvar alguma energia. Nos Manuais técnicos são apresentadas curvas de economia de energia que atinge o valor de 50%, mas apresenta economia somente para carregamentos menores que 60%. Permite interface via Simocode-DP para receber comandos de partida, parada e *reset*, enviar informações do estados de serviço, e falhas, além de frenagem (DC). É um equipamento robusto, não necessitado de tropicalização. (Siemens, 2001). Segundo o representante, no momento é adotada, para a comercialização deste produto, estratégia de redução do preço, com uma postura agressiva para a preservação e maior ocupação do mercado, com a intenção de domina-lo, e que existe a previsão de evolução tecnológica com grandes melhorias em seu desempenho funcional. Neste quadro, segundo o conceito de ciclo de vida do produto, apresentado por Kotler (p.337-341), que é utilizado para interpretar a dinâmica do produto no mercado, tem-se o produto no estágio de maturidade decadente.

No Brasil, em meados de 2002, a empresa QI Indústria e Comércio, lançou o ‘ECONÔMICO QI’, versão monofásica. O fabricante divulga teste realizado na UFMG, segundo o qual, o controlador pode proporcionar economia de até 50%. Além do bom desempenho técnico, possui como grande diferencial o preço, de aproximadamente 1/3 dos importados. Em abril de 2003, foi lançada a versão trifásica, que segundo dados apresentados pelo fabricante, proporciona a mesma economia que os *top* de linha importados, mantendo o diferencial no preço, de aproximadamente 1/3 dos importados.

2.3.9 Efeitos adversos dos acionamentos eletrônicos

Os acionamentos eletrônicos trazem grande flexibilidade e economia para a operação dos processos que utilizam os motores elétricos. No entanto, como as formas de onda de tensão e corrente não são mais senoidais, e são produzidas as harmônicas, que são introduzidas na rede elétrica de alimentação, causando distorções nas formas de onda de corrente e tensão do sistema elétrico, suficientes para alterar no comportamento das redes elétricas em geral, tanto domiciliar, comercial ou industrial. Estes harmônicos, segundo Américo et al., (1998, p.38), Mamede, (1999, p.93), podem provocar: - maiores perdas por aquecimento nos equipamentos; - torques oscilatórios; - ressonâncias elétricas com conseqüentes sobretensões ou sobrecorrentes;- interferências eletromagnéticas; - *spikes* (picos) e *notchs* (cortes/quebras) de tensão na rede; - disparos intempestivos de disjuntores, - aquecimentos de transformadores, - queima de condutores neutros aparentemente bem dimensionados, - explosões de capacitores de correção de fator de potência, dentre outros.

A disseminação dos equipamentos eletrônicos, grandes geradores de harmônicos, faz surgir, cada vez mais surgem problemas de qualidade de energia nas instalações elétricas. Segundo Mamede, (1999, p.93), a questão dos harmônicos é hoje perfeitamente conhecida, e existem, internacionalmente, vários documentos normativos que tratam das diversas funções relacionadas com as tensões e correntes harmônicas em todas as aplicações, tais como: IEE 519, IEC 555 e IEC 1000-4-7. Américo et al., (1998, p.38), acrescenta a IEC 146-2.

Mamede, (1999, p.93), considera, “...chega a ser consenso que o fabricante do equipamento gerador de harmônico seja o responsável pela limitação dos seus componentes harmônicos injetados na rede elétrica”. Em algumas instalações, para mitigar o efeito das harmônicas são instalados filtros supressores, de elevado custo. Algumas obras dedicam-se a esse assunto, dentre elas cita-se o clássico Arrillaga (1985) e o Mamede (1999). Para Américo et al., (1998, p.38), os problemas com os harmônicos gerados com a utilização dos *Drives*, acionamentos eletrônicos, são, em geral, compensados pelas vantagens.

2.4 Considerações

Neste capítulo apresentou-se uma revisão da literatura, com os fundamentos teóricos, e estado da arte, que serão base para os próximos capítulos. No capítulo a seguir, descrever-se-ão o ferramental, os materiais e métodos que serão utilizados no desenvolvimento do modelo para se alcançar os objetivos propostos.

3 FERRAMENTAL, MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo descrevem-se o ferramental, equipamentos, materiais, técnicas, métodos que serão utilizados na construção do modelo proposto, que será desenvolvido e apresentado no capítulo 4, bem como para a realização dos experimentos práticos descritos no capítulo 5, intitulado, Aplicação do Modelo.

3.1 Quantificação da capacidade de poupar energia dos *Drives* Moduladores de Energia

3.1.1 Mensurações da energia em laboratório.

Para mensuração da capacidade de poupar energia dos *Drives*, Moduladores, serão utilizados dados que constam do ‘Relatório de Ensaios Powerboss *Compact* - Modelo PBC 5.5’, (Anexo A), realizado pelo Laboratório de Aplicações Industriais do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). A seguir, são apresentados os procedimentos, as especificações e características dos equipamentos utilizados neste teste.

A figura 3.1 apresenta o diagrama utilizado para levantamento das potências demandadas pelo motor de indução (MI), para vários carregamentos, em duas condições: - *on-line*, motor alimentado diretamente pela rede de energia, e - *off-line*, motor alimentado via Modulador de Energia. As variações dos carregamentos são obtidas pela variação de resistores do banco carga (R), que dissipará a energia (transformar em calor), oriunda da armadura do motor de corrente contínua (Mcc), excitação independente que funcionará como gerador, cujo eixo está mecanicamente acoplado ao MI sob teste.

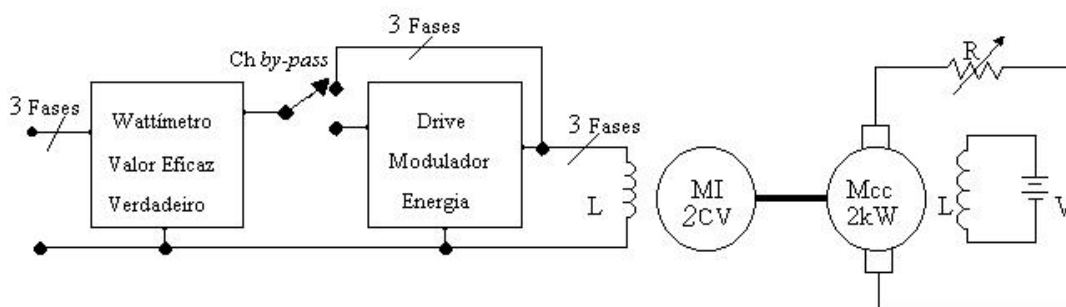


Figura 3. 1: Diagrama para o levantamento de consumo de energia do MI, condições: *on-line*, alimentado diretamente pela rede de energia, (Ch) fechada e *off-line*, alimentado via Modulador de Energia, (Ch) aberta.

O sistema para o teste é formado pelos componentes com as especificações:

- Motor de indução (MI) ; Eberle modelo B9064, potência de 2 cv, 1715 rpm, 440V e $I_N = 3,2A$.

- Motor (gerador) de CC (Mcc); potência de 2 kW, 1800 rpm, Armadura 125V/16A e Campo de 125V/1A, origem/marca não especificada.

- *Drive* Modulador de Energia; PowerBoss Compact PBC 5.5, de tensão de 380/440V e $I_N = 11A$, da empresa Somar.

- Wattímetro WT2030 Digital Power Meter YOKOGAWA, modelo 2532103.

Procedimentos:

Com o motor em funcionamento, inicialmente na condição *on-line*, alimentação direta da rede de energia, obtida pelo fechamento da chave de *by-pass* (Ch), que desviará a energia do *Drive*, anulando a sua ação, ajusta-se um carregamento do motor por meio da variação dos resistores do banco de carga (R) e mede-se a potência demandada (Wattímetro). Em seguida para este mesmo carregamento, com a abertura da chave de *by-pass* (Ch), alimentação do motor agora se faz via Modulador de Energia, condição *off-line*, ou seja, a energia a ser entregue ao motor, passa a ser controlada pelo *Drive*, e mede-se a nova demanda de potência (Wattímetro). Para cada uma das duas condições, *on-line* e *off-line*, o motor de indução submeteu-se a 6 (seis) níveis de carregamentos distintos, em passos percentuais de 20% aproximadamente, caracterizando os níveis: 1º- vazio ($\pm 0,0\%$), 2º- muito leve ($\pm 20,0\%$), 3º- leve ($\pm 40,0\%$), 4º- média ($\pm 60,0\%$), 5º- próxima da plena ($\pm 80,0\%$), 6º- plena ($\pm 100,0\%$).

Levantam-se assim as potências demandas em (W) do MI, nas condições, *on-line* e *off-line*, em função do nível de carregamento em (%), apresentadas nas tabelas do Anexo A.

3.1. 2 Mensurações da energia em um processo (unidade consumidora)

Nas mensurações elétricas, o estado da arte, aponta para o Analisador de Energia, que é um equipamento microprocessado de captura e aquisição, registro e análise de dados de magnitudes elétrica, tensão e corrente, em cada uma das fases simultaneamente, a pequenos intervalos de tempo, previamente estabelecidos, processa e determina os valores eficazes (rms) e instantâneos de cada fase: tensão, corrente, bem como as potências ativa e reativa, fator de potência, valores médios das três fases, e outros parâmetros como espectros dos harmônicos, o que não é possível ser realizado se forem utilizados equipamentos de concepção convencionais, amperímetro e wattímetro e outros. Apesar de ser um equipamento sofisticado e pouco difundido, a evolução da tecnologia tem possibilitado melhorias em suas

qualidades técnicas, em especial na capacidade de memória, na velocidade de amostragens e na diminuição do tamanho físico, aliado a queda substancial do seu preço.

Neste trabalho, será utilizado um Analisador de Energia da marca *Cicuitor*, modelo AR4-MP, faixa de tensão de 20 a 500Vac fase-neutro ou 35 a 866Vac fase para fase, sondas de corrente *Clamp* Cp-2000-200. Classes de precisão: corrente – 0,5%, tensão 0,5%, potência ativa 1,0%, potência reativa 1,0%, atendendo os padrões IEC 348, IEC 521, IEC 664, UNE 20.553, UNE 21.310, VDE 110, UL 94. Os dados coletados são disponibilizados ao operador de 3 (três) formas:

- Display de cristal líquido: 2 linhas x 16 colunas, para leitura de valores instantâneos de tensões, correntes, potência, energia, etc.
- Impressora: (saída serial), na formas de tabela ou de gráfico de barras, em papel termo sensível, (neste modelo encontra-se instalada junto à tampa).
- Cartão de memória: com arquivos eletrônicos que podem ser migrados para vários formatos e padrões, sendo utilizado, nesse trabalho, o formato tipo texto que é compatível com uma planilha eletrônica *Microsoft Excel*.

Para quantificar as potências instantâneas e a energia consumida em um processo produtivo (em campo), far-se-á necessário medir e registrar o consumo de energia elétrica em campo. Com o Analisador de Energia, conectado à rede de energia elétrica que alimenta o motor de um processo previamente escolhido, capturam-se e registram-se as magnitudes elétricas, tensão e corrente, potência e energia, etc, a que se submete o motor durante a operação deste processo, para posterior análise. Estes dados serão migrados para uma planilha eletrônica, *Microsoft Excel*, quanto será feita a seleção dos dados de interesse e traçado o relatório gráfico das demandas de potência instantâneas e de consumo de energia, mostrando os diferentes níveis de potência que o motor demanda em um período de tempo estipulado.

À planilha eletrônica, também, serão fornecidos os dados de placa do motor: potência nominal P_N em (cv), corrente nominal I_N em (A), rotação nominal n_N em (rpm), o número de pólos ou a rotação síncrona (ver motor síncrono, equação 2.4).

Neste ponto, aos dados será aplicado o Método da linearização, prescrito por Bortoni e Santos (2001, p.353-366) e explicitado no item 2.2.7 Avaliação das condições de operação da máquina, (p.53-55). Encontra-se o conjugado nominal M_n do motor em (cv/rpm) pela divisão da potência nominal P_N em (cv) pela rotação nominal n_N em (rpm) (equação 2.8) e em seguida, a corrente em vazio $I_o(\%)$, que é função da potência nominal P_N em (cv), pela equação 2.11. Para cada valor de corrente de trabalho I_t , amostradas e registradas pelo

Analisador de Energia nos variados níveis de carga, logram-se as correspondentes rotações de trabalho n_t em (rpm), equação 2.10. Para cada rotação de trabalho n_t em (rpm), tem-se o correspondente torque de trabalho M_t em (cv/rpm), equação 2.7. Multiplicando cada torque de trabalho pela correspondente rotação de trabalho, encontra-se cada uma das potências de trabalho P_t em (cv), equação 2.9. Para cada potência de trabalho P_t em (cv) dividida pela potência nominal P_N em (cv), multiplicado por 100, chegar-se-á aos carregamentos em valores percentuais em relação à potência nominal, a que o motor foi submetido durante a coleta de dados, equação 3.1.

$$C_{\%} = (P_t / P_N) \times 100 \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Onde: - $C_{\%}$ = Carregamento percentual, - P_t = Potência de trabalho (cv),

- P_N = Potência Nominal (cv).

De posse dos valores percentuais de cada potência demandada em relação à do motor, conhece-se o quão está carregado, o que permite traçar um relatório gráfico do carregamento percentual, identificando os variados níveis de carregamento, que serão comparados e cruzados com os dados apurados nos testes laboratoriais, de onde será obtido um percentual de poupança de energia para cada nível percentual de carregamento, que vai implicar na viabilidade ou não do *Drive* Modulador de Energia.

3.2 Análise econômica em conservação de energia

Empregar-se-ão conceitos da Engenharia Econômica que, em boa parte, retratam a aplicação da Matemática Financeira, obtendo-se indicadores de desempenho, cujos resultados são comparados com o objetivo de apurar a melhor alternativa para o investimento ou oportunidades de negócios.

Economicamente, a melhor alternativa é a que propiciará maior rentabilidade ou menor custo. As diferenças que marcam as alternativas serão expressas, tanto quanto possível, em termos quantitativos.

Para a tomada de decisões de investimento, alguns pressupostos, segundo Taha (1996, p.65), deverão ser estabelecidas, considerações e limitações descritas a seguir:

- analisar todas as alternativas viáveis, (não existe decisão com alternativa única);
- somente pode-se comparar alternativas homogêneas;
- apenas as diferenças das alternativas são relevantes;
- os critérios para decisão de alternativas econômicas devem reconhecer o valor do dinheiro no tempo;

- o capital é escasso (uma alternativa excepcionalmente rentável, mas não existe o capital para investir);
- deve-se sempre atribuir certo peso para os graus relativos de incerteza, associados às previsões efetuadas, pois os valores são estimados;
- levar-se-ão em consideração os eventos qualitativos, por vezes subjetivos e não quantificáveis monetariamente. Eventos não quantificáveis, devem ser claramente especificados, a fim de que os responsáveis pela tomada de decisão tenham os dados necessários relacionados, de forma a optar pela melhor, considerando-se que, em certos casos, a alternativa mais econômica não é a melhor solução em função dos dados não monetários ou não quantificáveis;
- realimentação de informações para os responsáveis pelo estudo de alternativas é vital para um reajuste das alternativas realizadas, permite diminuir o grau de sensibilidade e de incerteza e também para que se previnam erros nas decisões futuras.

3.2.1 Engenharia econômica para seleção de alternativas

As decisões de investimento em projetos e ações de alternativas de uso eficiente e economia de energia passam, necessariamente, por uma análise de viabilidade econômica, que utiliza indicadores que permitem traduzir a atratividade de um investimento (BORTONI e SANTOS, p.149, 2001).

A Engenharia Econômica alvitra critérios para a escolha dentre alternativas de investimento, a mais rentável. Alternativas não podem ser comparadas, a menos que suas respectivas conseqüências em valores monetários sejam, primeiramente, transladadas a pontos comparáveis no tempo, através de uma taxa de juros adequada. Assim, os critérios que serão adotados na análise deverão, necessariamente, incluir: - o quanto investir; - as datas de pagamento para cada uma das alternativas; - a medida de retorno ou taxa mínima de atratividade (TMA), que consiste naquela que o investidor pretende conseguir como capital, ao optar por realizar certo investimento, para o nível de risco escolhido, (é a taxa a partir da qual o investidor espera estar obtendo ganhos) e, na prática, corresponde à taxa oferecida pelo mercado para uma aplicação de capital “segura” como: a caderneta de poupança, depósitos a prazo fixo, e outros.

Para o propósito de análise, esta questão se apresenta de duas formas e é susceptível ao isolamento. Deseja-se:

- conhecer a economicidade de uma dada alternativa;
- decidir sobre a escolha entre duas alternativas mutuamente excludentes.

A proposta de utilização do *Drive* modulador, em termos práticos se enquadra como uma alternativa excludente, muito embora teoricamente (tecnicamente) as mesmas não são excludentes, e sim complementam algumas das alternativas de economia de energia, apresentadas no capítulo 2, como a substituição do motor por um de menor potência e/ou de alto-rendimento.

3.2.2 Critérios para tomada de decisão

Dentre os critérios mais utilizados na engenharia econômica, para a avaliação de alternativas de investimentos em projetos e ações de conservação e eficiência energética, serão destacados e utilizados quatro:

- a) Valor presente líquido (VPL);
- b) Tempo de retorno ou de recuperação de capital (ou do investimento), ou *Payback*,
- c) Taxa interna de retorno (TIR), e
- d) Índice Benefício/Custo ou índice de Lucratividade.

Cada critério possui características próprias e apresentam vantagens e desvantagens, quando comparados entre si, devendo sempre ser aplicado conhecendo-se suas limitações, Bortoni e Santos, (2001, p.153); Menezes (2001 p.94-99); Vilela (2003, p.22-25) e Bertolo (2002, p.52).

a) Valor presente líquido (VPL)

A característica essencial do Valor Presente Líquido (VPL), também conhecido por Valor Atual Líquido (VAL), é que os valores monetários são transladados para o presente. Todos os fluxos de caixa futuros, esperados como resultado de uma decisão de investimento são descontados, usando-se a Taxa Mínima de Atratividade (TMA). Na prática, trata-se de trazer para o presente, ou seja, para o tempo em que se iniciou o projeto, todas as despesas e receitas de capital esperado, a uma determinada taxa de juros que reflita a de mercado.

Segundo Bortoni e Santos, (2001, p.153-155), o critério do VPL torna-se interessante quando se deseja comparar alternativas mutuamente excludentes, ou investimentos isolados, que envolvam o curto prazo ou que tenham baixo número de períodos. Todos os benefícios, custos e despesas, em seus diversos instantes no tempo, são trazidos para o presente, onde os benefícios expressos no valor presente do fluxo de caixa (VPfc), que é o valor do somatório das parcelas de benefícios adequadamente corrigidos por uma TMA, e de despesas ou do investimento (VPI), que é o valor do somatório das parcelas investidas, adequadamente corrigidas pela TMA, ($VPL = VPfc - VPI$), no qual o (VPI) devem entrar com sinal oposto aos benefícios.

b) Tempo de retorno de capital ou *Payback*,

Sem dúvida, o critério mais difundido e de grande aceitação nas análises de viabilidade econômica, no meio técnico, é o tempo de retorno do capital ou *payback*, principalmente devido à sua facilidade de aplicação, (BORTONI e SANTOS,2001, p.162; TABOSA. 1998, p.12-14 e JANNUZZI, 1997, p.227). Este indicador mostra quanto tempo é necessário para que os benefícios se igualem aos investimentos, ou seja, mede o tempo necessário para que a somatória das parcelas dos benefícios seja igual ao investimento inicial.

Tem-se o *Payback* dividindo o custo da implantação do empreendimento pelo benefício médio auferido durante a vida do projeto ou da ação. Fala-se, inicialmente no chamado *Payback* simples ou não descontado, um procedimento de fácil cálculo (Investimento/Média dos benefícios), onde não se leva em consideração o custo de capital. O tempo de retorno descontado ou atualizado é o número de períodos necessários para que os benefícios se igualem ao do VPfc. Neste caso, a taxa de juros adotada é a TMA ou do custo de oportunidade. O *Payback* pode ser muito útil quando o futuro é altamente incerto, e o interesse é recuperar o investimento inicial o mais rápido, apesar de ser considerado um critério não exato.

c) Taxa interna de retorno (TIR)

A TIR é a taxa de juros que aplicada ao investimento torna-o equivalente ao VPfc, ou seja, é a taxa que torna nulo o VPfc do projeto dentro de um período de tempo. A decisão com base na TIR é aceitar um projeto de investimento, se o custo de oportunidade do capital for menor do que a taxa interna de retorno e vice-versa (TAHA,1996, p.65).

d) Índice benefício/custo (B/C) ou índice de Lucratividade (IL)

Indica o retorno por unidade monetária investida, sendo mais indicado em situações de forte restrição de capital. É obtido da relação do VPL de um fluxo de caixa, pelos custos e despesas ou do investimento também no valor presente (VPI), que é o valor de cada parcela investida, adequadamente corrigidas, $(B/C = IL = VPL/VPI)$.

3.2.3 Análise de sensibilidade e dados de entrada (*input*)

Uma forma de analisar oscilações e incertezas nos resultados de um investimento é por meio da Análise de Sensibilidade, que estuda o efeito que a variação de um dado de entrada (*input*) pode ocasionar nos resultados finais. A análise determina o efeito que variações nos *inputs*, receitas e custos operacionais, usados para estimar fluxos de caixa, podem provocar no valor presente líquido ou em qualquer outro fator de decisão utilizado. Quando uma pequena variação num parâmetro altera drasticamente a rentabilidade de um projeto, diz-se que o

projeto é muito sensível a este parâmetro e poderá ser interessante concentrar esforços para obter dados menos incertos. A Análise de Sensibilidade demonstra, portanto, o quanto o Valor Presente Líquido, ou outro fator utilizado, mudará, devido a uma dada alteração de um *input*. Assim, na análise de fluxos de caixa pelos modelos de Engenharia Econômica, alguns itens podem ter maior influência no resultado final do que outros, podendo-se identificar os *inputs* mais significativos. As planilhas eletrônicas são um dos melhores instrumentos para elaborar um estudo de análise de sensibilidade (TAHA, 1996, p.65).

3.2.4 Cômputo do benefício auferido

Para o cômputo do benefício auferido pelo uso da tecnologia do *Drive* Modulador de Energia, para análise do investimento e sua atratividade, os clássicos indicadores econômicos, serão utilizados, considerar-se-ão variações dos seguintes parâmetros de entrada (*input*):

a) **tempo de operação do processo produtivo;**

O número de horas de operação do motor que aciona o processo produtivo, referido por vezes como fator de utilização ou de carga; como regime ou taxa de trabalho, é certamente um importante fator de entrada. Nesta dissertação, empregar-se-á a mesma taxa de trabalho adotada pelo PROCEL nos levantamentos da viabilidade econômica para a utilização de motores de Alto-rendimento, que são de 8.000 e 4.000 horas por ano de funcionamento, que corresponde a jornadas de 24 e 12 horas por dia respectivamente, com ano de 365 dias, sendo que cerca de 7% deste são demandados com ociosidade na programação, tempo de preparação e manutenção da máquina. Faz-se necessário extrapolar a proposta do PROCEL, de mensurações sobre 8.000 e 4.000 horas por ano de operação dos motores e acrescentar também operação dos motores em 2000 horas por ano, relativo ao trabalho de 44 horas semanais, turno único, sendo que cerca de 12% deste são demandados com ociosidade na programação, tempo de preparação e manutenção da máquina.

b) **potência demandada pela carga (motor);**

A potência demandada pelo motor no processo produtivo torna-se um dado significativo. Acionamentos que envolvam potências muito reduzidas, dificilmente apresentarão méritos para o uso do *Drive* Modulador de Energia (trifásico). Para este caso, considera-se a que consta na placa do motor, portanto esta informação é de relativa facilidade de ser obtida.

c) tarifa e o custo da energia elétrica;

A tarifa de energia elétrica é outro importante parâmetro a ser considerado. Seu valor monetário varia no tempo e no espaço, depende do momento político, das tecnologias envolvidas, do nível pluviométrico, dos preços de combustíveis, (petróleo e gás). Por vezes, é, usada como instrumento de política econômica, ora para o controle da inflação, ora para estimular setores específicos da economia ou compensar desigualdades (JANNUZZI, 1997, p.94). Para Cascaes (2003) tem-se:

Na situação atual, as tarifas de energia (elétrica, gás, petróleo) são instrumento de arrecadação de impostos, o que força os preços para cima, menos por questões estratégicas de racionalização do uso da energia e mais para a simples e pura necessidade de mais dinheiro.

As unidades consumidoras de energia elétrica, são agrupadas por nível, em função da tensão de fornecimento, tal como:

a) “Grupo A” (Alta tensão) - a concessionária fornece energia em tensão superior a 2300Volts, ou em sistema subterrâneo de distribuição em caráter opcional, nos termos definidos na Resolução ANEEL n° 456, caracterizado pela estruturação tarifária binômia (tarifação em função da potência e da energia) e subdividido nos subgrupos A1 ($\geq 230\text{kV}$), A2 (88kV a 138kV), A3 (69kV), A3a (30 kV a 44 kV), A4 (2,3 kV a 25 kV) se Subterrâneo.

b) “Grupo B” (Baixa tensão), tensão de fornecimento inferior a 2300Volts, ou ainda, atendida em tensão superior a 2,3 kV e faturada neste grupo, nos termos definidos na Resolução ANEEL n° 456, caracterizada pela estruturação tarifária monômia e subdividida nos seguintes subgrupos: B1, B2, B3, B4. O conjunto de tarifas aplicáveis aos componentes de consumo de energia elétrica e/ou a demanda de potência ativa, de acordo com a modalidade de fornecimento de energia elétrica, que forma a estrutura tarifária.

A estrutura tarifária convencional é caracterizada pela aplicação de tarifas de consumo de energia elétrica e/ou demanda de potência, independentemente, das horas de utilização do dia e dos períodos do ano. A estrutura tarifária horo-sazonal se caracteriza pela aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica e de demanda de potência, de acordo com as horas de utilização do dia e dos períodos do ano. As tarifas subdividem-se, quanto ao tipo, em Azul e Verde; quanto ao horário de ponta e fora de ponta; quanto ao período seco e úmido, além de tarifa de ultrapassagem, de potência, de fator de potência, etc, (HADDAD e GAMA, 2001, p.122-8).

Deste emaranhado surge um intrincado leque de classificações e subdivisões, em que o custo monetário da energia elétrica assume valores distintos para cada caso, e Jannuzzi,

(1997, p.94) comenta que “à estrutura de preços adotada pelo setor elétrico, geralmente, considera que diferentes consumidores devem ter tarifas também diferentes”.

Portanto, verifica-se que a tarifação do consumo de energia elétrica é de difícil mensuração, pois estão sujeitos a imprevistos e distúrbios ocasionais. Além disso, informações sobre a tarifa e o consumo e custo de energia possuem caráter confidencial, pois permitem inferir sobre a empresa; tecnológica, estado da arte, conjuntura e participação deste insumo na produção, das políticas de preço, da produção e da produtividade. Todos estes aspectos respaldam e levam a utilizar, para esta pesquisa, que a unidade de quilo Watt-hora (kWh) de energia deverá ser convertida em unidade monetária, em função do custo da energia de cada unidade produtiva.

c) custos e despesas de implantação do *Drive* modulador;

O custo do *Drive* Modulador de Energia será determinado em função da corrente, da tensão e potências elétricas. Na estrutura produtiva de hoje, equipamentos eletrônicos, são fabricados em sua maioria, no exterior, e se não são montados a partir de peças e componentes importados, e de uma forma ou outra, terão preços atrelados à taxa cambial, que é convertida em Real em uma data específica. O custo de instalação (no local) do *Drive* Modulador de Energia é relativamente pequeno, em muitas vezes, a empresa vendedora o embute no preço de venda e/ou considera que cabe ao comprador, a disponibilização de mão-de-obra e componentes necessários: terminais, cabos elétricos e outros, que serão desconsiderados para fins desta dissertação.

3.3 Considerações

Através do ferramental, equipamentos, materiais, técnicas, métodos apresentados, vê-se uma seqüência lógica de procedimentos, quando, a partir das mensurações das energias consumidas (*on-line* e *off-line*), pode-se, através de estudos científicos, dimensionar a aplicabilidade de utilização do *Drive* Modulador de Energia, passando desde a sua operacionalidade até a viabilidade econômica.

A seguir, no capítulo 4, com base neste ferramental, será desenvolvido o modelo de identificação, quantização de energia consumida em um processo, bem como o resultado financeiro que poderá advir com o uso desta tecnologia.

4 MODELO PROPOSTO

Conservar energia é a correta aplicação dos conceitos técnico-científicos da engenharia aos da análise econômica. Os projetos e ações de racionalização e uso eficiente da energia devem inquirir a conciliação dos custos de implantação (investimento) e custos operacionais. Para uma ação ordenada de conservação de energia, deve-se responder às seguintes questões: Quem está consumindo? Quanta energia está sendo consumida? Como está sendo consumida a energia? Com qual eficiência? Esta abordagem é válida para instalações novas, em caráter preventivo, ou existentes, em caráter corretivo. (NOGUEIRA, p.98-99, 2001).

É preciso analisar ou auditar para conhecer e diagnosticar a realidade energética. A operacionalização da conservação de energia deve se dar num procedimento contínuo e cíclico, inicia-se com a identificação, a quantificação dos fluxos energéticos, ao longo do processo produtivo de bens e serviços, estabelecendo prioridades (planejar), implantando ações de melhoria e de redução de perdas, acompanhando e checando resultados, agindo corretivamente, quando necessário. (NOGUEIRA, p.99, 2001).

Nogueira (2001, p.105) apregoa que “diversas informações devem resultar de medidas em campo, consultas a fabricantes dos equipamentos e entrevistas com os responsáveis pela empresa”, em especial, os operadores do processo, pois, muitas vezes, apenas parte das informações, especificações, memórias de cálculo, esquemas, desenhos atualizados e outros estarão disponíveis. A dificuldade de equipamentos para as mensurações dos parâmetros na contabilização das perdas, freqüentemente, se constitui em “um desafio estimulante para o auditor exercer sua criatividade”, exigindo o desenvolvimento de técnicas e critérios para amostragens de sinais e estabelecimento de correlações.

Desenvolveu-se um modelo para avaliar uma possível economia de energia em kWh, a ser proporcionada pela utilização dos *Drives* Moduladores de Energia elétrica, convertendo-a em valores monetários e, por meio dos clássicos indicadores de desempenho (análise econômica), aferir a sua viabilidade ou não. O modelo foi implementado em uma planilha eletrônica do *Microsoft Excel*, compondo-se de quatro etapas, detalhadas conforme diagrama apresentado na figura 4.1.

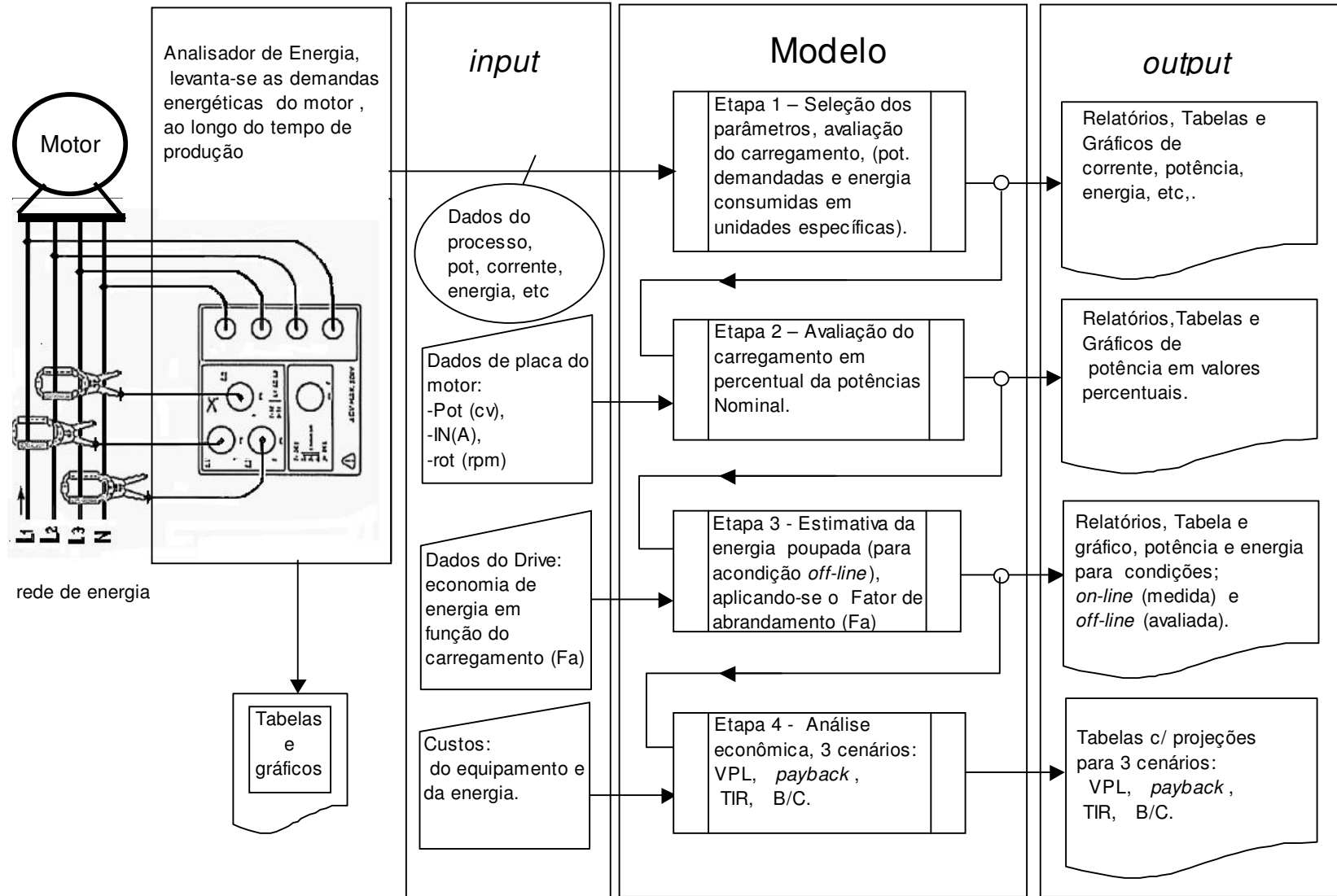


Figura 4.1 Diagrama do modelo proposto.

4.1 1ª Etapa – Seleção dos parâmetros, avaliação do carregamento, (potências demandadas e energia consumidas em unidades específicas)

Com um Analisador de Energia em campo, condição *on-line*, ou seja, com o motor alimentado diretamente pela rede de energia, registram-se os parâmetros elétricos, de demandas de correntes, de potências e consumos energéticos que o motor solicita, ao longo do tempo, nas condições de trabalho do processo.

Os dados coletados pelo analisador de energia são disponibilizados na forma de arquivos eletrônicos de vários formatos. Utiliza-se o formato tipo texto, migra-se para o ambiente *Microsoft Excel*, onde se selecionam os parâmetros de interesse, no caso: correntes e potências instantâneas, energia consumida, e geram-se relatórios gráficos: demanda de potências instantâneas em (W), e consumo energia em (Wh), cada parâmetro com valores expressos em suas unidades específicas. Na figura 4.2 apresenta-se um relatório gráfico gerado pela saída da 1ª etapa, potência demandada e energia consumida por um motor acionando um processo em função do tempo.

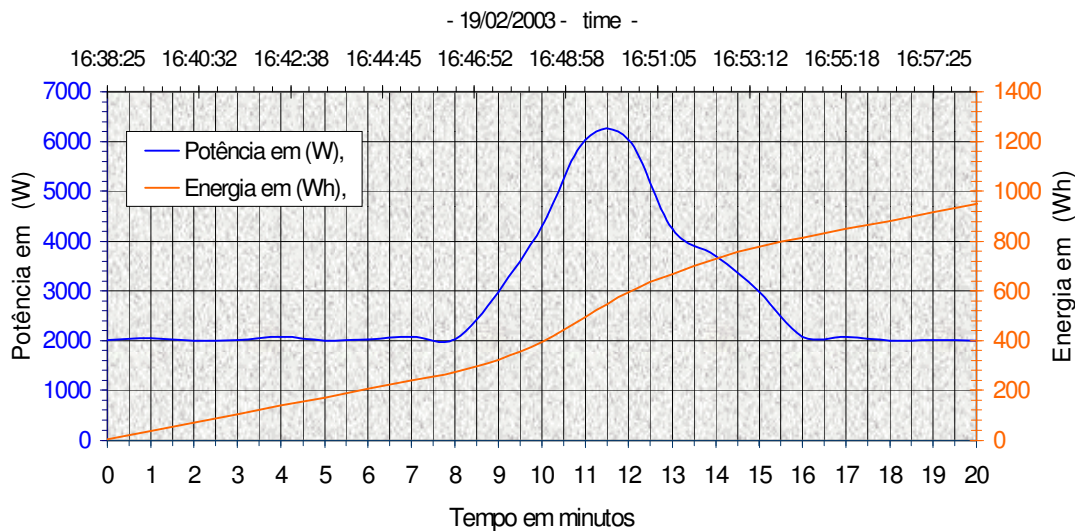


Figura 4. 2: Relatório gráfico gerado pela 1ª etapa, potência demandada em Watt e energia consumida em Wh.

Identifica-se, na figura 4.2, que o motor foi submetido a uma carga flutuante. A quantificação da energia que está sendo consumida a cada instante do período de produção é obtida da área que se apresenta abaixo da curva formada pelas potências instantâneas que corresponde à energia consumida durante o período considerado, quantificada e expressa pela

curva de (E_{on}). Esta energia pode ser obtida diretamente do analisador, pela integral da curva de potências instantâneas, ou, de outra forma, pelo somatório dos valores correspondentes a cada um dos “n” (número de amostragem) pontos amostrados que compõem a mesma. No caso exemplo, tem-se para o período de produção de 20 (vinte) minutos, o consumo de energia: $E_{on} = 949\text{Wh} = 0,949 \text{ kWh}$.

4.2 2ª Etapa – Avaliação do carregamento em percentual

Para conhecer o consumo de energia em valores percentuais, tendo como referência a potência nominal do motor, utilizaram-se as técnicas e critérios prescritos por Bortoni e Santos, apresentados no Capítulo 2 - Fundamentação teórica, item 2.2.7.1- Métodos de avaliação, b) Método expedito (p.53), e item 2.272- Método da linearização, (p.54), descrito e comentado no Capítulo 3, O Ferramental, materiais e métodos, item 3.1.2.- Mensuração da energia em um processo, (unidade consumidora), onde se avaliam as condições operacionais do motor, o carregamento em termos de valores percentuais instantâneos a que o motor é submetido durante o trabalho, a partir das rotações ou das correntes de trabalho.

Para isso, programa-se a planilha eletrônica para quantificar o carregamento percentual, $C(\%) = (P_t / P_N) * 100$. Fornecem-se como *input* à planilha (2ª etapa): parâmetros relativos a condições de trabalho do motor; a rotações de trabalho n_t (rpm), corrente a vazio I_o (A), se disponíveis, ou simplesmente as correntes de trabalho I_t , que foram registradas pelo Analisador de energia e selecionadas na 1ª etapa, bem como os dados de placa do motor (valores nominais), potência $PN(cv)$, rotação n_n (rpm), corrente I_N em (A), ocasião em que estes dados, se possível, devem ser verificados, confirmados, confrontados e referendados por meio de consultas aos dados contidos nos catálogos dos fabricantes de motores.

Dos dados amostrados pelo analisador de energia, cada um dos “n” valores de correntes no período sob análise, são convertidos nos correspondentes carregamentos percentuais e, gera-se o relatório gráfico, curva de carga, em relação à potência nominal de uma unidade consumidora, ou curva de consumo de percentual de energia ao longo do tempo, com o motor alimentado diretamente na rede (*on-line*), apresentada na figura 4.3.

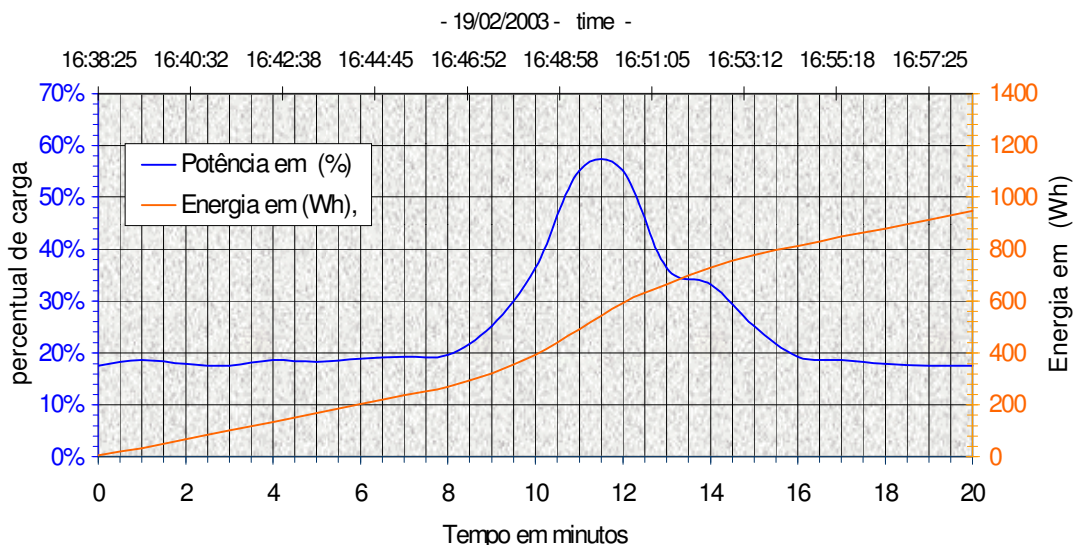


Figura 4. 3: Curva de carregamento, potências instantâneas demandadas em percentual (em relação à potência nominal) e de energia consumida em Wh, em função do tempo (saída da 2ª etapa).

Do relatório gráfico (figura 4.3), identifica-se a possibilidade de se poupar alguma energia pelo uso do *Drive* Modulador de Energia, visto que o processo permaneceu subcarregado (abaixo de 50% da potência nominal) cerca de 17,5 dos 20 minutos registrados no referido gráfico.

4.3 3ª Etapa - Estimativa da energia poupada (para a condição *off-line*)

A cada potência instantânea demandada, quantizada e expressa em percentual da potência nominal, obtida da 2ª etapa, deve-se aplicar um Fator de abrandamento (F_a), que resulta do produto do Fator de economia (F_e) pelo Fator de correção (F_c).

O Fator de economia (F_e) é o valor da energia economizada, que terá como base os dados contidos nas tabelas do Relatório de Ensaios Powerboss Compact - Modelo PBC 5.5', realizado pelo Laboratório de Aplicações Industriais do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), (ver Anexo A).

Com os parâmetros; Potência em (W) e carga em (%) extraídos das tabelas do Anexo A, monta-se a tabela da figura 4.4, com as demandas de potências em função da carga em (%), para as condições *on-line* e *off-line*.

Medições	Condição <i>on-line</i>		Condição <i>off-line</i>	
	Carga em (%)	Potência em (W)	carga em (%)	Potência em (W)
1	7,14	305,80	6,61	118,83
2	20,50	602,36	20,31	261,05
3	39,73	956,01	41,11	766,27
4	59,48	1358,65	59,39	1176,87
5	83,90	1671,04	76,38	1592,96
6	99,80	1897,97	99,77	1842,46

Figura 4. 4: Demandas de potências em função da carga em (%), condições *on-line* e *off-line*

Fonte: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS. Departamento de Engenharia Elétrica. Laboratório de Aplicações Industriais. **Relatório de Ensaios Powerboss Compact - Modelo PBC 5.5**. Belo Horizonte, 2002, (Anexo A).

A partir dos dados da figura 4.4, no ambiente *Excel*, traçaram-se os gráficos e demandas de Potência em (W) do motor de indução (MI), nas condições; *on-line*, e *off-line*, em função do nível de carregamento em (%), conforme apresentado na figura 4.5.

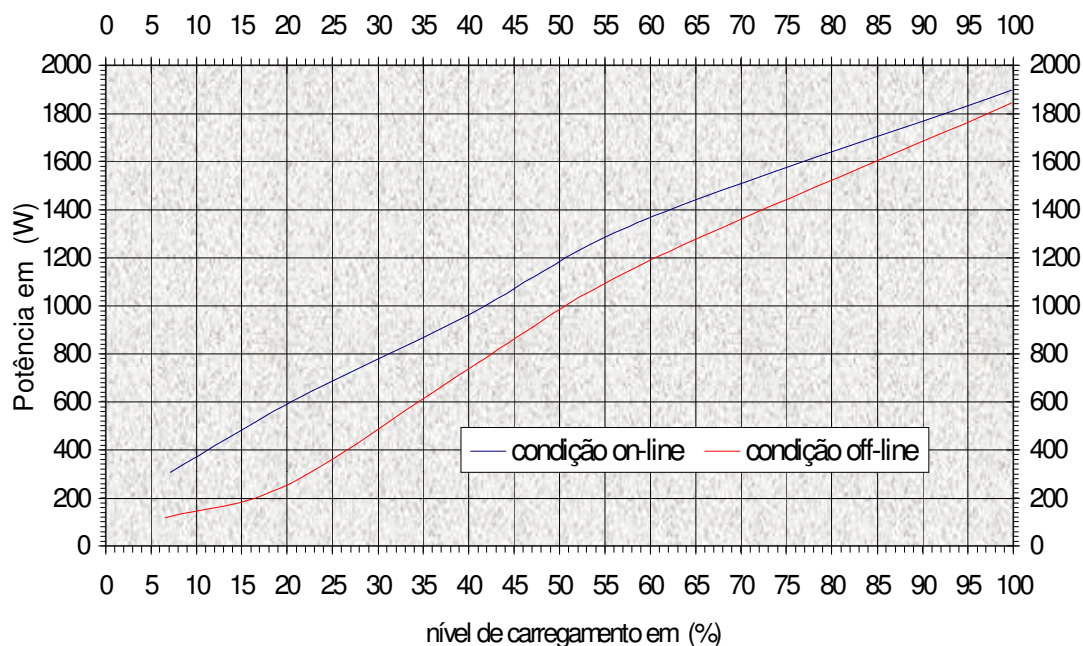


Figura 4. 5: Demandas de Potência em (W) do MI, nas condições; *on-line*, e *off-line*, em função do nível de carregamento em (%) da potência do motor.

A economia oriunda do uso do *Drive* Modulador de Energia será apurada pela diferença entre as potências instantâneas na condição *on-line*, e na condição *off-line*. Assim:

$$P_{econ} = P_{on} - P_{off} \quad (\text{Eq.4.1})$$

Para quantificar a energia economizada, considera-se que, em um intervalo de tempo unitário, ($\Delta t = 1$), os valores das potências correspondam aos das energias, ou seja,

$$P_{on} \rightarrow E_{on}, \quad P_{off} \rightarrow E_{off}, \quad \text{o que resulta em } P_{econ} \rightarrow E_{econ}.$$

Tratando-se em termos percentuais, tendo como referência a condição *on-line*, a energia economizada em percentual, ($E_{econ}(\%)$) resulta da divisão da energia economizada (E_{econ}), pela Energia consumida na condição *on-line* (E_{on}), multiplicada por 100 (cem).

$$E_{econ}(\%) = (E_{econ} / E_{on}) \times 100 \quad (\text{Eq.4.2})$$

Obtém-se o gráfico, Economia de energia em (%) em função dos níveis de carregamento em (%), ou Fator de economia (Fe), conforme apresentado na figura 4.6.

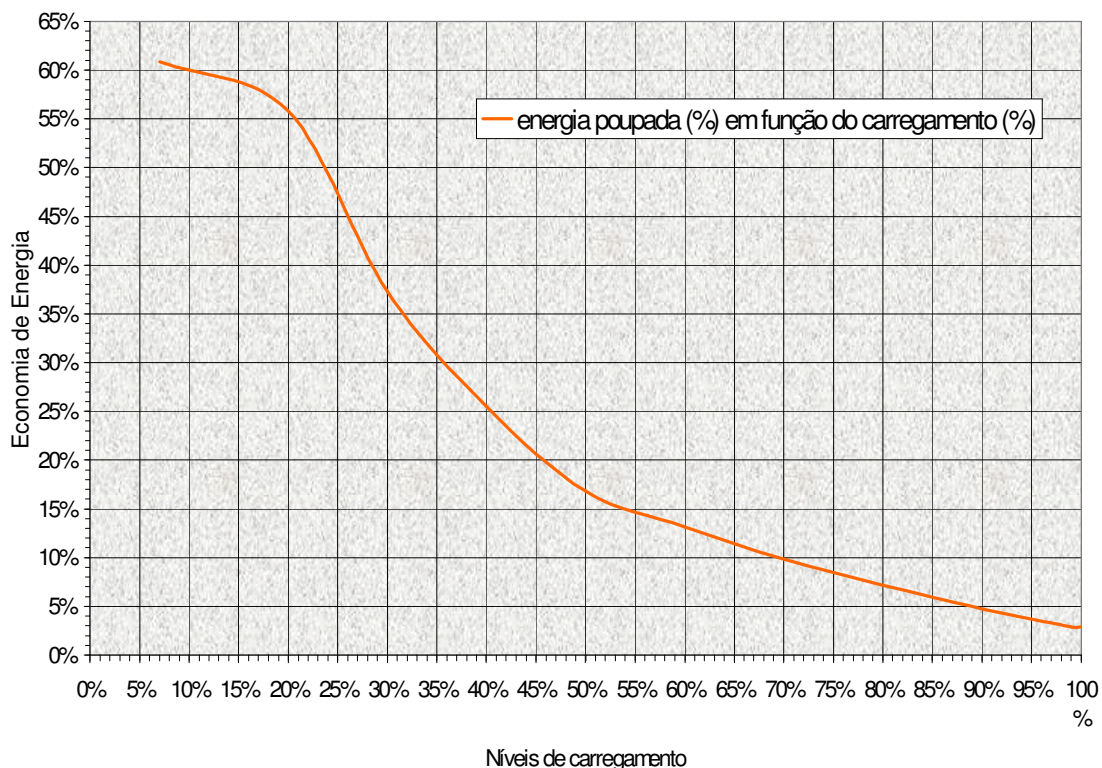


Figura 4. 6: Percentual de economia de energia em relação ao consumo com alimentação direta da rede em função do carregamento.

A partir da figura 4.6, obteve-se o quadro apresentado na figura 4.7, onde, agora, o carregamento possui passo de 2,5%, dados a serem utilizados como o de Fator de economia (Fe).

Carga	2,5%	5,0%	7,5%	10,0%	12,5%	15,0%	17,5%	20,0%	22,5%	25,0%
Fator de economia (Fe).	62,0%	61,5%	60,5%	60,0%	59,0%	58,4%	57,0%	55,0%	52,3%	47,0%

Carga	27,5%	30,0%	32,5%	35,0%	37,5%	40,0%	42,5%	45,0%	47,5%	50,0%
Fator de economia (Fe).	41,7%	37,0%	34,0%	30,5%	28,0%	25,5%	23,0%	20,4%	18,6%	17,1%

Carga	52,5%	55,0%	57,5%	60,0%	62,5%	65,0%	67,5%	70,0%	72,5%	75,0%
Fator de economia (Fe).	16,0%	14,8%	14,0%	13,0%	12,4%	11,7%	10,6%	9,8%	9,0%	8,2%

Carga	77,5%	80,0%	82,5%	85,0%	87,5%	90,0%	92,5%	95,0%	97,5%	100%
Fator de economia (Fe).	7,8%	7,1%	6,8%	6,2%	5,8%	5,2%	4,5%	3,9%	3,5%	2,9%

Figura 4. 7: Níveis de carregamento em (%), versus Economia de energia em (%), passo de 2,5% do carregamento.

A cada percentual de Energia economizada (Fe), obtida para cada nível de carregamento apresentado na figura 4.7, aplica-se um Fator de correção (Fc), que por sua vez resulta do produto de dois outros fatores:

- (F1), primeiro fator, deve-se às diferenças dos rendimentos (η) entre o motor utilizado para o levantamento que resultou nos Níveis de carregamento (figura 4.7), que é um motor de 2 cv padrão, *Standard* (B), rendimento $\eta = 73\%$ e do rendimentos η_x do motor utilizado no acionamento sob investigação. Os correspondentes rendimentos podem ser obtidos na figura 2.12, ou nos catálogos de características técnicas dos fabricantes. Assim:

$$(\Delta\eta = \eta_x - \eta), \quad F_1 = (1 - \Delta\eta), \quad F_1 = [1 - (\eta_x - \eta)]$$

- (F2), segundo fator, deve-se, aos dados contidos na figura 4.7, serem oriundos de condições de cargas estáticas, ou seja, carga fixa, que não variam ao longo do tempo, e nas plantas, nos processos reais, a condição é de carga dinâmica, ou seja, a carga varia ao longo do tempo. Os Moduladores de Energia sempre gastam um certo tempo à procura do melhor ponto de operação, buscando acomodar-se à carga. Enquanto a carga estiver variando, para garantir o motor em funcionamento (não tombar), o Modulador de Energia aplica uma quantidade de energia ligeiramente superior à mínima necessária. O valor deste fator vai ser função da

tecnologia do *Drive*, em especial, da velocidade do processador e do algoritmo de controle, e do quão rápido o carregamento do motor varia (da velocidade de variação da carga). Para esta dissertação, assume-se:

$$F_2 = (1 - 0,25) = 0,75.$$

Assim, resulta em um Fator de correção, obtido por $F_c = F_1 \times F_2$.

Tem-se, finalmente, o Fator de abrandamento (F_a), obtido do produto do Fator de economia (F_e) pelo Fator de correção (F_c).

Aplicando-se o Fator de abrandamento (F_a) a cada uma das potências instantâneas da curva apresentada (condição *on-line*), na figura 4.2, levantam-se as curvas estimadas de demandas de potências e de consumo de energia do processo, na condição *off-line*, procedimento a ser executado na planilha Eletrônica. Para melhor visualização da ação do *Drive* e comparações, faz-se uma sobreposição das curvas de potências e energias para as condições *on-line* e *off-line*, apresentada na figura 4.8.

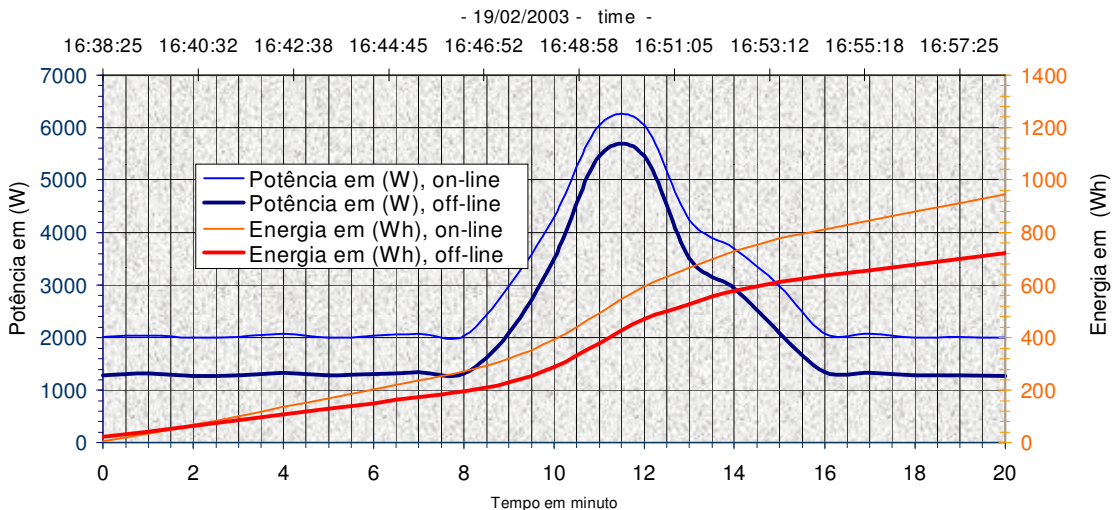


Figura 4. 8: Curvas de potência e energia, condições; *on-line* medida, e *off-line* avaliada.

As áreas abaixo das curvas de potências instantâneas correspondem às energias em Wh, consumidas no período considerado, que estão quantificadas e expressas nas curvas de energia, para a condição *on-line*, (E_{on}) efetivamente medida, e para a condição *off-line*, ($E_{econ-avaliada}$) que foi avaliada pelo modelo. A diferença entre as áreas abaixo das curvas de potências corresponde à energia que pode ser economizada ou poupada, representada por $E_{econ-avaliada} = E_{on} - E_{off-avaliada}$, quando do uso do *Drive* Modulador de Energia.

Ao final do período considerado de 20 minutos, o valor da energia *on-line* é $E_{on} = 949$ Wh, deve-se subtrair o da energia *off-line* $E_{off-avaliada} = 721$ Wh (valores obtidos na

planilha pelo somatório das potências instantâneas), ($E_{econ-avaliada} = E_{on} - E_{off}$). Assim, para o mesmo período de produção, estima-se uma economia de energia, quando do uso do *Drive* Modulador de Energia, $E_{econ-avaliada}$ de:

$$E_{off-avaliada} = E_{on} - E_{off} = 0,949 \text{ kWh} - 0,721 \text{ kWh} = 0,228 \text{ kWh} \quad (\text{Eq.4.3})$$

que representa economia de energia avaliada, para o mesmo período de produção, 20 minutos, quando do uso do *Drive* Modulador de Energia. Ao se dividir E_{econ} pela energia E_{on} e multiplicado por 100 (cem), tem-se aquela economizada em valores percentuais:

Assim:

$$E_{off-avaliada} (\%) = (E_{off-avaliada} / E_{on}) \times 100 \quad (\text{Eq.4.4})$$

$$E_{off-avaliada} (\text{PU}) = 0,228 \text{ kWh} / 0,949 \text{ kWh} = 0,2403$$

$$E_{off-avaliada} (\%) = 24\% \text{ de economia.}$$

4.4 4ª Etapa - Análise econômica

A economia de energia deve ser convertida em valores monetários, de acordo com a tarifa adotada para cada caso. Com os valores dos custos de implantação e da energia economizada, faz-se a análise econômica, que é a maneira de se estimar os resultados a serem obtidos do investimento.

Na 4ª etapa, o modelo gera os indicadores de desempenho, para a avaliação de alternativas de investimentos em projetos e ações de conservação e eficiência energética. Utilizaram-se os indicadores de desempenho: Valor Presente Líquido (VPL), Tempo de Recuperação de Capital (*Payback*), Taxa Interna de Retorno (TIR) e Índice Benefício/Custo, Bortoni e Santos, (2001, p.153); Menezes (2001 p.94-99); Vilela (2003, p.22-25) e Bertolo (2002, p.52).

A análise econômica fundamenta-se nas relações entre os benefícios e os custos dos investimentos. Detectar e equacioná-las é, sem dúvida, a principal tarefa do analista. Deve-se manipular convenientemente as equações da engenharia econômica, para obter indicadores que possibilitem uma escolha adequada, Bortoni e Santos (2001, p.157).

Do processo em estudo, obteve-se uma economia de 0,228 kWh em 20 minutos, correspondendo a 0,683 kWh em uma hora de trabalho. Conforme exposto no capítulo 3, fazem-se os cálculos para as condições de 8.000, 4.000 ou 2000 horas por ano de operação.

Converte-se em unidade monetária o kWh de energia elétrica economizada, que assume valores específicos para cada caso. Para esta dissertação assume-se: Tarifa

Convencional Comercial como referência, uma vez que seu valor é de conhecimento público e de grande aplicação em pequenas empresas, onde a estrutura tarifária é deste tipo. Com base neste valor, estimar-se as economias em valores monetários oriundos da energia poupada.

Para os próximos anos, serão projetados 3 (três) cenários para os reajustes da tarifas de energia elétrica:

a) A energia elétrica será reajustada, a cada ano, com a mesma taxa do custo de oportunidade, de tal forma que cada benefício ou anuidade será acrescido da taxa de oportunidade e que, quando trazida para o presente, será descontada na mesma proporção, ou seja, Valor Presente igual ao Valor Futuro, $VP = VF$.

b) A energia elétrica será reajustada a cada ano com um valor de 2,5% acima da taxa do custo de oportunidade, de tal forma que, quando da composição das parcelas de benefício ou anuidades, estas se apresentam com uma taxa resultante de juros de 2,5% por ano.

c) A energia elétrica será reajustada a cada ano com um valor de 5% acima da taxa do custo de oportunidade, de tal forma que, quando da composição das parcelas de benefício ou anuidades, estas se apresentam com uma taxa resultante de juros de 5% por ano.

Levantam-se os custos de implantação do *Drive* Modulador de Energia, para esta faixa de potência, junto às empresas que os comercializam/fabricam. Segundo dados colhidos, junto à empresa representante do equipamento que está sendo base para a dissertação, tendo como data de referência, a mesma utilizada para o custo do kWh de energia.

Quanto ao tempo de vida de um projeto ou ação em conservação de energia, os fabricantes dos moduladores não forneceram o tempo de vida do equipamento. Bortoni e Santos (2001, p.151), explanam “[...] o número de períodos, muitas vezes, representa a vida útil de um equipamento, vida contábil ou duração do fluxo de caixa como ocorrem em projetos que envolvam períodos de concessão”, que para este texto assume-se dois valores; $n = 5$ anos correspondentes à vida contábil (acelerada) de máquinas e equipamentos e de $n = 10$ (dez) anos que é a menor vida útil prevista para motores elétricos, (BERTONI e SANTOS, p.364, 2001). Para justificar os 10 (dez) anos, também tem-se a Instrução Normativa da Secretaria da Receita Federal, SRF nº 162/98, com as inclusões determinadas pela Instrução Normativa SRF 130/99, e nomenclatura comum do MERCOSUL – NCM - a ser registrada na escrituração da pessoa jurídica, como custo ou despesa operacional com a referência 9030 “[...]instrumentos e aparelhos para medida ou controle de grandezas elétricas [...]” prazo de vida útil de 10 (dez) anos, ou com a referência 9032 “instrumentos e aparelhos para regulação ou controle, automáticos” prazo de vida útil de 10 (dez) anos.

Nesta etapa o modelo recebe como *input*:

- A economia de energia em kW por cada hora, ($E_{\text{econ-avaliada}}$), advinda da 3ª etapa;
- O custo da energia em kWh e;
- O custo de implantação.

Calculam-se os indicadores de desempenho, para cada cenário, utilizando-se as funções financeiras do *Excel*, quando se gera como *output*, economia em valor monetário (em Real) para o 1º ano, (VP_{fc}) para taxa resultante acima da taxa de oportunidade. Apresentar-se-ão também os dados agrupados por cenários, com os quatro indicadores sobre as parcelas do fluxo de caixa.

a) **Valor presente líquido (VPL).**

Considera-se, neste, VPL como a diferença entre todos os benefícios ou anuidades e em seus diversos instantes no tempo, que são trazidos para o presente, e representam o valor presente do fluxo de caixa (VP_{fc}), e custo ou investimento (I). Assim, ($VPL = VP_{fc} - I$), e a alternativa que oferecer o maior VPL, será, dentro deste critério, a mais atraente.

b) **Tempo de retorno de capital ou *Payback* em anos.**

A alternativa que oferecer o maior retorno de capital, será, dentro deste critério, a mais atraente.

c) **Taxa interna de retorno (TIR)**

Neste item se consideram dois valores para os tempos de vida do equipamento; $n = 5$ anos, e $n = 10$ anos, e a que oferecer maior taxa, será, a mais atraente, dentro deste critério.

d) **Índice Benefício/Custo (B/C) ou Índice de Lucratividade (IL)**

A alternativa que oferecer o maior Índice Benefício/Custo (B/C), será, dentro deste critério, a mais atraente.

4.5 Considerações

Diante do modelo proposto neste capítulo, em que, partindo-se, das correntes instantâneas, demandadas, e dos dados do motor, estima-se uma economia de energia em kWh e de acordo com o custo da energia, gera-se os indicadores de desempenho. No próximo capítulo far-se-á a apresentação do teste do modelo, nas condições de pesquisa em campo, quando verificar-se-ão valores passíveis de serem economizados com a ação do *Drive* Modulador de Energia.

5 APLICAÇÃO DO MODELO

Neste capítulo, descreve-se um ensaio a que foi submetido o modelo proposto no capítulo 4, realizado em campo, em um processo real em produção, visando enriquecer a pesquisa através do conhecimento do comportamento e do desempenho, possibilitando identificar e quantificar desvios, averiguar, delimitar e restringir a sua validade e um aprimoramento do modelo.

5.1 Caracterização do ambiente e condições para o ensaio

Inicialmente projetou-se um ambiente desejável para a realização do ensaio, cujas características, a princípio, são propícias à utilização do *Drive* Modulador de Energia:

- que o processo produtivo dependa de energia mecânica oriunda de um motor elétrico de indução trifásico, linha comercial, 4 pólos, cujas especificações básicas possam ser conhecidas (em algumas máquinas, o motor é de difícil acesso e ou identificação da marca/fabricante/características é difícil);

- que o motor opere a pouca carga, ou em regime de carga variável, caracterizado por ciclos de trabalho (*duty cycle*), alternando momentos de plena carga ou quase plena, com momentos de pouca carga ou mesmo a vazio (nenhuma carga), em média abaixo de $\pm 50\%$.

Entre os processos produtivos, pode-se citar alguns que, de acordo com a literatura pesquisada, possuem e apresentam boas possibilidades de economia de energia elétrica: sistemas de corte (serras) e esmerilhamento; sistemas de trituração, moagem e de peneira; sistema de prensa, estampa e dobra; sistemas sopradores, exaustores e ventiladores; sistemas transportadores, correia, esteiras e escadas; sistemas compressores de pistão em geral, (incluindo resfriamento); sistemas extrudores e injetores; entre outros que, por questões diversas, impõem um motor de acionamento com potência instantânea muitas vezes acima da potência média necessária para as condições normais de operação, resultando em motor subcarregado.

Além das características já mencionadas, seria especialmente conveniente e desejável que o processo também abarcasse as seguintes possibilidades:

- de se promover intervenções (parada) no processo. Alguns processos, por serem críticos, gargalos, na produção da empresa, não devem sofrer intervenções que envolvam paradas (ou risco). Outros, mesmo não sendo críticos, para se atuar e efetuar intervenções/paradas, dependem de uma série de comunicações, justificativas e autorizações, resultando em dificuldade de intervenção;

- de se alterar as ligações elétricas do motor, comando e potência. Em algumas máquinas, existe grande dificuldade de modificações na parte elétrica, com nos casos em que ocorrem: acelerações e desacelerações, frenagem, paradas e reversões, troca de rotação, conversões $Y \rightarrow \Delta$, troca de número de pólos (máquinas operatrizes), e outros, fazendo uso de controles, comandos e temporizadores eletrônicos;

- que o acesso às dependências da empresa, seja fácil, em especial aos locais onde está o motor, o sistema de energia, de comando e proteção, que possua espaço físico para as necessárias instalações, manuseio e operação do *Drive* e do Analisador de Energia, restrições que se impõem, sejam pelo aspecto de segurança, de periculosidade e insalubridade do ser humano (pessoal), ou da segurança das instalações e patrimonial da empresa;

- que o processo seja cíclico, estável e que possua repetibilidade, com ciclo de produção (período) de curta duração, de poucos minutos no máximo.

Foi definida prioritariamente, a mesma seqüência em que as características desejáveis foram apresentadas, e que serviram de referência para seleção, escolha e definição da planta em produção onde se realizariam os testes. Além destes aspectos técnico-administrativo-produtivos, tem-se que compatibilizar os relativos às características elétricas das instalações, do motor que aciona o processo às do Modulador de Energia disponível para o teste, em especial, no que diz respeito à tensão, potência e a impedância da linha de alimentação (especificações elétricas), bem como com a disponibilidade do equipamento de medição (Analisador de Energia).

5.2 Definição da empresa/processo para a realização do ensaio

Utilizando-se do critério da estatística amostral, escolha da amostra ‘por julgamento’, que leva à seleção de um subgrupo de uma população, o qual, em vista das informações disponíveis, pode ser julgado como representativo da população, foram consultadas, abordadas e visitadas empresas que possuem processos de produção julgados propícios e favoráveis, de acordo com as características desejáveis apresentadas. Assim levantaram-se, identificaram-se e selecionaram-se empresas/processos.

Dentre as empresas consultadas, a que reuniu melhores condições e mostrou-se interessada em conhecer a nova tecnologia, proporcionando condições para o de trabalho, foi a ‘Cimento Davi S/A’, localizada na região metropolitana de Belo Horizonte, município de Santa Luzia/MG. É uma nova e moderna empresa que dispõe da mais alta tecnologia, com a planta industrial totalmente automatizada, sendo seu sistema de produção considerado ecologicamente correto. Desenvolve e pratica uma política explícita de qualidade ‘Momento

Davi de Qualidade’, com grande ênfase nas inovações e melhorias de processos e treinamentos constantes.

Iniciou sua produção em Agosto de 2001, com cimento Portland de alto forno, do tipo CP III 32 RS, conforme norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT e caracteriza-se por ter maior finura, torna-se mais impermeável, possui menor calor de hidratação, menor retração (hidráulica) e, por ser resistente a sulfato, é recomendado para: concretos e argamassas para meios agressivos (águas poluídas, esgoto, mar), galerias pluviais, obras subterrâneas, passagem de águas poluídas e esgotos sanitários; concretos: armado, estrutural armado, com agregados reativos ou simples; pisos industriais e pavimento; etc. A principal matéria-prima do CP III 32 RS do Cimento Davi é a escória de alto-forno, subproduto da produção do aço. A escória granulada utilizada é proveniente dos alto-fornos da Belgo Mineira, e compõe mais de 65% do Cimento Davi. A planta dispõe de uma ensacadeira instalada abaixo do silo central (Haver), com oitos bicos de enchimento e capacidade de 2.400 sacos de 50 Kg por hora. O cimento Davi é disponibilizado e comercializado em embalagens de sacos de 50 kg e a Granel.

A empresa insere-se no rol das ecologicamente corretas, apresentando um menor consumo de energia por unidade produzida, pois, além de reciclar matéria-prima, (um produto ou subproduto para a geração de outro), utiliza para a geração de calor gás natural, substituiu os controle mecânico de vazão, *Damper* (registro de tiragem de dutos e chaminé), por *Drives* eletrônicos Inversor, controlando motores, uso de motores de alto-rendimento, e outras ações, que resultam em melhor controle dos processos e economia de energia, comparando-se com a maioria de suas congêneres.

Dentre os vários processos existentes na fábrica, selecionou-se, para o trabalho, o da esteira transportadora de escória úmida que abastece o secador de escória. A esteira transportadora de escória úmida fica instalada no tempo, entre o estoque e o secador de escória, opera a uma velocidade linear de cerca de 1,32 m/s, possui um comprimento útil de 45 metros, elevação de 8 metros, 24 polegadas de largura, capacidade de transporte nominal de 80 ton/h, sendo setada para operar com cerca de 60 ton/h. Possui 2 (duas) entradas de carregamento, uma via balança dosadora de massa, de ação contínua, que atua em função da umidade do material na saída do secador. O sistema de controle de carregamento da esteira depende da constante de tempo (térmica) do secador que demanda alguns minutos. A outra entrada de carregamento, sem controle automático, é intermitente, vem de um triturador que desagrega a escória petrificada, (o triturador é alimentado por pá carregadeira). É acionada por um motor WEG de alto-rendimento de 12,5CV, 4 pólos com corrente nominal de 14,9 A,

440V trifásico de 60 Hz, que, em condições típicas e normais, opera a pouca percentagem da potência nominal, uma vez que, foi dimensionado para superar condições atípicas, acionar a correia transportadora com massa de escória máxima, estando a escoria úmida encharcada (dia de chuva forte), e caso necessite de parada, o motor deve ser capaz de partir e voltar à condição de regime.

5.3 Aplicação do modelo

5.3.1 1ª Etapa – Seleção dos parâmetros, avaliação do carregamento, (potências demandas e energia consumida em unidades específicas)

Com o Analisador de Energia ligado à rede de energia elétrica que alimenta o motor da esteira, capturam-se os dados correspondentes à condições de trabalho do motor (*on-line*). Com os dados coletados e disponibilizados na forma de tabela, migrados para o ambiente *Excel*, 1ª etapa do modelo, obteve-se como primeiro *Output*, o relatório gráfico da curva de carga da unidade consumidora, ou curva de consumo específico ao longo do tempo, do motor acionando a correia transportadora, alimentada diretamente na rede (*on-line*), apresentados na figura 5.1 e ao observá-la, vê-se que o processo solicita do motor uma carga que flutua ao longo do tempo.

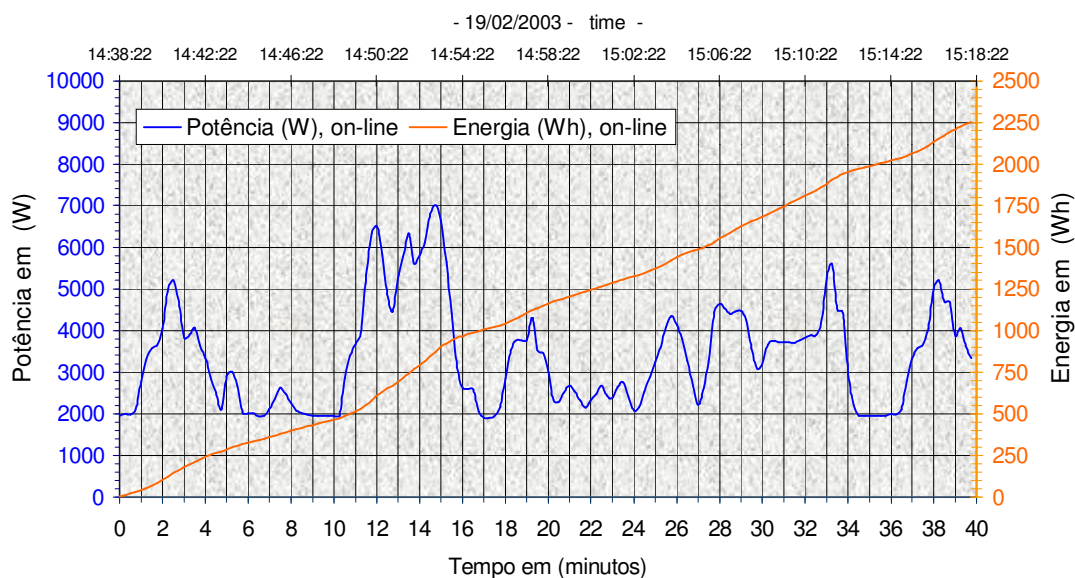


Figura 5. 1: Relatório gráfico gerado pela 1ª etapa, curva de carregamento do motor acionando a correia transportadora em período de produção de 40 minutos.

A área, abaixo da curva de potências instantâneas em Watt, corresponde à energia consumida, apresentada e quantificada pela curva de energia (E_{on}) em Wh = 2,253 kWh.

5.3.2 2ª Etapa – Avaliação do carregamento em percentual

Forneceu-se com *inputs* ao modelo, 2ª etapa, o carregamento instantâneo do motor; os seus dados de placa, gerou-se como *Output* o relatório gráfico, curva de carga em relação à potência nominal da unidade consumidora, ou curva de consumo de percentual de energia ao longo do tempo, o motor alimentado diretamente na rede (*on-line*), apresentado na figura 5.3.

Por simples inspeção da figura 5.3, identifica-se a possibilidade de se poupar alguma energia pelo uso do *Drive* Modulador de Energia, pois se observa que o processo permaneceu subcarregado, abaixo de 50% da potência nominal, boa parte do período amostrado.

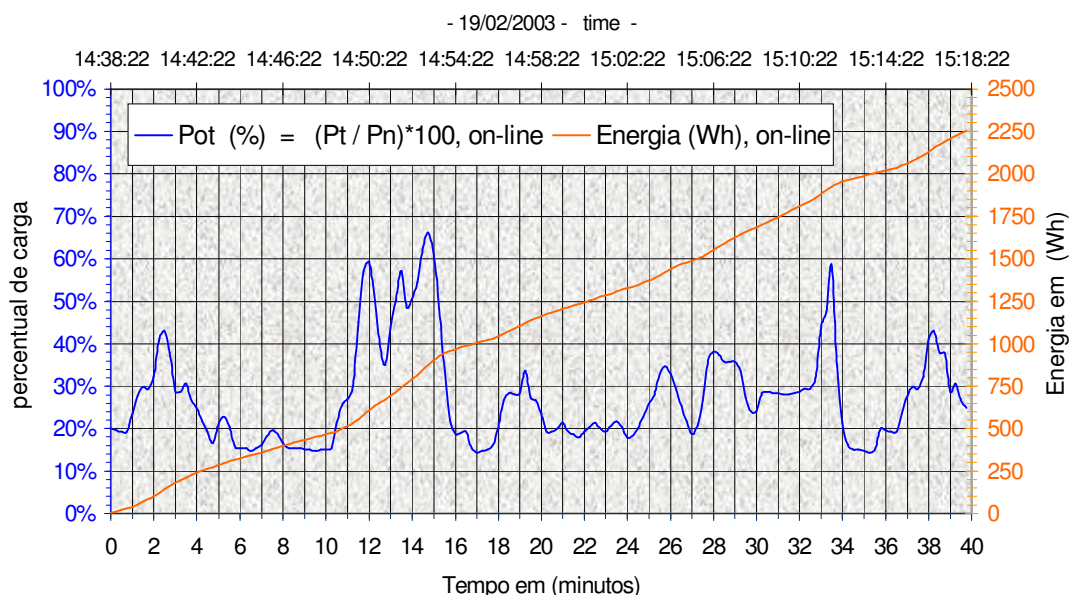


Figura 5. 2: Relatório gerado pela 2ª etapa, carregamento percentual do motor, em relação à potência nominal, e consumo de energia, em período de produção de 40 minutos.

5.3.3 3ª Etapa - Estimativa da energia poupada (para a condição *off-line*)

Na 3ª etapa do modelo, a cada potência instantânea demandada, quantizada e expressa em percentual da potência nominal, obtida da 2ª etapa, (figura 5.2), deve-se aplicar um Fator de abrandamento ($F_a = F_e \times F_c$).

O Fator de correção (F_c), é dado por $F_c = F_1 \times F_2$, onde:

- (F_1), primeiro fator, deve-se às diferenças de rendimentos (η) entre os motores utilizados para o levantamento que resultou na figura 4.7, (p.90) de 2 cv padrão, ou *Standard* (B) e do motor utilizado no acionamento da esteira, de 12,5 cv alto-rendimento (A). Os correspondentes rendimentos podem ser obtidos na figura 2.12 (p.47), ou nos catálogos de características técnicas dos fabricantes. Obteve-se, para o motor de 2 cv padrão ou *Standard* (B), $\eta = 73\%$, e para o motor de 12,5 cv alto rendimento (A) $\eta = 88\%$.

Assim: $\Delta \eta = \eta_x - \eta \rightarrow \Delta \eta = 0,88 - 0,73 = 0,15$ e,

$$F_1 = (1 - \Delta \eta) F_1 = (1 - 0,15) \rightarrow F_1 = 0,85 = 85 \%$$

• (F_2), segundo, fator, deve-se ao fato de a curva da figura 4.6 resultar de condições de carga estáticas, ou seja, carga fixa que não varia no tempo, e na planta, no processo real, a condição é de carga dinâmica, ou seja, varia constantemente ao longo do tempo. Para esta dissertação, assume-se: $F_2 = (1 - 0,25) = 0,75 = 75\%$

Resulta então um Fator de correção,

$$F_c = F_1 \times F_2 = 0,85 \times 0,75 = 0,64 = 64\%.$$

O Fator de economia (F_e), ou percentual de energia economizada é obtido na figura 4.7, (p.88), para variações de 2,5% em 2,5% do carregamento.

Assim, o produto do Fator de correção (F_c) pelo Fator economia (F_e) gera o Fator de abrandamento (F_a), ou seja: $F_a = F_e \times F_c$.

Agora, valor de potência instantâneo, percentual, apresentado na figura 5.2 deve ser atenuado pelo seu Fator de abrandamento (F_a) para se obter a demanda de potência estimada, para uma suposta condição *off-line*. Para melhor visualização da ação do *Drive* e comparações, na figura 5.3, fez-se sobreposição das curvas de potência e energia para as condições *on-line*, medidas no processo, nas condições *off-line*, e as avaliadas pelo modelo.

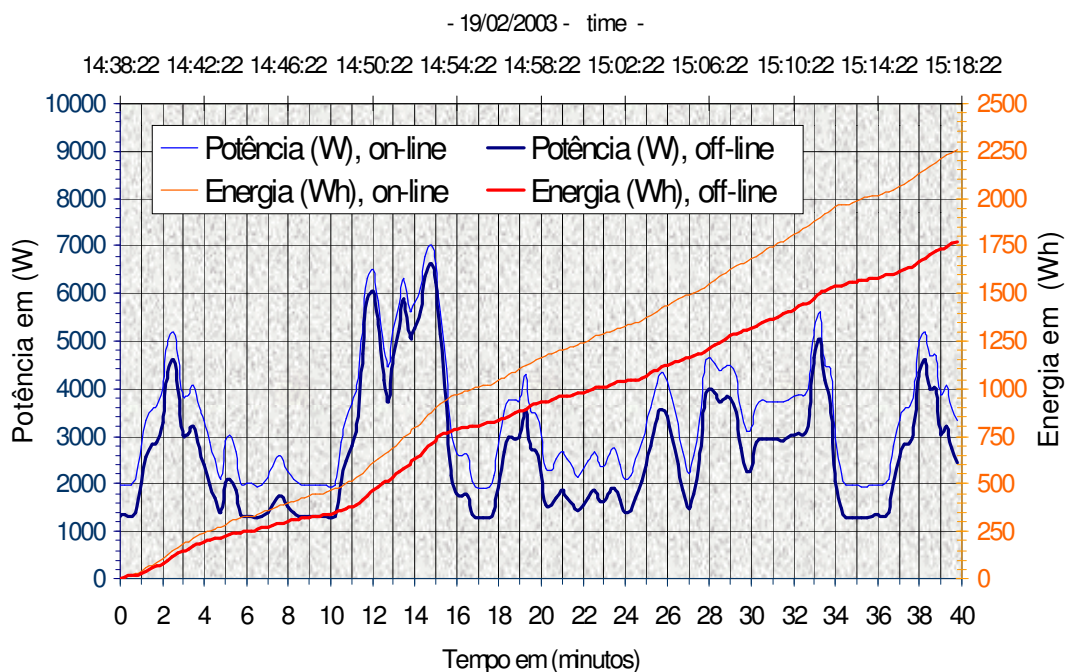


Figura 5. 3: 3ª etapa, relatório gráfico, curvas de potências e energia para as duas condições; *on-line* valores medidos e *off-line* valores estimados.

As áreas abaixo das curvas de potências instantâneas correspondem às energias em Wh consumidas no período considerado, para a condição *on-line*, (E_{on}) efetivamente medida, e para a condição *off-line*, ($E_{econ-avaliada}$) que foi avaliada pelo modelo. A diferença entre elas corresponde e expressa à energia que pode ser economizada ou poupada quando do uso do *Drive* Modulador de Energia, representada por $E_{econ-avaliada} = E_{on} - E_{off-avaliada}$

Ao final do período considerado de 40 (quarenta) minutos, o valor da energia *on-line* é $E_{on} = 2,253$ kWh, enquanto o da energia *off-line* é $E_{off-avaliada} = 1,770$ kWh. Assim, para o mesmo período de produção, 40 (quarenta) minutos, estima-se uma economia de energia, quando do uso do *Drive* Modulador de Energia, $E_{econ-avaliada}$ de:

$$E_{econ-avaliada} = E_{on} - E_{off-avaliada} = 2,253 \text{ kWh} - 1,770 \text{ kWh} = 0,483 \text{ kWh} \quad (\text{Eq. 5. 1})$$

$$E_{econ-avaliada} = 0,483 \text{ kWh.}$$

A relação entre $E_{econ-avaliada}$ e E_{on} multiplicado por cem, resulta na energia economizada em valores percentuais $E_{econ-avaliada} (\%) = (E_{econ} / E_{on}) \times 100$.

$$E_{econ-avaliada} = 0,483 \text{ kWh} / 2,253 \text{ kWh} = 0,215$$

$$E_{econ-avaliada}(\%) = 21,5\% \text{ de economia.}$$

Agora, com o Modulador de Energia controlando o motor da esteira, ou seja, condição *off-line* efetiva, procura-se reproduzir as mesmas condições de operação ou de carregamento. Para este processo, em termos práticos, a reprodução de carregamento dificilmente será alcançada, pois a matéria-prima transportada, escória, não se apresenta uniforme, possuindo elementos variados em sua composição, variados níveis de unidade e temperatura, densidades e granulidade. Capturam-se e registram-se os dados correspondentes às magnitudes elétricas, com foco nas demandas de potências e no consumo de energia do processo. Traça-se a curva das potências e de energia e determina-se o consumo de energia, ($E_{off-medida}$).

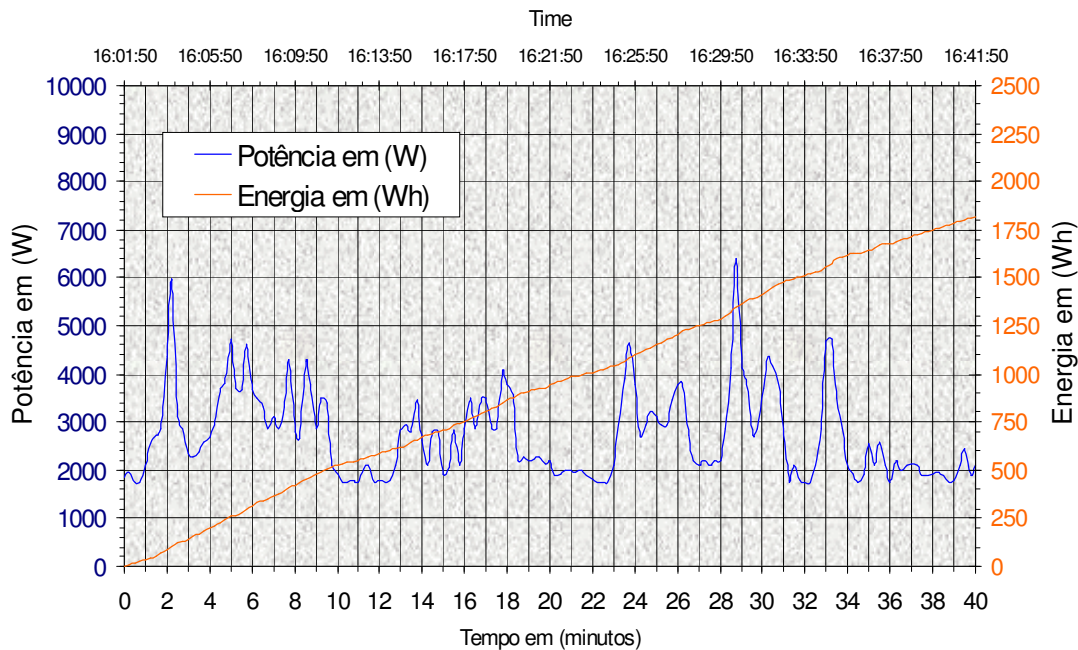


Figura 5. 4: Relatório gráfico, curvas de demanda de potência e consumo de energia para condições *off-line* efetivamente medida.

A área, abaixo da curva de potências instantâneas em Watt, corresponde à energia consumida em Wh, apresentada e quantificada pela curva de energia $E_{off-medida}$ que para o período de produção de 40 (quarenta) minutos, foi de $E_{off-medida} = 1,816$ kWh

A energia efetivamente economizada é obtida por, $E_{econ-medida} = E_{on} - E_{off-medida}$

$$E_{econ-medida} = 2,253 \text{ kWh}, - 1,816 \text{ kWh} = 0,437 \text{ kWh} \quad (\text{Eq. 5. 2})$$

A relação entre $E_{econ-medida}$ e E_{on} , multiplicada por cem, resulta na energia economizada medida em valores percentuais, $E_{econ-medida} (\%) = (E_{econ-medida} / E_{on}) \times 100$

$$E_{econ-medida} = 0,437 \text{ kWh} / 2,253 \text{ kWh} \times 100 = 19,38\%$$

$$E_{econ-medida} = 19,38\% \text{ de economia.}$$

Comparando-se os resultados dos valores efetivamente medidos no processo sob ação do modulador $E_{econ-medida} (\%) = 19,38\%$ de economia, com o valor oriundo do modelo proposto $E_{econ-avaliada} (\%) = 21,5\%$ de economia, observa-se uma dispersão de cerca de 10% entre os valores das percentagens de economia (desvio).

Todavia, esta dispersão pode ser considerada aceitável, pois, segundo Nogueira, (2001, p.105) “[...] de um modo geral, em auditorias energéticas, não se exige uma elevada precisão nos levantamentos de campo, aceitando-se preliminarmente desvios de até 10% nos balanços energéticos” ressaltando que “Caso resulte da auditoria um projeto específico, propondo uma redução de perdas com margens estreitas de retorno, procede-se então à reavaliação, com maior precisão, das perdas envolvidas”.

5.3.4 4ª etapa - Análise econômica

Nesta etapa, o modelo gera os indicadores de desempenho: Valor Presente Líquido (VPL), Tempo de Recuperação de Capital (*Payback*), Taxa Interna de Retorno (TIR) e Índice Benefício/Custo (B/C), que serviram de base para a avaliação de alternativas de investimentos em conservação e eficiência energética, conforme descrito no Capítulo 4, para as condições 8.000, 4.000 e 2.000 horas por ano de operação. Da 3ª etapa obteve-se em 40 (quarenta) minutos de operação, uma energia economizada avaliada, $E_{\text{econ-avaliada}}$ de 0,483 kWh, correspondendo a 0,725 kWh, $(0,483\text{kWh} \times 60/40)$.

A economia de energia 0,725 kWh, deve ser convertida em valores monetários, de acordo com a tarifa adotada para cada caso. Neste trabalho, assume-se como referência a Tarifa Convencional Comercial (ver capítulo 4), incluindo 18% de ICMS, para a região metropolitana de Belo Horizonte, no valor de R\$0,371300, que deve ser acrescida, a título de encargo de capacidade emergencial no valor de R\$0,0069512, por kW, e também a taxa municipal de iluminação pública que é cobrada de cada consumidor, que para efeito de apuração dos custos, deve ser rateada, proporcionalmente, entre todos os que consomem energia nas instalações deste consumidor. Todos os valores monetários referem-se aos do dia 02 de maio de 2003, (CEMIG, 2003). Para esta dissertação, será considerada, energia elétrica no valor de R\$ 0,38 por kWh.

Os custos de implantação do *Drive* Modulador de Energia, para a potência de 12,5 cv, foi de R\$3.598,00, considerando a cotação do dólar do dia 2 de maio de 2003 de R\$2,953.

O tempo de vida da ação em conservação de energia foi considerado: $n = 5$ anos correspondente à vida contábil (não acelerada) de máquinas e equipamentos e $n = 10$ anos.

Considerando-se os 3 (três) cenários (0%, 2,5% e 5%) para os reajustes da tarifa de energia elétrica acima da taxa de oportunidade.

Assim, nesta 4ª Etapa, o modelo recebe com *input*: a economia de energia em kWh, ($E_{\text{econ-avaliada}} = 0,725$ kWh), advinda da 3ª etapa; mais os custos: da energia em kWh e de implantação, que devem ser fornecidos. Utilizando-se das funções financeiras do *Excel*, calculam-se os indicadores e desempenho, para cada cenário, quando se gera o relatório apresentado na figura 5.5.

Número de horas de operação por ano	Economia de energia em kWh por ano	Economia em valor monetário (real) para o 1º ano, (VPfc) para Tx resultante acima tx de oportunidade		
		0% a.a.	2,5% a.a.	5% a.a.
8.000	5.802	R\$2.204,74	R\$2.259,86	R\$2.314,98
4.000	2.901	R\$1.102,37	R\$1.129,93	R\$1.102,37
2.000	1.450	R\$551,18	R\$564,96	R\$578,74

Fonte: dados da pesquisa.

Figura 5. 5: Economias em valores monetários, (em Real), para o 1º ano, (VPfc).

a) Valor presente líquido (VPL)

Considera-se como a diferença entre todos os benefícios ou anuidades e em seus diversos instantes no tempo, que são trazidos para o presente e representam o valor presente do fluxo de caixa (VP_{fc}), e custo ou investimento (I), Assim: $VPL = VP_{fc} - I$. A alternativa que oferecer o maior VPL, será, dentro deste critério, a mais atraente.

A figura 5.6, apresenta os valores para os dois tempos de vida e VPL para taxa resultante de desconto de: 0%, 2,5% e 5% a.a.

Número de horas de operação por ano	Valor Presente líquido (VPL), com taxa resultante acima da taxa de oportunidade					
	0% a.a.		2,5% a.a.		5% a.a.	
	5 anos	10 anos	5 anos	10 anos	5 anos	10 anos
8.000	R\$7.425,70	R\$18.449,40	R\$8.280,56	R\$21.720,05	R\$9.193,71	R\$25.519,53
4.000	R\$1.913,85	R\$7.425,70	R\$2.341,28	R\$12.659,03	R\$2.493,29	R\$10.267,49
2.000	R\$(842,08)	R\$1.913,85	R\$(628,36)	R\$6.329,51	R\$(400,07)	R\$3.681,38

Fonte: dados da pesquisa.

Figura 5. 6: Valor Presente líquido (VPL), com taxa acima da taxa de oportunidade.

b) Tempo de retorno de capital ou *Payback* em anos

A figura 5.7 apresenta os valores para dois tempos de vida e de retorno de capital para taxa resultante de desconto de: 0%, 2,5% e 5% a.a. A alternativa que oferecer o menor tempo de retorno de capital , será, dentro deste critério, a mais atraente.

Número de horas de operação por ano	Economia de energia em kWh por ano	Tempo de retorno de capital ou payback, com taxa resultante acima da taxa de oportunidade (em anos)		
		0% a.a.	2,5% a.a.	5% a.a.
8.000	8.040	1,63	1,58	1,53
4.000	4.020	3,26	3,05	3,10
2.000	2.010	6,53	5,98	5,46

Fonte: dados da pesquisa.

Figura 5. 7: Tempo de retorno de capital para taxas resultante acima da taxa de oportunidade.

c) A taxa interna de retorno (TIR)

A figura 5.8 apresenta os valores de TRI encontrados para dois tempos de vida: $n = 5$ e $n = 10$ anos. A que oferecer o maior Índice, será, dentro deste critério, a mais atraente.

Número de horas de operação por ano	Taxa interna de retorno (TIR), com taxa resultante acima da taxa de oportunidade					
	0% a.a.		2,5% a.a.		5% a.a.	
	5 anos	10 anos	5 anos	10 anos	5 anos	10 anos
8.000	54%	61%	58%	65%	62%	69%
4.000	16%	28%	19%	31%	20%	33%
2.000	-8%	9%	-6%	11%	-4%	14%

Fonte: dados da pesquisa.

Figura 5. 8: Taxa interna de retorno (TIR), para taxas resultante acima da taxa de oportunidade.

d) Índice Benefício/Custo (B/C) ou índice de Lucratividade (IL)

A alternativa que oferecer o maior Índice Benefício/Custo (B/C), será, dentro deste critério, a mais atraente. A figura 5.9 apresenta os valores para dois tempos de vida e para taxa resultante de desconto de: 0%, 2,5% e 5% a.a.

Número de horas de operação por ano	Índice Benefício/Custo (B/C), com taxa resultante acima da taxa de oportunidade					
	0% a.a.		2,5% a.a.		5% a.a.	
	5 anos	10 anos	5 anos	10 anos	5 anos	10 anos
8.000	3,06	6,13	3,30	7,04	3,56	8,09
4.000	1,53	3,06	1,65	3,52	1,69	3,85
2.000	0,77	1,53	0,83	1,76	0,89	2,02

Fonte: dados da pesquisa.

Figura 5. 9: Índice Benefício/Custo (B/C), com taxa resultante acima da taxa de oportunidade.

e) Variação referente às taxas e cenários

Apresentam-se também os dados agrupados por cenários com os quatro indicadores.

Número de horas de operação por ano	CENÁRIOS PARA TAXA RESULTANTE DE 0%						
	VLP		Payback (em anos)	TIR		B/C	
	5 anos	10 anos		5 anos	10 anos	5 anos	10 anos
8.000	R\$6.908,53	R\$17.415,07	1,63	54%	61%	3,06	6,13
4.000	R\$1.655,27	R\$6.908,53	3,26	16%	28%	1,53	3,06
2.000	R\$ (971,37)	R\$1.655,27	6,53	-8%	9%	0,77	1,53

Fonte: dados da pesquisa.

Figura 5. 10: indicadores para taxa resultante de 0%.

Número de horas de operação por ano	CENÁRIOS PARA TAXA RESULTANTE DE 2,5 %						
	VLP		Payback (em anos)	TIR		B/C	
	5 anos	10 anos		5 anos	10 anos	5 anos	10 anos
8.000	R\$8.280,56	R\$21.720,05	1,58	58%	65%	3,30	7,04
4.000	R\$2.341,28	R\$12.659,03	3,05	19%	31%	1,65	3,52
2.000	R\$(628,36)	R\$6.329,51	5,98	-6%	11%	0,83	1,76

Fonte: dados da pesquisa.

Figura 5. 11: indicadores para taxa resultante de 2,5%.

Número de horas de operação por ano	CENÁRIOS PARA TAXA RESULTANTE DE 5 %						
	VLP		Payback (em anos)	TIR		B/C	
	5 anos	10 anos		5 anos	10 anos	5 anos	10 anos
8.000	R\$9.193,71	R\$25.519,53	1,53	62%	69%	3,56	8,09
4.000	R\$2.493,29	R\$12.659,03	3,10	20%	33%	1,69	3,85
2.000	R\$(400,07)	R\$6.681,38	5,46	-4%	14%	0,89	2,02

Fonte: dados da pesquisa.

Figura 5. 12: indicadores para taxa resultante de 5%.

5.4 Considerações

Descreve-se, neste capítulo, um ensaio a que o modelo proposto foi submetido, realizado em um processo real em produção, (em campo). Vista a aplicabilidade do modelo, passa-se, no próximo capítulo, a concluir o trabalho.

6 CONCLUSÕES

A necessidade de uma taxa de crescimento econômico, a escassez de recursos e os limites da disponibilidade da energia elétrica tornam as ações de racionalização e uso eficiente da energia elétrica indispensáveis. Este quadro conflituoso pode ser atenuado pelo aumento da eficiência dos conversores eletromecânicos de energia, por meio de controladores de energia, desde que corretamente instalados e operados. Para tanto, as características operacionais dos processos foram estudadas, identificadas e expostas ao longo da pesquisa. A seguir são apresentadas as principais conclusões advindas do desenvolvimento do trabalho.

6.1 Conclusões

No confronto dos resultados, com relação aos objetivos do trabalho, verifica-se que foram atingidos, pelo que se relatam, sucintamente, as observações que lhes são pertinentes.

- A identificação das características operacionais dos motores elétricos de indução, em atendimento a necessidades energéticas de um processo produtivo, pode ser auferida com a comparação entre os valores das potências instantâneas demandadas e a potência nominal do motor, resultado que deve ser expresso em termos percentuais.

- Na identificação das características operacionais do *Drive* Modulador de Energia, constatou-se, fundamentalmente, que este apresenta méritos, quando empregado em processos de velocidades constantes, (dentro da faixa de escorregamento), com carregamento médio do motor inferior a 50%, e que a variação do carregamento não seja muito brusca (impacto).

- A associação *Drive*/motor, respeitadas as condições descritas, resulta num sistema de conversão eletromecânica com maior eficiência energética, que se viabilizará quando respeitadas as condições técnicas e o número de horas de operação do processo for da ordem de 8.000 horas por ano.

-A análise econômica indica a viabilidade da adoção do *Drive* em um processo produtivo, desde que, além das condições já relatadas, os dois principais e mais sensíveis fatores: - tarifa da energia elétrica, e - custos de implantação, sejam ponderados, visto que:

- A tarifa da energia elétrica possui custo variável para as empresas, seu valor efetivo é de difícil definição e em termos práticos, esta atrelada ao dólar (hoje), e conforme demonstrado possui forte tendência de alta;
- Custos de implantação do *Drive* Modulador são dependentes: das potências, da corrente e da tensão elétrica do processo. Os equipamentos são, total ou parcialmente, importados, e seus custos ficam atrelados à variação do câmbio. Existe tendência de queda, conforme descrito nas p.68-69, pois, a estratégia de comercialização adotada, é a supervalorização

do seu produto, denomina de *skimming*, “extraindo o máximo da camada mais alta, antes de baixar para atender aos demais níveis” (KOTLER, 2000.p.329,478).

- Qualitativamente, as análises apontam de forma sistemática para economia de energia, porém, quantitativamente, acusam dispersão nos valores. Na busca da explicação para as dispersões, constatou-se:

- Equipamentos de fabricantes diferentes guardam entre si semelhanças técnicas, todavia podem necessitar de ajustes específicos, e apresentam comportamentos e respostas distintas, especialmente em seus algoritmos de controle e correspondentes softwares, e que em um mesmo modelo de equipamento, pode existir algoritmo de controle de versão diferente.
- Os Moduladores de Energia mostraram-se sensíveis à qualidade da energia elétrica, em especial quanto à impedância e regulação da rede de alimentação.
- Diferentes metodologias e instrumentos de medição para as mensurações, utilizados por fabricantes e pesquisadores.
- Utilização de Motores de procedências e potências variadas, de rendimentos distintos.
- Tipos e variações do carregamento mecânico do motor.

Com relação ao teste de laboratório, cujo resultado está resumido pela figura 4.6 (p.86), observa-se que boa poupança de energia elétrica é obtida em grande parte da gama de percentagem de carregamento do motor mas, nas condições práticas, esta poupança assume valores inferiores, alcançando valores expressivos quando a percentagem de carregamento do motor for inferior a algo como 50%.

Quanto ao resultado do teste a que foi submetido Modelo Proposto, constatou-se:

No confronto entre os valores advindos do Modelo Proposto, e os efetivamente medidos no processo sob ação do Modulador, (capítulo 5, p.100), observou-se similitude entre a $E_{econ-medida} (\%) = 19,38\%$ e a $E_{econ-avaliada} (\%) = 21,5\%$. Na explicação para a dispersão de aproximadamente 10%, na quantização da economia, há de se considerar que existe um erro de avaliação inerente ao processo, uma vez que este não possui repetibilidade, conforme descrito no item 5.1 Caracterização do ambiente e condições para o teste (capítulo 5, p.93-94).

Há de se considerar, que o motor que aciona a esteira é do tipo alto-rendimento (A), possui menores perdas que o padrão (B), o que limita a quantidade de energia a ser poupada.

- Para a quantização definição dos valores dos indicadores de desempenho, Valor Presente Líquido (VPL), Tempo de Retorno de Capital (*Payback*), Taxa Interna de Retorno (TIR) e Índice Benefício/Custo (B/C) (figuras 5.5 a 5.12 p.103-104), os custos da energia e da implantação foram mantidos constantes, calculados para uma data específica. Porém

ocorreram outras simulações, com a variação destes dentro de faixas relativamente estreitas, quando se constatou forte dependência dos indicadores.

- Para as condições do teste, valores monetários referindo-se ao dia 02 de maio de 2003, considerando-se a cotação do dólar R\$2,953 e ao valor da energia a R\$ 0,38 por KWh, e outras, os indicadores de desempenho tornam-se atraentes para a condição do motor operando cerca de 8.000 horas por ano, ou acima.

- Tempo de Vida de um projeto ou ação em conservação de energia, foram simulados: $n = 5$ anos e $n = 10$ anos, conforme exposto no item 4.4 4ª Etapa - Análise econômica, (capítulo 4, p.90-92), Dos resultados apresentados nas figuras 5.5 a 5.9, (p.102-103), somente VPL mostra-se fortemente sensível a este parâmetro, sendo que a influência sobre TRI é pequena, e sobre B/C, apenas guarda a proporcionalidade.

- Cenários para os reajustes das tarifas de energia elétrica nos próximos anos, foram considerados 3 (três), em que a tarifa de energia elétrica será reajustada a cada ano pela taxa de oportunidade acrescida de 0%, 2,5% e 5% a.a. Conforme apresentado nas figuras 5.10, a 5.12, (p.103-104), somente VPL mostra-se fortemente sensível a este parâmetro, sendo que a influência sobre o *Payback*, a TRI, e o B/C, é relativamente pequena.

Quanto ao objetivo geral deste trabalho: avaliação do impacto em termos de eficiência energética e os correspondentes efeitos econômico-financeiros da adoção da tecnologia dos *Drives* Moduladores de Energia, associados aos motores elétricos de indução, diante os atuais custos e benefícios, é viável para processos cujo carregamento médio seja inferior a 50%, com motores que operam grande número de horas por ano, da ordem de 8.000. O ensaio detectou economia média de 20%, que, nos custos de energia e de implantação assumidos, em cerca de 18 meses, o equipamento se paga, a partir de quando esta percentagem de energia poupada, se reverterá em lucro. Afora destas condições, dificilmente poderá se obter vantagens econômicas e deverá ser feito um estudo específico para o caso.

Quanto à hipótese da pesquisa: a eficiência dos *Drives* Modulares de Energia encontra-se na capacidade de dosar a energia elétrica para o motor de indução, em função do torque requisitado (técnico) e diminuição dos custos operacionais decorrentes do menor consumo de energia elétrica (econômico), encontra-se totalmente comprovada diante dos aportes já relacionados.

Com a comprovação da hipótese, pode-se responder à problemática:

- A associação de *Drive* Modulador de Energia ao motor elétrico de indução leva à economia de energia, respeitados os aspectos apurados, podendo-se obter ganhos econômicos.

- Verificou-se no teste, em média, 20% de melhoria na eficiência, e por conseqüência, o mesmo ganho na produtividade.

- Os ganhos monetários são variáveis, pois estão sujeitos à tarifa da energia elétrica, tipicamente diferentes de empresa para empresa, das projeções para os reajustes da tarifa, do custo de implantação que depende do fornecedor e do câmbio, do número de horas de trabalho do motor e outros, determinando que estas mensurações sejam realizadas oportunamente, caso a caso.

Ressalta-se, assim, que a **utilização do *Drive* Modulador de Energia, de forma generalizada não garantirá benefícios técnico/econômicos.**

Ao se levantar, estudar e analisar, técnica e economicamente, a associação *Drive* Modulador de Energia ao motor de indução, buscam-se sistemas de acionamentos mais eficientes, de custo operacional adequado e de maior produtividade. A análise apresentada restringiu-se aos benefícios econômicos diretos e imediatos, não se consideraram outros ganhos marginais, de difícil mensuração monetária, como: diminuição da manutenção e maior vida útil do motor, menor quantidade de calor/temperatura no ambiente, disponibilização do sistema de energia para uso por outro equipamento/usuário. Todavia, nas avaliações de tecnologias/projetos/ações com intuito de reduzir o consumo de energia, há de se prestar atenção nos benefícios ao meio-ambiente, à contribuição ao desenvolvimento sustentável, que se constitui em *marketing* de causas sociais (*marketing societal*) para a empresa.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Apresentam-se algumas sugestões para futuros trabalhos de pesquisa a serem desenvolvidos em nível de dissertação ou tese, resultantes de lacunas de conhecimento detectadas no decorrer da pesquisa.

- Desenvolver um modelo com base em multicritérios, para apoio ao processo decisório, de investimentos em projetos e ações de uso eficiente e economia de energia, de acordo com critérios pré-estabelecidos, financeiros e não financeiros, definindo-se uma priorização, que leve ao estabelecimento sistemático, a uma regra matemática para expressar e representar julgamentos de valor, relações numéricas que reproduzam a estrutura de preferência dos decisores sobre um conjunto de objetos ou observações. O modelo deverá captar e expressar a ótica do decisor, através da avaliação de sua modelagem de preferências, que insere também os aspectos de risco. Deve-se definir as preferências sobre critérios específicos, que abranjam tanto os aspectos os estratégicos, os processual, quando os técnicos, da organização, que se possa atribuir valores numéricos às performances de ações do investimento, (os impactos dos descritores), obtendo-se um escore de valor que representa o grau pelo qual um ou vários objetivos são atingidos. Para

isso, dentro as ferramentas, metodologias e técnicas, destacam-se: - AHP, *Analytic-Hierarchy Process*, Processo de Análise Hierárquica, - MAUT, *Multi-Attribute Utility Theory*, Apoio a Decisão Multicritério, e - MCDA, *Multi-Criteria Decision Aid*, Multi-Critérios de Ajuda à Decisão. Assim, esse modelo como ferramenta de gestão, deverá contribuir para que os recursos dispensados e o retorno do investimento alcancem seu objetivo final.

- Desenvolvimento de modelo para estudo de viabilidade do *Drive* Modulador de Energia que abarcasse os sistemas de acionamento monofásico, que não foram abordados neste trabalho. Tipicamente, os motores monofásicos são de pequena potência, fracionários e de poucas horas de uso por ano, porém sua quantidade é grande e *Drive* monofásico possui preço bem menor do que o trifásico (Hardware muito mais simples). Há também de se considerar que, no meio rural o sistema de energia é monofásico, sendo comum encontrar motores de 10 cv, 15 cv, ou mais, trabalhando longos períodos, boa parte deles com carga média baixa no ciclo de operação, (máquinas de ração, picadeira, refrigeradores e misturadores, etc).

- Desenvolvimento de *Drive* Modulador de Energia, que servisse de plataforma para uma futura industrialização, com características customizadas, tropicalizadas e algoritmos e rotinas de controle específico para determinado processo (tipo de carga). Isso se desdobraria em conhecimento específico sobre *Drive* Modulador de Energia, sobre o processo, levando à evolução, sedimentação e divulgação e no incentivo à entrada de novos fabricantes no mercado, o que poderia levar à diminuição do preço do equipamento.

- Estudo comparativo entre os *Drives*: Inversor de tensão/frequência e o Modulador de Energia, contemplando as aplicações comuns, vantagens e desvantagens, visto que os estudos mostraram que, nem sempre, possuem aplicações distintas e, sim, que existem processos onde eles podem ser concorrentes, como em alguns casos dos sistemas de transporte (esteira) e em algumas cargas centrífugas.

- Estudo e desenvolvimento de um modelo para análise e controle dos fenômenos apresentados no item 2.3.9 Efeitos adversos dos acionamentos eletrônicos, (p.70). Apesar de os acionamentos eletrônicos trazerem grande flexibilidade e economia para a operação dos processos que utilizam os motores elétricos, produzem e introduzem na rede elétrica de alimentação as harmônicas, causando distorções nas formas de onda de corrente e tensão do sistema elétrico, capazes de prover influências no seu comportamento. Porquanto a potência manipulada pelos *Drive* eletrônicos seja pequena em relação à do barramento ao qual ele(s) esta(ão) ligado(s), seu efeito poderá ser desconsiderado mas, com a sua disseminação, cada vez mais surgirão problemas de qualidade de energia nas instalações elétricas.

REFERÊNCIAS

AMÉRICO, Márcio et al. **Guia operacional de acionamentos eletrônicos**. Rio de Janeiro: ELETROBRÁS/PROCEL/PROCEL CEPEL, 1998.

ARRILLAGA, J.; BRADLEY, P.A.; Bodger, P. S. **Power system harmonic**. New Delhi: John Wiley&Sons, 1985.

Associação Brasileira da Infra-Estrutura e Indústrias de Base, <http://www.abdib.com.br>

AUGUSTO JÚNIOR, Norberto. **Motores de alto-rendimento**: dimensionamento e viabilidade econômica. 2001 181p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001.

BARBI, Ivo. **Eletrônica de potência**. 3.ed. Florianópolis: Autor UFSC-CTC, 2000.

BERTOLO. L. A. **Análise de investimento**. Rio de Janeiro R.J: FAFICA. 2003. Disponível em: <<http://intermega.globo.com/lbertolo>>. Acesso em: 25 janeiro 2003.

BORTONI, Edson da Gama; SANTOS, Afonso Henriques Moreira. Acionamentos com motores de indução trifásicos. In: **Conservação de energia**: eficiência de instalações e equipamentos. Coord. Jamil Haddad. Itajubá: FUPAI, 2001.

BORTONI, Edson da Gama; SANTOS, Afonso Henriques Moreira. Análise econômica em conservação de energia. In: **Conservação de energia**: eficiência de instalações e equipamentos. Coord. Jamil Haddad. Itajubá: FUPAI, 2001.

CASCAES, João Carlos. **Tarifas, impostos e inflação**. Disponível em: <<http://www.canalenergia.com.br>>. Acesso em 07 abril 2003.

CATE/CEPEL, **Acionamento eletrônico**: uma tecnologia que economiza energia. Rio de Janeiro, 2001. Centro de Aplicação de Tecnologias Eficientes e o Centro de Pesquisa de Energia Elétrica. Rio de Janeiro. Disponível em :< <http://www.cepel.br>>.

Centrais Energéticas de Minas Gerais, CEMIG. Site:<<http://www.cemig.com.br>>

CHAVES, B.M.M. **Fatores subjacentes à nova modelagem do setor elétrico brasileiro**. 1999. 145p. Dissertação (Mestrado Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1999.

COSTA, Heitor Scalabrini. **Por que o tarifaço**.

<<http://www.canalenergia.com.br>>. Acesso em: 8 abril 2003.

DOEBELIN, Ernert **Measurement systems**: application and desing. 4 ed. Singapore: McGraw-Hill International editions, publishing company. 1998.

Eletrobrás: **Provedor de Informações Econômico-Financeiras das Empresas de Energia Elétrica**. Site: <<http://www.ie.ufrj.br/eletrobras>>

ENERGYSMART, divisão CEM (*Coast Energy Management*), Catálogo (eletrônicos), 2001. Site: <www.energysmart.com>

EBERLE. **Manual de motores elétricos**. Caxias do Sul, 2001.

FERREIRA, Fernando de. **Europe through the save network** Universidade de Coimbra Instituto de Sistemas e Robótica ISR-UC (Laboratório de Energia e Ambiente - LEA). <<http://www.isr.uc.pt/~jeepisr/indexa.html>>. Acesso em: 15 outubro 2002.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 1996.

HADDAD, Jamil; GAMA, Henrique Ramalho Parreira. Tarifação de energia elétrica. In: **Conservação de energia: eficiência de instalações e equipamentos**. Coord. Jamil Haddad. Itajubá: FUPAI, 2001.

HOLLANDA, Jayme Buarque. **No apagar das luzes**. Disponível em: <<http://www.canalenergia.com.br>>. Acesso em: 20 Dezembro 2002.

Instituto de Desenvolvimento Estratégico do Setor Elétrico. Site: <<http://www.ilumina.org.br>>

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA. Grandezas elétricas. Disponível em: <www.inmetro.gov.br>. Acesso em 15 setembro 2002.

Instituto Nacional de Tecnologia (INT). Site:<www.int.gov.br> <mailto:energia@int.gov.br>

JANNUZZI, Gilberto Martino; SWISHER, Joel N. R.. **Planejamento integrado de recursos energéticos: meio ambiente, conservação de energia e fontes renováveis**. Campinas: Autores Associados, 1997.

JOHNSON, E. David et al. **Fundamentos de análise de circuitos elétricos**. Rio de Janeiro:Prentice-Hall, 1994.

KOTLER, Philip. **Administração de marketing: a edição do novo milênio**. São Paulo: Prentice Hall, 2000.

LUZ, Mauricio V. Ferreira da, et al. **Calculo e avaliação das perdas no ferro e do ruído acústico no motor de relutância chaveado**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2001. WEG Conservação de Energia Elétrica

MAMEDE FILHO, João; **Proteção de equipamentos eletrônicos sensíveis: aterramento**. São Paulo: Érica, 1999.

MARQUES, José Augusto. **Rumos do setor elétrico**. Associação Brasileira da Infra-Estrutura e indústria de Base. Disponível em: <<http://www.abdib.com.br>>. Acesso em: 23 março 2003.

MENEZES, E. A. **Finanças em gestão de empresas**. Santa Catarina: UFSC, 2001. Apostila distribuída na disciplina de Finanças Empresarias ,do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.

Ministério de Minas e Energia, Site: <<http://ftp.mme.gov.br>>

NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta. Auditoria energética. In: **Conservação de energia: eficiência de instalações e equipamentos**. Coord. Jamil Haddad. Itajubá: FUPAI, 2001.

NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta. Energia: conceitos e fundamentos. In: **Conservação de energia: eficiência de instalações e equipamentos**. Coord. Jamil Haddad. Itajubá: FUPAI, 2001.

OLIVEIRA, A. C. C.; SÁ Jr., J. C..**Uso eficiente de energia elétrica**. Rio de Janeiro: PROCEL - UFPE, Editora Universitária, 1998.

OLIVEIRA, A.;ALMEIDA, E.L. Innovation and Energy Conservation Electric Motors in Brazil. **IEI**, Rio de Janeiro, n.348, p.43, set. 1995. Textos para discussão. UFRJ.

OLIVEIRA, André Luiz Pereira; HADDAD, Jamil. **Análise técnico econômica do reparo de motores de indução Weg visando a conservação de energia**. Itajubá: Universidade Federal de Itajubá, 1999. Concurso WEG para Conservação de Energia Elétrica.

POMILIO J. A. **Eletrônica de Potência**. Campinas: UNICAMP- DSCE FEEC, 2000. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor>>. Acesso em: 12 agosto 2002.

PROCEL Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. Site: <<http://www.eletronbras.gov.br/procel>> , <<http://www.motor.doe.gov.br/procel>>

SANTOS, A. H. M. et al. **Manual de reparo de motores de indução**. Itajubá: EFEI, 1998.

SANTOS, Júlio. **Ninguém sai da crise sem algum tipo de perda**. Disponível em: <<http://www.canalenergia.com.br>>. Acesso em: 15 abril 2003.

SHOEPS, C. A. E.; ROUSSO, J. **Conservação de energia elétrica na indústria: faça você mesmo**. 3 ed. Rio de Janeiro: CNI, DAMPI, ELETROBRÁS / PROCEL, 1994. 2v.

SIEMENS, Catalog (electronics) **SIKOSTART**: Siemens Ksquirrel-cage-rotor Optimization STARTer, 2001.

SOMAR, manual, **Powerboss PMLV2**: Three Phase Intelligent Motor Controllers.Installation and Commissioning Guide,2001. www.somar.co.uk

SOUZA, Flávio Maurício et al. **Otimização do rendimento das instalações de uma caldeira utilizando inversores de frequência nas malhas de combustível e de ar.** Belo Horizonte. II congresso mineiro de automação, V simpósio regional de instrumentação, 1998

SUEMITSU, Walter I; SOARES, George Alves; IMBUZEIRO, Rafael S. S. **Acionamentos de motores elétricos no Brasil:** Uma reflexão sobre perspectivas de desenvolvimento de linhas de pesquisa comerciais. XIII CBA - Congresso Brasileiro de Automática e International Symposium on Industrial Electronics, 1999.

TABOSA, Ronaldo de Paula et al. **Motor de alto-rendimento.** Rio de Janeiro: ELETROBRÁS/PROCEL/PROCEL CEPEL, 1998.

TAHA Patrícia. **Estudo de viabilidade técnico-econômica da produção de surimi.** 1996. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - UFSC - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Santa Catarina, 1996.

Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). **Relatório de ensaios powerboss compact:** Modelo PBC 5.5', Laboratório de aplicações industriais do departamento de engenharia elétrica, 2002.

Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). **Relatório de testes de avaliação de desempenho:** econômico QI, laboratório de aplicações industriais do departamento de engenharia elétrica, 2002.

VIANA, Augusto Nelson Carvalho. Bombas de fluxo e ventiladores. In: **Conservação de energia:** eficiência de instalações e equipamentos. Coord. Jamil Haddad. Itajubá: FUPAI, 2001.

VILELLA M. L. S. **Análise de viabilidade econômica de projetos.** Belo Horizonte: SENAC, 2003. Apostila distribuída no curso de Análise de viabilidade econômica de projetos.

WILK, Mauro. **Emprego do variador de velocidade na economia de energia em uma bomba centrífuga radial.** São Paulo: Escola de Engenharia Mecânica, Universidade Mackenzie, 1999. Concurso WEG para Conservação de Energia Elétrica.

BIBLIOGRAFIA

BARROS, J.R.M.; GOLDENSTEIN, L. Avaliação do processo de reestruturação industrial brasileiro. **Revista de Economia Política**, São Paulo, v.17, n.2 (66), p.10-31 abril-junho, 1997.

BORENSTEIN, Carlos R.; CAMARGO, C. Celso Brasil. **O setor elétrico no Brasil: dos desafios do passado às alternativas do futuro**. Porto Alegre: Sagra Luzzatto, 1997.

CAMARGO, Celso Brasil. **Gerenciamento pelo lado da demanda**: metodologia para identificação do potencial de conservação de energia elétrica de consumidores residenciais. 1996. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, 1996.

GAMA, Paulo Henrique Ramalho Pereira. Qualidade da energia elétrica. In: **Conservação de energia**: eficiência de instalações e equipamentos. Coord. Jamil Haddad. Itajubá: FUPAI, 2001.

GITMAN, Laurence. **Princípios de administração financeira**. 7 ed. São Paulo: Harba, 1997.

GRONLUND, Norman Edward. A formulação de objetivos comportamentais para aulas. Rio de Janeiro: Rio, 1975.

IVANOV, A.V. **Máquinas Elétricas**. Moscou: Mir Publishers, v.2, 1984.

KOSOW, Irving I. **Máquinas elétricas e transformadores**. 13 ed. São Paulo: Globo. 1998.

LORA, Electo Eduardo Silva; TEIXEIRA, Flávio Neves. Energia e meio ambiente. In: **Conservação de energia**: eficiência de instalações e equipamentos. Coord. Jamil Haddad. Itajubá: FUPAI, 2001.

MARTINS, André Ramon Silva. Caldeiras e fornos. In: **Conservação de energia**: eficiência de instalações e equipamentos. Coord. Jamil Haddad. Itajubá: FUPAI, 2001.

MEDEIROS, Adriana. O Processo de Estruturação da Personalidade dos Microempresários diante dos problemas de avaliação tecnológica dos processos produtivos numa perspectiva de *ecodesign*. Florianópolis, 2001. 191 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFSC, 2001.

OLIVEIRA, Carlos. **O surgimento das estruturas híbridas de governança na indústria de energia elétrica no Brasil**: a abordagem institucional da Economia dos Custos de Transação. 1998. Dissertação (Mestrado em ciências Econômicas) - Universidade Federal de Santa Catarina, 1998.

PIRANI, Marcelo José. Refrigeração e ar condicionado. In: **Conservação de energia**: eficiência de instalações e equipamentos. Coord. Jamil Haddad. Itajubá: FUPAI, 2001.

SILVA, Alexandre A. Sampaio. **Identificação paramétrica de uma máquina assíncrona pelo método da potência reativa**. 1996. 89p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1996.

SILVA, Edna Lúcia da; MENEZES, Eстера Muszkat. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 2 ed. Florianópolis: Laboratório de Ensino à Distância da UFSC, 2001. 120p.

SILVA, Valberto Ferreira da. CORTEZ, José Antônio. Inversores de frequência. In: **Conservação de energia: eficiência de instalações e equipamentos**. Coord. Jamil Haddad. Itajubá: FUPAI, 2001.

YAMACHITA, Roberto Akira; HADDAD, Jamil. Iluminação In: **Conservação de energia: eficiência de instalações e equipamentos**. Coord. Jamil Haddad. Itajubá: FUPAI, 2001.

Outros sites sobre o tema

www.ax.apc.org/--inee

www.bge.com/prodsrv/bus/conserd/efficientmotors.htm

www.bge.cpm/modsrv/bvs/conserved/efficientmotors.htm

www.brasilenergia.com.br, Revista Brasil Energia

[www.canal energia.com.Br](http://www.canalenergia.com.Br)

www.ceeformat.org

www.eberle.com.br, fabricante de motores

www.eia.doe.gov/oca7/ilo99/world.html

www.eimotors.com/QA.html

www.eletropaulo.com.br

www.energy.ca.gov

www.guiaenergia.com.br Guia Energia

www.kolbach.com.br, fabricante de motores

www.nema.org , Normas

www.weg.com.br, fabricante de motores

ANEXO A: Tabelas: Relatório de ensaios powerboss compact – UFMG

U F M G Universidade Federal de Minas Gerais



Relatório de Ensaios

POWERBOSS Compact

Modelo PBC 5.5

Prof. Braz J. Cardoso Filho, Ph.D.

Maxwell Fernandes Pinto

**Departamento de Engenharia Elétrica
Laboratório de Aplicações Industriais**

Medição 1

Alimentação direta da Rede - Rotação = 1794rpm									
Transformador		Máquina de Indução							
V_p (V)	V_s (V)	V (V)	I (A)	FP	P (W)	Q (VAr)	S (VA)	% Carga	
222.25	442.5	442.5	2.007	0.1988	305.80	1507.53	1538.23	7.14	

Alimentação via POWERBOSS (Vmin = 67%) - Rotação = 1784rpm									
Transformador		Máquina de Indução							
V_p (V)	V_s (V)	V (V)	I (A)	FP	P (W)	Q (VAr)	S (VA)	% Carga	
219.1	441.1	260.8	1.083	0.2429	118.83	474.56	489.21	6.61	

Alimentação via POWERBOSS (Vmin = 83%) - Rotação = 1791rpm									
Transformador		Máquina de Indução							
V_p (V)	V_s (V)	V (V)	I (A)	FP	P (W)	Q (VAr)	S (VA)	% Carga	
220.32	442.1	333.8	1.293	0.2211	165.29	729.06	747.56	6.09	

Amplitude dos Harmônicos de Tensão e Corrente									
Harmônico	Frequência	POWERBOSS (Vmin = 67%)			POWERBOSS (Vmin = 83%)			Rede	
		Tensão (%)		Corrente (%)	Tensão (%)		Corrente (%)	Tensão (%)	Corrente (%)
		Entrada	Saída	Carga	Entrada	Saída	Carga	Carga	Carga
1	60 Hz	100	59.273	33.844	100	83.450	40.406	100	62.719
5	300 Hz	2.889	6.694	7.346	2.799	6.687	7.014	2.912	0.919
7	420 Hz	2.356	4.389	3.118	2.654	4.333	3.181	2.378	0.843
11	660 Hz	1.381	5.013	1.738	1.159	5.001	1.381	0.000	0.740
13	780 Hz	0.000	3.495	1.981	0.000	3.496	1.258	0.000	0.000
17	1020 Hz	0.000	2.498	1.879	0.000	2.333	1.819	0.000	0.000
19	1140 Hz	0.000	2.061	0.487	0.000	2.012	0.512	0.000	0.000
THD _{RMS} (%)		3.975	17.847	25.486	4.008	12.580	20.163	3.760	2.312

Medição 2

Alimentação direta da Rede - Rotação = 1793rpm									
Transformador		Máquina de Indução							
V_p (V)	V_s (V)	V (V)	I (A)	FP	P (W)	Q (VAr)	S (VA)	% Carga	
223.17	445.5	445.5	2.119	0.3684	602.36	1520.08	1635.08	20.50	

Alimentação via POWERBOSS (Vmin = 67%) - Rotação = 1751rpm									
Transformador		Máquina de Indução							
V_p (V)	V_s (V)	V (V)	I (A)	FP	P (W)	Q (VAr)	S (VA)	% Carga	
220	439.9	261.2	1.466	0.3936	261.05	609.70	663.24	20.31	

Alimentação via POWERBOSS (Vmin = 83%) - Rotação = 1773rpm									
Transformador		Máquina de Indução							
V_p (V)	V_s (V)	V (V)	I (A)	FP	P (W)	Q (VAr)	S (VA)	% Carga	
222.6	445.2	347.9	1.535	0.3815	352.87	855.01	924.96	19.86	

Amplitude dos Harmônicos de Tensão e Corrente									
Harmônico	Frequência	POWERBOSS (Vmin = 67%)			POWERBOSS (Vmin = 83%)			Rede	
		Tensão (%)		Corrente (%)	Tensão (%)		Corrente (%)	Tensão (%)	Corrente (%)
		Entrada	Saída	Carga	Entrada	Saída	Carga	Carga	Carga
1	60 Hz	100	59.364	45.813	100	86.975	47.969	100	66.219
5	300 Hz	2.889	7.054	8.646	2.889	7.316	7.333	2.887	0.705
7	420 Hz	2.331	4.056	5.811	2.256	4.003	5.012	2.310	0.662
11	660 Hz	1.456	5.182	3.748	1.015	5.218	3.487	1.440	0.522
13	780 Hz	0.470	3.476	2.789	0.184	3.522	2.977	0.021	0.184
17	1020 Hz	0.134	2.265	1.879	0.000	2.266	1.879	0.015	0.000
19	1140 Hz	0.000	2.061	1.745	0.000	2.009	1.455	0.005	0.000
THD _{RMS} (%)		4.018	18.027	25.542	3.808	12.508	21.419	3.968	1.683

Medição 3

Alimentação direta da Rede - Rotação = 1767rpm									
Transformador		Máquina de Indução							
V_p (V)	V_s (V)	V (V)	I (A)	FP	P (W)	Q (VAr)	S (VA)	% Carga	
223.2	445.1	445.1	2.327	0.5329	956.01	1518.02	1793.97	39.73	

Alimentação via POWERBOSS (Vmin = 67%) - Rotação = 1752rpm									
Transformador		Máquina de Indução							
V_p (V)	V_s (V)	V (V)	I (A)	FP	P (W)	Q (VAr)	S (VA)	% Carga	
220.1	439.6	375.4	2.077	0.5674	766.27	1112.05	1350.49	41.11	

Alimentação via POWERBOSS (Vmin = 83%) - Rotação = 1754rpm									
Transformador		Máquina de Indução							
V_p (V)	V_s (V)	V (V)	I (A)	FP	P (W)	Q (VAr)	S (VA)	% Carga	
220.9	440.6	377.1	1.993	0.5548	722.21	1083.03	1301.74	39.75	

Amplitude dos Harmônicos de Tensão e Corrente									
Harmônico	Frequência	POWERBOSS (Vmin = 67%)			POWERBOSS (Vmin = 83%)			Rede	
		Tensão (%)	Corrente (%)	Carga	Tensão (%)	Corrente (%)	Carga	Tensão (%)	Corrente (%)
1	60 Hz	100	85.318	64.906	100	94.275	62.281	100	72.719
5	300 Hz	2.895	9.705	9.881	2.865	9.066	9.884	2.880	0.894
7	420 Hz	2.356	5.660	6.459	2.541	5.562	6.554	2.330	0.708
11	660 Hz	1.416	4.523	5.987	1.231	4.321	5.789	1.421	0.689
13	780 Hz	0.560	4.265	3.147	0.506	3.998	3.708	0.491	0.045
17	1020 Hz	0.312	3.091	3.966	0.000	3.008	3.587	0.155	0.015
19	1140 Hz	0.000	1.012	2.776	0.000	1.118	2.556	0.170	0.009
THD _{RMS} (%)		4.043	15.525	22.249	4.054	13.337	23.118	4.005	1.833

Medição 4

Alimentação direta da Rede - Rotação = 1749rpm									
Transformador		Máquina de Indução							
V_p (V)	V_s (V)	V (V)	I (A)	FP	P (W)	Q (VAr)	S (VA)	% Carga	
220.38	438.1	438.1	2.668	0.6711	1358.65	1500.90	2024.51	59.48	

Alimentação via POWERBOSS (Vmin = 67%) - Rotação = 1741rpm									
Transformador		Máquina de Indução							
V_p (V)	V_s (V)	V (V)	I (A)	FP	P (W)	Q (VAr)	S (VA)	% Carga	
219.4	438	407	2.515	0.6638	1176.87	1326.00	1772.94	59.39	

Alimentação via POWERBOSS (Vmin = 83%) - Rotação = 1741rpm									
Transformador		Máquina de Indução							
V_p (V)	V_s (V)	V (V)	I (A)	FP	P (W)	Q (VAr)	S (VA)	% Carga	
221.5	441.5	413.6	2.475	0.6569	1164.70	1336.83	1773.03	61.33	

Amplitude dos Harmônicos de Tensão e Corrente									
Harmônico	Frequência	POWERBOSS (Vmin = 67%)			POWERBOSS (Vmin = 83%)			Rede	
		Tensão (%)	Corrente (%)	Carga	Tensão (%)	Corrente (%)	Carga	Tensão (%)	Corrente (%)
1	60 Hz	100	92.500	78.594	100	103.400	77.344	100	83.375
5	300 Hz	2.891	9.184	10.400	2.443	9.958	10.400	2.900	0.979
7	420 Hz	2.345	6.443	8.510	2.589	6.652	8.510	1.985	0.955
11	660 Hz	1.421	4.959	5.536	1.489	5.001	5.536	1.005	0.877
13	780 Hz	0.560	4.869	3.833	0.569	4.856	3.833	0.489	0.708
17	1020 Hz	0.236	3.526	3.754	0.000	3.454	3.754	0.201	0.015
19	1140 Hz	0.000	1.059	2.604	0.000	1.041	2.604	0.022	0.045
THD _{RMS} (%)		4.049	14.812	19.988	3.887	13.848	20.311	3.709	2.126

Medição 5

Alimentação direta da Rede - Rotação = 1728rpm								
Transformador			Máquina de Indução					
V_p (V)	V_s (V)	V (V)	I (A)	FP	P (W)	Q (VAr)	S (VA)	% Carga
220.27	437.9	437.9	3.009	0.7322	1671.04	1554.40	2282.22	83.90

Alimentação via POWERBOSS (Vmin = 67%) - Rotação = 1731rpm								
Transformador			Máquina de Indução					
V_p (V)	V_s (V)	V (V)	I (A)	FP	P (W)	Q (VAr)	S (VA)	% Carga
219.9	439.2	426.8	2.943	0.7322	1592.96	1481.77	2175.58	76.38

Alimentação via POWERBOSS (Vmin = 83%) - Rotação = 1726rpm								
Transformador			Máquina de Indução					
V_p (V)	V_s (V)	V (V)	I (A)	FP	P (W)	Q (VAr)	S (VA)	% Carga
221.5	440.1	423.4	2.896	0.7265	1542.93	1459.39	2123.78	80.61

Amplitude dos Harmônicos de Tensão e Corrente									
Harmônico	Frequência	POWERBOSS (Vmin = 67%)			POWERBOSS (Vmin = 83%)			Rede	
		Tensão (%)		Corrente (%)	Tensão (%)		Corrente (%)	Tensão (%)	Corrente (%)
		Entrada	Saída	Carga	Entrada	Saída	Carga	Carga	Carga
1	60 Hz	100	97.000	91.969	100	105.850	90.500	100	94.031
5	300 Hz	2.888	8.589	10.219	2.995	8.858	10.198	2.901	1.017
7	420 Hz	2.054	5.416	7.404	2.154	5.066	7.198	2.203	1.005
11	660 Hz	1.568	4.023	5.023	1.688	4.336	5.221	1.362	0.936
13	780 Hz	0.589	3.855	3.615	0.577	3.230	3.516	0.341	0.879
17	1020 Hz	0.211	2.589	2.130	0.121	2.116	2.206	0.503	0.633
19	1140 Hz	0.000	1.001	1.254	0.000	1.114	1.199	0.051	0.066
THD _{RMS} (%)		3.933	12.279	15.517	4.099	11.141	15.694	3.955	2.153

Medição 6

Alimentação direta da Rede - Rotação = 1714rpm								
Transformador			Máquina de Indução					
V_p (V)	V_s (V)	V (V)	I (A)	FP	P (W)	Q (VAr)	S (VA)	% Carga
220.26	437	437	3.254	0.7706	1897.97	1569.70	2462.97	99.80

Alimentação via POWERBOSS (Vmin = 67%) - Rotação = 1711rpm								
Transformador			Máquina de Indução					
V_p (V)	V_s (V)	V (V)	I (A)	FP	P (W)	Q (VAr)	S (VA)	% Carga
220.1	438.2	429.5	3.219	0.7694	1842.46	1529.63	2394.67	99.77

Alimentação via POWERBOSS (Vmin = 83%) - Rotação = 1713rpm								
Transformador			Máquina de Indução					
V_p (V)	V_s (V)	V (V)	I (A)	FP	P (W)	Q (VAr)	S (VA)	% Carga
221.2	439	432.2	3.18	0.7657	1822.77	1531.15	2380.52	98.76

Amplitude dos Harmônicos de Tensão e Corrente									
Harmônico	Frequência	POWERBOSS (Vmin = 67%)			POWERBOSS (Vmin = 83%)			Rede	
		Tensão (%)		Corrente (%)	Tensão (%)		Corrente (%)	Tensão (%)	Corrente (%)
		Entrada	Saída	Carga	Entrada	Saída	Carga	Carga	Carga
1	60 Hz	100	97.614	100	100	108.050	100	100	101.688
5	300 Hz	2.901	8.231	9.025	2.915	8.561	9.250	2.914	1.219
7	420 Hz	2.022	5.132	7.412	2.221	5.221	7.423	2.263	1.015
11	660 Hz	1.489	3.514	5.556	1.399	3.416	5.561	1.377	0.789
13	780 Hz	0.602	3.092	3.084	0.715	3.211	3.414	0.974	0.655
17	1020 Hz	0.321	2.010	1.987	0.411	2.321	1.977	0.547	0.889
19	1140 Hz	0.000	1.420	0.523	0.000	1.411	0.571	0.330	0.583
THD _{RMS} (%)		3.913	11.318	13.453	4.018	10.549	13.692	4.107	2.132