UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DESENVOLVIMENTO DE INDICADORES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA AVALIAÇÃO DE PIVÔS CENTRAIS DE IRRIGAÇÃO

AUREO CEZAR DE LIMA

JANEIRO
2008

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DESENVOLVIMENTO DE INDICADORES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA AVALIAÇÃO DE PIVÔS CENTRAIS DE IRRIGAÇÃO

Tese de Doutorado apresentada à banca examinadora da Universidade Federal de Uberlândia por Aureo Cezar de Lima em 30/01/2008 como requisito para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Prof. José Roberto Camacho, PhD. (UFU) orientador;
Prof. Décio Bispo, Dr. (UFU);
Prof. Delly Oliveira Filho, PhD. (UFV);
Prof. José Tarcisio de Resende (Dr.) (UFV);
Prof. Sebastião Camargo Guimarães Jr., Dr. (UFU).

DESENVOLVIMENTO DE INDICADORES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA AVALIAÇÃO DE PIVÔS CENTRAIS DE IRRIGAÇÃO

AUREO CEZAR DE LIMA

Tese de Doutorado apresentada à banca examinadora da Universidade Federal de Uberlândia por Aureo Cezar de Lima em 30/01/2008 como requisito para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

_____

Prof. José Roberto Camacho, PhD
Orientador

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

L732d Lima, Aureo Cezar de, 1971-
Desenvolvimento de indicadores de eficiência energética para avaliação de pivôs centrais de irrigação / Aureo Cezar de Lima. - 2008.
194 f. : il.

Orientador: José Roberto Camacho.
Tese (doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
Inclui bibliografia.

1. Energia elétrica - Consumo - Teses. 2. Irrigação por pivô central - Teses. I. Camacho, José Roberto. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.311

Elaborado pelo Sistema de Bibliotecas da UFU / Setor de Catalogação e Classificação

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo, agradeço a Deus por prover-nos de perseverança nesta caminhada.

À minha esposa Marina de Souza Santos pela paciência, presença, disponibilidade, renúncia, ajuda e colaboração. À minha filha Mariana Souza Lima pela ternura.

Aos meus familiares pelos incentivos prestados ao longo de todos os estudos.

Aos professores PhD. José Roberto Camacho, Dr. Sebastião Camargo Guimarães Jr. e ao Pesquisador da Embrapa Agropecuária Oeste Dr. Carlos Ricardo Fietz pela orientação e o apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores do grupo de Eletricidade Rural e Fontes Alternativas de Energia Dr. Carlos Henrique Salerno e MSc Aídson Antônio de Paula pela inestimável colaboração e aos demais professores da Faculdade de Engenharia Elétrica da UFU que contribuíram na realização desta tese.

Ao Coordenador do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica Prof. Ph.D. Darizon Alves de Andrade por coordenar as questões acadêmicas com muito empenho, competência e profissionalismo.

Ao Eng. Agrônomo Rogério Guerino Franchini do IDATERRA e demais amigos da Fazenda Itamarati pelo apoio nos trabalhos no Assentamento Itamarati.

À Embrapa Agropecuária Oeste pelo apoio na coleta dos dados, em especial aos técnicos Mauro Alves Jr. e Luiz Carlos Machado Silva pela inestimável colaboração na realização dos ensaios.

Ao Dr. José Monteiro Soares e a Embrapa do Semi-Árido pela colaboração técnica.

Ao empresário e amigo André Omizolo da Comercial Moto Serra Ltda pela atenção e contribuição para realização deste trabalho. Aos amigos do CEFET Petrolina João Tercio Fontenele Ribeiro e Manuel Rangel Borges Neto pelo apoio e estima.

Aos meus amigos de grupo do Laboratório de Eletricidade Rural e Fontes Alternativa de Energia: Lindolfo Marra de Castro Neto, Flávia Fernandes de Leva, Sidney Pereira, Humberto de Ávila Rodrigues pela colaboração e amizade.

À Marli Junqueira Buzzi, secretária do COPEL e demais colaboradores pela atenção dedicada.

À CAPES, pela ajuda financeira recebida no decurso deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo apresentar o desenvolvimento de indicadores e propor uma etiqueta e um padrão de eficiência energética para sistemas de irrigação por pivô central. Inicialmente buscou-se apresentar as políticas e programas relacionados ao uso eficiente da energia elétrica e as metodologias utilizadas para a avaliação destes sistemas. Sob a abordagem da eficiência, são determinadas as perdas nos subsistemas de sucção, bombeamento, adutora, linha lateral e aspersão aplicando-se os indicadores disponíveis na literatura e propostos neste trabalho.

Os indicadores desenvolvidos buscam integrar os parâmetros energéticos e agrícolas nos sistemas de irrigação por pivô central de forma a caracterizá-los, auxiliar o irrigante na compra e uso e estimular a concorrência entre os fornecedores.

Estes indicadores são aplicados em quatro sistemas de irrigação por pivô central, um na Embrapa Agropecuária Oeste e três no Assentamento Itamarati I, onde se obteve a Eficiência de Irrigação variando entre 8,9% e 21,8%. Através da análise econômica, novos projetos determinaram índices para Eficiência de Irrigação superiores a 23,4% e um padrão denominado Consumo Específico Normalizado na Irrigação igual a 8,68 kWh/(mm.ha.100m).

O benefício esperado pelas medidas de eficiência energética pode alcançar R$ 260,2 mil por ano nos sistemas do Assentamento Itamarati I que, extrapolando à utilização nacional, pode propiciar a economia de 229,4 GWh/ano, ou ainda, evitar 40,72 milhões de reais/ano gastos com energia elétrica neste sistema de irrigação.

Palavras chaves: Indicadores e índices de eficiência energética; irrigação por pivô central; avaliação de sistemas de irrigação; Lei de eficiência energética.

ABSTRACT

The task of this work is to present the development of some indicators and to create a label and energy efficiency standards for central pivoting irrigation systems. Firstly were presented policies and programs related to the efficient use of electrical energy and the methodology for the evaluation of such systems. With the approach of efficiency, losses in suction subsystems, electrical motors and pumps, pipes, lateral lines and aspersion are determined, with the application of indices available in the literature and proposed in this work.

The development of indices were made to integrate energy and hydraulic parameters in central pivoting irrigation systems in order to clearly characterize them, as an aid to the user and buyer, and to stimulate the competition among different central pivoting assembling companies.

Such indices are applied in four central pivoting irrigation systems, one at *EMPBRAPA Agropecuaria Oeste* and three at *Assentamento Itamarati 1*, where irrigation efficiencies between 8.9% and 21.8% were obtained. Through economic analysis, new projects show irrigation efficiency indices above 23.4% and a standard called Irrigation Normalized Specific Consumption equal to 8.68 kWh/(mm.ha.100m).

The expected benefit due to the energy efficiency measures can reach 260.2 thousand Reais/year in *Assentamento Itamarati 1* systems, extrapolating to the national use of central pivoting, which allows an economy of 229.4 GWh/year, or else, to avoid 40.72 million of Reais/year spent in electrical energy in such irrigation systems in the country.

Keywords: indicators and indices of energy efficiency; central pivoting irrigation; irrigation systems evaluation; energy efficiency law.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 1
2. IRRIGAÇÃO E A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA 9
2.1. Introdução 9
2.2. Métodos de irrigação 9
2.3. Método de irrigação tipo aspersão 13
2.4. Sistema de irrigação por pivô central 14
2.5. Eficiência energética em irrigações pressurizadas 18
2.6. Programas de etiquetagem e padronização de eficiência energética 30
2.6.1 Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica - PROCEL 33
2.6.2 Programa de Eficiência Energética 35
2.7. Irrigação e indicadores de eficiência energética 35
3. INDICADORES DE EFICIÊNCIA DE PIVÔS DE IRRIGAÇÃO 37
3.1. Introdução 37
3.2. Indicadores agrícolas 37
3.2.1 Medidas de uniformidade 37
3.2.2 Medidas de eficiência de aplicação de água 40
3.2.3 Relação entre o coeficiente de uniformidade e a Eficiência de Distribuição 43
3.3. Indicadores energéticos 44
3.3.1 Conjunto motor e bomba 45
3.3.2 Tubulação de sucção e adutora 60
3.3.3 Linha lateral 62
3.3.4 Aspersores 64
3.3.5 Sistema de irrigação 67
3.4. Fluxo energético de um pivô central 70
3.5. Procedimentos para avaliação de um pivô central 71

4. ETIQUETAGEM ENERGÉTICA DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR PIVÔ CENTRAL 77
4.1. Introdução 77
4.2. Caracterização do Assentamento Itamarati I 77
4.2.1 Sistema elétrico do Assentamento Itamarati I 78
4.2.2 Faturamento da energia no Assentamento Itamarati I 80
4.3. Etiquetagem energética de pivôs centrais 85
5. AVALIAÇÃO ENERGÉTICA DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR PIVÔ CENTRAL 93
5.1. Introdução 93
5.2. Conjunto motor e bomba 93
5.3. Tubulação de sucção 104
5.4. Adutora e linha de pressão 105
5.5. Linha lateral 108
5.6. Aspersão 114
5.7. Sistema de irrigação 117
5.7.1 Fluxo energético 117
5.7.2 Indicadores de eficiência do sistema de irrigação 118
6. PADRÃO DE EFICIÊNCIA PARA PIVÔS CENTRAIS DE IRRIGAÇÃO 123
6.1. Introdução 123
6.2. Dimensionamento econômico de um sistema de bombeamento 124
6.3. Equacionamento do padrão de eficiência energética de um pivô central 126
6.4. Padrão de eficiência energética dos sistemas ensaiados 129
6.4.1 Índice de eficiência para o pivô da Embrapa Agropecuária Oeste 129
6.4.2 Índice de eficiência para o pivô L06 136
6.4.3 Índice de eficiência para o pivô C08 141
6.4.4 Índices de eficiência energética nos elementos do pivô G13 147
6.4.5 Padrão de eficiência energética de pivôs centrais 152
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 159
8. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA 165
9. ANEXOS 174

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. – Modelo dos primeiros pivôs centrais de irrigação instalados 3
Figura 2.1. – Método de irrigação por superfície 10
Figura 2.2. – Método de irrigação localizada utilizando gotejadores (a) e tubos porosos (b) 10
Figura 2.3. – Método de irrigação localizada utilizando microaspersores 11
Figura 2.4. – Método de irrigação tipo subirrigação 11
Figura 2.5. – Área irrigada no Brasil em 2003/2004 12
Figura 2.6. – Sistema de irrigação por aspersão convencional..... 13
Figura 2.7. – Sistema de irrigação por aspersão de linhas móveis (a) Lateral rolante, (b) deslocamento linear 14
Figura 2.8. – Sistema de irrigação por aspersão tipo pivô central..... 14
Figura 2.9. – Sistema de irrigação por aspersão tipo pivô central..... 15
Figura 2.10. – Ponto e painel central de um pivô central de irrigação 16
Figura 2.11. – Braço giratório de um pivô central de irrigação..... 17
Figura 2.12. – Componentes de um equipamento de irrigação tipo pivô central 17
Figura 2.13. – Esquema de aplicação do sistema tarifário do grupo "A"..... 20
Figura 2.14. – Curva de distribuição de demanda em um período de faturamento..... 22
Figura 2.15. – Curva de distribuição de demanda em um período de faturamento..... 24
Figura 2.16. – Influência da etiquetagem e padronização na eficiência energética dos produtos vendidos 30
Figura 2.17. – Processo de desenvolvimento de um programa de etiquetagem e padronização de eficiência energética de um produto 32
Figura 3.1. – Instalação de coletores para a determinação da uniformidade de distribuição de água de um pivô central 38
Figura 3.2. – Curva de distribuição da água no solo após um evento de irrigação para pa = 80% 42
Figura 3.3. – Distribuição das lâminas infiltrada e Eficiência de Distribuição (80%) para diferentes valores de C_{UH} 43
Figura 3.4. – Elementos dissipadores de energia de um pivô central..... 44
Figura 3.5. – Conjunto motor elétrico e bomba centrífuga 45
Figura 3.6. – Circuito equivalente de um motor de indução 47
Figura 3.7. – Representação da equação de Bernoulli para fluidos reais 56
Figura 3.8. – Determinação da altura manométrica na bomba em um ensaio de campo 58
Figura 3.9. – Determinação da perda de carga na adutora em um ensaio de campo..... 60
Figura 3.10. – Efeito nas plantas da desuniformidade na distribuição da lâmina 63
Figura 3.11. – Determinação da perda de carga ao longo da linha lateral em ensaio 64
Figura 3.12. – Emissores para diferentes intensidades de aplicação de água..... 65
Figura 3.13. – Fluxograma para realização do Ensaio de Avaliação Energética de Pivô Central 73

Figura 4.1. – Disposição dos pivôs centrais no Assentamento Itamarati I 78
Figura 4.2. – Histórico de consumo e fatura de energia no ano 2004 do Assentamento Itamarati I 81
Figura 4.3. – Curva de demanda do ramal que alimenta os pivôs centrais do Assentamento Itamarati I no faturamento de dezembro de 2004 82
Figura 4.4. – Curva de demanda de dez pivôs centrais do Assentamento Itamarati I nos dias 15 e 16 de dezembro de 2004 83
Figura 4.5. – Curva do preço médio, fator de carga, tempo de utilização dos pivôs em funcionamento em dezembro de 2004 no Assentamento Itamarati I 85
Figura 4.6. – Coletores instalados no pivô da Embrapa Agropecuária Oeste no pivô C08 do Assentamento Itamarati I ensaiado em abril de 2006 86
Figura 4.7. – Coleta e leitura da lâmina infiltrada nos pivôs da Embrapa Agropecuária Oeste (a) e G13 (b) do Assentamento Itamarati I em abril de 2006 87
Figura 4.8. – Medições de potência e fatores climáticos nos ensaios no Assentamento Itamarati I em abril de 2006 87
Figura 4.9. – Etiqueta de Eficiência Energética - relatório do programa "etiqueta_pivo" para os equipamentos ensaiados na Embrapa Agropecuária Oeste e no Assentamento Itamarati I em abril de 2006 89
Figura 4.10. – Lâmina de água ao longo da linha lateral nos pivôs ensaiados na Embrapa Agropecuária Oeste e Assentamento Itamarati I em abril de 2006 91
Figura 4.11. – Distribuição da lâmina coletada normalizada para 80% da área adequadamente irrigada dos pivôs ensaiados na Embrapa Agropecuária Oeste e Assentamento Itamarati I em abril de 2006 91
Figura 5.1. – (a) Medição de vazão e (b) medição de pressão nos pivôs G13 e L06 ensaiados no Assentamento Itamarati I em abril de 2006 94
Figura 5.2. – Curvas de rendimento, altura manométrica e potência pela vazão nos conjuntos motor e bomba ensaiados na Embrapa Agropecuária Oeste e Assentamento Itamarati I em abril de 2006 96
Figura 5.3. - Rendimento nos conjuntos motor e bomba ensaiados na Embrapa Agropecuária Oeste e no Assentamento Itamarati I em abril de 2006 97
Figura 5.4. – Rendimento, potência no eixo e índice de carregamento do motor - relatório do programa "motor" para os equipamentos ensaiados na Embrapa Agropecuária Oeste e no Assentamento Itamarati I em abril de 2006 99
Figura 5.5. – Curvas características dos motores de 40 e 250 cv dos sistemas da Embrapa Agropecuária Oeste e Assentamento Itamarati ensaiado em abril de 2006 100
Figura 5.6. – Curvas características dos motores de 300 cv do Assentamento Itamarati ensaiado em abril de 2006 101
Figura 5.7. – Avaliação dos rendimentos das bombas obtidos no pivô da Embrapa Agropecuária Oeste e no Assentamento Itamarati I em abril de 2006 103
Figura 5.8. – Tubulação de sucção dos pivôs L06 (a) e G13 (b) do Assentamento Itamarati I 105
Figura 5.9. – (a) Manômetro no ponto do pivô da Embrapa Agropecuária Oeste e (b) Trecho da adutora do pivô G13 do Assentamento Itamarati I 106
Figura 5.10. – Tubulação de adutora em ferro galvanizado (a), Ferro com revestimento em cimento: (b) em bom estado, (c) corroído 106
Figura 5.11. – Manômetro e acessórios para medição da pressão ao longo da linha lateral 108
Figura 5.12. – Leitura da pressão ao longo da linha lateral: (a) Embrapa Agropecuária Oeste, (b) G13 Assentamento Itamarati I 109
Figura 5.13. – Velocidade do fluido ao longo da linha lateral nos pivôs ensaiados na Embrapa Agropecuária Oeste e no Assentamento Itamarati I em abril de 2006 109

Figura 5.14. – Linha de carga medida e calculada nas laterais dos pivôs ensaiados na Embrapa Agropecuária Oeste e no Assentamento Itamarati I 110
Figura 5.15. – Perda de carga em 100 m ao longo das linhas laterais ensaiadas na Embrapa Agropecuária Oeste e no Assentamento Itamarati I em abril de 2006 111
Figura 5.16. – Potência elétrica dissipada ao longo das linhas laterais ensaiadas na Embrapa Agropecuária Oeste e no Assentamento Itamarati I em abril de 2006 112
Figura 5.17. – Vazamento no ponto do pivô G13 do Assentamento Itamarati I em abril de 2006..... 115
Figura 5.18. – Distribuição das lâminas de água nos pivôs ensaiados na Embrapa Agropecuária Oeste e Assentamento Itamarati I em abril de 2006 116
Figura 5.19. – Fluxo energético nos equipamentos de irrigação ensaiados em abril de 2006 117
Figura 5.20. – Indicadores de eficiência energética nos elementos dos sistemas de irrigação ensaiados em abril de 2006 119
Figura 5.21. – Indicadores de eficiência energética (a) Consumo Específico, (b) Consumo Específico Normalizado, (c) Eficiência da Irrigação dos sistemas ensaiados na Embrapa Agropecuária Oeste e Assentamento Itamarati I em abril de 2006 . 121
Figura 6.1. – Diâmetro econômico de um sistema de bombeamento..... 125
Figura 6.2. – Avaliação econômica do sistema de irrigação da Embrapa Agropecuária Oeste 131
Figura 6.3. – Curvas características do motor de 40 cv após substituição da bomba do pivô da Embrapa Agropecuária Oeste ensaiado em abril de 2006 132
Figura 6.4. – Curvas características do motor de 25 cv acionando a bomba de um projeto novo do pivô da Embrapa Agropecuária Oeste ensaiado em abril de 2006 .. 135
Figura 6.5. – Curvas características do motor de 30 cv acionando a bomba de um projeto novo do pivô da Embrapa Agropecuária Oeste ensaiado em abril de 2006 ... 135
Figura 6.6. – Avaliação econômica do sistema de irrigação L06 do Assentamento Itamarati I 137
Figura 6.7. – Características do motor de 250 cv para o projeto novo do pivô L06 do Assentamento Itamarati I 140
Figura 6.8. – Características do motor de 200 cv para o projeto novo do pivô L06 do Assentamento Itamarati I 140
Figura 6.9. – Avaliação econômica do sistema de irrigação C08 do Assentamento Itamarati I 142
Figura 6.10. – Curvas características do motor de 300 cv do pivô C08 do Assentamento Itamarati I com a substituição dos aspersores..... 144
Figura 6.11. – Curvas características do motor de 300 cv do pivô C08 do Assentamento Itamarati I com a substituição dos aspersores e da bomba 145
Figura 6.12. – Curvas características do motor de 300 cv do pivô C08 do Assentamento Itamarati I com a substituição dos aspersores, da bomba e da adutora..... 145
Figura 6.13. – Curvas características do motor de 125 cv do pivô C08 do Assentamento Itamarati I com a substituição dos aspersores, da bomba e da adutora..... 146
Figura 6.14. – Avaliação econômica do sistema de irrigação G13 do Assentamento Itamarati I 148
Figura 6.15. – Curvas características do motor de 300 cv do pivô G13 do Assentamento Itamarati I com a substituição dos aspersores e da bomba 150
Figura 6.16. – Curvas características do motor de 250 cv do pivô G13 do Assentamento Itamarati I com a substituição dos aspersores e da bomba 152
Figura 6.17. – Fluxo energético nos pivôs ensaiados na Embrapa Agropecuária Oeste e Assentamento Itamarati I após as medidas de eficiência energética 154

Figura 6.18. – Padrões de Eficiência Energética propostos para os elementos dos pivôs da Embrapa Agropecuária Oeste e Assentamento Itamarati I ensaiados 155
Figura 6.19. – Índices de Eficiência Energética do sistema de irrigação dos pivôs da Embrapa Agropecuária Oeste e Assentamento Itamarati I ensaiados 157

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. – Descontos na tarifa de consumo de energia elétrica para irrigantes 20
Tabela 3.1. – Avaliação do desempenho de um equipamento de irrigação por aspersão mecanizada 39
Tabela 3.2. – Estratificação da água em um sistema de irrigação 41
Tabela 3.3. – Equações utilizadas na determinação da eficiência energética de pivôs centrais 69
Tabela 4.1. - Divisão das áreas do Assentamento Itamarati I por grupo social 77
Tabela 4.2. - Relação dos transformadores no Assentamento Itamarati I em dezembro de 2004 79
Tabela 4.3. – Relação dos motores no Assentamento Itamarati I em Dezembro de 2004 80
Tabela 4.4. – Histórico do faturamento de energia elétrica do ramal de alimentação dos sistemas de irrigação do Assentamento Itamarati I entre janeiro e dezembro de 2004 82
Tabela 4.5. – Consumo, importe, tempo e índice de utilização, fator de carga e preço médio da energia dos pivôs em funcionamento em dezembro de 2004 no Assentamento Itamarati I 84
Tabela 4.6. – Características construtivas dos pivôs ensaiados na Embrapa Agropecuária Oeste e Assentamento Itamarati I em abril de 2006 86
Tabela 4.7. - Medições e levantamentos de dados dos pivôs ensaiados na Embrapa Agropecuária Oeste e Assentamento Itamarati I em abril de 2006 88
Tabela 5.1. - Rendimento nos conjuntos motor e bomba dos pivôs ensaiados na Embrapa Agropecuária Oeste e Assentamento Itamarati I em abril de 2006. 95
Tabela 5.2. – Dados de placa dos motores dos conjuntos motor e bomba da Embrapa Agropecuária Oeste e do Assentamento Itamarati I ensaiados em abril de 2006. 97
Tabela 5.3. – Dados de ensaio dos motores dos conjuntos motor e bomba da Embrapa Agropecuária Oeste e do Assentamento Itamarati I ensaiados em abril de 2006. 98
Tabela 5.4. – Parâmetros dos circuitos equivalentes dos motores para os conjuntos motor e bomba da Embrapa Agropecuária Oeste e Assentamento Itamarati I ensaiados em abril de 2006 98
Tabela 5.5. - Carregamento e rendimento dos motores dos pivôs ensaiados na Embrapa Agropecuária Oeste e Assentamento Itamarati I em abril de 2006 102
Tabela 5.6. – Rendimento das bombas ensaiadas na Embrapa Agropecuária Oeste e no Assentamento Itamarati I em abril de 2006 103
Tabela 5.7. – Indicador de eficiência nos conjuntos motor e bomba dos pivôs ensaiadas na Embrapa Agropecuária Oeste e Assentamento Itamarati I em abril de 2006. 104

Tabela 5.8. – Indicador de eficiência das tubulações de sucção dos pivôs ensaiadas na Embrapa Agropecuária Oeste e Assentamento Itamarati I ensaiados em abril de 2006. 105
Tabela 5.9. – Características das adutoras dos pivôs ensaiadas na Embrapa Agropecuária Oeste e Assentamento Itamarati I em abril de 2006. 106
Tabela 5.10. – Indicadores de eficiência energética na adutora e linha de pressão dos pivôs ensaiadas na Embrapa Agropecuária Oeste e Assentamento Itamarati I em abril de 2006. 107
Tabela 5.11. – Indicador de eficiência das linhas laterais dos pivôs ensaiadas na Embrapa Agropecuária Oeste e no Assentamento Itamarati I em abril de 2006. 113
Tabela 5.12. – Indicador de eficiência energética dos aspersores dos sistemas de irrigação ensaiados na Embrapa Agropecuária Oeste e Assentamento Itamarati I em abril de 2006. 114
Tabela 5.13. – Indicadores de eficiência energética nos pivôs ensaiados na Embrapa Agropecuária Oeste e Assentamento Itamarati I em abril de 2006 119
Tabela 6.1. – Eficiência energética no sistema de irrigação da Embrapa Agropecuária Oeste 130
Tabela 6.2. – Avaliação econômica das medidas de eficiência energética no sistema de irrigação da Embrapa Agropecuária Oeste (primeira análise) 131
Tabela 6.3. – Padrão de eficiência energética para o sistema de irrigação da Embrapa Agropecuária Oeste 133
Tabela 6.4. – Padrão de eficiência energética para o sistema de irrigação da Embrapa Agropecuária Oeste – projeto novo. 134
Tabela 6.5. – Análise da eficiência energética no sistema de irrigação L06 do Assentamento Itamarati I 136
Tabela 6.6. – Resultado da análise da eficiência energética no sistema de irrigação L06 do Assentamento Itamarati I 138
Tabela 6.7. – Eficiência energética no sistema de irrigação L06 do Assentamento Itamarati I 139
Tabela 6.8. – Eficiência energética no sistema de irrigação C08 do Assentamento Itamarati I 141
Tabela 6.9. – Eficiência energética no sistema de irrigação C08 do Assentamento Itamarati I 143
Tabela 6.10. – Padrão de eficiência energética para o sistema de irrigação C08 do Assentamento Itamarati I 147
Tabela 6.11. – Eficiência energética no sistema de irrigação G13 do Assentamento Itamarati I 148
Tabela 6.12. – Resultado da avaliação econômica da eficiência energética no sistema de irrigação do pivô G13 149
Tabela 6.13. – Padrão de eficiência energética para o sistema de irrigação C08 do Assentamento Itamarati I 151
Tabela 6.14. – Características atuais e projeto novo para os pivôs da Embrapa Agropecuária Oeste e do Assentamento Itamarati I ensaiados. 153
Tabela 6.15. – Índices de eficiência energética baseados nos pivôs ensaiados na Embrapa Agropecuária Oeste e no Assentamento Itamarati I em abril de 2006. 155
Tabela 6.16. – Extrapolação das Eficiências Energéticas aos sistemas de irrigação dos pivôs ensaiados para o consumo do Assentamento Itamarati I em 2004. 158

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIAÇÕES

AMFFI	Associação dos moradores e funcionários da fazenda Itamarati;
C_{Easp}	Consumo específico na aspersão;
C_{EI}	Consumo específico na irrigação;
C_{EN}	Consumo específico normalizado no conjunto motor e bomba;
C_{ENI}	Consumo específico normalizado na irrigação;
C_{ENT}	Consumo específico normalizado na tubulação;
C_{UH}	Coeficiente de uniformidade de Heerman e Hein;
C_{UD}	Coeficiente de uniformidade de distribuição de água;
CUT	Central Única de Trabalhadores;
EAp	Eficiência de Aplicação em Potencial.
EApa	Eficiência de Aplicação para uma parcela adequadamente irrigada (pa);
EA_{80}	Eficiência de Aplicação para 80% da parcela adequadamente irrigada;
EDpa	Eficiência de Distribuição para uma parcela adequadamente irrigada (pa);
E_I	Eficiência de Irrigação;
ELETROBRÁS	Centrais Elétricas Brasileiras S.A;
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária;
ENCE	Etiqueta nacional de conservação de energia;
ENERSUL	Empresa Energética do Mato Grosso do Sul;
FETAGRI	Federação dos trabalhadores na Agricultura;
IDATERRA	Instituto de Desenvolvimento Agrário, Assistência Técnica e Desenvolvimento Rural do Mato Grosso do Sul;
INCRA	Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária;
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial;
L06, L08 e G13	Pivôs centrais ensaiados no Assentamento Itamarati I;

MST	Movimento dos Trabalhadores Rurais Sem Terra;
MUG	Medidor universal de grandezas;
η	Rendimento, %;
PBE	Programa brasileiro de etiquetagem;
PQ	Relação potência ativa por potência reativa, 1;
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica;
TIR	Taxa interna de retorno;
TRC	Tempo de retorno de capital, anos;
V_C	Volume de água coletado, m³;
V_{PA}	Volume de água disponível na zona radicular da cultura, m³;
V_S	Volume de água bombeado pelo sistema de irrigação, m³;

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A área irrigada mundial representa 273,7 milhões de hectares; deste total, a Índia (57,3 milhões), a China (53,8 milhões), os Estados Unidos (27,9 milhões) correspondem a 50,8% do total (Siebert et al., 2005). O Brasil possui uma superfície territorial de 851 milhões de hectares, onde 42 milhões são utilizados com lavouras e 178 milhões com pecuária (IBGE, 2006). De acordo com Christofidis (2006a), a área irrigada no Brasil em 2003/2004 era de 3,4 milhões de hectares, o que representa 1,54% da área agrícola explorada no país com agricultura e pecuária.

Por outro lado, de acordo com ABIMAQ (2002), a área total de solos aptos à irrigação no Brasil é cerca de 29,6 milhões de hectares, sendo 13,5 milhões de hectares com solos de várzeas e 16,1 milhões com solos de terras altas. A importância da irrigação para a produção agrícola, por sua vez, pode ser caracterizada quando se considera que, com 17% da área mundial cultivada, produz 40% dos alimentos (FAO, 2002). Segundo Machado (1998), o Brasil em 1996, irrigando 4,8% de sua área cultivada, alcançava 16% da produção agrícola total e obtinha faturamento equivalente a 35% da produção nacional.

O Brasil possui condições pedológicas, hídricas e topográficas para atingir índices de utilização da agricultura irrigada idênticos ou maiores que muitos países que hoje fazem uso intensivo dessa técnica. Os benefícios obtidos da irrigação, por sua vez, extrapolam as questões de produtividade e valor agregado do produto, propiciando, sobretudo, impactos positivos nas condições socioeconômicas regionais.

Por outro lado, na agricultura irrigada todos os fatores de produção devem estar em níveis ótimos para maximizar a produção face aos investimentos necessários e recursos utilizados. De acordo com FAO (2003), a eficiência do uso da água na irrigação é, em média, igual a 38% nos países em desenvolvimento. Segundo Christofidis (2006a), 2.595 km³ de água são destinadas anualmente à agricultura no mundo, o que representa 70,2% da água

derivada dos rios, lados e aqüíferos. Segundo Brasil (2004a), o custo da energia pode chegar a 35% dos custos de produção em sistemas de aspersão convencional e pivô central.

De acordo com a CEMIG apud ABIMAQ (2002), o consumo médio da energia em uma área irrigada é de 2.714 kWh ha^{-1} ano^{-1}. Assumindo que toda a área irrigada brasileira utilize energia elétrica, pode-se estimar o consumo no Brasil de 7.789 GWh ano^{-1}, o que corresponde a 1,40% da capacidade instalada de geração hidráulica do país (ABIMAQ, 2002).

Segundo Sano et al. (2005), entre 1992 e 2002, o número de pivôs centrais no Distrito Federal passou de 55 para 104, a área irrigada aumentou de 3.894 para 6.823 ha e o consumo de água, de 23,36 para 40,94 milhões de m^3 ano^{-1}. Na Bahia, segundo Barreiras (2000a) apud Pinto et al. (2006), a partir de 1984 foram implantados os primeiros projetos de irrigação sob pivô central, principalmente nos municípios de São Desidério e Barreiras. Em 1993, a área irrigada na região atingia 39.104 ha, com 376 pivôs centrais instalados e, em 2000, a área alcançava 66 mil ha.

Para Christofidis (2006a), a área irrigada por pivô central no Brasil é igual a 710.553 ha, onde é possível se estimar um consumo de energia igual 1.928 GWh ano^{-1}. O potencial para implementação de medidas de eficiência energética no Brasil, por sua vez, conforme CEMIG apud Lima, Ferreira, Christofidis (2006b), pode ser estimado em 20% de redução no consumo de água e 30% no consumo de energia.

Oliveira, C. et al. (2004) verificaram que se deve considerar, de forma integrada, os aspectos de adequação de força motriz, dimensionamento hidráulico, especialmente a adequação das bombas e o manejo do uso de água com avaliação econômica de vida útil, para que se maximize a economia. A partir desta análise aplicada ao Perímetro Irrigado de Mirorós no município de Ibipeba, Bahia, os autores puderam determinar um patamar de até 31,6% de economia de energia, verificando, assim, a importância do estudo de racionalização em sistemas de irrigação.

Os modernos pivôs centrais e laterais móveis utilizados atualmente tiveram origem do "Aparato de irrigação por aspersão auto-propelido" inventado em 1948 e patenteado em 1952 por Frank Zybach no Colorado, (Evans, 2007), (Figura 1.1).

Ao longo dos anos o pivô central tem passado por aperfeiçoamentos tecnológicos tornando-se confiável, de simples operação e reduzindo o desperdício de água e energia. Sua evolução baseia-se, principalmente, na redução da pressão de funcionamento dos aspersores, redução das perdas de carga, aumento na eficiência dos motores e bombas e, sobretudo, ao nível de automação e controle que tem permitido o fornecimento de água no tempo e quantidade necessária à planta.

Figura 1.1. – Modelo dos primeiros pivôs centrais de irrigação instalados

Os aspersores de impacto de 50 mca, utilizados nos primeiros pivôs, foram substituídos por aspersores rotativos e difusores que trabalham com pressões entre 7 e 17 mca. Vem sendo utilizados, conforme a aplicação, os difusores LDN, "low drift Nozzle", com pressões entre 10 e 17 mca e ainda os LEPA, "low energy precision application", que funcionam com pressões entre 4 e 7 mca, (Evans & Sneed, 1996).

A avaliação energética da irrigação normalmente é obtida através da determinação da Eficiência da Aplicação e do Consumo Específico. De acordo com Moreira (2006), os sistemas mais eficientes, como os que utilizam irrigação localizada, podem obter Eficiência de Aplicação de até 98%, sendo de 65% a 85% para irrigação por aspersão e inferior a 40% para irrigação por inundação.

Para EMBRAPA (2002), as medidas de uniformidade utilizadas na verificação do desempenho de um sistema de irrigação pivô central é o Coeficiente de Uniformidade de Heerman e Hein (C_{UH}) e o Coeficiente de Uniformidade de Distribuição de Água (C_{UD}). A medida para a avaliação do aproveitamento da água, por sua vez, constitui-se na Eficiência de Aplicação, também denominada Eficiência de Irrigação.

ABNT (1998) determina os procedimentos para avaliação de pivô central e lateral móvel e institui o Coeficiente de Uniformidade de Heerman e Hein para a determinação do desempenho destes sistemas.

Soares & Nascimento (1998) obteve na avaliação de sistemas de aspersão convencional no distrito irrigado de Barreiras, município de Petrolândia, PE, Eficiência de

Aplicação variando entre 47,28 e 78,89%. Outra avaliação, apresentada por Pinto et al.(2006), na Fazenda Moreno, município de Barreiras, oeste da Bahia, apresentou Eficiência de Aplicação variando entre 62 e 71%. Klar, Santan, Duroha (2001) avaliando dois pivôs centrais de 46,5 ha utilizando aspersores novos e usados na Fazenda Medeira, Silvania, GO, verificou que, com o kit de aspersores antigos a lâmina aplicada era 25% menor do que com os kits novos, recomendando a avaliação periódica destes equipamentos.

Segundo Paz et al. (2002), a uniformidade de distribuição, o custo da água e o valor pago pelo produto são fatores determinantes para a otimização de sistemas de irrigação, Considerando a função de resposta do feijoeiro nas condições climáticas de Ilha Solteira, SP, os autores obtiveram a produção máxima com lâmina de água 18,64% menor.

Valín & Pereira (2006, 2007) desenvolveram um software para projeto e avaliação de pivôs centrais, DEPIVOT, considerando a necessidade da irrigação, o projeto hidráulico, a escolha dos aspersores, a estimativa do escoamento superficial e a verificação da eficiência através do coeficiente de distribuição e de uniformidade. A partir da aplicação do software para avaliação de pivôs instalados em Alentejo, Portugal, foi obtido Uniformidade de Distribuição variando entre 74,6 e 87,7% e Coeficiente de Uniformidade entre 79,3 a 91,4%.

O Consumo Específico, por sua vez, considera a relação entre a energia e o volume bombeado. Oliveira, A. et al. (2004) apresentam a potência especifica por hectare irrigado (cv/ha) para associar a energia gasta na irrigação. Pessoa (2005) expressa o rendimento do equipamento pela relação entre o consumo de energia e a lâmina irrigada (kWh/mm). Bortolozzo et al. (2004a,b,c,d) e Souza et al. (2001), por sua vez, apresentam a relação da potência por metro cúbico (kW/m³), potência por hectare (kW/ha), energia por metro cúbico (kWh/m³) e energia por hectare (kWh/ha).

Para Marouelli apud Lima, Ferreira, Christofidis (2006b), o consumo específico para irrigação por aspersão varia entre 0,2 e 0,6 kWh m^{-3}. Medeiros et al. (2003) obteve, para irrigação convencional no Perímetro Irrigado de Pirapora, MG, consumos específicos médios de 0,4773 e 0,4701 kWh m^{-3} nos anos de 1999 e 2000, respectivamente.

Para Moreira (2006), ao se adotar o manejo racional de irrigação e otimizar os gastos energéticos em áreas irrigadas por pivô-central em Minas Gerais, o resultado imediato seria a economia de energia suficiente para abastecer uma cidade de 60.000 habitantes durante um ano. Considerando, por exemplo, a implementação de medidas de eficiência energética numa área irrigada de 100 ha irrigada por pivô central foi possível evitar o gasto desnecessário de 1 milhão de litros de água e reduzir o consumo de energia de 400 kWh a cada milímetro de lâmina de água excedente.

Marques, Marques, Frizzone (2006) constatou a inviabilidade da irrigação de cana-de-açucar por pivô central, uma vez que o custo total anual esperado alcança 943,46 R$ ha^{-1} ano^{-1}. Representando 38,36%, o bombeamento representa a maior parcela dentre os custos fixos, mão-de-obra, manutenção e água.

Rocha, Pereira, Coelho (2001) caracterizou o custo do bombeamento de água para irrigação no Brasil. Pessoa, Folegatti & Paz (1996) avaliou um pivô de 155,7 ha no município de Santa Fé, GO, obtendo consumo específico de 0,13 kWh ha^{-1}.

O processo de transformação e modernização tecnológica com o uso de máquinas, tubulações, equipamentos e implementos adequados às áreas de irrigação exige, de acordo com Christofidis (2006b), além da transformação do próprio setor industrial e comercial, o aprofundamento técnico, através de parcerias, que possibilite:

- A apresentação de estudos de caso de viabilidade, mostrando o retorno que ocorre em projetos de reconversão e em projetos novos, com uso de métodos, equipamentos e máquinas mais eficientes;
- A existência de um sistema de normatização que seja atual, coerente com as novas tecnologias e o mercado consumidor e que leve à melhoria da qualidade dos produtos, assegurando a sua vida útil, a reposição de peças e a ética comercial.

Para CLASP (2005), o aumento da eficiência energética propicia ganhos à economia nacional, ao comércio exterior e possibilita a redução do capital investido em infra-estrutura, economia ao consumidor e a preservação ambiental. O fortalecendo da competição entre fabricantes de equipamentos e os programas de etiquetagem e padronização, podem, assim, propiciar a retirada de produtos ineficientes do mercado e estimular o desenvolvimento de tecnologias eficientes.

De acordo com Brasil (2001a), a Lei 10.295, Lei de Eficiência Energética, determinou que o Poder Executivo deve estabelecer níveis máximos de consumo específico de energia ou mínimos de eficiência energética de máquinas e aparelhos consumidores de energia fabricados ou comercializados no País, com base em indicadores técnicos.

Segundo Brasil (2002a), os trabalhos relativos à definição dos índices máximos de consumo específico de energia ou mínimos de eficiência energética para os aparelhos consumidores de energia eram inéditos no País e, desta forma, um longo caminho ainda teria que ser percorrido para a completa implementação da Lei. Além do ineditismo do tema, este trabalho se caracteriza pela alta complexidade dos assuntos tratados, pela necessidade de um

esforço contínuo de pesquisa e de desenvolvimento tecnológico e pela diversidade de agentes públicos e privados envolvidos.

Observa-se, assim, que o motor elétrico é o único equipamento com rendimentos mínimos estabelecidos, Brasil (2001b). O PROCEL, por sua vez, desenvolve programas de conservação de energia através de selos eficiência para motores e bombas centrífugas, PROCEL (2005), e esforços vêm sendo concentrados na avaliação de equipamentos eletrorurais tais como o desintegrador/picador/moedor, moinho de martelo e sistemas de irrigação.

Rodrigues et al. (2006) apresentaram a avaliação de desempenho de desintegrador/ picador/moedor na moagem de milho baseando-se nas orientações americanas e alemãs, uma vez não estirem padrões nacionais.

Zanatta et al. (2006) avaliaram o moinho de martelo considerando a potência elétrica específica de entrada para a peneira de crivos circulares e diâmetro de 4mm e 8 mm. Os autores obtiveram consumos específicos iguais a 3,73 kWh t^{-1} / 521,07 μm e 2,48 kWh t^{-1} / 665,67 μm, respectivamente. Oliveira, Pereira e Paz (2004) obtiveram, na avaliação de onze pivôs na região Oeste da Bahia, potências específicas variando entre 1,29 e 2,50 cv ha^{-1} e Eficiência de Aplicação entre 59,8 e 91,1%.

Os programas, as avaliações e os indicadores de eficiência, em especial para pivôs centrais de irrigação, caracterizam os elementos do sistema isoladamente, ou ainda, determinam o rendimento agrícola e energético de forma separada. Puderam ser observados indicadores para o motor, a bomba, a tubulação, a irrigação, o consumo de energia sem, no entanto, formatar um índice ou padrão que avalie todo o sistema. Surge, assim, a necessidade da obtenção de indicadores gerais que permitam a comparação dos sistemas de irrigação sob quaisquer características de instalação.

Assim, considerando o elevado potencial para economia de água e energia e a expansão da área irrigada no Brasil, bem como a necessidade do desenvolvimento de pesquisa em eficiência energética, é proposto, neste trabalho, uma metodologia para avaliação e determinação de um padrão de eficiência energética global para sistemas de irrigação por pivô central.

Desta forma, o desenvolvimento deste trabalho tem como objetivo contribuir para o aumento da eficiência na irrigação, em especial, realizada por pivô central. Para isto, serão apresentados os métodos de irrigação e a eficiência energética, com ênfase ao sistema de aspersão tipo pivô central, Capítulo II.

No capítulo III as metodologias existentes para avaliação destes sistemas são discutidas e métodos de ensaios são propostos para determinação da etiqueta de eficiência energética, exemplificada no Capítulo IV.

No Capítulo V a energia dissipada em cada elemento do pivô é estratificada e seus indicadores determinados. Por fim, no Capítulo VI, são propostas medidas de eficiência para os sistemas de irrigação ensaiados e, a partir da avaliação econômica, determinado o padrão de máximo consumo específico dos pivôs centrais.

CAPÍTULO II

IRRIGAÇÃO E A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

2.1. Introdução

O objetivo da irrigação é suprir água às plantas na quantidade necessária e no momento apropriado para que sejam obtidos níveis adequados de produção e qualidade do produto. O sistema adequado de irrigação é, por sua vez, aquele capaz de propiciar ao produtor a possibilidade de fazer uso do recurso água com a máxima eficiência, aumentando a produtividade das culturas, reduzindo os custos de produção e, conseqüentemente, maximizando o retorno dos investimentos.

Segundo Silva, Folegatti, Duarte (2005), não existe um método ideal, pois cada situação em particular deve ser estudada observando-se soluções em que as vantagens inerentes possam compensar as limitações naturais dos métodos de irrigação. O pivô central, por sua vez, tem se constituído em um equipamento popular para irrigação, principalmente nas regiões Sudeste e Centro Oeste no País. A opção por este sistema deve-se, principalmente, ao alto índice de automação e sua adaptabilidade a uma grande diversidade de clima e topografia.

2.2. Métodos de irrigação

Segundo EMBRAPA (2001), método de irrigação é a forma pela qual a água é aplicada às culturas. Basicamente são quatro os métodos de irrigação:

- Superfície;
- Localizada;
- Subirrigação;
- Aspersão.

Para cada método há dois ou mais sistemas de irrigação que podem ser empregados observando-se a variação do solo, clima, cultura, disponibilidade de água e energia e as condições socioeconômicas. No método de irrigação por superfície, a distribuição da água se dá por gravidade através da superfície do solo. Este método representa a maior área irrigada no Brasil e no mundo (Figura 2.1).

Figura 2.1. – Método de irrigação por superfície
(fonte: Brasil, 2004b)

No método de irrigação localizada a água é aplicada em apenas uma fração do sistema radicular das plantas, empregando-se emissores pontuais (gotejadores – Figura 2.2a), lineares (tubo poroso ou "tripa" – Figura 2.2b) ou superficiais (microaspersores – Figura 2.3). A proporção da área molhada varia entre 20% e 80% da área total, o que pode resultar em economia de água e energia. O teor de umidade do solo pode ser mantido alto através de irrigações freqüentes e em pequenas quantidades, beneficiando culturas que respondam a essa condição.

(a) **(b)**

Figura 2.2. – Método de irrigação localizada utilizando gotejadores (a) e tubos porosos (b)
(fonte: Brasil, 2004b)

Figura 2.3. – Método de irrigação localizada utilizando microaspersores

Com a subirrigação, o lençol freático é mantido a uma profundidade capaz de permitir um fluxo de água adequado à zona radicular da cultura. Geralmente a subirrigação está associada a um sistema de drenagem subsuperficial que, em condições satisfatórias, pode se constituir no método de menor custo. No Brasil, esse tipo de sistema de irrigação tem sido empregado com relativo sucesso no projeto do Rio Formoso, TO (Figura 2.4).

Figura 2.4. – Método de irrigação tipo subirrigação
(fonte: EMBRAPA, 2001)

De acordo com Silva, Folegatti, Duarte (2005), na irrigação por aspersão, a aplicação de água ao solo resulta da fragmentação de um jato de água lançado sob pressão no ar atmosférico, por meio de simples orifícios ou bocais de aspersores. Como vantagens da irrigação por aspersão, pode se destacar que este sistema:

- Dispensa o preparo ou sistematização do terreno;
- Permite um bom controle da lâmina de água a ser aplicada;
- Possibilita economia de mão-de-obra;
- Possibilita economia de água (maior eficiência que a irrigação por superfície);
- Permite a aplicação de fertilizantes e tratamentos fitossanitários.

Por outro lado, o sistema de irrigação por aspersão possui como limitações:

- Os custos iniciais de instalação e manutenção;
- A distribuição de água pode ser afetada pelos fatores climáticos, principalmente, pelo vento;
- O favorecimento para o desenvolvimento de doenças em algumas culturas;
- O risco de selamento da superfície do solo;
- Não ser apropriado para água com alto teor de sais.

De acordo com Brasil (2004b), a seleção do sistema e do método de irrigação obedece a critérios que levam em conta questões socioeconômicas, tipo de solo, topografia, relevo, clima, cultura, disponibilidade e qualidade da água. Considerando estes fatores, os sistemas de irrigação utilizados no Brasil podem ser observados na Figura 2.5.

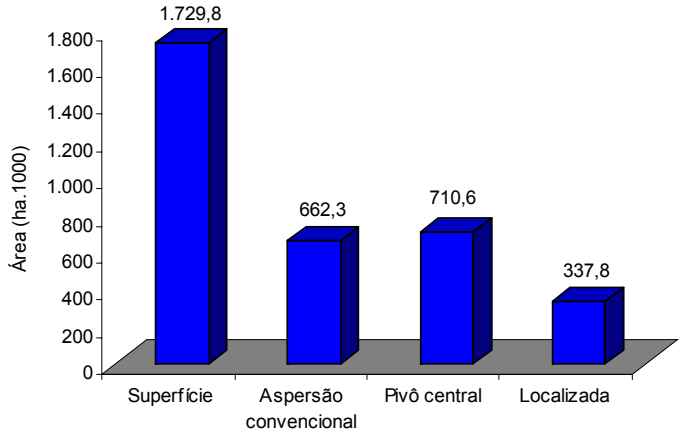


Figura 2.5. – Área irrigada no Brasil em 2003/2004
(fonte: Christofidis, 2006a)

Pode se observar, a partir da Figura 2.5, que, com 710,6 mil ha, o método de irrigação por pivô central representa 20,65% da área nacional irrigada. Nos Estados Unidos 125 mil equipamentos irrigam 7,9 milhões de ha, aproximadamente 29% da área nacional irrigada utiliza sistemas de irrigação auto-propelidos, em sua maioria pivôs centrais (Evans, 2007).

2.3. Método de irrigação tipo aspersão

Neste método de irrigação a água é aspergida sobre as plantas simulando uma chuva (Mantovani, 2006). Segundo Silva, Folegatti, Duarte (2005), o método de irrigação por aspersão pode ser dividido em sistema de irrigação convencional, Figura 2.6, e sistema de irrigação por aspersão mecanizada.

Figura 2.6. – Sistema de irrigação por aspersão convencional

O sistema de aspersão convencional é o mais básico método por aspersão, do qual derivam todos os demais. Caracteriza-se pelo uso de tubulações móveis de engate rápido ou fixas e enterradas. A aspersão mecanizada, sistema dotado de mecanismo de movimentação automática, pode ser dividida em sistema de aspersão autopropelido e sistema de linha lateral móvel.

Nos sistemas de linhas laterais móveis o equipamento é dotado de mecanismos propulsores que asseguram sua movimentação contínua ou intermitente na área irrigada. Estes sistemas são classificados de acordo com a direção do deslocamento, isto é, sistemas com deslocamento linear (Figuras 2.7a, b) e sistemas com deslocamento radial (pivô central – Figura 2.8).

(a) **(b)**

Figura 2.7. – Sistema de irrigação por aspersão de linhas móveis (a) Lateral rolante, (b) deslocamento linear
(fonte: EMBRAPA, 2001)

Figura 2.8. – Sistema de irrigação por aspersão tipo pivô central
(fonte: Valley, 2003)

2.4. Sistema de irrigação por pivô central

Com relativa facilidade de manejo, o pivô central pode aplicar água na quantidade e freqüência que melhor se ajustem ao sistema solo-planta-atmosfera, possibilitado, assim, a alta produtividade em uma grande diversidade de culturas.

Estes equipamentos têm capacidade de irrigar, em apenas uma volta, áreas de até 130 ha ou mais. Preferencialmente, estas áreas devem possuir relevo plano ou levemente ondulado, contudo, há equipamentos projetados para operar em áreas de relevos irregulares, com declives de até 20%. Destacam-se como principais vantagens deste sistema:

- Menor necessidade de mão-de-obra;
- Constância de alinhamento e velocidade de deslocamento em todas as irrigações;
- Posicionamento da linha lateral no inicio após uma revolução completa;
- Facilidade em proporcionar bom manejo na irrigação;
- Boa uniformidade de distribuição de água;
- Facilidade de aplicação de fertilizantes e outros produtos químicos.

As limitações deste sistema, quando comparado com os equipamentos tradicionais de aspersão, constituem-se:

- Na perda de 20% das áreas cultiváveis caso não seja utilizado equipamentos de irrigação de canto;
- Na necessidade da desobstrução da área a ser irrigada para a revolução completa da linha lateral;

De acordo com EMBRAPA (2005), o sistema de irrigação tipo pivô central consiste de uma única lateral que gira em torno do centro de um círculo (pivô). Segmentos da linha lateral metálica são sustentados por torres em formato de "A" conectadas entre si por juntas flexíveis (Figura 2.9). Um pequeno motor elétrico permite o movimento independente de cada segmento ditado pela velocidade da última torre que, por sua vez, determina a lâmina a aplicada.

Figura 2.9. – Sistema de irrigação por aspersão tipo pivô central
(fonte: Autor)

Como pode ser observado na Figura 2.10, o suprimento de água é feito através do ponto do pivô, requerendo, assim, um poço profundo no centro da área ou que a água seja conduzida por uma adutora enterrada. Os pivôs são sistemas que permitem alto grau de automação através de um painel principal onde o operador pode ligar, desligar, selecionar a velocidade e examinar todo o sistema, facultando ainda, operação local ou remota.

Figura 2.10. – Ponto e painel central de um pivô central de irrigação
(fonte: Autor)

A distribuição de água na linha lateral do pivô é feita por meio de aspersores (spray ou difusores) acoplados sobre a tubulação ou em tubos de descida. Os aspersores são convenientemente espaçados de forma a permitir adequada uniformidade na distribuição da água. Quanto à pressão de serviço, os sistemas de irrigação por pivô central podem operar em baixa, média e alta pressão, isto é, pressões entre 7 e 60 mca.

Em função da pressão de serviço, do número de torres e do tamanho dos aspersores, a vazão de um pivô pode atingir valores de até 550 m³/h. Na extremidade final ainda pode existir um canhão hidráulico, em geral acionado por um motor e bomba de aproximadamente 5 cv, com a finalidade de aumentar a área irrigada ou irrigar os cantos. Em substituição ao canhão hidráulico vem sendo utilizado um lance em balanço na tubulação aérea equipado com aspersores, uma vez que garante maior uniformidade de aplicação de água. É possível ainda encontrar um equipamento denominado braço giratório, utilizado para irrigação dos cantos da propriedade, conforme apresentado na Figura 2.11.

Figura 2.11. – Braço giratório de um pivô central de irrigação
(fonte: VALLEY, 2003)

Na Figura 2.12 são apresentados os principais componentes de um pivô central de irrigação.

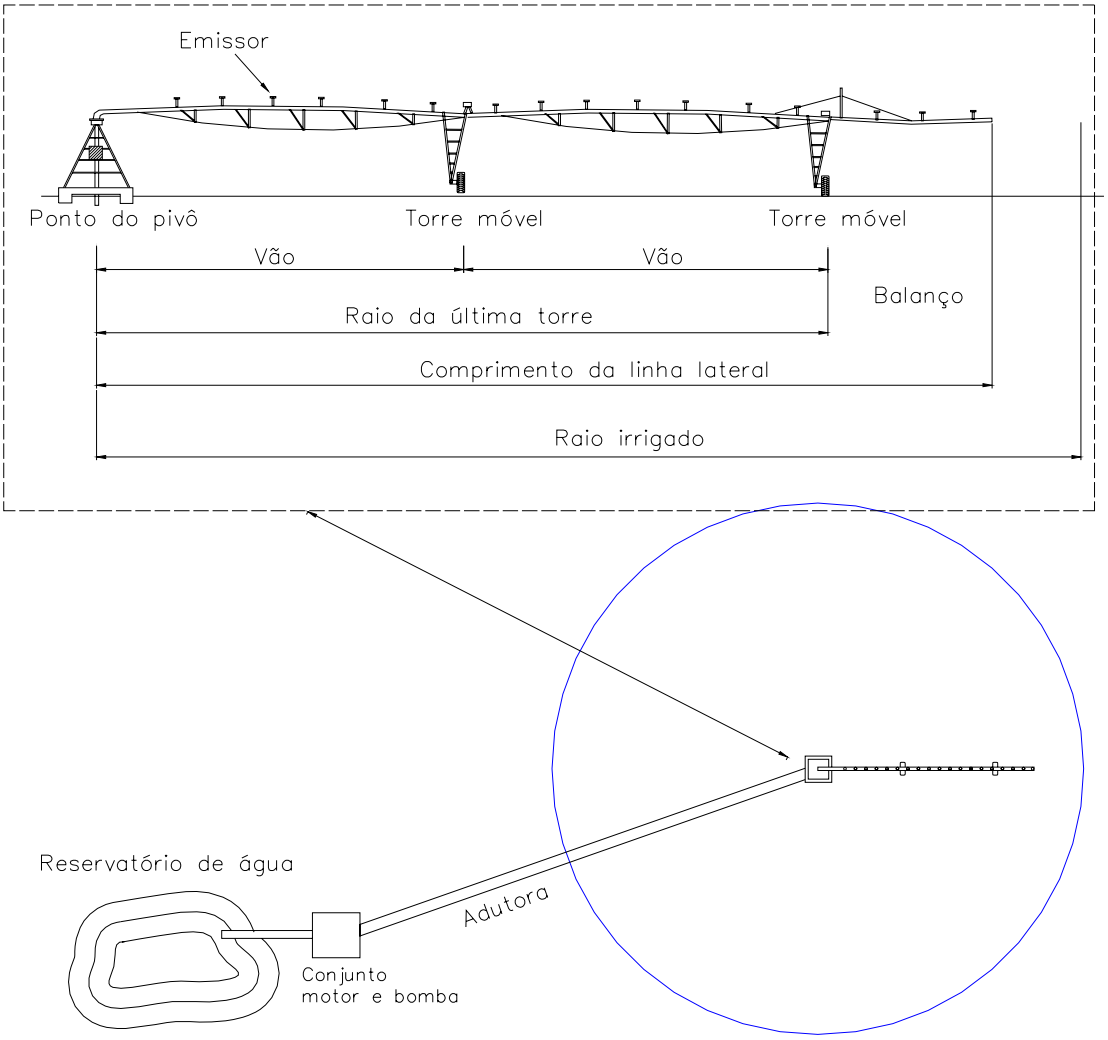


Figura 2.12. – Componentes de um equipamento de irrigação tipo pivô central
(fonte: Colombo, 2003)

2.5. Eficiência energética em irrigações pressurizadas

Segundo Batty et al. (1975) apud Fernández (1996), a energia necessária para irrigar uma determinada superfície pode ser calculada pela Equação 2.1.

$$PE = \frac{0,0271\, A\, D\, H}{E\, E_p} \tag{2.1}$$

Onde: PE – *Energia consumida no sistema de bombeamento [kWh];*
A – *Superfície irrigada [ha];*
D – *Irrigação necessária [mm];*
H – *Altura manométrica de bombeamento [m];*
E – *Eficiência de irrigação [decimal];*
E_p – *Eficiência de bombeamento [decimal];*

A partir da Equação 2.1 conclui-se que, para diminuir o consumo de energia em um sistema de irrigação pressurizado, deve-se reduzir a irrigação necessária, aumentar a eficiência de irrigação, reduzir a altura manométrica e aumentar o rendimento do motor e da bomba utilizada, uma vez que área irrigada é constante. Segundo Gilley & Watts (1977) e Chen et al. (1976) apud Fernández (1996), a partir dos fatores citados, é possível se economizar até 41% da energia elétrica fornecida ao sistema.

A relação entre a irrigação necessária e a eficiência de irrigação, D/E, caracteriza o volume bombeado. Assim, métodos mais eficientes e manejo adequado da irrigação podem trazer economia de água entre 15 e 35%, Stegman y Ness (1974) apud Fernández (1996).

Os sistemas de irrigação podem, assim, ser caracterizados quanto ao seu consumo específico, onde a irrigação por superfície encontra-se entre 0,03 e 0,3 kWh m^{-3}, por aspersão consome entre 0,2 e 0,6 kWh m^{-3} e a localizada entre 0,1 e 0,4 kWh m^{-3}, (Marouelli apud Lima, Ferreira, Christofidis, 2006b).

A irrigação localizada, todavia, possui maior eficiência, uma vez que irriga diretamente na região radicular da planta, diminui as perdas por evaporação, diminui a perda por percolação, não há perda por escoamento superficial e não irriga o mato entre as fileiras. Somado ao melhor aproveitamento de água, a irrigação localizada necessita, normalmente,

menor altura manométrica que os sistemas de aspersão. Todavia este sistema apresenta maior custo inicial, sendo mais adaptável a culturas perenes.

Determinar a irrigação necessária em um sistema instalado, denominado manejo de irrigação, é escolher quanto e quando deve ser aplicado de água para se obter o máximo rendimento da cultura. Turco et al. (2005) constataram que, embora o consumo e custo da energia para a irrigação da soja, para 40% do esgotamento da reserva de água utilizável no solo, seja maior do que para 60%, a produtividade aumenta, garantindo o consumo específico e custo específico menores. Os autores determinaram, na área demonstrativa e experimental do campus da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinária da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Jabuticabal, SP, o valor mínimo de 1,79 kWh kg^{-1} de soja e 607,61 R$ ha^{-1} ou ainda 0,2987 R$ kg^{-1}.

Definir a irrigação total necessária durante o projeto do sistema de irrigação, é calcular a quantidade de água a ser suprida pela irrigação, de modo a complementar as precipitações efetivas, no atendimento à necessidade da cultura, (Bernardo, Soares, Mantovani, 2005). Desta forma, a irrigação total necessária é um dos principais parâmetros para o correto planejamento, dimensionamento e manejo de qualquer sistema de irrigação, uma vez que, quando não avaliada corretamente, pode levar a sub ou superdimensiomento dos equipamentos.

Quando a quantidade de irrigação necessária é subdimensionada, o sistema de irrigação não terá capacidade de aplicar água suficiente à cultura, obtendo-se, assim, menores produções ou necessitando a redução da área irrigada.

O superdimensionamento da capacidade do sistema, por outro lado, além da redução da produtividade devido ao excesso de água, salinização e lixiviação dos nutrientes, eleva o custo inicial do equipamento e o custo da energia elétrica. Esta análise deve, ainda, ser realizada quando se considera a redução do número de horas de trabalho do equipamento para evitar o horário de ponta e buscar o funcionamento no horário reservado.

As unidades consumidoras de energia elétrica podem ser classificadas como pertencentes ao grupo “B” ou “A”. Os consumidores do grupo “B” possuem tarifa monômia, ou seja, faturamento somente de consumo e, desta forma, fogem ao escopo desta abordagem. Os consumidores do grupo “A”, todavia, possuem tarifa binômia, ou seja, o faturamento se dá através do consumo e da demanda, podendo ser classificados, ainda, como sistema convencional, horo-sazonal azul e verde cujos critérios de aplicação são ilustrados na Figura 2.13.

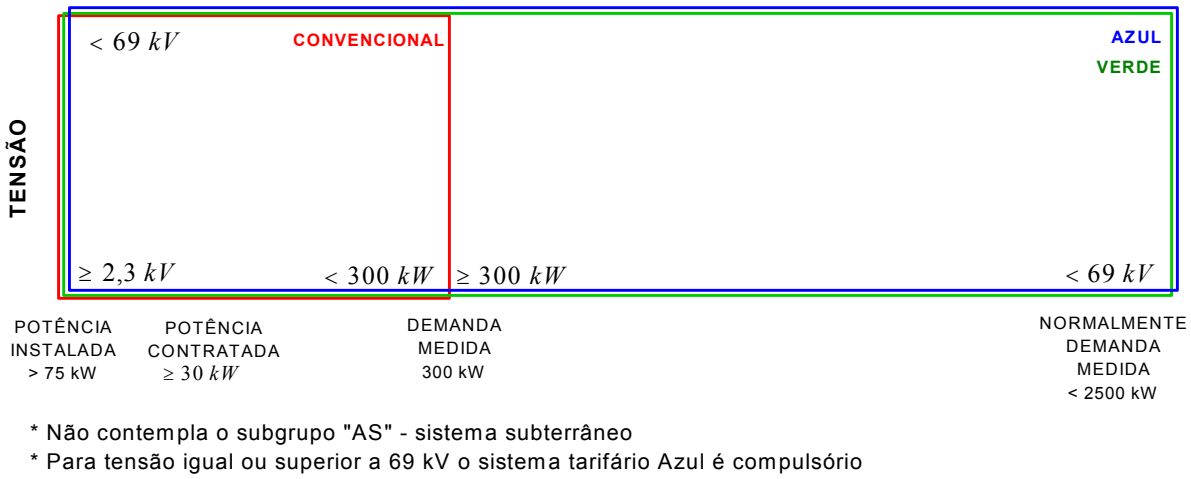


Figura 2.13. – Esquema de aplicação do sistema tarifário do grupo "A"
(fonte: Lima, 2003)

A partir do esquema apresentado na Figura 2.13 pode-se observar que as opções tarifárias convencional, horo-sazonal azul e verde ficam restritas a potência instalada de 75 kW e a demanda de 300 kW. Para consumidores com demanda maior ou igual a 300 kW até a potência limite para atendimento em tensão inferior a 69 kV, ou seja, 2500 kW, tem-se como como opção o sistema horo-sazonal azul e verde, ficando compulsória o sistema tarifário azul para tensão igual ou superior a 69 kV.

Os equipamentos de irrigação, cujas características enquadram-se no sistema tarifário horo-sazonal, são projetados para funcionamento diário máximo de 21 horas, de modo que o sistema fica desligado nas três horas do horário de ponta, onde o custo da energia é maior. Consumidores irrigantes possuem, ainda, desconto na tarifa de consumo de energia para o funcionamento entre 21,5 h e 6,0 h, ou seja, 8,5 horas onde a energia pode ser reduzida em até 90%, Tabela 2.1.

Tabela 2.1. – Descontos na tarifa de consumo de energia elétrica para irrigantes

Região do País	Grupo A (%)	Grupo B (%)
Nordeste e outras regiões geoeconômicas incluídas na área de atuação da SUDENE	90	73
Norte e Centro-Oeste	80	67
Demais regiões	70	60

Fonte: Brasil, 2000.

Na área de atuação da Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE) estão, também, incluídos os municípios do norte do Estado do Espírito Santo e nordeste do Estado de Minas Gerais.

A potência do motor e da bomba é determinada pela relação entre a energia consumida, PE, Equação 2.1 e o número de horas de funcionamento para o turno de rega desejado. Assim, considerando um consumidor com tarifa binômia e incentivo à irrigação, a redução do número de horas de funcionamento diário de 21 para 8,5 significa menor faturamento de consumo de energia devido ao incentivo ao irrigante, todavia, maior fatura de demanda será paga, uma vez que deve se aumenta a potência dos equipamentos para se manter a mesma irrigação.

Considerando o aumento do horário de incentivo para irrigantes de 6,0 para 8,5 horas, definido em outubro de 2002, Ribeiro (2003) analisou sua influência no rendimento de projetos de irrigação. Nesta análise, o autor comparou (i) período de irrigação de 6 $h.dia^{-1}$; (ii) período de irrigação de 8,5 $h.dia^{-1}$; e (iii) sistema dimensionado para o período de horas de irrigação noturna de 6 $h.dia^{-1}$ e adaptado para o período de incentivo à irrigação noturna atual, 8,5 horas diárias. O autor concluiu que o ganho da adequação da bomba e motor é variável para cada caso, todavia, para a condição avaliada pôde chegar a 35% de economia na conta de energia.

Com o objetivo de verificar a influência da demanda na avaliação de um pivô central, serão discutidos três indicadores relacionados. O fator de carga, índice de utilização do horário reservado e o preço médio da energia serão analisados considerando que o equipamento fique desligado no horário de ponta. Os sistemas enquadrados na tarifa binômia, consumo e demanda, podem ser avaliados por meio do fator de carga para verificar a distribuição do consumo de energia ao longo do período de faturamento. Relacionando a demanda média à máxima o fator de carga, Equação 2.2, pode, ainda ser representado pela Figura 2.14.

$$FC = \frac{C}{D_m\, T} \tag{2.2}$$

Onde: FC – *Fator de carga [1];*

C – *Consumo de energia [kWh];*

D_m – *Demanda máxima registrada [kW];*

T – *Período considerado no intervalo de faturamento [h].*

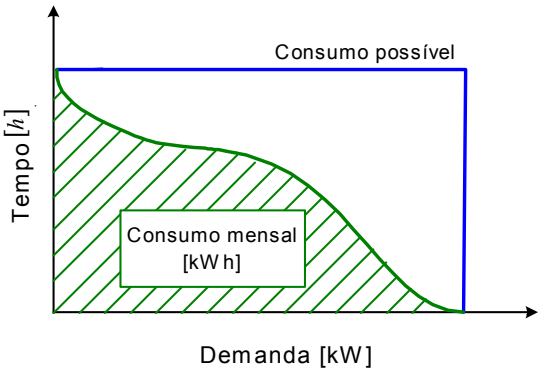


Figura 2.14. – Curva de distribuição de demanda em um período de faturamento

O índice de utilização do horário reservado relaciona, por sua vez, o consumo no horário de benefício ao irrigante com o consumo total, Equação 2.3. O preço médio da energia, Equação 2.4, tem como objetivo relacionar o importe total com o consumo, de forma a identificar a influência do custo da demanda no trabalho desenvolvido pela máquina, energia elétrica absorvida da rede.

$$IU_{hr} = \frac{C_r}{C} \tag{2.3}$$

$$Pm = \frac{D_m\ TD + C_r\ TC_r + C_{fr}\ TC_{fr}}{C} \tag{2.4}$$

Onde: IU_{hr} – *Índice de Utilização do horário reservado [1];*

C_r – *Consumo de energia no horário reservado [kWh];*

P_m – *Preço médio da energia [R$/kWh];*

TD – *Tarifa de demanda [R$/kW];*

TC_r – *Tarifa de consumo no horário reservado [R$/kWh];*

C_{fr} – *Consumo de energia fora do horário reservado [kWh]*

Substituindo as Equações 2.2 e 2.3 em 2.4 pode ser obtido o preço médio da energia a partir do fator de carga e índice de utilização do horário reservado, Equação 2.5. A equação apresentada pode ser utilizada para tarifas binômia, considerando o não funcionamento do equipamento no horário de ponta para sistemas horo-sazonais azul ou verde.

$$Pm = \frac{TD}{FC\ \ T} + TC_{fr} - IU_{hr}(TC_{fr} - TC_r) \tag{2.5}$$

Onde: P_m – *Preço médio da energia [R$/kWh];*

Considerando, ainda, que a potência absorvida pelo motor da bomba seja aproximadamente constante, uma vez que a pressão e vazão da bomba devam permanecer constantes para manter uma lâmina de água uniforme. Nesta condição de operação, os consumos apresentados nas Equações 2.3 e 2.4 podem ser calculados a partir da demanda máxima e do tempo de funcionamento nos respectivos horários, de forma que a Equação 2.5 pode ser reescrita, Equação 2.6.

$$Pm = \frac{TD}{t_t} + TC_{fr} - \frac{t_r}{t_t}(TC_{fr} - TC_r) \tag{2.6}$$

Onde: P_m – *Preço médio da energia [R$/kWh];*

t_t – *Tempo de utilização total do equipamento [h];*

t_r – *Tempo de utilização do equipamento no horário reservado [h];*

A influência da utilização do horário reservado pode ser analisada considerando as tarifas de demanda, R$ 12,699/kW e consumo fora de ponta, R$ 0,121086/kWh, da concessionária ENERSUL para consumidores horo-sazonais azul ou verde, grupo A4a, irrigante, 34,5 kV, período úmido, ANEEL (2006), Figura 2.15.

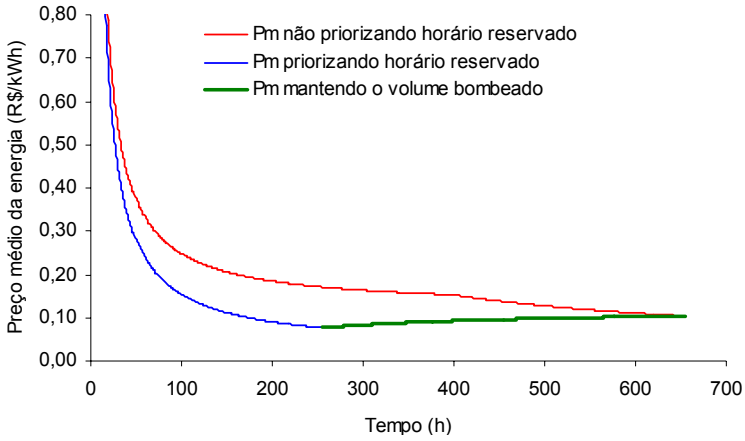


Figura 2.15. – Curva de distribuição de demanda em um período de faturamento

Analisando a curva do preço médio da energia priorizando a utilização do horário reservado, Figura 2.15, é possível se obter um custo mínimo do kWh consumido igual a R$ 0,0767, correspondente a 255 horas de funcionamento neste horário. Por outro lado, utilizando o equipamento não priorizando o horário reservado, o mínimo é obtido para 654 horas, com valor igual a R$ 0,1038, quando se considera o número de horas de dezembro de 2004.

Outra importante avaliação refere-se à variação do preço médio da energia mantendo o volume bombeado. Nesta simulação é considerada a redução do tempo de funcionamento do equipamento até seu uso restrito no horário reservado, mantendo o volume bombeando no período de faturamento. Considerando, ainda, igual variação da potência e da vazão do equipamento, máquinas similares, a redução percentual do tempo de funcionamento implica em igual aumento da potência do conjunto motor e bomba.

Apresentado na Figura 2.15, o aumento do custo relativo à demanda de energia, 156,5% do valor inicial, sobrepõe-se ao preço médio priorizando o horário reservado. Há, desta forma, uma redução no preço médio da energia de 26,09% para um aumento de 156,5% na capacidade de bombeamento e aplicação de água, que devem ser analisado para verificação da viabilidade econômica.

Observa-se, ainda, que o preço médio da energia, considerando uma carga de potência constante, independe da demanda, tendo seu valor associado às tarifas de demanda e consumo e dos tempos de utilização nos segmentos de faturamento, Equação 2.6. Desta forma, o preço médio da energia é suficiente para caracterizar um projeto de irrigação quanto ao

comportamento da demanda e do consumo ao longo do período de faturamento, de forma que este indicador será utilizado no Capítulo VI para determinação do padrão de eficiência energética do pivô central.

A eficiência de irrigação, discutida no Capítulo III, associada às perdas totais de água, relaciona a quantidade de água armazenada na zona radicular da planta à quantidade bombeada. Parte da energia utilizada para o bombeamento pode ser associada a um volume de água não disponível à cultura. Assim, do manancial até região do solo onde a água fica disponível à cultura, os vazamentos, a evaporação e a deriva pelo vento, o escoamento superficial e a percolação profunda provocam perda de parte da água bombeada pelo sistema.

Azevedo et al. (1999), considerando a água bombeada que não alcança a área irrigada, avaliou o desperdício de energia em um sistema de aspersão de alta pressão em função dos fatores climáticos. Em uma propriedade da Usina Sapucaia S.A, no município de Campos dos Goytacazes, RJ, obteve perdas de energia de até 14,67 kWh ha^{-1} devido, principalmente, umidade relativa do ar, a velocidade do vento, a pressão de serviço do aspersor e a radiação solar.

Em geral, o manancial e a área irrigada encontram-se em alturas geométricas diferentes que, acrescidos das perdas de carga nos elementos do circuito hidráulico de um sistema de irrigação, tubulações, conexões, válvulas e emissores, determinam a altura manométrica que deve ser vencida pelo conjunto motor e bomba, Equação 2.7.

$$H_m = h_g + (\Delta h_s + \Delta h_{Ad} + \Delta h_{LL} + \Delta h_{ASP}) \tag{2.7}$$

Onde: H_m – *Altura manométrica fornecida pela bomba [mca];*

h_g – *Desnível geométrica entre a captação e a altura da cultura na condição de maior desnível [m];*

Δh_s – *Perda de carga distribuída e localizada na sucção [mca];*

Δh_{Ad} – *Perda de carga distribuída e localizada na adutora e tubulação de pressão [mca];*

Δh_{LL} – *Perda de carga distribuída e localizada na linha lateral e reguladores de pressão [mca];*

Δh_{ASP} – *Pressão de serviço do difusores [mca];*

Pode se observar, a partir da Equação 2.7, que o desafio tecnológico para redução da altura manométrica encontra-se na escolha da área com menor desnível geométrico, redução das perdas de carga nas tubulações e conexões hidráulicas e a utilização do difusor de menor pressão que melhor se adapte as condições da solo-planta-atmosfera.

Outro potencial elemento associado ao consumo de energia nos sistemas de irrigação é o motor elétrico. Apesar do desenvolvimento tecnológico e elevado rendimento, a representatividade na matriz energética destes equipamentos sugere que ganhos na eficiência em sua construção ou em sua operação podem trazer significativos benefícios à economia de energia no País.

Para Scheihing et al. (2008), mais de 13,5 milhões de motores converte eletricidade em trabalho útil nos processos industriais dos Estados Unidos, o equivalente a 70% do total da energia elétrica consumida nas indústrias. Estima-se que os motores elétricos na indústria brasileira consumam 82.217 GWh/ano, que equivalem a 60% da eletricidade consumida no setor secundário e 27% do consumo brasileiro, Garcia (2003).

Segundo Fuchsloch, Finley, Walter (2008), a eficiência dos motores de indução trifásicos vem sendo estudada por vários anos com o objetivo da redução de suas perdas, uma vez que a energia elétrica representa 95% dos custos do motor ao longo de sua vida útil.

A eficiência dos motores elétricos, por sua vez, pode ser relacionada às suas características construtivas e condições de operação. Os princípios dos projetos dos motores de indução não mudaram significativamente ao longo dos anos, no entanto, as ferramentas e o conhecimento de engenharia melhoram consideravelmente, trazendo contínua redução das perdas. Como fatores inter-relacionados à eficiência e ao custo dos motores, Fuchsloch, Finley, Walter (2008) identificam:

- O aumento do material do rotor e estator;
- A utilização de materiais laminados de alto rendimento;
- A redução do nível da temperatura dos motores;
- A otimização da geometria do estator e rotor;
- A otimização das dimensões do entreferro;
- A otimização do corte e empilhamento das lâminas;
- O aumento da eficiência dos ventiladores;
- A utilização de rolamentos de alto rendimento;
- O aumento na taxa de transmissão de calor entre a parte ativa e a carcaça;
- A redução das tolerâncias de fabricação.

As características originais de projeto de um motor elétrico devem, ainda, ser analisadas após o processo de rebobinagem. Cao & Bradley (2006) investigaram a influência do recondicionamento no rendimento de 23 motores, com potência variando entre 5,5 e 225 kW. Os autores observaram que, para uma condição de manutenção não controlada, os motores apresentaram redução do rendimento entre 0,6 e 1% e, obedecendo as boas práticas de bobinagem, sob condição controlada, a redução obtida foi, em média, menor que 0,1%. O aumento da perda nos condutores do estator, a modificação no sistema de ventilação, na seção do cobre e comprimento médio da espira justificaram as variações observadas no rendimento dos motores após a rebobinagem.

Campbell (1997) sugere uma análise detalhada sobre a substituição ou rebobinagem do motor após a queima. Esta análise deve considerar a vida útil e a conservação do motor, a história de operação e rebobinagem, o tipo do motor e a aplicação, suas especificações, a aplicação de programas co-participativos na substituição e o potencial de conservação de energia. Na substituição de um motor de 50 hp, IV pólos, 93% de rendimento, após a análise, o autor obteve retorno do investimento em 11 meses, uma vez que o motor queimado possuía eficiência igual a 90,2%.

Yung (2007) ainda apresenta formas para aumentar a confiabilidade e a eficiência dos motores no processo de rebobinagem. Para os motores analisados, a área do cobre poderia ser aumentada, em média, de 21,7%, o que propiciaria uma redução de aproximadamente 10º C na temperatura e consequentemente, aumento da eficiência do motor.

A alteração no tipo de bobinagem pode reduzir as correntes circulantes no enrolamento do motor e, desta forma, suas perdas Joule. A utilização de calços magnéticos fechando as ranhuras e a otimização do sistema de ventilação pode aumentar a eficiência do motor em 0,5 e 1%, respectivamente. As perdas por atrito nos mancais dos motores são influenciadas pelo tipo e quantidade de graxa utilizada na lubrificação dos rolamentos.

Para Yung (2007), limitar os harmônicos espaciais das ranhuras em 5% pode, ainda, reduzir o efeito do torque em freqüências diferentes da fundamental, inclusive a influência do momento em direção oposta à rotação do motor.

No Brasil, diante da crise no abastecimento de energia elétrica e, com o objetivo de garantir a oferta de produtos eficientes no mercado, foi sancionada em 17 de outubro de 2001, a Lei 10.295 (Lei de Eficiência Energética, Brasil, 2001a) cujo Decreto de regulamentação, 4.059 foi aprovado em 19 de dezembro de 2001 (Brasil, 2001b). O motor elétrico de indução trifásico foi o primeiro equipamento a ser estabelecido valores mínimos de rendimento, (Brasil, 2002b).

Garcia (2003) discute a regulamentação dos motores e seu potencial na conservação de energia elétrica em sistemas motrizes na indústria. Analisando 2.119 motores em 18 fábricas, o autor concluiu que a Lei de Eficiência Energética pode trazer como contribuição economia de 1% no consumo de energia destes equipamentos.

Considerando a operação do motor, sua eficiência é dependente da rede de alimentação e do carregamento desenvolvido. Pillay (1997) comparou a variação do rendimento entre motores normais e de alto rendimento acionando bombas centrífugas sob condição de tensão superior a nominal.

Motores de alto rendimento funcionam com maior velocidade e, consequentemente, desenvolvem maior vazão e absorvem maior potência quando acionam bombas centrífugas. Na avaliação realizada, o autor observou que a diferença entre os rendimentos, para um motor de 100 hp, IV pólos, reduziu de 3,3 para 0,93%, uma vez que a velocidade do motor de alto rendimento era 15 rpm maior.

Para um aumento de 10% na tensão, Pillay (1997) observou aumento na eficiência nominal do motor de alto rendimento entre 0,5 e 1% e redução no motor padrão entre 1 e 4%. A variação na tensão de funcionamento dos motores, conforme o autor, também é responsável pelo deslocamento do ponto de eficiência máxima, verificado em 75% da carga para motores entre 5 e 50 hp e 100% nas máquinas maiores.

Para Yung (2007), o desbalanceamento da tensão eleva as perdas nos motores. Na avaliação realizada, 3% de diferença entre as tensões, como aparece em 30% das instalações nos Estados Unidos, provocou variações de 18 a 30% entre as correntes, aumento na temperatura em até 50º C e redução do rendimento do motor em dois pontos percentuais.

Campana (2000) avaliando os motores de seis sistemas de irrigação por aspersão e pivô central em Minas Gerais, com potência entre 15 e 75 cv, utilizou um polinômio de sexto grau para relacionar as perdas no motor com a variação da tensão em relação a nominal. Nos ensaios realizados, considerando a média aritmética e geométrica da corrente, o autor obteve redução no rendimento de até 2,5% para uma variação de tensão de 11,7%.

O carregamento do motor tem influência sobre seu rendimento em operação, uma vez que a eficiência da máquina, geralmente, é menor para potências menores que a nominal. A partir das auditorias energéticas realizadas na fábrica de ração da Universidade Federal de Viçosa e na empresa frigorífica Pif Paf Alimentos, Lopes et al. (2006) observaram que 60,5% dos motores operavam com índice e carregamento abaixo de 50%, trazendo retorno financeiro a substituição de 66,7% destas máquinas avaliadas.

Garcia (2003) observou, nas indústrias analisadas, carregamento e rendimento médios iguais a 62 e 86%, respectivamente, destacando, assim, o potencial para adequação do motor a carga e o uso de máquinas de alto rendimento.

Lemes (2007), por sua vez, desenvolveu um programa que, além da avaliação técnica e econômica da substituição de motores de indução, fornece as curvas características, velocidade, corrente, fator de potência e rendimento, a partir da modelagem da máquina utilizando o circuito equivalente. Este programa pode auxiliar na determinação da condição de acoplamento ótimo entre o motor e carga, possibilitando a minoração das perdas e majoração do fator de potência.

Os sistemas de bombeamento representam, por sua vez, o maior consumo por aplicação nos Estados Unidos, uma vez que, em 1994 absorveram 149 GWh, ou seja, 27% de toda energia elétrica do País. A otimização destes sistemas pode trazer uma economia de 10.838 MWh ano^{-1}, ou ainda, 16,5% do consumo de energia elétrica dos sistemas de bombeamento no País, (Scheihing et al., 2008).

Fernández (1996) ressalta a necessidade da seleção correta do motor e da bomba para o funcionamento do sistema sob condição ótima. Uma vez que o máximo rendimento do conjunto pode variar entre 72 e 77%, o funcionamento da bomba e motor elétrico fora do ponto de máxima eficiência traz elevadas perdas de energia.

Para se reduzir o consumo de energia em sistemas de irrigação ou ainda determinar seu correto dimensionamento, deve se considerar as novas tecnologias empregadas e a análise técnica-econômica ao longo da vida útil do equipamento.

Campana (2000) estudou a racionalização do uso de energia elétrica em sistemas de irrigação do tipo pivô central e aspersão sob os aspectos do carregamento, rendimento dos motores elétricos e uso do inversor de freqüência. O autor concluiu que, em dois dos cinco casos analisados, houve viabilidade econômica da substituição do motor padrão por outro de alto rendimento e que a utilização do inversor de freqüência encontra-se, ainda, para os casos analisados, inviável economicamente.

Para Gomes (2004), a metodologia mais adequada para obter um projeto eficiente é através da introdução do critério econômico, de forma a se determinar a alternativa de projeto que minimize o custo de implantação e de operação ao longo da vida útil do sistema.

Zocoler (2003) apresenta um estudo prático para a determinação da melhor alternativa econômica considerando os custos de implantação e operação ao longo da vida útil do sistema de irrigação por pivô central. Gomes (2004), por sua vez, propõe a utilização do método baseado na Variação Linear dos Custos das Tubulações e o Método das Tentativas.

Desta forma, projetar e manter um sistema de irrigação sob a real necessidade de água da cultura, garantindo elevada eficiência de aplicação com baixa perda de carga são fatores importantes para a eficiente na irrigação. O motor e a bomba, sobretudo, são os elementos propulsores do sistema, de forma que, uma vez responsáveis pela transformação da energia elétrica em hidráulica, podem comprometer o rendimento total do sistema devido as perdas origem construtivas e de operação nas condições de funcionamento no campo.

2.6. Programas de etiquetagem e padronização de eficiência energética

De acordo com CLASP (2005), a taxa de crescimento do consumo de energia varia com as diferenças estruturais das nações, tais como, demografia, composição industrial, crescimento econômico e escolhas de serviços energéticos. O crescimento natural de cada país determina a demanda de serviços energéticos que, por sua vez, pode ser suprida por meio do aumento da oferta de energia ou pelo aumento da eficiência energética.

A decisão pelo desenvolvimento de programas de eficiência energética, anteriormente ao aumento da oferta de energia, tem sido geralmente a estratégia economicamente mais viável na maioria dos setores de consumo. O gráfico apresentado na Figura 2.16 representa a curva de distribuição de aparelhos vendidos considerando os programas de eficiência energética.

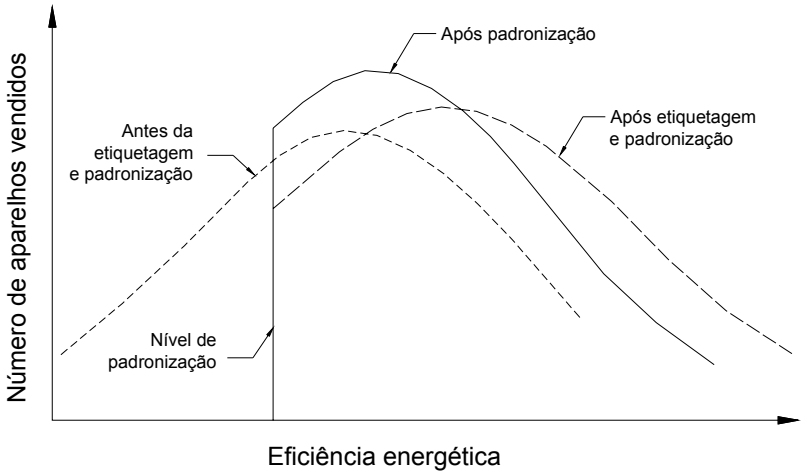


Figura 2.16. – Influência da etiquetagem e padronização na eficiência energética dos produtos vendidos
(fonte: CLASP, 2005)

Analisando a Figura 2.16 pode se observar que a determinação de um padrão de eficiência energética mínima retira do mercado os produtos que consomem mais do que um nível estabelecido (curva "após a padronização"). Todavia, o fabricante pode acomodar-se após a obtenção deste padrão e não buscar o aumento da eficiência energética de seus produtos.

Os programas de etiquetagem, por sua vez, caracterizam uma "concorrência pela eficiência energética", mas não impede a compra de equipamentos menos eficientes pelo consumidor desatento.

Desta forma, o melhor resultado na economia de energia, como pode ser verificado na curva "após etiquetagem e padronização" (Figura 2.16), pode ser obtido pela combinação de programas que estabelecem o nível mínimo de eficiência energética (padronização) e promovem o aprimoramento tecnológico contínuo (etiquetagem).

As etiquetas de eficiência energética são normalmente fixadas nos produtos e contém informações sobre o desempenho energético, usualmente na forma de consumo, eficiência ou custo de energia. A fixação das etiquetas tem como principal objetivo apresentar as informações necessárias para a escolha e a aquisição do produto pelo comprador. De acordo com CLASP (2005), as etiquetas podem ser dividias em dois tipos:

- Etiqueta de endosso que consiste essencialmente em um selo de aprovação segundo um critério específico;
- Etiqueta comparativa que permite ao consumidor comparar o desempenho entre produtos similares utilizando categorias discretas ou escalas contínuas.

Os padrões de eficiência energética são, por sua vez, regulamentações e procedimentos que prescrevem o desempenho energético de um produto, proporcionando a restrição da comercialização dos equipamentos com eficiência abaixo de um limite pré-estabelecido. Segundo CLASP (2005), existem três tipos de padrões de eficiência energética:

- Padrão prescrito que exige a instalação de dispositivos ou a observância de características particulares em todos os novos produtos;
- Padrões de índices mínimos de desempenho ou máximo de consumo de energia que devem ser seguidos pelos fabricantes sem considerar, no entanto, a tecnologia empregada ou detalhes de projetos;

- Padrões médios que especificam a eficiência média de um produto, permitindo que o fabricante selecione o nível de eficiência de cada modelo, desde que o valor médio geral seja alcançado.

A implementação e a manutenção de um programa de etiquetagem e padronização de eficiência energética devem ser criteriosas, pois, dependem de um conjunto de condições legais, financeiras e sociais (CLASP, 2005). Estas condições estão, por sua vez, intimamente ligadas às características econômicas, estruturais e culturais da sociedade onde serão implantadas. Na Figura 2.17 são apresentados os passos necessários para o desenvolvimento de um programa de etiquetagem e padronização de eficiência energética de um produto.

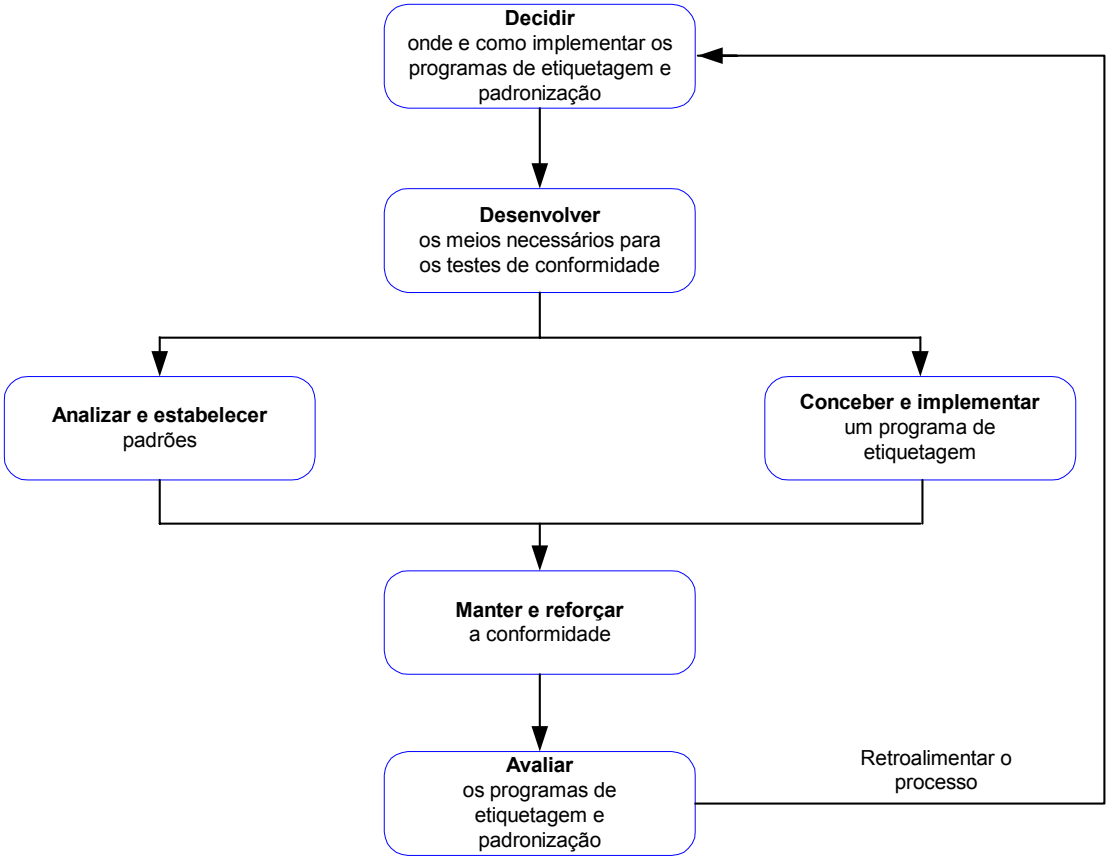


Figura 2.17. – Processo de desenvolvimento de um programa de etiquetagem e padronização de eficiência energética de um produto
(fonte: CLASP, 2005)

Pode ser observado no esquema apresentado na Figura 2.17 que, uma vez decidido pela implementação de um programa de etiquetagem ou padronização de eficiência energética

de um produto, são necessários os meios para a realização dos testes. Estes testes requerem o desenvolvimento de procedimentos que, para o caso da padronização, ainda necessitam do estabelecimento de limites de mínima eficiência ou máximos consumos para o produto.

Após serem concebidos e implementados, os resultados dos programas de eficiência energética são alcançados através do acompanhamento e da manutenção, de forma a garantir sua confiabilidade. Como último passo, a avaliação do programa deve verificar seu impacto na economia de energia, nos preços dos produtos, no desenvolvimento de novas tecnologias e, desta forma, realimentá-lo através de novos níveis de padrões de eficiência, por exemplo.

Haddad (2002) ressalta ainda que a eficiência energética não pode estar vinculada às questões conjunturais, todavia, deve integrar-se a Política Energética Nacional. Assim, a Lei de Eficiência Energética, os programas do PROCEL e o Programa de Eficiência Energética das concessionárias e permissionárias de energia são medidas adotadas no Brasil que contribuem para redução do desperdício de energia.

2.6.1 Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica - PROCEL

O PROCEL, órgão subordinado à Eletrobrás, foi criado em dezembro de 1985 pelo Ministério de Minas e Energia e pelo Ministério da Indústria e Comércio. Seus principais objetivos consistem na diminuição do desperdício de energia elétrica no país e na busca da eficiência energética no setor elétrico, considerando o desenvolvimento tecnológico, a segurança energética, a eficiência econômica e a proteção ambiental, PROCEL (2005).

Os programas desenvolvidos pelo PROCEL, ou que contam com sua participação, e se relacionam à eficiência de sistemas de irrigação, consistem-se no:

- Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE);
- Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE);
- Selo de Eficiência Energética;
- PROCEL SANEAR – Programa Nacional de Eficiência Energética em Saneamento Ambiental;
- Programa Nacional de Eficiência Industrial: Otimização de Sistemas Motrizes.

De acordo com INMETRO (2005), o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) tem como objetivo a conservação de energia através de etiquetas informativas que alertam o consumidor quanto à eficiência energética de alguns dos principais eletrodomésticos.

A adesão ao Programa Brasileiro de Etiquetagem é voluntária, de forma que os testes são feitos com os produtos dos fabricantes que querem fazer parte do PBE. A partir dos resultados dos ensaios, é criada uma escala onde todos os equipamentos são classificados. Com isso, o Programa incentiva a melhoria contínua do desempenho dos eletrodomésticos, buscando a qualidade dos mesmos, e estimula a competitividade do mercado, pois a cada nova avaliação os fabricantes procuram atingir níveis de desempenho melhores.

Segundo INMETRO (2005), participam do Programa, entre outros produtos, geladeiras, freezers, chuveiros, ares-condicionados, motores elétricos trifásicos, máquinas de lavar roupas, sistemas de aquecimento solar de água, lâmpadas fluorescentes compactas, lâmpadas incandescentes, reatores, fornos e fogões.

Outro importante programa desenvolvido pelo INMETRO, que conta com o apoio do PROCEL, consiste da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE). Esta etiqueta certifica que as informações prestadas pelo fabricante foram realizadas conforme as Normas Brasileiras pertinentes e os ensaios controlados por laboratórios credenciados. De acordo com INMETRO (1998), o objetivo do ENCE é permitir a comparação entre todos os produtos comercializados de uma mesma linha.

O Selo de Eficiência Energética é um instrumento promocional do PROCEL, concedido anualmente para estimular a fabricação nacional de produtos mais eficientes e orientar o consumidor, no ato da compra, a adquirir equipamentos que apresentem melhores níveis de eficiência energética (PROCEL, 2005).

O PROCEL SANEAR, Programa Nacional de Eficiência Energética em Saneamento Ambiental, visa promover ações para o uso eficiente de energia elétrica e água em sistemas de saneamento ambiental, segundo uma visão integrada de utilização desses recursos. Desta forma, são objetivos deste programa (PROCEL, 2005):

- Incentivar o uso eficiente dos recursos hídricos;
- Contribuir para a universalização dos serviços de saneamento ambiental;
- Melhorar os indicadores de desempenho associados à energia elétrica e ao processamento de água dos prestadores de serviços de saneamento;
- Conscientizar os consumidores quanto ao uso adequado de energia elétrica e água.

Para o setor industrial, este órgão lançou o PROCEL Indústria (Programa de Eficiência Energética Industrial). A dinâmica deste programa consiste no comprometimento das indústrias com a implementação das medidas de eficiência energética identificadas pelos

seus agentes (funcionários da empresa) que são treinados gratuitamente por multiplicadores capacitados pela ELETROBRÁS/PROCEL.

A finalidade deste programa é promover a eficiência energética em empresas do setor industrial, treinar e capacitar seus profissionais para atuarem como multiplicadores, disseminando os conceitos de eficiência energética em sistemas motrizes, além de contemplar a monitoração, verificação e a divulgação dos resultados.

2.6.2 Programa de Eficiência Energética

Em 1995, com o início da privatização das empresas concessionárias de distribuição de energia elétrica, o Governo Federal buscava uma forma de garantir que o setor privado, os novos proprietários das concessionárias, investisse em eficiência energética (Haddad, 2002).

Em 24 de julho de 2000 foi sancionada pelo Presidente da República a Lei nº 9.991 (Brasil, 2000) que dispõe às concessionárias, permissionárias e autorizadas do setor de energia elétrica a obrigatoriedade de aplicar, no mínimo, 1% da receita operacional líquida em pesquisa e desenvolvimento de programas de eficiência energética no lado da oferta e no uso final da energia.

Deve-se ressaltar, ainda, a publicação do Manual para Elaboração do Programa de Eficiência Energética (ANEEL, 2002a) pela Resolução da Aneel nº 492 de 3 de setembro de 2002 (ANEEL, 2002b). Este manual define a estrutura e a forma de apresentação, os critérios para avaliação econômica, a aprovação, o acompanhamento e os tipos de projetos do Programa de Eficiência Energética, bem como os procedimentos para contabilização dos custos e os tipos de recursos que podem ser utilizados.

2.7. Irrigação e indicadores de eficiência energética

Conforme pôde ser observado, a regulamentação da Lei de Eficiência Energética determina o marco regulatório necessário para o desenvolvimento de padrões e etiquetas de eficiência energética para os equipamentos consumidores de energia no Brasil. Assim, decidido pelo desenvolvimento de um programa de etiquetagem e padronização para pivôs centrais, formata-se como objetivo deste trabalho, conforme Figura 2.17, o desenvolvimento de uma metodologia para testes de conformidade, a concepção do programa de etiquetagem e a proposição de um padrão de eficiência energética para estes sistemas.

CAPÍTULO III

INDICADORES DE EFICIÊNCIA DE PIVÔS DE IRRIGAÇÃO

3.1. Introdução

Os indicadores de eficiência de pivôs centrais serão divididos em indicadores agrícolas e energéticos. Os indicadores agrícolas buscam avaliar a distribuição da lâmina de água e seu aproveitamento. Os indicadores energéticos, por sua vez, avaliam o consumo específico de energia do pivô central. Assim, serão apresentados neste capítulo os indicadores utilizados para avaliar os sistemas de irrigação por pivô central e propostos indicadores gerais de eficiência para a avaliação destes equipamentos a partir da integração entre a energia e o aproveitamento da água bombeada.

A integração entre Eficiência de Aplicação e Eficiência Energética tem como objetivo gerar uma ferramenta de avaliação, análise e comparação do rendimento entre os sistemas de irrigação por pivô central sob quaisquer condições de instalação. A utilização deste indicador pode favorecer ao desenvolvimento de projetos eficientes e auxiliar os irrigantes no acompanhamento da manutenção de seus equipamentos.

3.2. Indicadores agrícolas

Os indicadores de eficiência, chamados neste trabalho de agrícolas, consistem na medida da uniformidade de distribuição de água e na Eficiência de Aplicação.

3.2.1 Medidas de uniformidade

Conforme EMBRAPA (2002), a uniformidade de distribuição de água é o indicador de desempenho que reflete o grau de variação da água em uma dada irrigação. Quanto mais

uniforme for a distribuição da água aplicada pelo sistema, melhor será seu desempenho. Para avaliação desse parâmetro em sistemas de irrigação por pivô central normalmente são empregados o Coeficiente de Uniformidade de Heerman e Hein (C_{UH}) e o Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (C_{UD}).

A medida de uniformidade de distribuição de água de um pivô de irrigação deve ser realizada através do ensaio determinado pela norma ABNT 14244/98 (ABNT, 1998). Os dados necessários para o cálculo da uniformidade de distribuição de água devem ser obtidos a partir de coletores instalados em duas ou mais linhas perpendiculares à direção da trajetória da máquina, conforme apresentado na Figura 3.1.

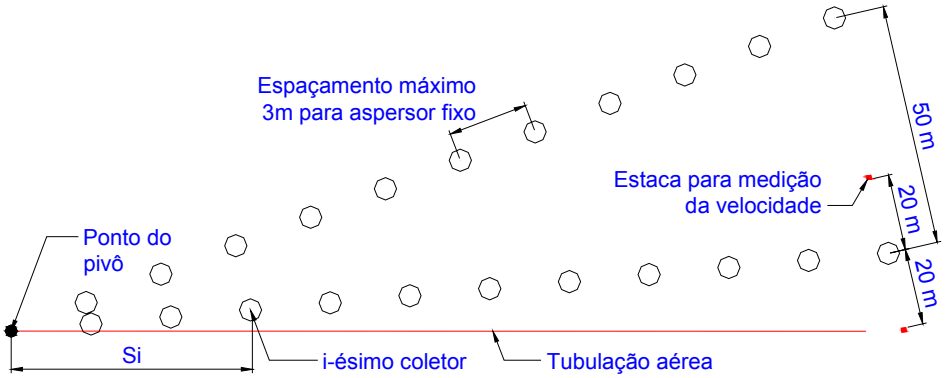


Figura 3.1. – Instalação de coletores para a determinação da uniformidade de distribuição de água de um pivô central
(fonte: ABNT, 1998)

De acordo com Oliveira, A. et al. (2004), o mais conhecido indicador que expressa a variabilidade na quantidade de água aplicada pelo sistema de irrigação é o Coeficiente de Christiansen que, adaptado para pivô central por Heerman & Hein apud Oliveira, A. et al. (2004), passou a ser denominado Coeficiente de Uniformidade de Heerman e Hein (C_{UH}), Equações 3.1 e 3.2.

$$C_{UH} = 100\left[1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^{n} |V_i - V_{MP}|\, S_i}{\sum_{i=1}^{n} V_i\, S_i}\right)\right] \tag{3.1}$$

$$V_{MP} = \frac{\sum_{i=1}^{n} V_i \, S_i}{\sum_{i=1}^{n} S_i} \tag{3.2}$$

Onde: C_{UH} – *Coeficiente de Uniformidade de Heerman e Hein [%];*

n – *Número de coletores utilizados na análise de dados;*

i – *Número designado para identificação de um coletor em particular, normalmente começando com o coletor localizado mais próximo do ponto do pivô (i=1) e terminando com i = n, para o último coletor considerado;*

V_i – *Volume de água (massa ou coluna d´água) coletado no i-ésimo coletor [cm³], [mm];*

S_i – *Distância entre o i-ésimo coletor e o ponto do pivô [m];*

V_{MP} – *Volume médio ponderado (massa ou coluna d´água) da água coletada [cm³], [mm].*

É importante ressaltar que, no caso do pivô central, os coletores representam sub-áreas de tamanho crescente a partir do ponto do pivô e, desta forma, é necessário utilizar a distância entre cada coletor ao ponto central do pivô para a ponderação destes valores, conforme apresentado na Equação 3.2.

De acordo com a ABNT (1998), o coeficiente de uniformidade calculado deve ser utilizado como um indicativo do desempenho do conjunto de emissores nas condições de campo, ambiente e pressão. Esta norma avalia o desempenho de um equipamento de irrigação por aspersão mecanizada conforme é mostrado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. – Avaliação do desempenho de um equipamento de irrigação por aspersão mecanizada

C_{UH}	Classificação da uniformidade de distribuição de água
Menor que 80%	Ruim
80% a 84%	Regular
85% a 89%	Boa
Acima de 90%	Muito boa

Fonte: ABNT (1998)

Outro índice de uniformidade de distribuição de água é o Coeficiente de Uniformidade de Distribuição que, por sua vez, expressa a relação entre a média do quartil inferior das lâminas ou vazões aplicadas e a média geral. Apesar de consistir-se em um coeficiente freqüentemente utilizado na literatura não é citado em ABNT (1998).

3.2.2 Medidas de eficiência de aplicação de água

Os parâmetros de eficiência têm como objetivo expressar o aproveitamento da água aplicada na irrigação. De acordo com Bernardo, Soares, Mantovani (2005) os coeficientes utilizados são:

- EA_{pa} - Eficiência de Aplicação para uma parcela adequadamente irrigada (pa) (%);
- ED_{pa} - Eficiência de Distribuição para uma parcela adequadamente irrigada (pa) (%);
- EA_p - Eficiência de Aplicação em Potencial (1).

A Eficiência de Aplicação relaciona a quantidade de água armazenada na zona radicular da planta com a quantidade de água aplicada, ou seja, determina a fração da água que pode ser utilizada pelas plantas. A Eficiência de Aplicação está relacionada, desta forma, com as perdas totais de água, podendo ser expressa pela associação da Eficiência de Distribuição e a Eficiência de Aplicação em Potencial (Equação 3.3):

$$EA_{pa} = ED_{pa}\ EA_p \tag{3.3}$$

Onde: EA_{pa} – *Eficiência de Aplicação para uma parcela adequadamente irrigada (pa) (%);*
ED_{pa} – *Eficiência de Distribuição para uma parcela adequadamente irrigada (pa) (%);*
EA_p – *Eficiência de Aplicação em Potencial [1].*

Em um sistema de irrigação, o volume bombeado (Vs) pode ser decomposto no volume armazenado na zona radicular para uma área adequadamente irrigada (Vpa) e volume coletado a partir da avaliação do equipamento (Vc) (Tabela 3.2). Define-se ainda como volume em déficit (Vd) o volume complementar ao Vpa para irrigar adequadamente 100% da

área (Figura 3.2). Desta forma, a Eficiência de Aplicação em Potencial pode ser obtida a partir da Equação 3.4.

Tabela 3.2. – Estratificação da água em um sistema de irrigação

Símbolo			Volume de água
Vs	Vs - Vc		Derivado pelo vento
			Evaporado
			Escoado para fora da parcela irrigada
	Vc	Vpa	Armazenado na zona radicular
		Vc - Vpa	Percolado abaixo das raízes
Vd			Em déficit

$$EA_p = \frac{V_c}{V_s} \tag{3.4}$$

Onde: EA_p – *Eficiência de Aplicação em Potencial [1];*

V_c – *Volume coletado no ensaio de avaliação do sistema [m³]*

V_s – *Volume bombeado pelo sistema [m³];*

Assim, a Eficiência de Aplicação em Potencial relaciona a água infiltrada na parcela com a água total bombeada. A água bombeada que não infiltra no solo perde-se por deriva pelo vento, por evaporação ou ainda fora da parcela irrigada.

Colombo (2003) cita que as perdas por evaporação e deriva raramente ultrapassam a 5% da demanda hídrica. Segundo Keller & Bliesner apud Frizzone & Dourado Neto (2003), as perdas por evaporação são da ordem de 5 a 10%. Essas perdas ainda podem ser maiores com o aumento da velocidade do vento, da temperatura do ar, da pressão de operação e altura dos aspersores e com a redução da umidade relativa do ar.

A Eficiência de Distribuição, por sua vez, avalia a fração de água que, infiltrada na parcela, permanece disponível às plantas após um evento de irrigação (Equação 3.5). Desta forma, considerando a curva do perfil de irrigação (Figura 3.2), é possível observar que, do volume total de água infiltrada no solo (Vc), parte fica disponível na zona radicular (Vpa) e parte perde-se percolando abaixo da zona das raízes (Vc – Vpa).

$$ED_{pa} = \frac{V_{pa} + V_d}{V_c} \; 100 \tag{3.5}$$

Onde: ED_{pa} – *Eficiência de Distribuição para uma parcela adequadamente irrigada (%);*

V_{pa} – *Volume armazenado na zona radicular da planta [m³];*

V_d – *Volume de água em déficit para uma parcela adequadamente irrigada (pa) [m³];*

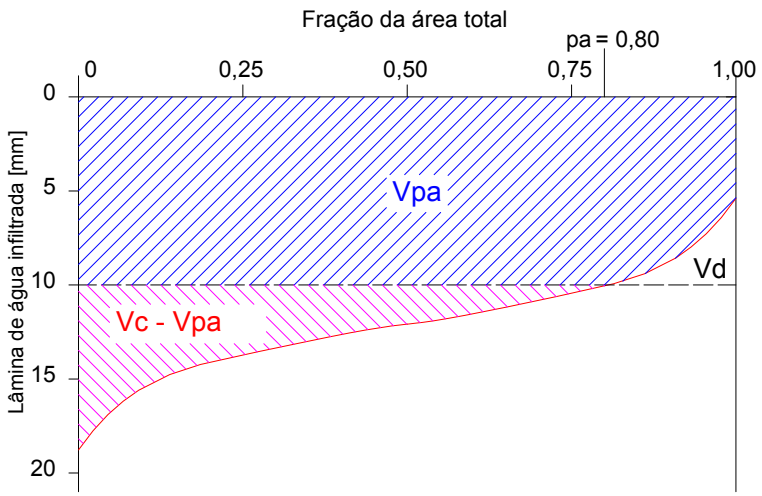


Figura 3.2. – Curva de distribuição da água no solo após um evento de irrigação para pa = 80%

A Eficiência de Distribuição pode ainda ser obtida diretamente do ensaio do equipamento através da disposição das lâminas obtidas dos coletores em ordem decrescente e do cálculo da área acumulada percentual. A Eficiência de Distribuição é calculada para a lâmina que garanta a parcela adequadamente irrigada desejada (pa), Equação 3.6.

$$ED_{pa} = \frac{d_{pa}}{d_m} \; 100 \tag{3.6}$$

Onde: ED_{pa} – *Eficiência de distribuição para uma parcela adequadamente irrigada (%);*

d_{pa} – *Lâmina que irrigada adequadamente uma parcela pa [mm];*

d_m – *Lâmina líquida média ponderada [mm].*

3.2.3 Relação entre o coeficiente de uniformidade e a Eficiência de Distribuição

A lâmina média ponderada obtida a partir dos volumes coletados representa a lâmina mínima obtida em aproximadamente 50% da área irrigada (Figura 3.3). Desta forma, utilizar esta lâmina como referência significa deixar em estresse hídrico aproximadamente 50% da área irrigada.

De acordo com Bernardo, Soares, Mantovani (2005), 90% da área adequadamente irrigada é o recomendado para culturas de alto valor comercial e 80% para culturas de baixo e médio valor comercial. Assim, escolhida a área adequadamente irrigada, conhecendo-se o volume armazenado na zona radicular da cultura e a Eficiência de Distribuição, pode se determinar o volume infiltrado.

Desta forma, Hart & Reynolds apud Colombo (2003), aproxima a curva de distribuição de água (Figura 3.2) a uma curva de distribuição normal, de forma a permitir, a partir do C_{UH}, determinar a Eficiência de Distribuição. É apresentada na Figura 3.3 uma representação gráfica do Anexo A2.

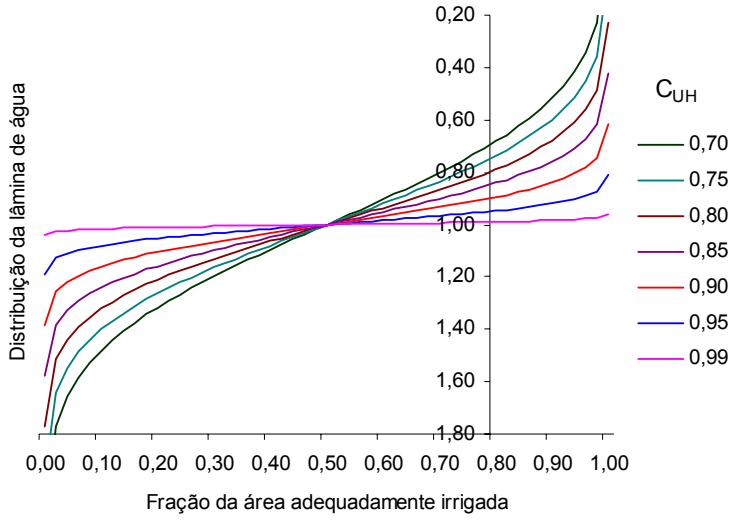


Figura 3.3. – Distribuição das lâminas infiltrada e Eficiência de Distribuição (80%) para diferentes valores de C_{UH}

Considerando que o Coeficiente de Uniformidade de Heerman e Hein associa a dispersão das lâminas infiltradas, pode-se afirmar a partir da Figura 3.3, que quanto menor este coeficiente, mais crítico será o estresse hídrico imposto a uma parcela da área irrigada. A Eficiência de Distribuição (ED_{80}) pode ser obtida diretamente do eixo vertical (distribuição da lâmina de água) deslocado para a área acumulada igual a 80% como indicado na Figura 3.3.

Em Bernardo, Soares, Mantovani (2005) é mostrado que quando se considera uma área adequadamente irrigada de 80% a Eficiência de Distribuição (ED_{80}) é aproximadamente igual ao C_{UH}, como pode ser observado no Anexo A2.

3.3. Indicadores energéticos

O indicador energético normalmente utilizado para avaliar sistemas pivôs centrais de irrigação consiste do consumo específico. Assim, para avaliar o custo operacional da energia necessária para o funcionamento de um equipamento de irrigação são utilizados a potência ou consumo especifico por lâmina aplicada ou por área irrigada ou por volume bombeado.

A topografia da área irrigada tem grande influência no dimensionamento do sistema hidráulico e, conseqüentemente, na energia consumida. Assim, apesar da relevância dos parâmetros acima apresentados para a determinação dos gastos com energia de um projeto específico, estes indicadores não são suficientes para a caracterização da eficiência do sistema de irrigação. Estes índices determinam a energia total absorvida pelo sistema de irrigação que, por sua vez, dependem das condições topográficas, das perdas nas tubulações, do rendimento do conjunto motor e bomba e da tecnologia do sistema de aspersão.

Buscando detalhar o sistema de irrigação, será analisada neste item a influência de cada um dos elementos do sistema de irrigação na composição do rendimento total. Também será proposta uma metodologia para relacionar a energia consumida ao volume de água útil, ou seja, disponível na zona radicular da planta. O sistema de irrigação por pivô central será analisado quanto à energia utilizada no conjunto motor e bomba, tubulação de sucção e adução, linha lateral e aspersão (Figura 3.4).

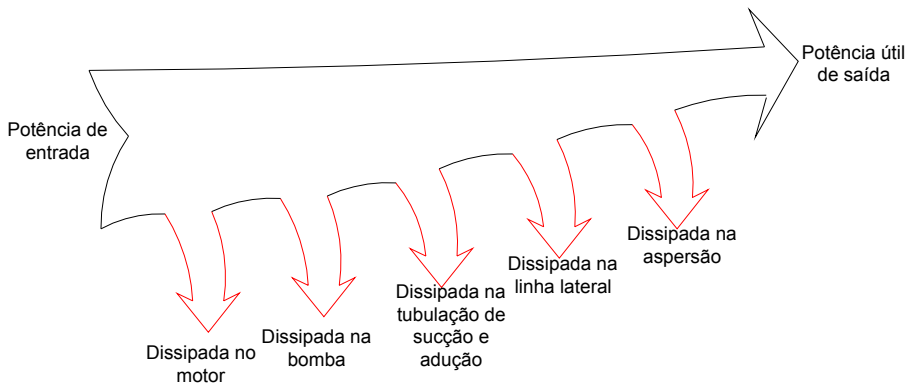


Figura 3.4. – Elementos dissipadores de energia de um pivô central

3.3.1 Conjunto motor e bomba

O conjunto motor e bomba, aqui analisado, é composto por um motor elétrico, uma junta de acoplamento elástica e uma bomba centrífuga. Considerando o acoplamento com rendimento unitário, a eficiência do conjunto passa ser o produto do rendimento do motor pelo da bomba, Figura 3.5.

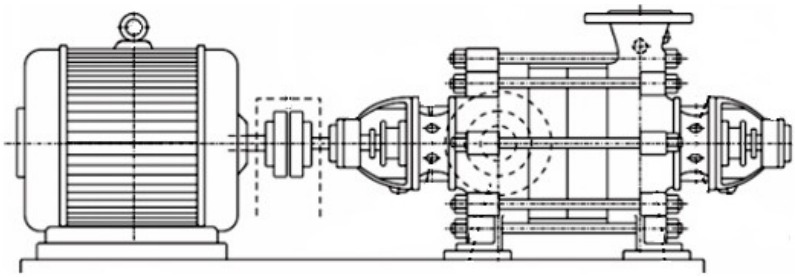


Figura 3.5. – Conjunto motor elétrico e bomba centrífuga

A avaliação do motor elétrico, regulamentada por ABNT (2002) e IEEE (2004), foi desenvolvida para ser realizada em laboratório de ensaio e, desta forma, apresenta dificuldades no seu desenvolvimento de campo, em especial devido a elevada potência dos motores analisados e o acoplamento com a carga.

Lu, Habetler, Harley (2006) discutem métodos para estimar a eficiência dos motores de indução trifásicos em serviço. Os autores descrevem brevemente mais de vinte métodos comumente utilizados, classificando-os em seis categorias maior interesse:

- Métodos de placa;
- Métodos de escorregamentos;
- Métodos da corrente;
- Métodos do circuito equivalente;
- Métodos da segregação de perdas;
- Métodos do torque.

Segundo Phumiphak & Chat-uthai (2002), existem várias razões para se testar um motor de indução no campo, tais como, a avaliação da substituição por um novo ou a necessidade da verificação de sua eficiência após rebobinagem.

Para Finley et al. (2003), os métodos para avaliação do motor de indução determinam resultados diferentes, que variam, consideravelmente, com o custo e o desempenho do teste. IEEE (2004), por exemplo, apresenta os procedimentos para segregação das perdas, métodos E ou E1 e determinação do circuito equivalente, F ou F1. Da mesma forma, ABNT (2002), determina os métodos 4 e 5, segregação das perdas e, 6 a 10, circuito equivalente, para determinação da eficiência do motor de indução.

Para Phumiphak & Chat-uthai (2002), a vantagem da utilização do método do circuito equivalente consiste na possibilidade da determinação do rendimento do motor para qualquer carga, uma vez conhecidos os valores das impedâncias do circuito. Campana (2000) utiliza a curva do fabricante para a determinação da eficiência dos motores avaliados. Assim, neste trabalho, os rendimentos dos motores serão obtidos a partir da determinação do circuito equivalente e utilizando os três pontos de rendimento por índice de carregamento, fornecidos pelo fabricante.

Determinação da eficiência utilizando o circuito equivalente do motor

Segundo Umans (1989) e IEEE (2004), a eficiência de um motor pode ser determinada pela relação entra a potência de saída e a de entrada, ou ainda, pela potência de saída divida pela sua soma com as perdas da máquina. A energia dissipada em um motor de indução pode ser dividida entre as perdas nos condutores do estator e rotor, no ferro, nas perdas rotacionais e adicionais.

Os condutores do estator e rotor apresentam perdas Joule em sua resistência, que deve ser considerada para a temperatura e freqüência de operação. Perdas por histerese e por correntes parasitas dissipam energia no ferro da máquina. Atrito nos mancais e ventilação caracteriza as perdas rotacionais e, perdas adicionais, representam a parcela que, não caracterizada pelas anteriores, completam a perda total da máquina.

Para Ayasun & Nwankpa (2005), o circuito equivalente pode ser utilizado para facilitar a determinação de variáveis de operação da máquina, tais como, corrente do estator, potência de entrada, perdas, torque induzido e eficiência.

O método do circuito equivalente, apresentado em IEEE (2004), necessita da medição da impedância, testes em vazio, de variação de tensão, sem rotor e rotação reversa. Assim, para Lu, Habetler, Harley (2006), apesar de elevada precisão, este método é intrusivo e impraticável para a avaliação dos motores em serviço.

Ontario Hydro Modified Method F (OHMF), por sua vez, consiste em uma versão modificada do método F1, IEEE (2004), proposto por Kueck (1998). O teste de variação de tensão não é necessário, todavia, os ensaios em vazio e sob carga em tensão nominal são realizados para se determinar a tensão de linha, potência de entrada, corrente de linha, fator de potência, resistência do estator e escorregamento.

Lu et al. (2006) propuseram, por sua vez, um método não intrusivo para estimar a eficiência. Utilizando os dados de placa da máquina e as leituras de tensão e corrente nos terminais em dois pontos de carga os autores determinam um circuito equivalente modificado para o motor. Devido à variação dos parâmetros do motor para diferentes níveis de carga, erro na estimativa da velocidade e resistência do rotor e dados de placa imprecisos, os autores obtiveram uma diferença entre 2 e 3% nas eficiências estimadas e medidas, para a carga variando entre 30 e 90% da nominal.

Considerando a intervenção possível no conjunto motor e bomba, os equipamentos disponíveis e a precisão necessária, o método de determinação do rendimento do motor em campo deve ser escolhido. As informações fonecidas pelo fabricante, de ensaio em laboratório são, sobretudo, confiáveis quando relativas ao modelo do motor avaliado, podendo ainda, apresentar erros de até 1% devido ao processo de rebobinagem.

Assim, tendo como objetivo a determinação das curvas características dos motores e obtenção de seus rendimentos, os parâmetros do circuito equivalente das máquinas serão obtidos a partir dos ensaios realizados pelos fabricantes. De acordo com Ayasun & Nwankpa (2005), as características de operação de um motor de indução trifásico pode ser analisada através do circuito equivalente por fase, Figura 3.6.

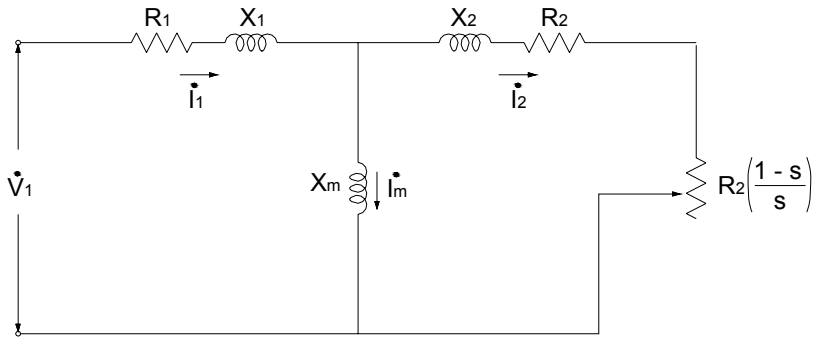


Figura 3.6. – Circuito equivalente de um motor de indução

Os parâmetros R_1 e X_1 representam a resistência e a reatância de dispersão do estator, R_2 e X_2, do rotor referidas ao estator, X_m a reatância de magnetização e s o escorregamento. Para Ayasun & Nwankpa (2005), a resistência que representa a perda no ferro, utilizada em paralelo com a reatância de magnetização, é usualmente desconsiderada, sendo esta perda calculada juntamente com as perdas por atrito, ventilação e adicionais.

A metodologia adotada para determinação do circuito equivalente, considerando os dados fornecidos pelo fabricante, baseia-se no Método 10, ABNT (2002), ou F/F1, IEEE (2004). A determinação precisa das características da máquina em funcionamento normal, todavia, dependerá da aproximação da resistência e reatância do rotor ao valor real para baixas freqüências, (IEEE, 2004).

Os testes em vazio, de rotor bloqueado e de carregamento são realizados imediatamente após o ensaio de elevação de temperatura, de forma que a resistência dos enrolamentos do estator, medida entre os terminais do motor a temperatura ambiente, com ligação estrela ou triângulo, deve ser dividida por dois e corrigida para a temperatura de funcionamento da máquina, Equação 3.7.

$$R_1 = R_{ta} \frac{(t_1 + k)}{(t_{ta} + k)} \tag{3.7}$$

Onde:

- R_1 – *Resistência do estator à temperatura dos ensaios em vazio e de rotor bloqueado [Ω];*
- R_{ta} – *Resistência do estator à temperatura ambiente [Ω];*
- t_1 – *temperatura obtida do ensaio de elevação de temperatura [ºC];*
- t_a – *temperatura ambiente durante a medição da resistência do estator [ºC];*
- k – *igual a 234,5 para cobre eletrolítico com 100% de condutividade e 225 para alumínio com condutividade em volume igual a 62% (ABNT, 2002);*

A perda no núcleo e as perdas por atrito e ventilação são determinadas pelo ensaio em vazio. Sob tensão e freqüência nominal, o motor gira sem carga até estabilizar as perdas por atrito nos rolamentos, quando são medidas as três correntes e a potência de entrada. A média das correntes das três fases representa a corrente em vazio e a potência ativa medida, o total das perdas em vazio.

No ensaio de rotor bloqueado são realizadas as medições sob freqüência e tensão nominais, enquanto o eixo do motor encontra-se travado. Sob esta condição são medidos os valores das correntes, tensões e potência ativa absorvida pela máquina para a determinação do circuito equivalente. Assim, dos ensaios em vazio e de rotor bloqueado, podem ser obtidas as potências do motor, Equações 3.8 a 3.11.

$$S_{vz} = n_{fases}\, V_{1,vz}\, I_{1,vz} \tag{3.8}$$

$$Q_{vz} = \sqrt{S_{vz}^2 - P_{vz}^2} \tag{3.9}$$

$$S_{bl} = n_{fases}\, V_{1,bl}\, I_{1,bl} \tag{3.10}$$

$$Q_{bl} = \sqrt{S_{bl}^2 - P_{bl}^2} \tag{3.11}$$

Onde: S_{vz} – *Potência aparente a vazio [VA];*

n_{fases} – *Número de fases [1];*

$V_{1,vz}$ – *Tensão de fase a vazio [V];*

$I_{1,vz}$ – *Corrente de fase a vazio[A];*

Q_{vz} – *Potência reativa a vazio [VAr];*

P_{vz} – *Potência elétrica a vazio[W];*

S_{bl} – *Potência aparente do ensaio de rotor bloqueado [VA];*

$V_{1,bl}$ – *Tensão de fase no ensaio de rotor bloqueado [V];*

$I_{1,bl}$ – *Corrente do ensaio de rotor bloqueado[A];*

Q_{bl} – *Potência reativa do ensaio de rotor bloqueado [VAr];*

P_{bl} – *Potência ativa do ensaio de rotor bloqueado[W];*

Considerando a relação entre a reatância do primário pelo secundário igual a 0,68, ABNT (2002) e IEEE (2004), a reatância do estator e de magnetização podem ser obtidas através do método iterativo dos mínimos quadrados Gauss-Newton, função fsolve (Matlab, 2000), uma vez implementadas as Equações 3.12 e 3.13.

$$X_m = \frac{n_{fases}\, V_{1,vz}^2}{Q_{vz} - n_{fases}\, I_{1,vz}^2\, X_1} \left(\frac{1}{1 + \frac{X_1}{X_m}} \right)^2 \tag{3.12}$$

$$X_1 = \frac{f}{f_{bl}} \frac{Q_{bl}}{n_{fases}\, I_{1,bl}^2 \left(1 + \frac{X_1}{X_2} + \frac{X_1}{X_m} \right)} \left(\frac{X_1}{X_2} + \frac{X_1}{X_m} \right) \tag{3.13}$$

Onde: X_m – *Reatância de magnetização [Ω];*

X_1 – *Reatância do primário [Ω];*

f – *freqüência da rede [Hz];*

f_{bl} – *freqüência do ensaio de rotor bloqueado [Hz].*

Para aumentar o torque inicial, reduzir a corrente de partida e obter bom rendimento em funcionamento, as barras do rotor são fabricadas de forma que sua resistência diminua deste a partida até a velocidade nominal do motor. O projeto do motor aproveita o efeito indutivo do fluxo de dispersão da ranhura sobre a distribuição da corrente nas barras do rotor para se obter a variação da resistência, uma vez que a freqüência no rotor varia desde o valor nominal da rede, momento da partida, a aproximadamente 3 Hz, plena carga, (Fitzgerald & Umans, 2006).

Assim, para se determinar a resistência do rotor referida ao estator, quando o motor encontra-se em funcionamento, uma vez que o ensaio de rotor bloqueado fornecido pelo fabricante é realizado à freqüência nominal, deve se utilizar um ponto de carga para calibração dos parâmetros do rotor, Equações 3.14 a 3.20, (ABNT, 2002 e IEEE 2004).

$$V_2 = \sqrt{\left[V_1 - I_1 \left(X_1\, sen\theta_1 + R_1 \cos\theta_1 \right) \right]^2 + \left[I_1 \left(X_1 \cos\theta_1 + R_1\, sen\theta_1 \right) \right]^2} \tag{3.14}$$

$$\theta_2 = \arctan\left(\frac{I_1\left(X_1 \cos\theta_1 + R_1\ sen\theta_1\right)}{V_1 - I_1\left(X_1\ sen\theta_1 + R_1 \cos\theta_1\right)}\right) \tag{3.15}$$

$$I_m = \frac{V_2}{X_m} \tag{3.16}$$

$$I_2 = \sqrt{\left(I_1 \cos\theta_1 + I_m\ sen\theta_2\right)^2 + \left(I_1\ sen\theta_1 + I_m \cos\theta_2\right)^2} \tag{3.17}$$

$$X_2 = \frac{V_1\ I_1\ sen\theta_1 - I_1^2\ X_1 - I_m\ V_2}{I_2^2} \tag{3.18}$$

$$Z_2 = \frac{V_2}{I_2} \tag{3.19}$$

$$R_2 = s\sqrt{Z_2^2 - X_2^2} \tag{3.20}$$

Onde: V_2 – *Tensão do rotor referida ao estator [V];*

θ_2 – *ângulo do fator de potência do rotor referido ao estator [rad];*

I_m – *Corrente do ramo de magnetização [A];*

I_2 – *Corrente do rotor referida ao estator [A];*

X_2 – *Reatância do rotor referida ao estator para a freqüência nominal [Ω];*

Z_2 – *Impedância de rotor referida ao estator para a freqüência nominal [Ω];*

R_2 – *Resistência do rotor referida ao estator para a freqüência nominal [Ω];*

s – *Escorregamento [1];*

Desprezando as perdas Joule na resistência do rotor durante o ensaio em vazio, as perdas rotacionais e no núcleo podem ser obtidas através da Equação 3.21.

$$P_{rotf} = P_{vz} - n_{fases}\, I_{1,vz}^{2}\, R_1 \tag{3.21}$$

Onde: P_{rotf} – *Perdas rotacionais e no núcleo do motor [W];*

As perdas por atrito e ventilação podem ser separadas das perdas no núcleo utilizando a análise de regressão linear, quando três ou mais pontos são plotados no gráfico da tensão ao quadrado e esta é igual a zero, IEEE (2004). De acordo com Sen (1989), se a máquina opera com freqüência e tensão constante, as perdas por atrito, ventilação e no ferro também são aproximadamente constantes, podendo ser consideradas conjuntamente, assim, a resistência relativa à perda no ferro pode ser removida do circuito equivalente.

Considerando-se que o fabricante não realiza ensaio para separação das perdas no ferro, optou-se por manter a perda no núcleo do motor junta às perdas devido ao atrito e ventilação, Equação 3.21, sendo as mesmas retiradas na determinação da potência no eixo, Equação 3.27.

Determinado os parâmetros do circuito equivalente do motor é possível calcular a corrente de entrada I_1 e a corrente do rotor I_2 referida ao estator em função do escorregamento (Equações 3.22 e 3.23). Assim, as características de funcionamento do motor, potência de entrada, do eixo, rendimento, fator de potência, relação entre a potência ativa e reativa e índice de carregamento podem ser calculadas a partir das Equações 3.24 a 3.31.

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{V}_1}{R_1 + jX_1 + \dfrac{jX_m\,(R_2/s + jX_2)}{jX_m + (R_2/s + jX_2)}} \tag{3.22}$$

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_1\, \frac{jX_m}{jX_m + (R_2/s + jX_2)} \tag{3.23}$$

$$\dot{S}_{entrada} = n_{fases}\, \dot{V}_1\, \dot{I}_1^{*} \tag{3.24}$$

$$P_{entrada} = \mathrm{Re}[\dot{S}_{entrada}] \tag{3.25}$$

$$Q_{entrada} = \mathrm{Im}\,ag[\dot{S}_{entrada}] \tag{3.26}$$

$$P_{eixo} = n_{fases}\ I_2^2\ R_2 \left(\frac{1-s}{s}\right) - P_{rotf} \tag{3.27}$$

$$\eta = \frac{P_{eixo}}{P_{entrada}} 100 \tag{3.28}$$

$$fp = \frac{P_{entrada}}{S_{entrada}} \tag{3.29}$$

$$PQ = \frac{P_{entrada}}{Q_{entrada}} \tag{3.30}$$

$$IC = \frac{P_{eixo}}{P_{nominal}} \tag{3.31}$$

Onde: $\dot{I}_1$ – *Corrente de entrada no motor [A];*

$\dot{I}_2$ – *Corrente do rotor referida ao estator [A];*

$\dot{S}_{entrada}$ – *Potência aparente de entrada no motor [VA];*

$P_{entrada}$ – *Potência ativa de entrada [W];*

Re – *Parte real do número complexo;*

$Q_{entrada}$ – *Potência reativa de entrada [VAr];*

$Imag$ – *Parte imaginária do número complexo;*

P_{eixo} – *Potência no eixo [W];*

η – *Rendimento do motor [%];*

fp – *Fator de potência [1];*

PQ – *Relação entre a potência de entrada ativa e a potência reativa [1];*

IC – *Índice de carregamento [1];*

$P_{nominal}$ – *Potência nominal do motor [W].*

Para os motores cujo fator de potência máximo encontra-se sob índice de carregameto igual a um, onde, normalmente, o equipamento apresenta o melhor desempenho, a relação PQ pode ser utilizada para identificar o aclopamento ótimo entre motor e carga.

Determinação da eficiência utilizando a curva do fabricante de motores

O segundo método considerado consiste na utilização dos catálogos dos motores ou a ficha técnica da máquina fornecida pelo fabricante. Utilizando três pontos, 50, 75 e 100% da carga, o rendimento é relacionado ao carregamento do motor. Estes pontos podem ainda ser aproximados a uma curva, de forma que o rendimento possa ser obtido para a carga desejada.

Deve-se observar que esses dados relacionam o rendimento ao índice de carregamento e o ensaio de campo disponibiliza a potência de entrada do motor, assim, um método deve ser utilizado para a aproximação da curva e a determinação do índice de carregamento no ponto de operação da máquina.

O método utilizado aproxima os três pontos dados pelo fabricante à curva do rendimento pelo índice de carregamento através de um polinômio de segundo grau. A aproximação da curva e o método iterativo para a determinação do índice de carregamento no ponto desejado, disponíveis em Matlab® (2000), utilizam as funções *polyfit, fsolve e polyval.*

Determinado o carregamento do motor é possível se obter a potência fornecida no eixo por meio da Equação 3.32.

$$P_{eixo} = P_{nom}\ IC \tag{3.32}$$

Onde: P_{eixo} – *Potência no eixo do motor [kW];*

P_{nom} – *Potência nominal do motor [kW];*

IC – *Índice de carregamento [1];*

Avaliação da bomba hidráulica

A bomba centrífuga, ainda não regulamentada quanto aos valores mínimos de eficiência apresenta, ainda, uma grande variação no rendimento dependendo do ponto de operação e do tempo de uso, assim, faz-se faz necessária a avaliação deste equipamento no campo.

Determinado a potência no eixo do motor, considerando rendimento unitário para o acoplamento através de junta elástica, é conhecida a potência no eixo da bomba. O rendimento da bomba será a relação entre a potência hidráulica fornecida e a potência requerida em seu eixo.

A potência hidráulica em uma instalação de recalque é o trabalho que a bomba realiza sobre o líquido em um segundo, expresso pela Equação 3.33 (Batista & Coelho 2003).

$$P_H = \gamma \, Q_S \, H_m \tag{3.33}$$

Onde: P_H – *Potência hidráulica [kW];*

γ – *Peso específico da água (9,81kN/m³ para água a 4º C);*

Q_S – *Vazão bombeada no sistema [m³/s];*

H_m – *Altura manométrica fornecida pela bomba [m];*

Nos ensaios em laboratório, ABNT (1975), a altura manométrica da bomba é determinada considerando-se um ponto na entrada e outro na saída da bomba. Todavia, não existindo manômetro na entrada da bomba nas condições de campo, a pressão na sucção e a altura manométrica da bomba podem ser obtidas através das Equações 3.34 a 3.39.

De acordo com Batista & Coelho (2003), a equação de energia aplicada a duas secções de um escoamento permanente, onde existe uma bomba ou motor hidráulico, denominada equação de Bernoulli para fluidos reais, pode ser escrita conforme a Equação 3.34 e representada pela Figura 3.7 para condutos forçados.

$$H_m = Z_1 - Z_2 + \frac{P_1 - P_2}{\gamma} + \frac{U_1^2 - U_2^2}{2g} - \Delta h_{1-2} \tag{3.34}$$

Onde: H_m – *Energia ou carga fornecida pela bomba [mca];*

Z_i – *Energia ou carga de posição no ponto i [m];*

P_i/γ – *Energia ou carga de pressão no ponto i [mca];*

P_i – *Pressão no ponto i [N/m²];*

γ – *Peso específico da água [N/m³];*

$U^2_i/2g$ – *Energia ou carga de velocidade no ponto i [mca];*

U_i – *Velocidade média do escoamento no ponto i [m/s];*

g – *Aceleração da gravidade [m/s²];*

Δh_{1-2} – *perda de energia mecânica ou perda de carga entre os ponto 1 e 2 [mca];*

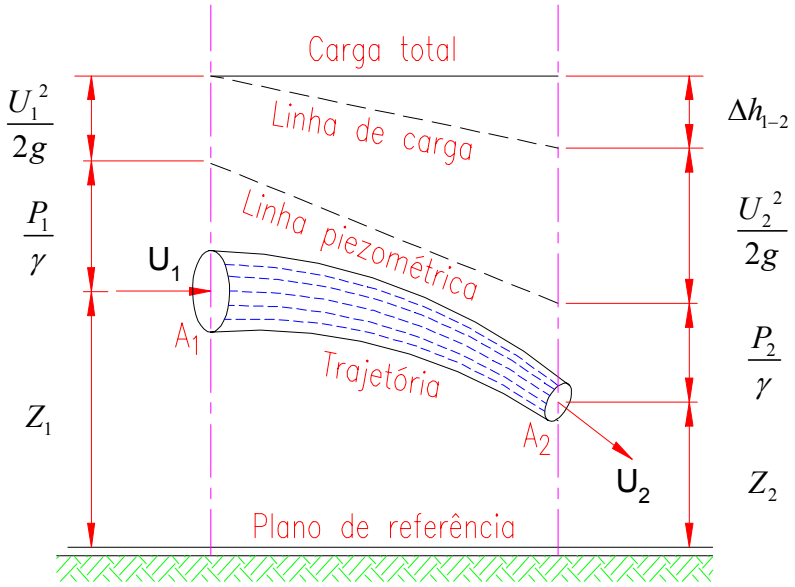


Figura 3.7. – Representação da equação de Bernoulli para fluidos reais

Segundo Batista & Coelho (2003), na equação de Bernoulli a soma das parcelas ($Z + P/\gamma$) é denominada energia Potencial e $U^2/2g$, energia cinemática, sendo possível a transformação entre elas. A determinação da perda de carga em uma obra hidráulica executada pode ser realizada pela medição dos elementos da Equação 3.34, todavia, prever esta perda de energia durante o projeto representa uma dificuldade maior.

A perda de carga em um conduto forçado é dividida em contínua $\Delta h'$ (ao longo da tubulação) e localizada $\Delta h''$ (nas singularidades do circuito hidráulico). A perda de carga contínua pode ser obtida através da equação Universal de perda de carga que, para condutos de seção circular, é mostrada nas Equações 3.35 e 3.36 (Batista & Coelho, 2003).

$$\Delta h' = \frac{f}{D}\frac{U^2}{2g} l \tag{3.35}$$

$$U = 4\frac{Q}{\pi D^2} \tag{3.36}$$

Onde: $\Delta h'$ – *perda de carga contínua [mca];*
f – *coeficiente de perda de carga [];*
U – *velocidade média do escoamento [m/s];*
l – *comprimento do conduto [m]*
D – *diâmetro interno do conduto [m];*
g – *Aceleração da gravidade [m/s²].*
Q – *Vazão na seção [m³/s];*

O coeficiente de perda de carga *f* pode ser obtido através das Equações 3.37 e 3.38 onde Barr tornou explícito o coeficiente determinado por Colebrook e White para tubos comerciais, hidraulicamente lisos e rugosos (Batista & Coelho, 2003).

$$f = \frac{0,25}{\left[\log_{10}\left(\frac{e}{3,7D} + \frac{5,13}{\mathrm{Re}^{0,89}}\right)\right]^2} \tag{3.37}$$

$$\mathrm{Re} = \frac{U\ D}{\nu} \tag{3.38}$$

Onde: f – *Coeficiente de perda de carga [];*
e – *Rugosidade do tubo [m];*
Re – *Número de Reynolds do escoamento [];*
υ – *Viscosidade cinemática do fluido [m²/s].*

Adicionando-se à perda de carga contínua, as perdas de carga localizadas são perturbações causadas por singularidades, tipo curvas, junções e válvulas instaladas no circuito hidráulico. De acordo com Batista & Coelho (2003), a perda de carga localizada pode ser obtida através da Equação 3.39. O coeficiente K depende da geometria da singularidade e do número de Reynolds, sendo estes normalmente obtidos experimentalmente.

$$\Delta h'' = K \frac{U^2}{2g} \tag{3.39}$$

Onde: $\Delta h''$ – *Perda de carga localizada [mca];*

K – *Coeficiente de perda de carga localizada [mca/m];*

U – *Velocidade média no conduto [m/s];*

g – *Aceleração da gravidade [m/s²].*

Desta forma, para se determinar a energia fornecida pelo conjunto motor e bomba ao líquido em um ensaio de campo pode se aplicar a Equação 3.34 entre um ponto na superfície da captação e outro, no manômetro da bomba, Figura 3.8.

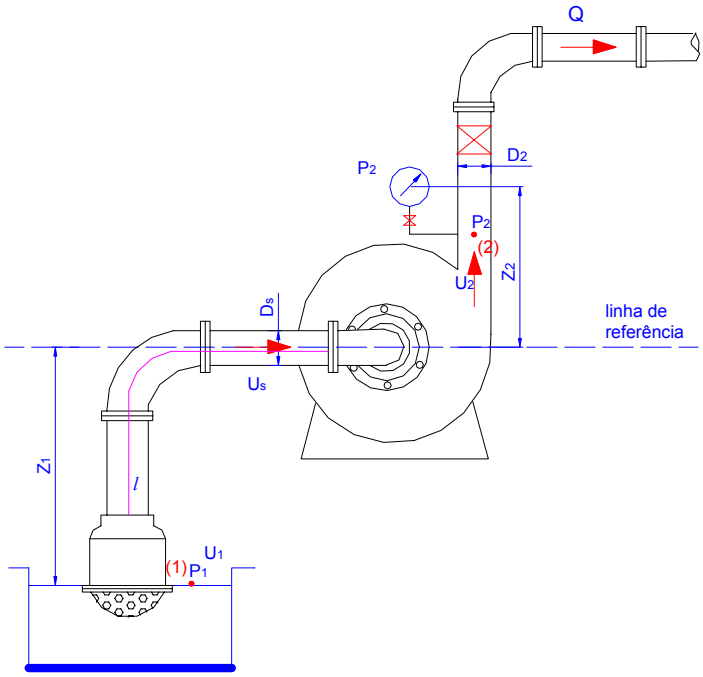


Figura 3.8. – Determinação da altura manométrica na bomba em um ensaio de campo

A superfície de captação da água encontra-se sob a pressão atmosférica (P_1 = 0 mca) e a velocidade do líquido é igual a zero (U_1 = 0 m/s). Desta forma, a altura manométrica

fornecida ao líquido pode ser obtida em ensaios de campo determinando-se as cotas da superfície e do manômetro (Z), a pressão do manômetro (P), a velocidade do fluido (U) e a perda de carga na tubulação de sucção (Δh).

Obtida a altura manométrica, a potência hidráulica é dada pela Equação 3.33, o rendimento da bomba e do conjunto motor e bomba pelas Equações 3.40 e 3.41, respectivamente. Conforme a vazão, a altura manométrica e o tipo do equipamento, o rendimento da bomba varia, geralmente, entre 30 e 90% (Batista & Coelho, 2003).

$$\eta_b = \frac{P_H}{P_{eixo}} 100 \tag{3.40}$$

$$\eta_{mb} = \frac{P_H}{P_{entrada}} 100 \tag{3.41}$$

Onde: η_b – *Rendimento da bomba [%]*

η_{mb} – *Rendimento do conjunto motor e bomba [%];*

O indicador de eficiência energética do conjunto motor e bomba, proposto em IWA (2000), possibilita determinar a potência por metro cúbico para elevar uma altura manométrica de 100 m, conforme apresentado na Equação 3.42.

$$C_{EN} = \frac{P_{entrada}}{Q_S \; H_m} 100 \tag{3.42}$$

Onde: C_{EN} – *Consumo de energia normalizado [kWh/(m³.100m)];*

$P_{entrada}$ – *Potência elétrica medida no motor [kW];*

Q_S – *Vazão de bombeamento no sistema [m³/h];*

H_m – *Altura manométrica da bomba [m];*

Este indicador também representa, considerando a conversão das unidades utilizadas, o inverso da eficiência média do conjunto de bombeamento (Equação 3.43).

$$\eta_{mb} = \frac{27,25}{C_{EN}} \tag{3.43}$$

Onde: η_{mb} – *Rendimento do conjunto motor e bomba [%].*

3.3.2 Tubulação de sucção e adutora

A energia dissipada ao longo da sucção e adutora de um sistema de irrigação por pivô central é resultado das perdas por atrito nas tubulações e singularidades do circuito hidráulico. Com diâmetro constante, a adutora e a tubulação de sucção possuem vazão constante e, conseqüentemente, mesma velocidade do fluido ao longo de seu comprimento.

A perda de carga ao longo da adutora pode ser calculada através das Equações 3.35 a 3.39. Por outro lado, a determinação da perda de carga no ensaio pode ser realizada considerando a Figura 3.9 e aplicando a Equação 3.34.

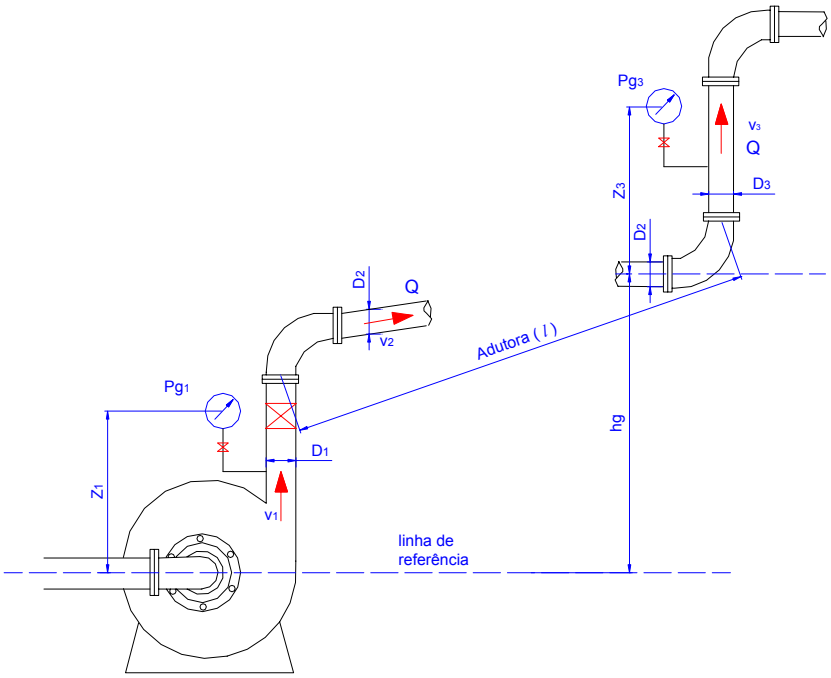


Figura 3.9. – Determinação da perda de carga na adutora em um ensaio de campo

A potência dissipada na tubulação de sucção e adutora, considerando os pontos determinados pelos manômetros, pode ser obtida através da Equação 3.44.

$$P_d = \gamma \, Q_S \, \Delta h \tag{3.44}$$

Onde: P_d – *Potência dissipada no elemento [kW];*
γ – *Peso específico da água [kN/m³];*
Q_S – *Vazão bombeada pelo sistema [m³/s];*
Δh – *Perda de carga no elemento [mca];*

A potência P_d obtida da Equação 3.44 refere-se à potência hidráulica. Assim, para a obtenção da potência elétrica associada às perdas na sucção, adutora ou linha lateral, é necessário dividir o valor obtido pelo rendimento do motor e da bomba (Equação 3.45).

$$P_{Ed} = \frac{P_d}{\eta_m \, \eta_b} \tag{3.45}$$

Onde: P_{Ed} – *Potência elétrica dissipada no elemento [kW];*
P_d – *Potência dissipada no elemento [kW];*
η_b – *Rendimento da bomba [1];*
η_m – *Rendimento do motor [1];*

O indicador de eficiência energética associado à adutora e a tubulação de sucção, de utilização comum por projetistas de instalações hidráulicas, constitui-se da perda de carga por 100 m, calculada pela Equação 3.46. A perda de carga por 100 m (Δh_{100}), neste trabalho, considerará não somente as perdas distribuídas ao longo da tubulação, como também as perdas localizadas, pois se constitui da condição necessária para a comparação com valores obtidos no ensaio.

$$\Delta h_{100} = \frac{\Delta h_{1-2}}{l} 100 \tag{3.46}$$

Onde: Δh_{100} – *perda de carga em 100 m [mca/100m];*
Δh_{1-2} – *perda de carga entre os ponto 1 e 2 [mca];*
l – *comprimento da tubulação [m];*

O indicador de eficiência energética proposto para tubulação, possibilita determinar a potência por metro cúbico para deslocar o fluido em um quilômetro de tubulação, conforme apresentado na Equação 3.47.

$$C_{ENT} = \frac{P_d}{3,6\, l\, Q_S} \tag{3.47}$$

Onde: C_{ENT} – *Consumo específico normalizado na tubulação [kWh/(m³.km)];*
P_d – *Potência dissipada na tubulação [kW];*
l – *Comprimento da tubulação [m];*
Q_S – *Vazão bombeada pelo sistema [m³/s];*

3.3.3 Linha lateral

A energia dissipada ao longo da linha lateral é obtida de forma similar à tubulação de adução e sucção. Todavia, devido à água derivada pelos aspersores instalados ao longo da linha, há variação na vazão e no diâmetro desta tubulação. Assim, na determinação da perda de carga ao longo da linha lateral, deve se considerar a variação da velocidade do fluido ao longo do conduto.

A perda de carga na tubulação da linha lateral pode ser calculada considerando os segmentos entre os aspersores, onde permanece constante o diâmetro da tubulação e a vazão, utilizando-se as Equações 3.35 a 3.39.

De acordo com Cuenca (1989), a uniformidade de aplicação de água depende da pressão fornecida ao emissor. Segundo o mesmo autor, baixas pressões não disponibilizam o

volume de água adequado e, por outro lado, pressões elevadas provocam a aplicação de grande quantidade de água próximo ao centro aspersor e a formação de gotículas excessivamente pequenas. O efeito da desuniformidade na distribuição de água nas plantas pode ser observado a partir da Figura 3.10.

Para propiciar melhor uniformidade na distribuição de água, a pressão em todos os bocais dos aspersores deve ser constante e igual ao valor indicado em projeto. Para isso, o sistema hidráulico deve ser projetado para a condição mais desfavorável de topografia e perda de carga e, ainda, associado a um dispositivo que mantenha esta pressão constante.

Figura 3.10. – Efeito nas plantas da desuniformidade na distribuição da lâmina
(fonte: Rogers et al, 2005)

Os reguladores de pressão são utilizados para dissipar a energia excedente e garantir a pressão constante no bocal do aspersor, independente da topografia do terreno e da pressão da linha lateral. Assim, a potência dissipada na linha lateral pode ser obtida pela Equação 3.44 quando se aplica a Equação 3.34 entre o manômetro do ponto do pivô e o último emissor.

Em ensaios de campo é possível, ainda, determinar o perfil da perda de carga ao longo da linha lateral. Para isso é necessário obter o perfil topográfico ao longo da tubulação aérea para se determinar as cotas Z, medirem as pressões no ponto do pivô Pg_3 e ao longo da linha e estimar a velocidade na tubulação (Figura 3.11).

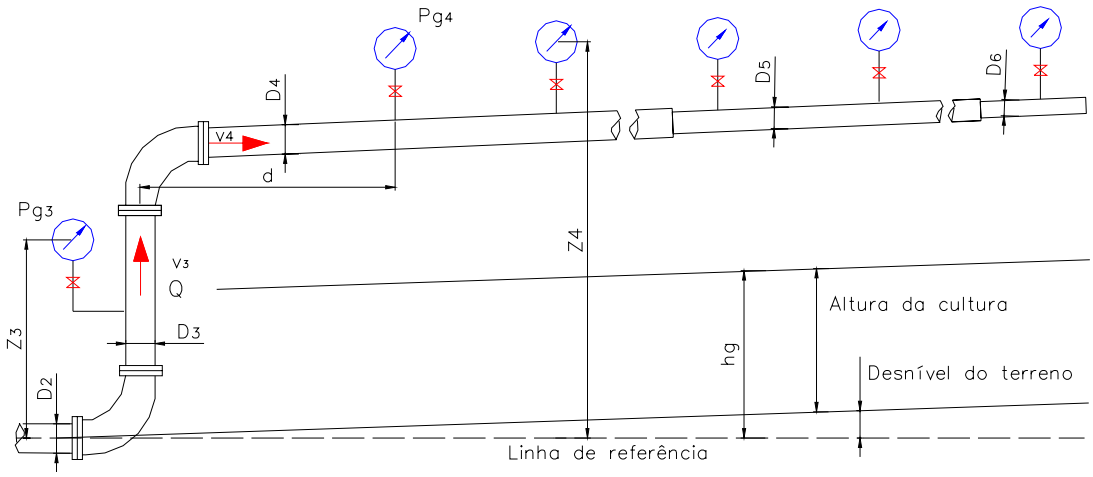


Figura 3.11. – Determinação da perda de carga ao longo da linha lateral em ensaio

3.3.4 Aspersores

A aplicação de água em um pivô central é realizada ao longo da tubulação aérea pelos aspersores (linha lateral). A escolha do aspersor ideal depende, principalmente, das condições locais do solo, topografia, condições climáticas e do custo da energia elétrica. De acordo com Broner (2005), os sistemas de irrigação pivô central podem ser classificados com base na pressão do aspersor:

- Sistema de alta pressão – pressão no bocal superior a 35 mca;
- Sistema de média pressão – pressão no bocal entre 25 e 35 mca;
- Sistema de baixa pressão – pressão no bocal inferior a 25 mca.

A escolha de um equipamento de média ou baixa pressão, ou ainda, a conversão de um sistema existente, deve ser criteriosa. O pivô de baixa pressão apresenta menor consumo de energia em razão da menor pressão necessária, por outro lado, fornece elevada precipitação no final da linha lateral devido ao pequeno tempo de aplicação de água em cada ponto. Na Figura 3.12 são apresentados alguns modelos de aspersores utilizados em pivôs centrais de irrigação.

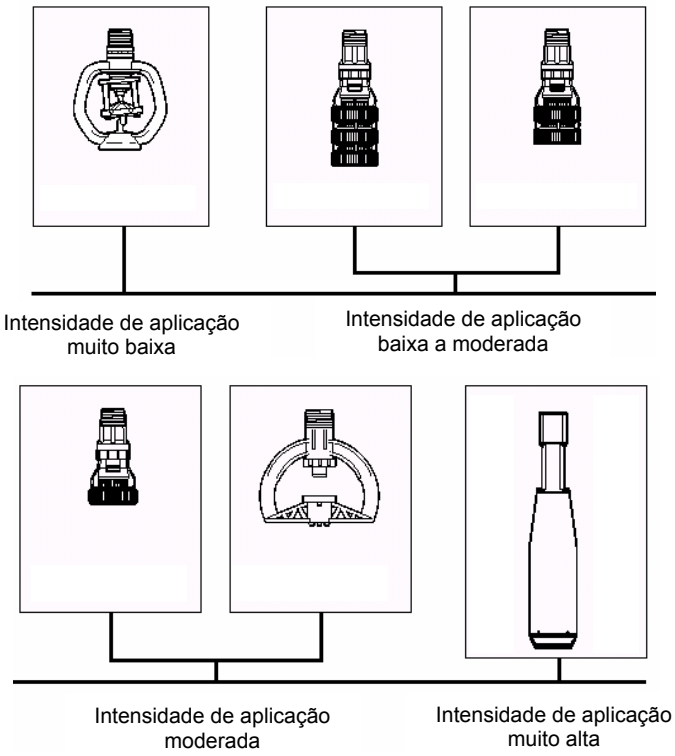


Figura 3.12. – Emissores para diferentes intensidades de aplicação de água
(fonte: Senninger, 2005)

Segundo Broner (2005), a pressão de operação nominal no aspersor e a emissão de água normalmente são constantes para cada dispositivo, podendo ser distribuídas conforme as faixas apresentadas:

- LEPA "Low energy precision application" (Aplicação de precisão de baixa energia) – emissor com pressão entre 4 e 7 mca;
- LDN "Low Drift Nozzle" (emissor de baixa deriva) – pressão entre 10 mca e 17 mca;
- Difusor fixo e rotativo – pressão entre 7 a 17 mca;
- Aspersor de pequeno impacto com bocal modificado – pressão entre 14 a 31 mca;
- Aspersor de pequeno impacto com bocal rotativo – pressão entre 21 a 42 mca;
- Aspersor de grande impacto – pressão entre 31 a 56 mca.

Normalmente os aspersores de impacto que operam sob média ou alta pressão, são instalados acima da linha lateral e irrigam sobre as plantas. Os difusores operam sob média e baixa pressão e podem ser instalados acima da linha lateral ou abaixo através de tubos de

descida (pendurais, bengalas ou extensões) e podem ainda propiciar uma irrigação abaixo da copa da planta.

Todavia, a pressão do aspersor não é suficiente para caracterizá-lo quanto à eficiência energética, sendo necessário avaliá-lo quanto Eficiência de Aplicação. A perda de água, juntamente com a energia necessária para levá-la desde a fonte até a área a ser irrigada, está associada à lâmina não disponível na zona radicular da cultura, devido à evaporação e deriva pelo vento, ao escoamento fora da parcela irrigada e a percolação profunda.

A Eficiência de Aplicação relaciona a vazão útil às culturas (Q_{PA}) com a vazão total bombeado pelo sistema (Q_S). Desta forma, é possível determinar a Potência Dissipada nos Aspersores (Equação 3.48) e Consumo Específico nos Aspersores (Equação 3.49).

$$P_{dasp} = \gamma\, Q_S \left[H_m \left(1 - \frac{EA_{80}}{100} \right) + \frac{EA_{80}}{100}\, h_{asp} \right] \tag{3.48}$$

$$C_{Easp} = \frac{P_{dasp}}{Q_s\; EA_{80}\; 3,6} \tag{3.49}$$

Onde: P_{dasp} – *Potência dissipada nos aspersores [kW];*

γ – *Peso específico da água [kN/m³];*

Q_S – *Vazão bombeada pelo sistema [m³/s];*

H_m – *Altura manométrica fornecida pela bomba [mca];*

EA_{80} – *Eficiência de Aplicação para 80% da parcela adequadamente irrigada [%];*

h_{asp} – *Altura manométrica do aspersor [mca];*

C_{Easp} – *Consumo específico nos aspersores [kWh/(mm.ha)];*

Verifica-se, a partir das Equações 3.48 e 3.49, que a economia de energia no difusor é determinada pela Eficiência de Aplicação EA_{80} e esta, por sua vez, pode ser determinada pelo Coeficiente de Heerman e Hein, uma vez estabelecida uma área adequadamente irrigada. A constante 3,6, Equação 3.49, é utilizada para converter o indicador C_{Easp} da unidade resultante, kWs/m³, para a unidade desejada, kWh/(mm.ha) e a Eficiência de Aplicação de porcentagem para decimal.

Assim, a utilização de um sistema em baixa pressão e com alto C_{UH} pode aumentar a eficiência energética do sistema. Faz-se necessário ressaltar que a conversão de um sistema de irrigação pivô central de média para baixa pressão deve considerar as alterações nas características da bomba, uma vez que a eficiência deste equipamento depende da pressão e vazão de trabalho.

3.3.5 Sistema de irrigação

Determinada a potência associada a cada um dos elementos do sistema de irrigação pivô central, é necessária sua potência útil para se determinar a eficiência do sistema. É proposta, neste trabalho, a potência hidráulica útil do sistema de irrigação calculada pela vazão útil e o desnível geométrico h_g de bombeamento (Equação 3.50).

$$P_U = \gamma \, Q_S \, \frac{EA_{80}}{100} \, h_g \tag{3.50}$$

Onde: P_U – *Potência útil do sistema de irrigação [kW];*

h_g – *Altura geométrica de recalque [m];*

$\frac{Q_S \, EA_{80}}{100}$ – *Vazão útil do sistema de irrigação [m³ s⁻¹];*

Q_S – *Vazão bombeada pelo sistema [m³ s⁻¹];*

EA_{80} – *Eficiência de Aplicação para 80% da parcela adequadamente irrigada [%].*

A avaliação completa do sistema passa da forma atualmente utilizada, Equação 3.51, para o Consumo Específico Normalizado na Irrigação e Eficiência de Irrigação conforme Equações 3.52 a 3.54.

$$C_E = \frac{P_{entrada}}{Q_S} \tag{3.51}$$

$$C_{ENI} = \frac{P_{entrada}\,100}{Q_S\;EA_{80}\;h_g\;3,6} \tag{3.52}$$

$$E_I = \frac{P_U}{P_{entrada}} \cdot 100 \tag{3.53}$$

$$E_I = EA_{80}\,\frac{h_g}{H_m}\,\eta_b\,\eta_m \tag{3.54}$$

Onde: C_E – *Consumo específico [kWh/m³];*

$P_{entrada}$ – *Potência de entrada [kW];*

C_{ENI} – *Consumo específico normalizado na irrigação [kWh/(mm.ha.100m)];*

H_m – *Altura manométrica do sistema [m];*

E_I – *Eficiência de irrigação [%];*

η_b – *Rendimento da bomba [1];*

η_m – *Rendimento do motor [1].*

O Consumo Específico Normalizado na Irrigação, C_{ENI}, trás como vantagem a comparabilidade entre sistemas diferentes. Enquanto o Consumo Específico atualmente utilizado, dependente da altura geométrica, das perdas de carga e da vazão bruta não permite comparar diferentes sistemas, o indicador proposto normaliza os valores para 100 metros de altura geométrica e utiliza a vazão útil ao sistema. Assim, quaisquer sistemas de irrigação pivô central podem ser comparados entre si, tornando o índice geral e adaptado para programas de etiquetagem e padronização.

O rendimento ou Eficiência de Irrigação, determinado pela relação entre a potência hidráulica útil à irrigação e a potência elétrica de entrada, determina a porcentagem de energia que é aproveitada no sistema de irrigação.

Ainda, os indicadores Consumo Específico Normalizado na Irrigação e a Eficiência de irrigação possibilitam associar o indicador agrícola Eficiência de Aplicação ao consumo de energia elétrica do sistema. Assim, são apresentadas na Tabela 3.3 as equações dos indicadores de eficiência energética existentes e propostos para a avaliação e etiquetagem de pivô central.

Tabela 3.3. – Equações utilizadas na determinação da eficiência energética de pivôs centrais

Item		Nome	Relacionado a:	Equação	nº
1	EXISTENTE	Consumo de energia normalizado [kWh/(m³.100m)]	Energia consumida pelo conjunto motobomba para elevar 1 m³ de água em uma altura manométrica igual a 100 m	$C_{EN} = \frac{P_{entrada}}{Q_S\ H_m} 100$	3.42
2		Rendimento do conjunto motor e bomba [%]	Rendimento do conjunto motor e bomba através do consumo de energia normalizado	$\eta_{mb} = \frac{27,25}{C_{EN}}$	3.43
3		Perda de carga em 100m [mca/100m]	Perda de carga na tubulação em 100 m	$\Delta h_{100} = \frac{\Delta h_{1-2}}{l} 100$	3.46
4		Consumo específico normalizado na tubulação [kWh/(m³.km)]	Energia dissipada na tubulação para deslocar 1 m³ de água em 1 km	$C_{ENT} = \frac{P_d}{3,6\ l\ Q_S}$	3.47
5		Consumo específico [kWh/m³]	Energia consumida em um sistema de irrigação para bombear 1 m³ de água	$C_E = \frac{P_{entrada}}{Q_S}$	3.51
6	PROPOSTO	Consumo específico nos aspersores [kWh/(mm.ha)]	Energia dissipada nos aspersores para irrigar adequadamente 1mm em pelo 80% de 1 ha.	$C_{Easp} = \frac{P_{dasp}}{Q_s\ EA_{80}\ 3,6}$	3.49
				$P_{dasp} = \gamma\ Q_S \left[H_m \left(1 - \frac{EA_{80}}{100}\right) + \frac{EA_{80}}{100} h_{asp} \right]$	3.48
7		Consumo específico normalizado na irrigação [kWh/(mm.ha.100m)]	Energia consumida pelo sistema para irrigar adequadamente 1 mm em 80% de 1 ha para um desnível geométrico de 100 m.	$C_{ENI} = \frac{P_{entrada}\ 100}{Q_S\ EA_{80}\ h_g\ 3,6}$	3.52
8		Potência útil do sistema de irrigação [kW]	Potência útil de um sistema de irrigação determinada pela vazão útil e a altura geométrica	$P_U = \gamma\ Q_S \frac{EA_{80}}{100} h_g$	3.50
9		Eficiência de irrigação [%]	Porcentagem da energia realmente aproveitada em um sistema de irrigação pivô central	$E_I = \frac{P_U}{P_{entrada}} 100$	3.53
				$E_I = EA_{80} \frac{h_g}{H_m} \eta_b\ \eta_m$	3.54

Para a determinação do padrão de eficiência, apresentado no Capítulo VI, é proposta uma equação única que determina a energia elétrica dissipada no sistema de irrigação em função da Eficiência de Aplicação, da altura geométrica entre a captação e o difusor na condição mais desfavorável e das perdas de carga nos elementos do sistema (Equação 3.55).

$$P_{dI} = \frac{\gamma\ EA_{80}\ Q_S}{100\ \eta_b\ \eta_m}\left(h_g(1-\eta_b\ \eta_m) + (\Delta h_s + \Delta h_{Ad} + \Delta h_{LL} + \Delta h_{ASP}) + \frac{H_m}{EA_{80}}\left(100 - EA_{80}\right)\right) \qquad (3.55)$$

Onde:

- P_{dI} – *Potência dissipada no sistema de irrigação [kW];*
- γ – *Peso específico da água [kN/m³];*
- EA_{80} – *Eficiência de Aplicação de água para 80% da área adequadamente irrigada [%];*
- Q_s – *Vazão bombeada pelo sistema hidráulico [m³/s];*
- η_b – *Rendimento da bomba [1];*
- η_m – *Rendimento do motor [1];*
- h_g – *Desnível geométrica entre a captação e a altura da cultura na condição de maior desnível [m];*
- Δh_s – *Perda de carga na sucção [mca];*
- Δh_{Ad} – *Perda de carga na adutora e tubulação de pressão [mca];*
- Δh_{LL} – *Perda de carga na linha lateral [mca];*
- Δh_{ASP} – *Perda de carga nos difusores [mca];*
- H_m – *Altura manométrica fornecida pela bomba [mca].*

3.4. Fluxo energético de um pivô central

A formulação apresentada analisa o sistema de irrigação de forma global, onde se considera a vazão útil disponível na zona radicular da planta. Um pivô central de irrigação pode ainda ser analisado considerando o fluxo energético do equipamento de irrigação a partir da vazão total bombeada.

Pode se determinar, a partir da potência de entrada, a parcela dissipada na conversão de energia elétrica para energia hidráulica no conjunto motor e bomba, a energia perdida nas tubulações de sucção, adutora e linha lateral e a energia associada aos aspersores para, então, considerar a potência hidráulica útil, Figura 3.4.

Assim, considerando a potência dissipada na conversão (Equação 3.56), a potência dissipada na tubulação de sucção, adutora e linha lateral (Equação 3.44) e a potência útil do

equipamento obtida pela Equação 3.57, é possível estratificar as potências nos equipamentos de irrigação pivô central.

$$P_{dmb} = \gamma\, Q_S\, H_m \left(\frac{1-\eta_b\, \eta_m}{\eta_b\, \eta_m} \right) \tag{3.56}$$

$$P_{UE} = \gamma \cdot Q_S \cdot h_g \tag{3.57}$$

Onde: P_{dmb} – *Potência dissipada no conjunto motor e bomba [kW];*

γ – *Peso específico da água [kN/m³];*

Q_S – *Vazão bombeada pelo sistema [m³/s];*

H_m – *Altura manométrica do sistema [mca];*

η_b – *Rendimento da bomba [1];*

η_m – *Rendimento do motor [1];*

P_{UE} – *Potência útil do equipamento [kW];*

h_g – *Desnível geométrico entre a captação e a altura da cultura na condição mais desfavorável [m].*

3.5. Procedimentos para avaliação de um pivô central

O indicador de eficiência energética de um pivô central, suficiente para caracterizá-lo em um programa de etiquetagem e padronização, é o Consumo de Energia Normalizado na Irrigação. Todavia, se o objetivo é analisar os elementos responsáveis pela dissipação de energia, ou seja, o motor, a bomba, as tubulações e os aspersores ou ainda comparar com avaliações existentes, são necessários os demais indicadores apresentados neste Capítulo.

Partindo da Equação 3.52, que determina o Consumo Específico Normalizado na Irrigação C_{ENI}, a potência elétrica de entrada, a vazão, a altura geométrica e a Eficiência de Aplicação podem ser medidas e calculadas através do Ensaio de Avaliação Energética de Pivô Central descrito neste item.

Considerando a dificuldade da obtenção da vazão do sistema, uma vez que instrumentos portáteis que fornecem boa precisão são extremamente caros, é possível se determinar a vazão útil irrigada Q_{80} conforme a Equação 3.58, de forma que a Equação 3.52 pode ser reescrita como a Equação 3.59.

$$Q_{80} = Q_S \frac{EA_{80}}{100} \tag{3.58}$$

$$C_{ENI} = \frac{P_{entrada}}{Q_{80}\ h_g\ 3,6} \tag{3.59}$$

Onde: Q_{80} – *Vazão útil para 80% da parcela irrigada adequadamente [m³/s];*

Q_S – *Vazão bombeada pelo sistema [m³/s];*

EA_{80} – *Eficiência de Aplicação para 80% da parcela irrigada adequadamente [%];*

C_{ENI} – *Consumo específico normalizado na irrigação [kWh/(mm.ha.100m)];*

$P_{entrada}$ – *Potência de entrada [kW];*

h_g – *Desnível geométrico entre a captação e a altura da cultura na condição mais desfavorável [m].*

O Ensaio de Avaliação Energética de Pivô Central deverá, assim, determinar a potência de entrada do sistema, a vazão útil e a altura geométrica de forma a apresentar índices confiáveis e repetíveis. A realização do ensaio basear-se-á na norma brasileira de determinação da uniformidade de distribuição de água (ABNT, 1998), uma vez que permite a caracterização e controle do sistema, seu procedimento é adaptado para a obtenção da vazão útil conforme o fluxograma apresentado na Figura 3.13.

O primeiro passo para a realização do Ensaio de Avaliação Energética de Pivô Central em funcionamento é verificar, planejar e levantar os dados do equipamento. Normalmente os projetos de sistemas de irrigação não são encontrados ou, muitas vezes, estão desatualizados após remodelamento do sistema. Desta forma é necessário levantar os dados do equipamento, verificar se está em condições normais de funcionamento e planejar a direção da linha lateral, porcentagem de rotação, local para instalação dos medidores, horário e condições climáticas para realização do ensaio.

No levantamento dos dados do equipamento, atenção especial deve ser dada para a determinação do raio efetivo do pivô, definido como a distância do ponto central do equipamento ao emissor mais extremo na tubulação, mais 75% do raio molhado do último aspersor, ABNT (1998).

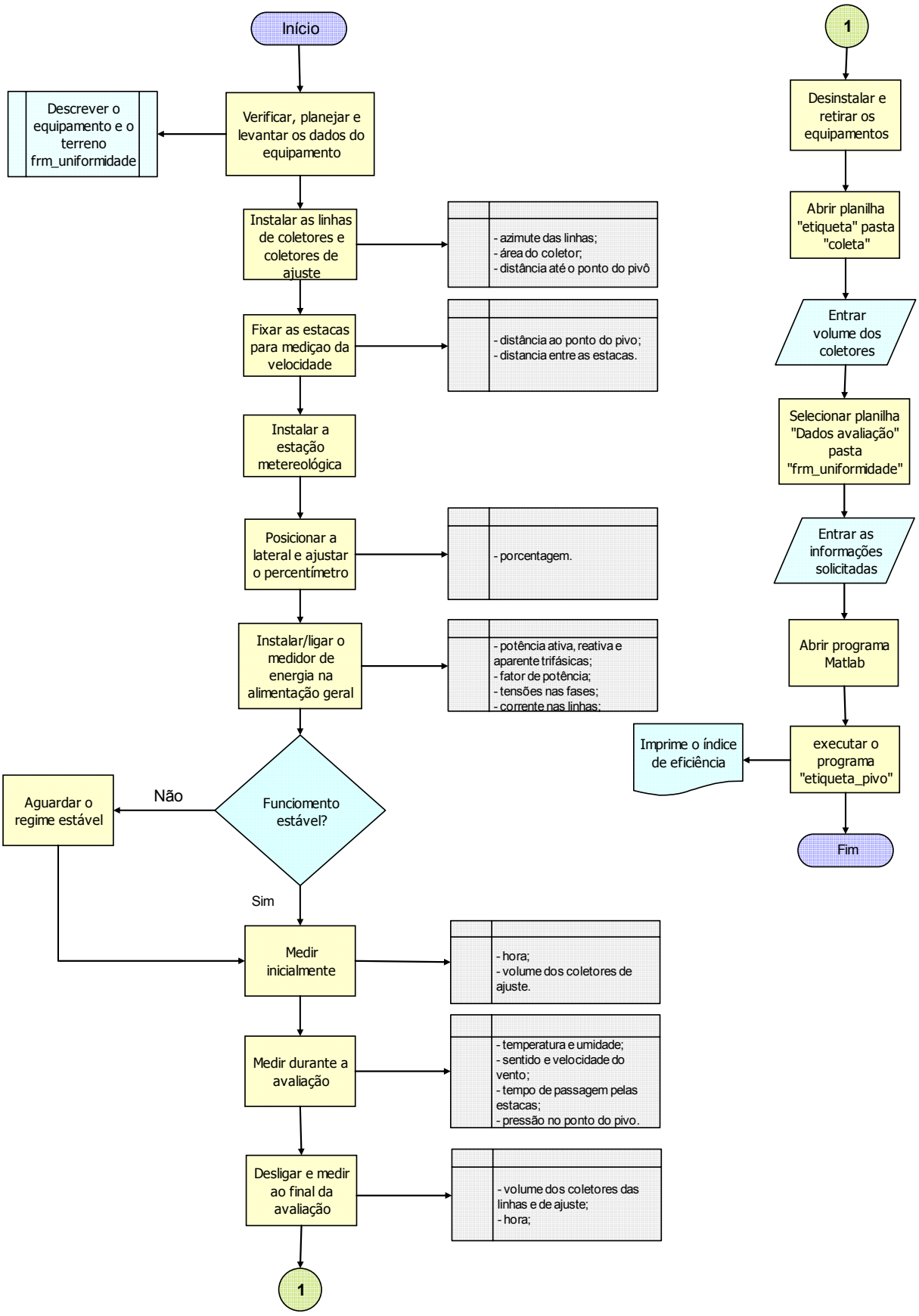


Figura 3.13. – Fluxograma para realização do Ensaio de Avaliação Energética de Pivô Central

Outro dado importante consiste na altura geométrica, uma vez que é um elemento determinante na Equação 3.59. O levantamento topográfico realizado através de teodolito ou nível traz a precisão necessária para os ensaios, todavia, a utilização de GPS equipado com barômetro pode inserir erros de até 3 m na altura geométrica.

A direção das linhas de coletores, Figura 3.1, deve determinar a condição mais desfavorável do sistema, ou seja, a cota mais elevada do terreno. Conforme a ABNT (1998), o espaçamento entre os coletores dentro de cada linha não deve ser superior a 3 m para emissores fixos e 5 m para emissores rotativos. A distância entre os coletores não deve ser múltiplo da distância entre os emissores ou coincidir com a trilha de caminhamento do equipamento. Os três coletores necessários para a determinação da taxa de evaporação, coletores de ajuste, devem estar posicionados de forma a não receber respingos de água durante o ensaio.

Próximo a marca deixada pela última torre, deve ser instalada três estacas para a medição da velocidade da linha lateral, Figura 3.1, anotando-se a distância entre elas e ao ponto central do pivô.

Considerando que os fatores climáticos, temperatura, vento e unidade relativa influenciam no ensaio, uma estação meteorológica deve ser instalada a 2 m de altura e leituras devem ser realizadas em intervalos regulares de 15 min durante o ensaio. Deve-se observar que, caso a velocidade do vento ultrapasse 3 m/s o ensaio deve ser suspenso.

Na casa de bomba deve ser instalado um Medidor Universal de Grandeza (MUG) na alimentação geral do painel e programado para armazenamento dos dados a cada 5 min. Deve se observar que alguns pivôs possuem a alimentação dos motores das torres diretamente da casa de bombas, de forma que este procedimento determina toda a energia utilizada pelo equipamento, outros, possuindo transformador e medidor próprio, devem ser realizados leitura no início e final do ensaio e adicionado às leituras do MUG instalado no painel da bomba. O MUG pode ser ainda substituído pela leitura ou a memória de massa do medidor da concessionária de energia.

O percentímetro, rele que determina a rotação da linha lateral, deve ser ajustado para aplicar uma lâmina não inferior a 15 mm e a tubulação deve ser posicionada de forma que a irrigação não alcance os coletores antes do início do ensaio. Preferencialmente pela manhã, para evitar o efeito da evaporação, para realização do ensaio, o equipamento é ligado, o funcionamento normal é aguardado e as medições indicadas na Figura 3.13 são realizadas.

O dispositivo de mensuração do volume coletado deve apresentar uma exatidão de $\pm 3\%$ do volume médio de água coletada. O tempo de permanência de água dentro dos

coletores deve ser anotado para a compensação da evaporação. Não superior a 3% das leituras, os dados incorretos causados por vazamentos e coletores tombados, devem ser eliminados e seus motivos anotados. Os volumes coletados além do raio efetivo devem ser eliminados quando caírem abaixo de 70% do volume médio coletado.

De posse de todos os dados necessários, a próxima etapa consiste no preenchimento das planilhas de dados para, através do programa desenvolvido em Matlab® (2000), Anexo A1, determinar os dados da Etiqueta de Avaliação Energética do Pivô contendo:

- Área irrigada, [ha];
- Consumo Específico Normalizado na Irrigação, [kWh/(mm.ha.100m)];
- Eficiência de Irrigação, [%];
- Lâmina líquida média diária, [mm];
- Lâmina diária para 80% da parcela irrigada adequadamente, [mm];
- Eficiência de Distribuição (pa = 80%), [%];
- Coeficiente de Hermann & Hein, [%].

Deve-se observar que os dados apresentados na etiqueta proposta são suficientes para caracterizar a eficiência energética do sistema de irrigação e compará-lo a qualquer outro pivô de forma prática, fácil e com pouca necessidade de recursos laboratoriais. Todavia, quando o objetivo é fazer o diagnóstico do sistema, verificando a dissipação de energia e a influência de cada elemento do pivô, bem como determinar um padrão de eficiência, uma avaliação mais detalhada, complexa e dispendiosa deve ser realizada, como desenvolvida ao longo deste Capítulo e exemplificada nos Capítulos V e VI.

CAPÍTULO IV

ETIQUETAGEM ENERGÉTICA DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR PIVÔ CENTRAL

4.1. Introdução

Para exemplificar os indicadores apresentados e propostos no Capítulo III e, de uma forma geral, verificar seu potencial para caracterização de sistemas de irrigação por pivô central, será apresentada neste capítulo a avaliação e a etiquetagem de quatro sistemas de irrigação. Os ensaios foram realizados no mês de abril de 2006 em um sistema de irrigação da Embrapa Agropecuária Oeste, localizada na cidade de Dourados – MS e em três sistemas do Assentamento Itamarati I na cidade de Ponta Porã - MS.

4.2. Caracterização do Assentamento Itamarati I

O Assentamento Itamarati I, com área igual a 25.072 ha, está localizado a 22º32' de latitude sul e 55º43' de longitude oeste, no município de Ponta Porã – MS (45 km do centro urbano), Figura 4.1. Segundo Mato Grosso do Sul (2003), está dividido em quatro sub–áreas, sendo uma para cada movimento social, Tabela 4.1.

Tabela 4.1. - Divisão das áreas do Assentamento Itamarati I por grupo social

Grupo Social	Área Total aproximada (ha)	Nº de Famílias	Área Irrigada (ha)
CUT	6.287	280	1.835
MST	6.571	320	1.964
FETAGRI	7.727	395	1.751
AMFFI	4.487	150	1.682
TOTAL	25.072	1.145	7.232

O Assentamento Itamarati I, ocupando aproximadamente a metade da antiga Fazenda Itamarati, possui 58 pivôs centrais com idade média de 20 anos, irrigando 7.232 ha, Figura 4.1.

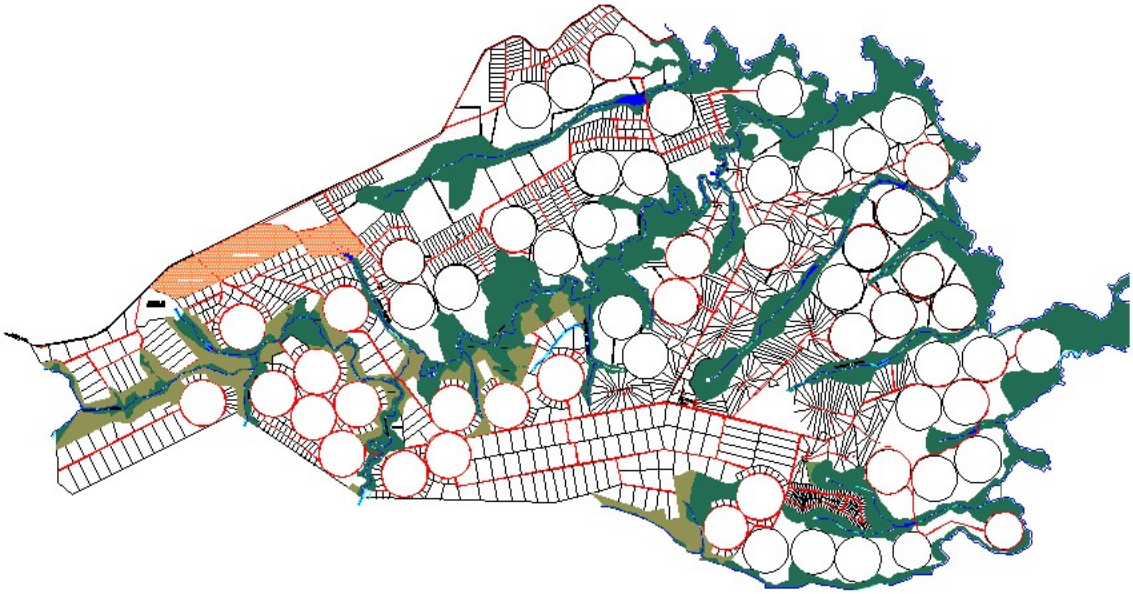


Figura 4.1. – Disposição dos pivôs centrais no Assentamento Itamarati I

(fonte: Brasil, 2002c)

Até dezembro de 2004, a energia que alimentava os sistemas de irrigação provinha da subestação da Fazenda Itamarati, que ainda permanecia em funcionamento na área não adquirida pelo INCRA. Assim, durante o período de negociação entre INCRA, governo do Estado e Fazenda Itamarati, a concessionária de energia ENERSUL (concessionária de energia do Estado) não assumiu o faturamento das contas de energia diretamente dos agricultores irrigantes, obrigando ao Estado esta responsabilidade.

4.2.1 Sistema elétrico do Assentamento Itamarati I

A Fazenda Itamarati possuía inicialmente uma subestação na tensão de 138 kV com três alimentadores em 34,5 kV para o fornecimento de energia às suas instalações. Com a venda de parte de sua área para o Governo Federal, sua subestação, consistindo-se da única fonte de energia para a região, passou também a fornecer energia para o Assentamento Itamarati I.

O alimentador e suas derivações internas ao Assentamento Itamarati I possuem extensão aproximada de 110.850 m e tinham, até dezembro de 2004, a finalidade exclusiva de fornecimento de energia para os sistemas de irrigação. No alimentador interno ao assentamento estavam conectados 126 transformadores na tensão de 34,5 kV que somavam uma potência total de 16.365 kVA (Tabela 4.2).

Os equipamentos de irrigação instalados totalizam 943 motores, sendo a maior carga concentrada nos 58 motores das bombas d'água. A potência total em motores é de 16.260 cv conforme apresentado na Tabela 4.3.

Tabela 4.2. - Relação dos transformadores no Assentamento Itamarati I em dezembro de 2004.

Item	nº de fases	Potência (kVA)	Tensão de Saída (V)	Quantidade	Potência total (kVA)
01	Trifásico	300	440/254	10	3000
02	Trifásico	300	380/220	10	3000
03	Trifásico	250	440/254	15	3750
04	Trifásico	250	380/220	20	5000
05	Trifásico	200	380/220	1	200
06	Trifásico	150	440/254	1	150
07	Trifásico	125	440/254	1	125
08	Trifásico	15	500	58	870
09	Bifásico	45	220/127	5	225
10	Bifásico	15	230/115	5	45
			Total	126	16.365

Devido ao fato do fornecimento de energia para os sistemas de irrigação do Assentamento Itamarati I ser realizado por meio de um ramal da subestação da Fazenda Itamarati, a ENERSUL não pôde assumir a função de distribuidora.

Enquanto as negociações se davam no sentido da compra da outra parte da Fazenda Itamarati pelo Governo Federal e a transferência da responsabilidade sobre a subestação para a ENERSUL, o IDATERRA viu-se na necessidade de assumir a responsabilidade pela distribuição da energia para os assentados.

Tabela 4.3. – Relação dos motores no Assentamento Itamarati I em Dezembro de 2004

Item	Equipamento	Potência (cv)	Tensão (V)	Quantidade	Potência total (cv)
01	Bomba d'água	350	380	3	1050
02	Bomba d'água	300	440	10	3000
03	Bomba d'água	300	380	7	2100
04	Bomba d'água	250	440	15	3750
05	Bomba d'água	250	380	20	5000
06	Bomba d'água	200	380	1	200
07	Bomba d'água	150	440	1	150
08	Bomba d'água	125	440	1	125
09	Pivô	1	480	885	885
			Total	943	16260

Desde o início das atividades do Assentamento Itamarati I até o mês de dezembro de 2004, o custo da energia utilizada nos sistemas de irrigação era dividido entre os assentados para compor a conta total a ser paga à ENERSUL. Inicialmente era calculado um valor através da constatação do estádio da planta na área de cada pivô para o rateio do valor total medido no ramal de alimentação. Posteriormente, foram instaladas medições para faturamento em cada sistema de irrigação, de forma a permitir melhor controle sobre o uso da energia e incentivos tarifários aos irrigantes.

4.2.2 Faturamento da energia no Assentamento Itamarati I

Durante o período entre a instalação dos equipamentos de medição e a aquisição do sistema pela ENERSUL, houve a necessidade da leitura dos medidores e do desenvolvimento de contas de energia individuais de cada pivô de irrigação. Sob a responsabilidade do Governo do Estado de MS, através do IDATERRA, as faturas de energia, observando os procedimentos de faturamento caracterizado pelo sistema tarifário Horo-sazonal Verde, constituíam-se de quatro grupos:

- Demanda de potência ativa e reativa;
- Consumo de energia ativa e reativa;
- Custo proporcional de operação da subestação;
- Custo de medição, cálculo e impressão das contas.

A determinação da fatura da energia do ramal que alimenta o Assentamento Itamarati I, por sua vez, segue os procedimentos dispostos em ANEEL (2000). Todavia, por considerarem tarifas relativas à tensão de 138 kV, a Fazenda Itamarati acrescentava, para o fornecimento em 34,5 kV, o custo proporcional de operação da subestação. Este custo consistia no rateio das despesas operacionais da subestação entre o assentamento e a Fazenda Itamarati, proporcionalmente as suas respectivas faturas de energia.

As leituras nos medidores, o cálculo e a impressão das contas de energia eram operacionalizados pelo IDATERRA que, por sua vez, acrescentava, às contas individuais dos irrigantes, as despesas relativas à execução destes serviços.

A despesa com energia elétrica para o funcionamento de toda a irrigação era determinada pela medição do ramal que alimenta o Assentamento Itamarati I. Na Tabela 4.4 são apresentas as despesas com energia dos 58 pivôs do assentamento verificadas entre janeiro e dezembro de 2004. O gráfico da Figura 4.2, determinado a partir dos dados da Tabela 4.4, ilustra a variação do consumo e da fatura de energia no assentamento ao longo do ano de 2004.

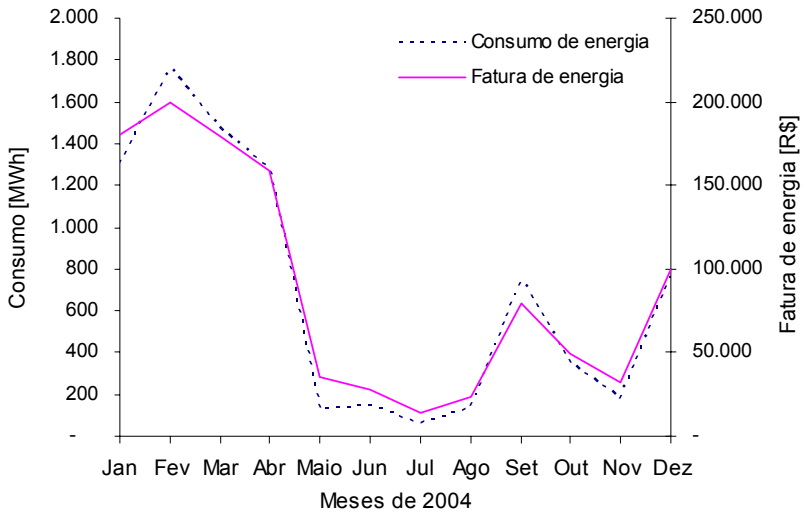


Figura 4.2. – Histórico de consumo e fatura de energia no ano 2004 do Assentamento Itamarati I

A partir da Figura 4.2 é possível observar a sazonalidade da utilização dos sistemas de irrigação que, por sua vez, está relacionada aos fatores climáticos e aos estádios das safras ao longo do ano. Através da Tabela 4.4 pode se observar um gasto expressivo com energia elétrica nos sistemas de irrigação do Assentamento Itamarati I que, no ano de 2004, alcançou R$ 1.079.226,59.

Tabela 4.4. – Histórico do faturamento de energia elétrica do ramal de alimentação dos sistemas de irrigação do Assentamento Itamarati I entre janeiro e dezembro de 2004.

MESES	CONSUMO				DEMANDA		OUTROS [R$]		FATURA TOTAL [R$]
	Fora Ponta [kWh]	Reservado [kWh]	Total [kWh]	Custo [R$]	Medida [kW]	Custo [R$]	Operação Subestação	Baixo fator de potência e Atraso	
Janeiro	891.000	417.690	1.308.690	114.890,49	6.944	36.895,23	8.709,86	19.392,10	179.887,68
Fevereiro	1.052.190	703.620	1.755.810	142.738,26	6.177	32.819,96	7.261,65	16.400,35	199.220,23
Março	923.940	544.320	1.468.260	122.015,10	5.972	31.730,75	6.949,76	18.614,02	179.309,62
Abril	772.654	504.900	1.277.554	103.676,27	5.767	30.641,53	7.349,76	17.462,74	159.130,30
Maio	63.990	63.720	127.710	9.309,00	2.376	12.624,29	5.778,54	8.040,66	35.752,48
Junho	79.920	69.660	149.580	11.299,05	1.047	5.562,98	4.176,00	6.973,88	28.011,91
Julho	30.510	29.430	59.940	4.407,08	497	2.640,69	2.681,92	4.305,55	14.035,23
Agosto	65.073	70.740	135.813	9.662,57	1.134	6.025,23	3.910,94	3.693,72	23.292,46
Setembro	396.101	348.030	744.131	56.092,29	2.516	13.368,14	9.644,24	245,72	79.350,39
Outubro	181.443	173.610	355.053	26.162,40	2.862	15.206,53	7.990,66	0	49.359,59
Novembro	74.520	108.270	182.790	11.964,71	2.538	13.485,04	6.571,40	0	32.021,15
Dezembro	377.112	390.142	767.254	55.343,05	6.016	31.964,53	12.547,97	0	99.855,55
TOTAL	4.908.453	3.424.132	8.332.585	667.560,27	6.944*	232.964,89	83.572,70	95.128,73	1.079.226,59

* Demanda máxima medida e faturada no ano.

A partir da leitura de dezembro de 2004 do medidor do ramal que alimenta os pivôs de irrigação do Assentamento Itamarati I, é possível verificar a distribuição do funcionamento das cargas ao longo do período de faturamento, Figura 4.3.

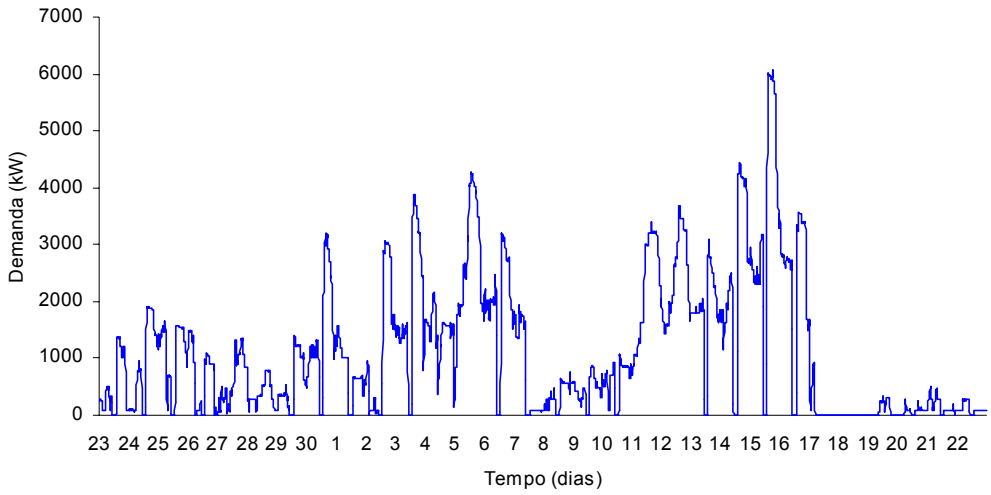


Figura 4.3. – Curva de demanda do ramal que alimenta os pivôs centrais do Assentamento Itamarati I no faturamento de dezembro de 2004

Considerando, todavia, a demanda de um conjunto de motores de bombas, pôde se verificar que a potência exigida da rede permanece aproximadamente constante ao longo do tempo, enquanto o equipamento permanece em funcionamento, comprovando, assim, a afirmação realizada para a determinação da Equação 2.6, Figura 4.4.

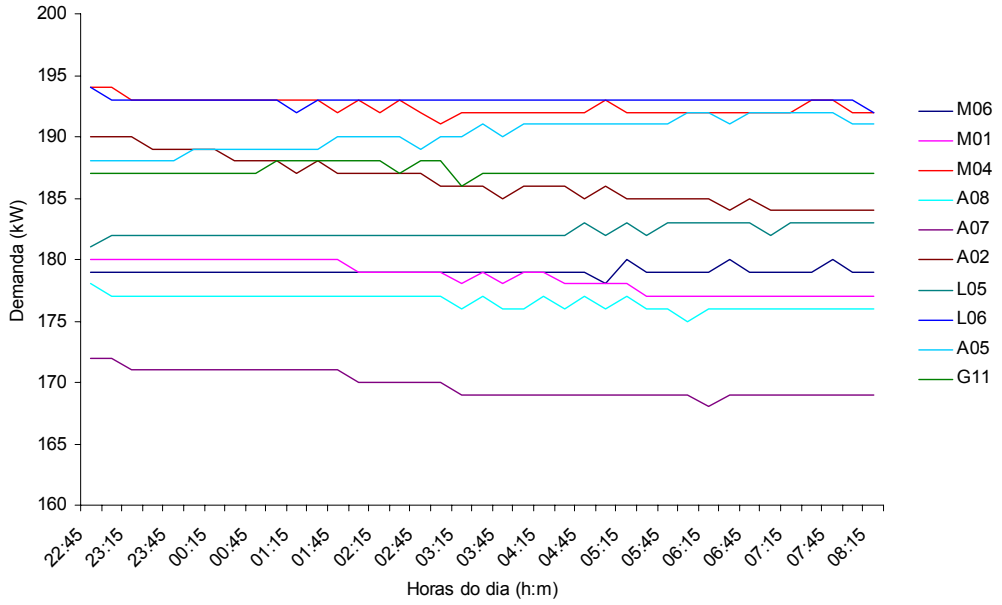


Figura 4.4. – Curva de demanda de dez pivôs centrais do Assentamento Itamarati I nos dias 15 e 16 de dezembro de 2004

O preço médio da energia varia de acordo com as tarifas e a forma de utilização do sistema de irrigação, quando se considera um consumidor horo-sazonal rural irrigante. Desta forma, considerando as tarifas estabelecidas para a ENERSUL em 2006, ANEEL (2006) e as leituras dos medidores no período entre 23 de novembro e 22 de dezembro de 2004 dos equipamentos em funcionamento, pôde se determinar o fator de carga, índice de utilização do horário reservado e preço médio da energia, Tabela 4.5 e Figura 4.5.

Tabela 4.5. – Consumo, importe, tempo e índice de utilização, fator de carga e preço médio da energia dos pivôs em funcionamento em dezembro de 2004 no Assentamento Itamarati I

Pivô	CONSUMO		Demanda (kW)	IMPORTE			TEMPO		Índice de utilização do horário reservado (1)	Fator de carga (1)	Preço médio (R$/kWh)
	Fora do horário reservado (kWh)	Horário reservado (kWh)		Consumo (R$)	Demanda (R$)	Total (R$)	Utilização horário reservado (h)	Utilização total (h)			
T03	3009	605	182	380,63	2.311,22	2.691,85	3,32	19,86	0,167	0,030	0,7448
L07	2906	1796	201	400,20	2.552,50	2.952,70	8,94	23,39	0,382	0,036	0,6280
T01	4299	1834	174	569,90	2.209,63	2.779,52	10,54	35,25	0,299	0,054	0,4532
C03	2769	5713	233	489,01	2.958,87	3.447,88	24,52	36,40	0,674	0,056	0,4065
M03	6218	1604	184	796,07	2.336,62	3.132,69	8,72	42,51	0,205	0,065	0,4005
T07	4839	5071	237	722,39	3.009,66	3.732,05	21,40	41,81	0,512	0,064	0,3766
C02	2811	6137	219	505,51	2.781,08	3.286,59	28,02	40,86	0,686	0,062	0,3673
M05	4415	4296	182	650,19	2.311,22	2.961,41	23,60	47,86	0,493	0,073	0,3400
L05	3930	6042	190	638,45	2.412,81	3.051,26	31,80	52,48	0,606	0,080	0,3060
C06	2172	8101	203	480,98	2.577,90	3.058,88	39,91	50,61	0,789	0,077	0,2978
L06	4645	7275	199	758,20	2.527,10	3.285,30	36,56	59,90	0,610	0,092	0,2756
T06	5297	10776	241	931,35	3.060,46	3.991,81	44,71	66,69	0,670	0,102	0,2484
C04	6337	7793	191	977,02	2.425,51	3.402,53	40,80	73,98	0,552	0,113	0,2408
L01	10980	5538	169	1.478,54	2.146,13	3.624,67	32,77	97,74	0,335	0,149	0,2194
A06	16124	5464	199	2.099,42	2.527,10	4.626,52	27,46	108,48	0,253	0,166	0,2143
A09	45	17609	257	479,27	3.263,64	3.742,91	68,52	68,69	0,997	0,105	0,2120
A01	4411	12302	210	865,13	2.666,79	3.531,92	58,58	79,59	0,736	0,122	0,2113
M04	5400	12379	204	986,96	2.590,60	3.577,55	60,68	87,15	0,696	0,133	0,2012
M01	16118	7745	184	2.160,07	2.336,62	4.496,68	42,09	129,69	0,325	0,198	0,1884
AL2	1251	9432	119	405,27	1.511,18	1.916,46	79,26	89,77	0,883	0,137	0,1794
B02	12972	15386	230	1.984,73	2.920,77	4.905,50	66,90	123,30	0,543	0,189	0,1730
A05	15732	12675	207	2.245,98	2.628,69	4.874,68	61,23	137,23	0,446	0,210	0,1716
GRA	34756	58608	802	5.785,49	10.184,60	15.970,09	73,08	116,41	0,628	0,178	0,1711
C01	8292	13582	186	1.369,51	2.362,01	3.731,52	73,02	117,60	0,621	0,180	0,1706
M06	18992	11041	184	2.596,76	2.336,62	4.933,37	60,01	163,22	0,368	0,250	0,1643
T04	29986	15612	266	4.050,97	3.377,93	7.428,91	58,69	171,42	0,342	0,262	0,1629
G01	14662	13081	186	2.127,35	2.362,01	4.489,36	70,33	149,16	0,472	0,228	0,1618
G11	20626	13116	199	2.850,45	2.527,10	5.377,55	65,91	169,56	0,389	0,259	0,1594
B01	22925	17824	249	3.255,50	3.162,05	6.417,56	71,58	163,65	0,437	0,250	0,1575
A02	10066	17018	197	1.676,77	2.501,70	4.178,48	86,39	137,48	0,628	0,210	0,1543
A08	13072	15181	184	1.991,33	2.336,62	4.327,94	82,51	153,55	0,537	0,235	0,1532
A07	18224	14933	188	2.608,49	2.387,41	4.995,90	79,43	176,37	0,450	0,270	0,1507
B03	17806	23183	257	2.779,87	3.263,64	6.043,51	90,21	159,49	0,566	0,244	0,1474
T02	9969	21300	191	1.780,25	2.425,51	4.205,76	111,52	163,71	0,681	0,250	0,1345

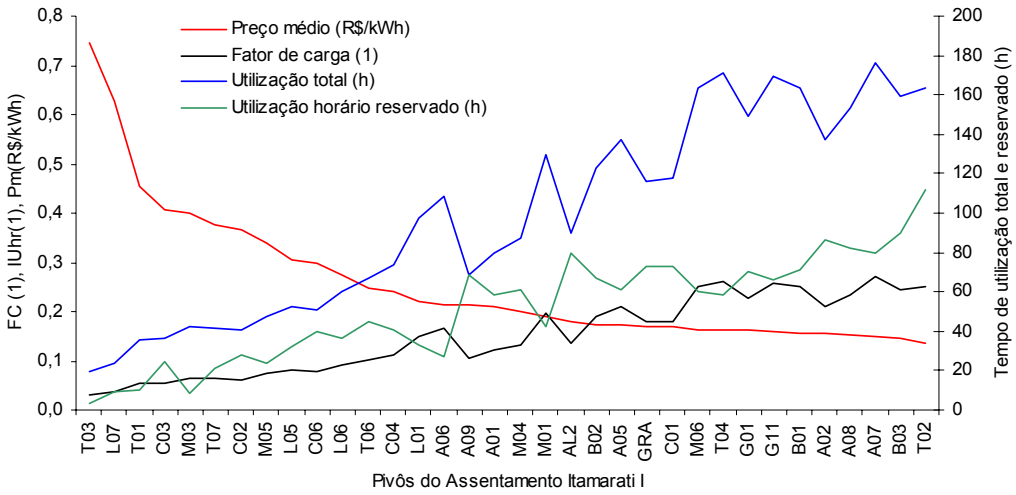


Figura 4.5. – Curva do preço médio, fator de carga, tempo de utilização dos pivôs em funcionamento em dezembro de 2004 no Assentamento Itamarati I

Verifica-se, na Tabela 4.5 e Figura 4.5, a relação entre o custo médio da energia, o tempo de utilização do sistema e o fator de carga. Para o período considerado os equipamentos de irrigação no Assentamento Itamarati I funcionaram entre 19,86 e 176,37 horas, com índice de utilização do horário reservado variando entre 0,167 e 0,997 e fator de carga mínimo igual a 0,030 e máximo igual a 0,262.

Caracterizando o custo pelo trabalho realizado, o preço médio da energia no Assentamento Itamarati I, para o faturamento de dezembro de 2004, esteve compreendido entre 0, 1345 e R$ 0, 7448/kWh, o que representa uma variação de 5,54 vezes, para as tarifas, tempo e horário de utilização dos sistemas de irrigação calculados. Assim, o preço médio da energia é suficiente para relacionar a demanda e consumo em um sistema de tarifa binômia.

4.3. Etiquetagem energética de pivôs centrais

Com objetivo de se obter a Etiqueta de Eficiência Energética dos Pivôs Centrais proposta, foram avaliados quatro sistemas de irrigação durante o mês de abril de 2006, um na Embrapa Agropecuária Oeste, localizada na cidade de Dourados, MS e três no Assentamento Itamarati I.

As principais características dos equipamentos ensaiados na Embrapa Agropecuária Oeste e no Assentamento Itamarati I são apresentadas na Tabela 4.6. Conforme apresentado no Item 3.5, para a realização do ensaio de avaliação energética de pivô central, foram instalados coletores espaçados a 3 m em duas linhas, considerando um ângulo de 3º (Figura 4.6). O volume medido nos coletores, Figura 4.7, encontra-se relacionado no Anexo A3.

Tabela 4.6. – Características construtivas dos pivôs ensaiados na Embrapa Agropecuária Oeste e Assentamento Itamarati I em abril de 2006

Pivô	Potência do Motor (cv)	Área Irrigada (ha)	Desnível (m)			Sucção			Adutora			Pressão no balanço (mca)
			Sucção	Recalque	Linha lateral e cultura	Diâmetro (mm)	Compr. (m)	Material*	Diâmetro (mm)	Compr. (m)	Material*	
Embrapa	40	20,8	1,0	17,0	4,9	159	10	F.G.	150	628	F.G.	14,1
L06	250	118,1	-4,0	34,0	4,2	309	29	F.G.	300	1142	F.C.	14,1
C08	300	114,6	2,0	30,0	5,8	260	8	F.G.	200	1466	F.C.	14,1
G13	300	108,0	3,0	58,0	3,7	261	15	F.G.	300	2298	F.C.	14,1

Continuação

Ponto (m)	Linha lateral												
	Lance B Diâmetro de 8"			Lance A Diâmetro 6 5/8			Balanço				Características		
	Qde	Comprimento (m)		Qde	Comprimento (m)		Compr. (m)	Diâmetro (pol)	Compr. (m)	Diâmetro (pol)	Compr. Total (m)	Material	e (m)
		lance	Total		lance	Total							
0,9				6	38,7	232,2	14,7	6 5/8	9,8	4	257,6	F.G.	0,0002
0,5	6	39	234,0	7	51,0	357,0	12,5	6 5/8	9,0	4	613,0	F.G.	0,0002
0,9				15	38,6	579,0	12,1	6 5/8	12,1	4	604,0	F.G.	0,0002
1,0				15	38,6	579,0	6,2	6 5/8			586,2	F.G.	0,0002

(*) FG - Ferro galvanizado, FC - Ferro cimentado

(a)

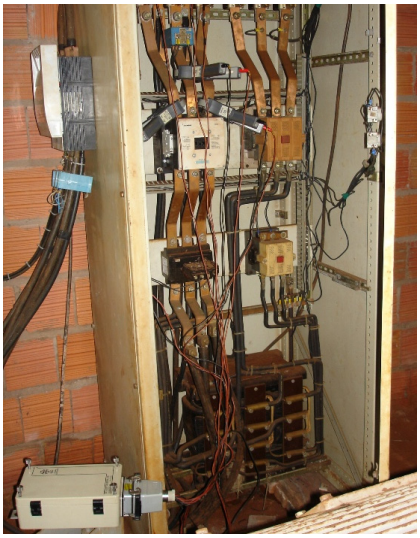
(b)

Figura 4.6. – Coletores instalados no pivô da Embrapa Agropecuária Oeste no pivô C08 do Assentamento Itamarati I ensaiado em abril de 2006

(a) **(b)**

Figura 4.7. – Coleta e leitura da lâmina infiltrada nos pivôs da Embrapa Agropecuária Oeste (a) e G13 (b) do Assentamento Itamarati I em abril de 2006

Durante a realização dos ensaios foi medida a potência elétrica trifásica ativa, reativa e aparente, o fator de potência e os parâmetros climáticos. A potência elétrica do motor foi obtida por meio do medidor universal de grandezas MUG – Elo Sistemas Eletrônicos (Figura 4.8a), a velocidade do vento pelo Anemômetro ANM-10 da Hidrologia SA. e a temperatura e umidade pelo termo-higrômetro MF972B da More Fitness (Figura 4.8b). Os valores obtidos são apresentados na Tabela 4.7.



(a) medição de potência **(b) fatores climáticos**

Figura 4.8. – Medições de potência e fatores climáticos nos ensaios no Assentamento Itamarati I em abril de 2006

O Medidor Universal de Grandezas, MUG, é um medidor/registrador eletrônico programável de grandezas elétricas trifásicas e fase a fase, em tempo real, cuja principal aplicação é a supervisão de redes de distribuição de baixa e média tensão. O MUG, com precisão de 0,2%, executa a medição em corrente alternada de tensão, corrente, energias ativa e reativa, potência ativa, reativa, aparente, fator de potência e freqüência. As grandezas medidas podem ainda ser registradas e descarregadas no computador para posterior análise.

Tabela 4.7. - Medições e levantamentos de dados dos pivôs ensaiados na Embrapa Agropecuária Oeste e Assentamento Itamarati I em abril de 2006

Pivô		Potência Medida (kW)	Condições Climáticas			
			Temperatura (ºC)	U. R. (%)	Vento (m/s)	Horário (h:m)
1	Embrapa	37,07	29,1	73,0	1,1	14:00
	Embrapa*	24,70				
2	L06	196,00	30,4	64,0	3,9	08:50
3	C08	203,00	30,5	40,0	1,6	10:20
4	G13	247,36	27,0	51,0	0,9	15:00

*Dados de projeto

O único pivô que possibilitou a comparação entre os valores obtidos e os de projeto foi o da Embrapa Agropecuária Oeste. Para os demais, não foram encontrados nenhuma documentação de instalação. Pode se verificar, a partir da Tabela 4.7, que o equipamento da Embrapa encontra-se fora das condições originais de projeto, devido a uma reforma realizada que substituiu os aspersores de média pressão por difusores (baixa pressão), sendo também retirado o canhão final e acrescentado um lance em balanço.

A partir dos procedimentos para realização do ensaio de avaliação energética de pivô central apresentado no Item 3.5, os dados obtidos foram alimentados na pasta "frm_uniformidade" planilha "Dados avaliação" e pasta "coleta" da planilha "etiqueta". Com os dados alimentados, executou-se o programa desenvolvido em Matlab® "etiqueta_pivo" para o fornecimento das Etiquetas de Eficiência Energética propostas, Figura 4.9.

EMBRAPA AGROPECUÁRIA OESTE

Área irrigada	=	21,01 ha
Consumo Específico Normalizado na Irrigação	=	20,47 kWh/(mm.ha.100m)
Eficiência de irrigação (PA = 80%)	=	13,3%
Lamina líquida media diária	=	9,07 mm
Lamina para 80% da parcela irrigada adequadamente	=	7,95 mm
Eficiência de Distribuição (PA = 80%)	=	87,69%
Coeficiente de Hermann & Hein	=	86,05%
Uniformidade de distribuição de água	=	BOA

ASSENTAMENTO ITAMARATI – PIVÔ L06

Área irrigada	=	118,02 ha
Consumo Específico Normalizado na Irrigação	=	15,01 kWh/(mm.ha.100m)
Eficiência de irrigação (PA = 80%)	=	18,2%
Lamina líquida media diária	=	7,32 mm
Lamina para 80% da parcela irrigada adequadamente	=	6,72 mm
Eficiência de Distribuição (PA = 80%)	=	91,73%
Coeficiente de Hermann & Hein	=	89,22%
Uniformidade de distribuição de água	=	BOA

ASSENTAMENTO ITAMARATI – PIVÔ C08

Área irrigada	=	114,58 ha
Consumo Específico Normalizado na Irrigação	=	30,47 kWh/(mm.ha.100m)
Eficiência de irrigação (PA = 80%)	=	8,9%
Lamina líquida media diária	=	4,15 mm
Lamina para 80% da parcela irrigada adequadamente	=	3,23 mm
Eficiência de Distribuição (PA = 80%)	=	77,83%
Coeficiente de Hermann & Hein	=	72,50%
Uniformidade de distribuição de água	=	RUIM

ASSENTAMENTO ITAMARATI – PIVÔ G13

Área irrigada	=	107,92 ha
Consumo Específico Normalizado na Irrigação	=	12,49 kWh/(mm.ha.100m)
Eficiência de irrigação (PA = 80%)	=	21,8%
Lamina líquida media diária	=	6,86 mm
Lamina para 80% da parcela irrigada adequadamente	=	5,96 mm
Eficiência de Distribuição (PA = 80%)	=	86,94%
Coeficiente de Hermann & Hein	=	86,71%
Uniformidade de distribuição de água	=	BOA

Figura 4.9. – Etiqueta de Eficiência Energética - relatório do programa "etiqueta_pivo" para os equipamentos ensaiados na Embrapa Agropecuária Oeste e no Assentamento Itamarati I em abril de 2006

O parâmetro mais importante na etiqueta proposta é o Consumo Específico Normalizado na Irrigação, pois permite caracterizar o equipamento e compará-lo com qualquer outro pivô de irrigação. Pode se observar a variação neste indicador entre 12,49 e 30,47 kWh/(mm.ha.100m) nos pivôs G13 e C08, determinando o primeiro como sendo o mais eficiente e o segundo como sendo o de menor eficiência dentre os equipamentos ensaiados. A análise realizada no Capítulo V determinará, todavia, a influência de cada elemento do sistema de irrigação na formação do indicador apresentado.

A eficiência de irrigação, relação entre a potência útil e a absorvida pelo sistema, avalia a porcentagem do aproveitamento da energia pelo equipamento. Variando entre 8,9 e 21,8% pode se afirmar que o pivô C08 perde 91,1% da energia elétrica de entrada enquanto que, 78,2% da energia do pivô G13 é dissipada nas tubulações, motor e bomba e aspersão. Elevadas perdas de carga nas tubulações, baixo rendimento do motor e da bomba e a água não aproveitada pelo sistema de irrigação são as possíveis causas da baixa eficiência que serão analisadas no Capítulo V.

A lâmina líquida média diária determina todo o volume que alcançou os coletores, enquanto que a lâmina para 80% da área adequadamente irrigada estabelece o volume disponível para a cultura considerando 21 horas de um dia. Associados a estas lâminas estão a Eficiência de Distribuição e Coeficiente de Hermann & Hein para a determinação de parâmetros.

Observa-se que o Coeficiente de Hermann & Hein varia desde uma uniformidade Ruim (72,50%) determinada para o pivô C08 até Boa, 89,2% para o pivô L06. Assim, a etiqueta proposta caracteriza os pivôs quanto ao uso e aproveitamento da energia e água na irrigação. Para visualizar a uniformidade de distribuição de água obtida são apresentadas na Figura 4.10 a lâmina de água coletada e sua média ponderada ao longo da linha lateral dos pivôs ensaiados.

Pode se observar, a partir da Figura 4.10, uma variação da lâmina aplicada no pivô C08 entre 3,1 mm, final da linha lateral, até 64 mm na área crítica entre 100 e 200 m. Observa-se ainda uma redução na lâmina aplicada neste pivô a partir dos 400 m devido à baixa pressão nos difusores.

Assim, a utilização de difusores fora de especificação, o desgaste dos mesmos, o entupimento na tubulação e os vazamentos observados justificam uma Eficiência de Distribuição de 77,83% no pivô C08.

Para a comparação dos sistemas ensaiados é possível normalizar os valores obtidos pela lâmina útil em 80% da área e dispô-los em ordem decrescente conforme Figura 4.11.

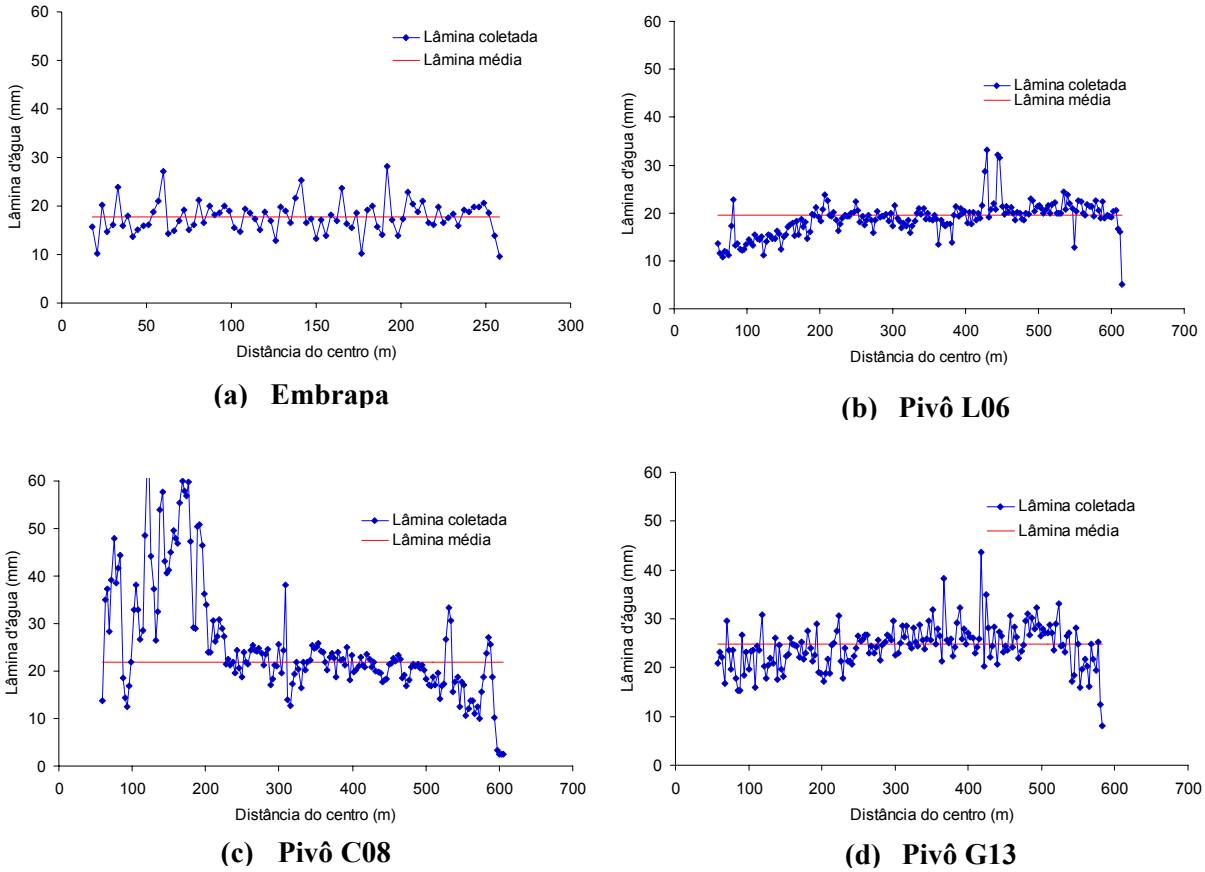


Figura 4.10. – Lâmina de água ao longo da linha lateral nos pivôs ensaiados na Embrapa Agropecuária Oeste e Assentamento Itamarati I em abril de 2006

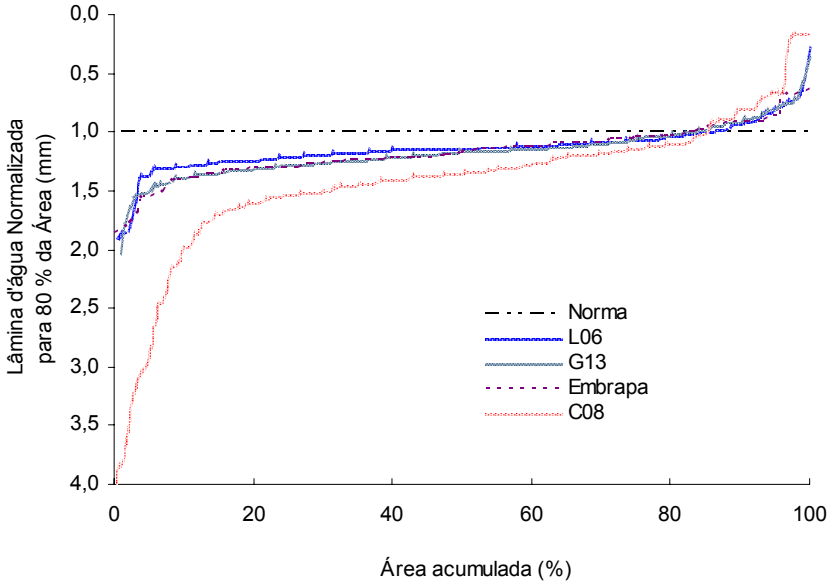


Figura 4.11. – Distribuição da lâmina coletada normalizada para 80% da área adequadamente irrigada dos pivôs ensaiados na Embrapa Agropecuária Oeste e Assentamento Itamarati I em abril de 2006

Pode se observar na Figura 4.11 que o pivô C08 apresenta uma variação de 4,1 vezes o valor da lâmina útil, ao passo que os demais não ultrapassam a 2 vezes este valor.

A etiqueta proposta caracteriza os sistemas de irrigação quanto ao uso e aproveitamento de energia e água, todavia, o Consumo Específico Normalizado na Irrigação deve ser avaliado quanto a melhor opção técnica e econômica para o sistema. Faz-se, então, necessário analisar a contribuição de cada elemento na formação do índice obtido parama etiqueta, bem como analisar e estabelecer um padrão mínimo de eficiência para os pivôs centrais. Para isso, o sistema de irrigação será avaliado mais detalhadamente, considerando cinco subsistemas, conforme apresentado no Capítulo V.

CAPÍTULO V

AVALIAÇÃO ENERGÉTICA DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR PIVÔ CENTRAL

5.1. Introdução

Neste capítulo será determinada a contribuição de cada elemento do sistema de irrigação nos índices de eficiência existentes na etiqueta apresentada, bem como exemplificado a potencialidade da utilização dos indicadores discutidos no Capítulo III. De uma forma geral, busca-se uma avaliação energética mais detalhada dos quatro sistemas de irrigação apresentados no Capítulo IV para verificar seu potencial na caracterização de sistemas de irrigação por pivô central.

A avaliação energética descrita neste capítulo utiliza as metodologias apresentadas no Capítulo III para verificar a contribuição do conjunto motor e bomba, tubulação de sucção, adutora e linha de pressão, linha lateral e aspersão que, por sua vez, auxiliarão na determinação do padrão mínimo de eficiência no Capítulo VI.

5.2. Conjunto motor e bomba

Na avaliação do sistema de irrigação, o rendimento do conjunto motor e bomba é de grande importância devido à representatividade da energia dissipada neste elemento (Figuras 5.1a e 5.1b). Inicialmente foi ensaiado o conjunto motor e bomba para, posteriormente, separar a contribuição do motor e da bomba na formação do rendimento do conjunto. O ensaio da bomba foi realizado utilizando como base ABNT (1975) e a potência útil do motor determinada a partir de duas metodologias, uma considerando a modelagem do motor através de seu circuito equivalente (ABNT, 2002) e outra utilizando a aproximação polinomial da curva de rendimento, conforme apresentadas no Capítulo III.

Para a determinação da energia dissipada nestes elementos foi necessário obter a potência elétrica de entrada e a potência hidráulica de saída. A potência elétrica de entrada foi determinada por meio do medidor universal de grandezas MUG – Elo Sistemas Eletrônicos apresentado na Figura 4.8a e o resumo dos dados obtidos do ensaio dos conjuntos motor e bomba são apresentados nos Anexos A4 a A7.

A potência hidráulica, Equação 3.33, foi obtida a partir da altura manométrica da bomba determinada pela Equação 3.34. Para isso, foram medidas a vazão da bomba através do medidor ultra-sônico de vazão e velocidade de líquidos Fuji Portable Flowmeter "Portaflow-X" (Figura 5.1.a), a pressão de saída no manômetro (Figura 5.1b), a rotação do motor e as cotas do manômetro da sucção, Figura 3.8.

O Portaflow-X é um medidor ultrassônico portátil de fluxo, não intrusivo, que utiliza como princípio de medição a diferença de tempo de trânsito. Adequado para fluidos relativamente limpos com pouco ou moderada presença de oxigênio, este medidor determina a vazão e o sentido de fluxo comparando o tempo que o sinal ultrassônico atravessa a tubulação.

A utilizando desta tecnologia permite que os transdutores sejam fixados do lado de fora da tubulação, de forma que reduz o tempo de instalação, não contamina o fluido, não impõe queda de pressão no circuito, não há necessidade de desmontar a tubulação e não apresenta risco de vazamento. Para as leituras realizadas, tubulações entre 50 e 300 mm, a precisão é de 1% para velocidade entre 2 e 32 m/s e 0,02 m/s para velocidades menores.

(a) **(b)**

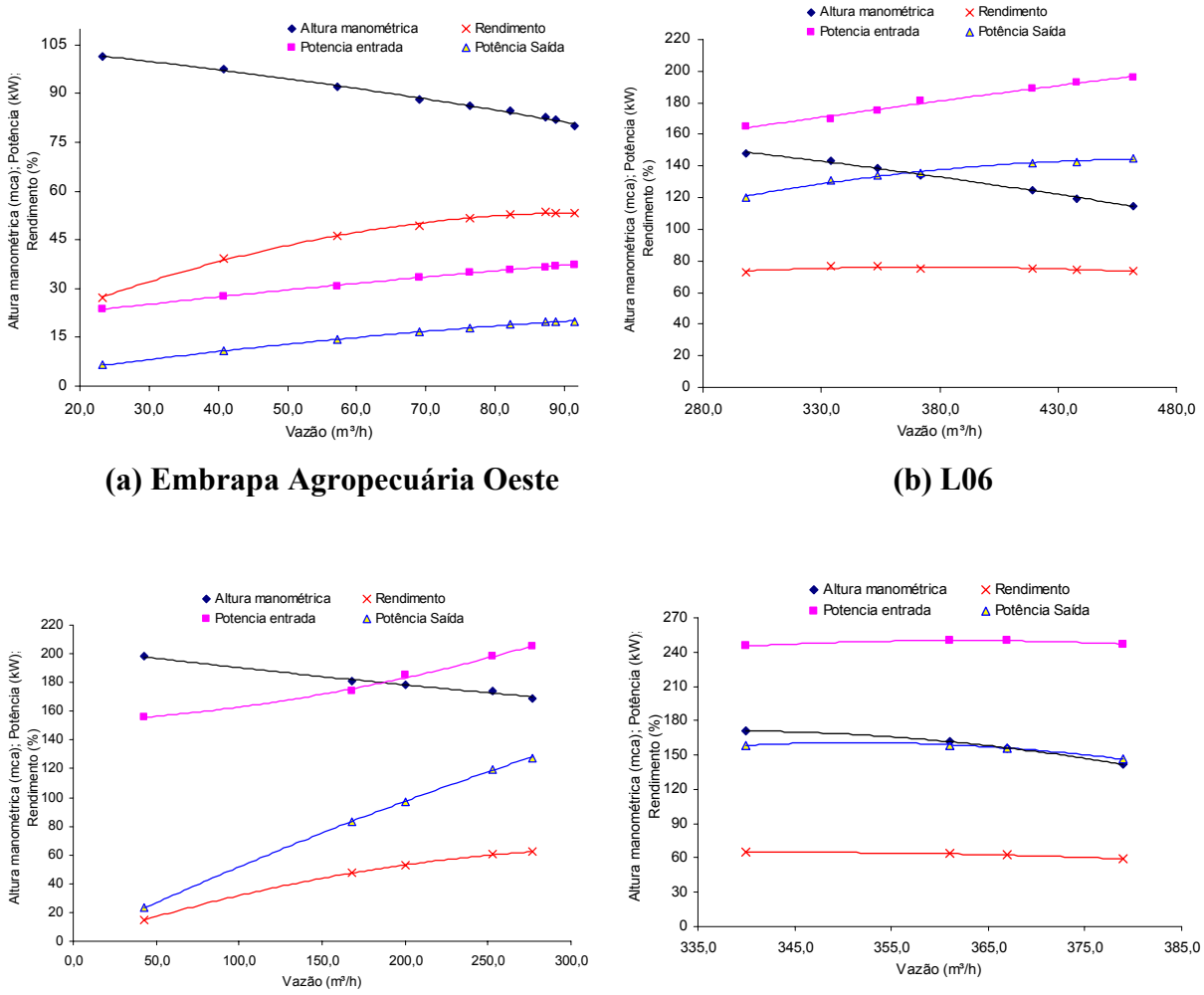
Figura 5.1. – (a) Medição de vazão e (b) medição de pressão nos pivôs G13 e L06 ensaiados no Assentamento Itamarati I em abril de 2006

Os rendimentos dos conjuntos motor e bomba podem ser obtidos para diferentes valores de pressão e vazão variando a abertura do registro instalado na saída da bomba (Figura 5.1b). Os valores obtidos no ensaio dos conjuntos motor e bomba são apresentados na Tabela 5.1 e os dados instantâneos das leituras do MUG nos Anexos A4 a A7.

Tabela 5.1. - Rendimento nos conjuntos motor e bomba dos pivôs ensaiados na Embrapa Agropecuária Oeste e Assentamento Itamarati I em abril de 2006.

Pivô		Potência elétrica de entrada (kW)	Ensaio				Potência dissipada no motor e bomba (kW)	Rendimento (%)
			Vazão (m³/h)	Hm (mca)	Rotação (rpm)	Potência hidráulica de saída (kW)		
EMBRAPA	1	23,70	23,3	101,4	1785	6,44	17,3	27,18
	2	27,60	40,7	97,7	1782	10,83	16,8	39,24
	3	30,90	57,1	92,0	1780	14,31	16,6	46,31
	4	33,60	69,0	88,3	1777	16,60	17,0	49,40
	5	34,80	76,3	86,5	1776	17,98	16,8	51,67
	6	35,90	82,2	84,7	1775	18,96	16,9	52,83
	7	36,70	87,2	82,8	1775	19,68	17,0	53,63
	8	37,10	88,7	81,9	1774	19,79	17,3	53,35
	9	37,50	91,5	80,0	1773	19,94	17,6	53,18
L06	1	165,00	298,0	148,3		120,39	44,6	72,96
	2	170,00	334,0	143,5		130,62	39,4	76,84
	3	175,00	354,0	138,8		133,85	41,1	76,49
	4	181,00	372,0	133,9		135,71	45,3	74,98
	5	189,00	419,0	124,4		142,06	46,9	75,16
	6	193,00	438,0	119,7		142,81	50,2	74,00
	7	196,00	462,0	115,0		144,74	51,3	73,85
C08	1	156,00	42,8	197,9	1795	23,08	132,9	14,80
	2	174,00	167,7	181,4	1795	82,90	91,1	47,64
	3	185,00	200,0	178,6	1795	97,32	87,7	52,60
	4	198,00	252,6	174,0	1793	119,74	78,3	60,48
	5	205,00	278,0	169,2	1793	127,42	77,6	62,16
G13	1	245,00	340,0	171,1		158,51	86,5	64,70
	2	250,00	361,0	161,3		158,72	91,3	63,49
	3	250,00	367,0	156,4		156,44	93,6	62,58
	4	247,00	379,0	141,6		146,23	100,8	59,20

Pode se observar na Tabela 5.1 a falta dos valores das rotações dos motores dos pivôs L06 e G13, uma vez que as extremidade dos eixos não estavam disponíveis para medição utilizando o tacômetro disponível. Os dados da Tabela 5.1 são também representados na Figura 5.2.



(a) Embrapa Agropecuária Oeste **(b) L06**

(c) C08 **(d) G13**

Figura 5.2. – Curvas de rendimento, altura manométrica e potência pela vazão nos conjuntos motor e bomba ensaiados na Embrapa Agropecuária Oeste e Assentamento Itamarati I em abril de 2006

Os rendimentos dos conjuntos motor e bomba podem ser melhores observados quando associados em um mesmo gráfico (Figura 5.3). Pode se verificar que o maior rendimento refere-se ao pivô L06 (76,84%) e o menor rendimento máximo encontrado pertence ao conjunto motor e bomba da Embrapa (53,63%).

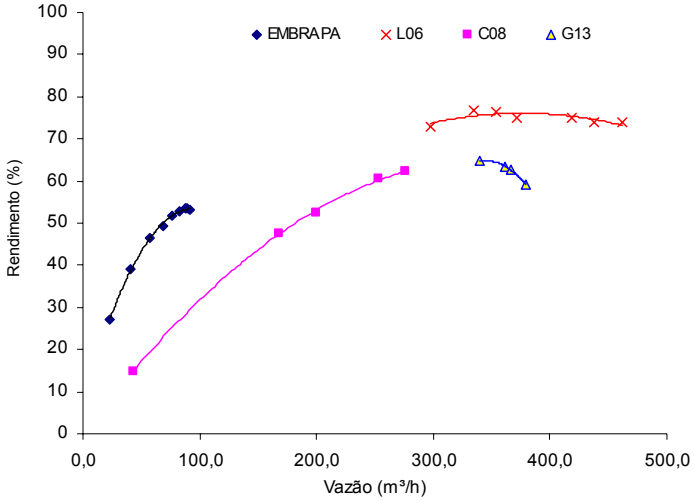


Figura 5.3. - Rendimento nos conjuntos motor e bomba ensaiados na Embrapa Agropecuária Oeste e no Assentamento Itamarati I em abril de 2006

Considerando a maior leitura de vazão como ponto de operação da bomba, é possível observar que, pela tendência das curvas, os conjuntos estão trabalhando fora do ponto de rendimento máximo. Este deslocamento na curva altura x vazão representa uma das causas das perdas no sistema de bombeamento.

A partir da avaliação do conjunto motor e bomba é possível ainda determinar o rendimento do motor e da bomba separadamente. Conforme apresentado no Capítulo III, pode se calcular a potência no eixo do motor através de seu circuito equivalente e da aproximação dos pontos da curva do fabricante, para isso foram obtidos os dados de placa dos motores utilizados, Tabela 5.2. A partir dos dados de placa dos motores foram obtidas as informações de ensaio dos equipamentos conforme Tabela 5.3, WEG (2007).

Tabela 5.2. – Dados de placa dos motores dos conjuntos motor e bomba da Embrapa Agropecuária Oeste e do Assentamento Itamarati I ensaiados em abril de 2006.

	Pivô	Características de Placa				
		Fabricante	Modelo	Tensão (V)	Potência (cv)	Rotação (rpm)
1	Embrapa	Siemens	1L4 2006-4YA	380	40	1760
2	L06	WEG Motores	315SM 0694	380	250	1786
3	C08	WEG Motores	355ML 0885	440	300	1790
4	G13	WEG Máquinas	HGF 315	440	300	1782

Tabela 5.3. – Dados de ensaio dos motores dos conjuntos motor e bomba da Embrapa Agropecuária Oeste e do Assentamento Itamarati I ensaiados em abril de 2006.

Potência (cv)	Modelo WEG (2007)	Resistência estator (Ω)	Ensaio em vazio			Ensaio de rotor bloqueado			
			Potência (W)	Corrente (A)	Tensão (V)	Freqüência (Hz)	Potência (W)	Corrente (A)	Tensão (V)
40	200M 012006	0,1421	667,9	16,76	380	60,0	92.320	322,2	380
250	315S/M092002	0,0090	4101,7	113,38	380	60,0	725.240	2865,9	380
300	355M/L082007	0,0110	3210,0	97,58	440	60,0	619.520	2352,7	440
300	355M/L082007	0,0110	3210,0	97,58	440	60,0	619.520	2352,7	440

Continuação.

Potência (cv)	Temperatura (ºC)		Potência medida em campo (kW)	Rendimento			Ponto de carga		
	ambiente	elevação		0,5Pn*	0,75Pn*	1,0Pn*	Rotação (rpm)	Corrente (A)	Fator de potência (%)
40	23,1	65,57	37,3	93,2	93,1	92,1	1765	57,2	85
250	28,4	58,47	197,0	96,6	97,1	97,0	1794	201,7	84
300	18,0	71,90	203,1	96,0	96,2	96,0	1790	352,1	84
300	18,0	71,90	247,6	96,0	96,2	96,0	1790	352,1	84

*Pn – Potência nominal

Considerando que os motores do pivô da Embrapa e G13, são de fabricação da Siemens e WEG Máquinas, respectivamente, foram utilizadas as características de ensaio de motores similares. Assim, utilizando as Equações 3.7 a 3.32 e os dados da Tabela 5.3, por meio do programa desenvolvido em Matlab® (2000), "motor", pode se calcular os parâmetros do circuito equivalente, Tabela 5.4 e determinar o rendimento, fator de potência relação potência ativa pela reativa (PQ) e a potência no eixo do motor, Figura 5.4. As curvas características potência, corrente, rotação, fator de potência, relação PQ, rendimento e o ponto de operação da máquina são apresentadas na Figura 5.5.

Tabela 5.4. – Parâmetros dos circuitos equivalentes dos motores para os conjuntos motor e bomba da Embrapa Agropecuária Oeste e Assentamento Itamarati I ensaiados em abril de 2006.

Potência (cv)	Impedância (Ω)					Perdas rotacionais (kW)
	Primário		Magnetização	Secundário		
	R1	X1	Xm	R2	X2	
40	0,089	0,252	12,845	0,076	0,904	0,593
250	0,006	0,027	1,905	0,005	0,152	3,890
300	0,007	0,041	2,560	0,004	0,184	3,008

EMBRAPA AGROPECUÁRIA OESTE – Motor de 40 cv

CIRCUITO EQUIVALENTE:

Rendimento	=	92,96 %
Fator de potência	=	84,86 %
Potência no eixo	=	34,67 kW
Índice de carregamento	=	1,18

APROXIMAÇÃO DA CURVA:

Rendimento	=	91,04 %
Potência no eixo	=	33,96 kW
Indice de carregamento	=	1,15

ASSENTAMENTO ITAMARATI – L06 Motor de 250 cv

CIRCUITO EQUIVALENTE:

Rendimento	=	96,28 %
Fator de potência	=	84,23 %
Potência no eixo	=	189,66 kW
Índice de carregamento	=	1,03

APROXIMAÇÃO DA CURVA:

Rendimento	=	96,93 %
Potência no eixo	=	190,96 kW
Índice de carregamento	=	1,04

ASSENTAMENTO ITAMARATI – C08 Motor de 300 cv

CIRCUITO EQUIVALENTE:

Rendimento	=	97,01 %
Fator de potência	=	84,98 %
Potência no eixo	=	197,04 kW
Índice de carregamento	=	0,89

APROXIMAÇÃO DA CURVA:

Rendimento	=	96,14 %
Potência no eixo	=	195,26 kW
Índice de carregamento	=	0,88

ASSENTAMENTO ITAMARATI – G13 Motor de 300 cv

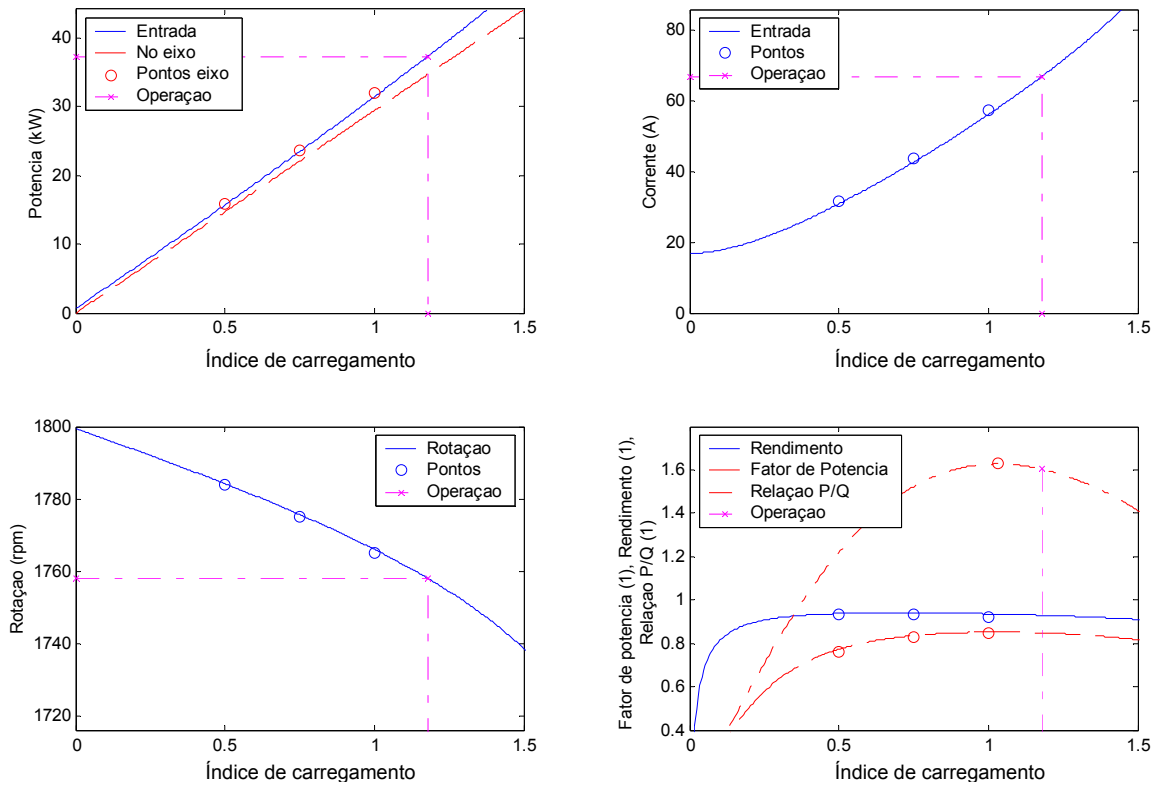
CIRCUITO EQUIVALENTE:

Rendimento	=	96,93 %
Fator de potência	=	84,88 %
Potência no eixo	=	239,989 kW
Índice de carregamento	=	1,09

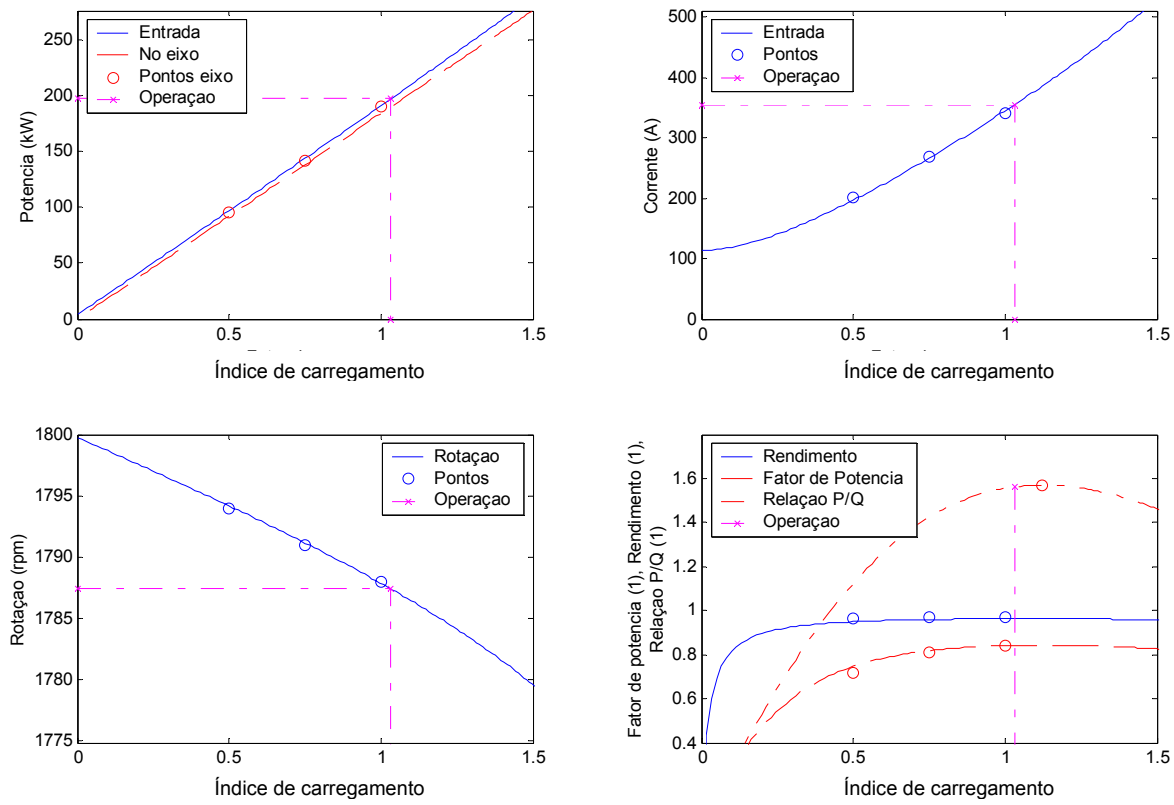
APROXIMAÇÃO DA CURVA:

Rendimento	=	95,86 %
Potência no eixo	=	237,354 kW
Índice de carregamento	=	1,07

Figura 5.4. – Rendimento, potência no eixo e índice de carregamento do motor - relatório do programa "motor" para os equipamentos ensaiados na Embrapa Agropecuária Oeste e no Assentamento Itamarati I em abril de 2006

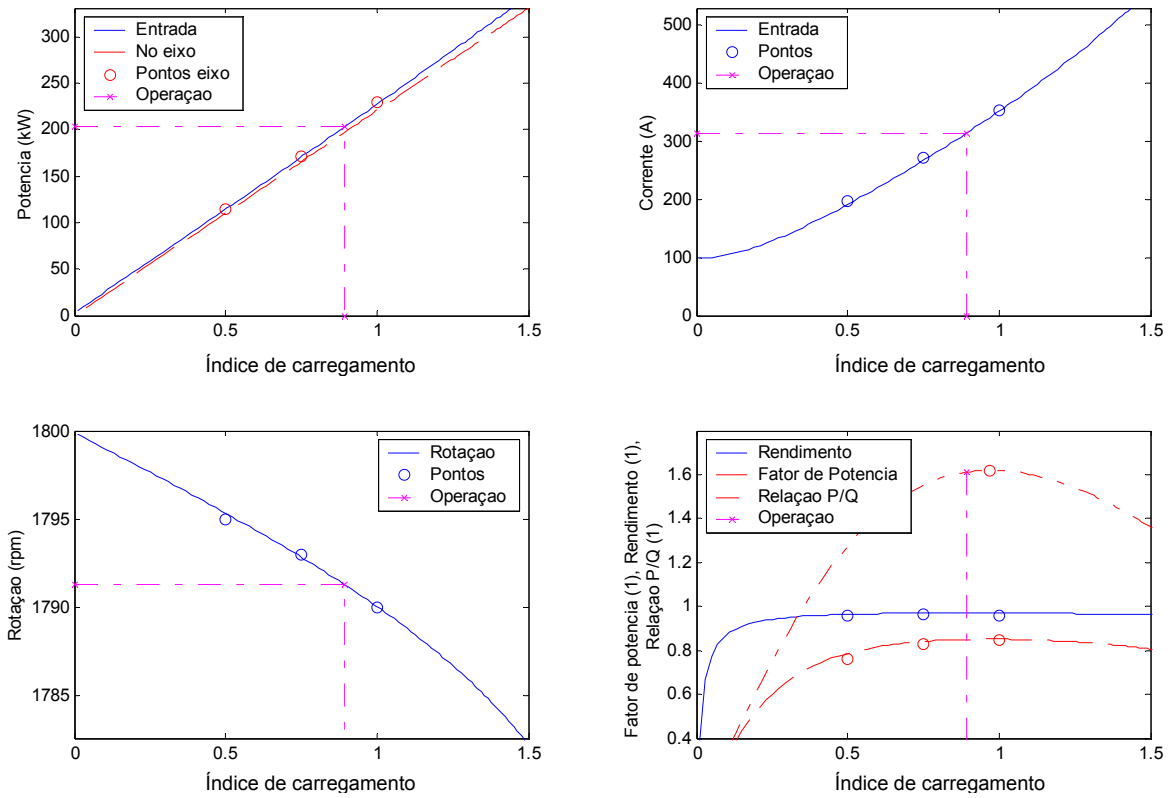


(a) Motor 40 cv: Embrapa Agropecuária Oeste

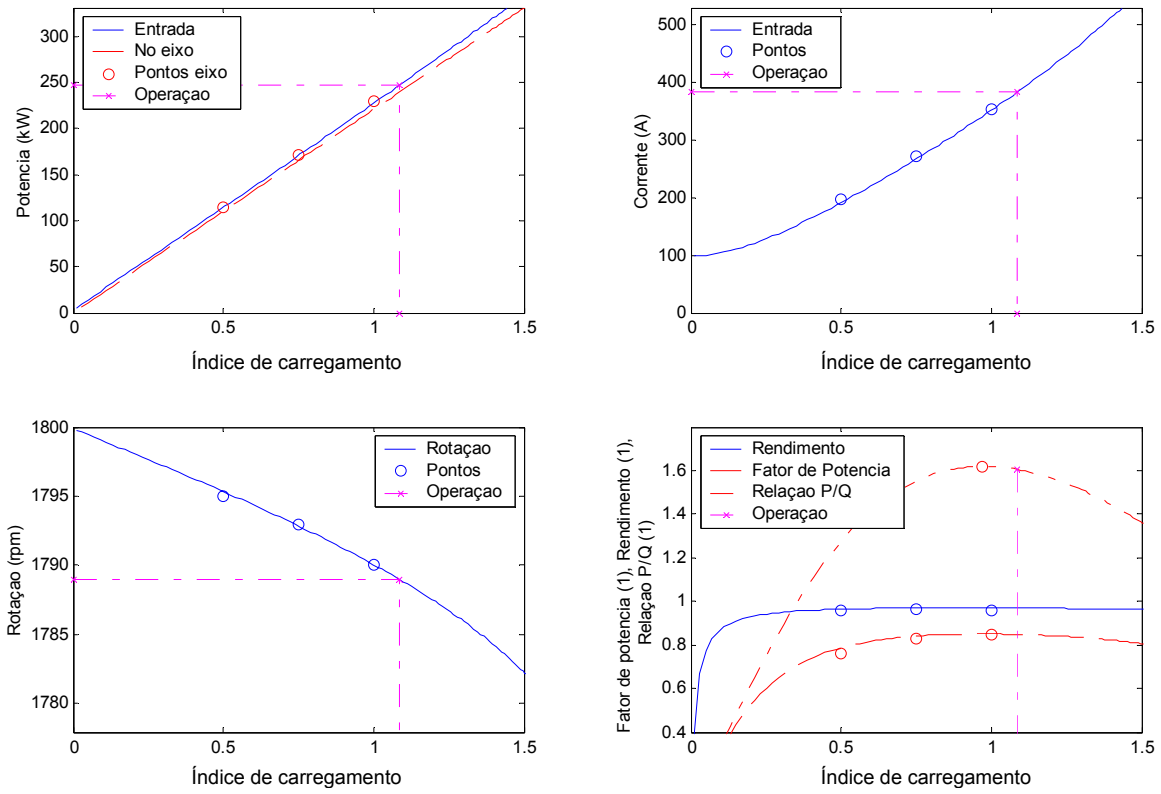


(b) Motor 250 cv: Assentamento Itamarati L06

Figura 5.5. – Curvas características dos motores de 40 e 250 cv dos sistemas da Embrapa Agropecuária Oeste e Assentamento Itamarati ensaiado em abril de 2006



(a) Motor 300 cv: Assentamento Itamarati – C08



(b) Motor 300 cv: Assentamento Itamarati G13

Figura 5.6. – Curvas características dos motores de 300 cv do Assentamento Itamarati ensaiado em abril de 2006

Pode se observar, a partir do relatório e das curvas obtidas pelo programa "motor", que há pequena variação entre o cálculo utilizando o circuito equivalente do motor e a aproximação da curva fornecida pelo fabricante. Assim, na impossibilidade da obtenção dos dados de ensaio para a geração da curva podem ser utilizados os pontos de rendimento fornecidos pelo fabricante ou disponíveis em catálogos, observando as características dos motores.

Os rendimentos dos motores obtidos de catálogos são confiáveis quando o mesmo refere-se ao ano, modelo e fabricante do motor e quando a máquina não tenha passado por processos de rebobinagem. O rendimento, todavia, pode ter seu valor reduzido de 0,1%, condição de boa manutenção, até 1%, com manutenção sem os rigores técnicos, Cao & Bradley (2006).

Verifica-se, ainda, nas Figuras 5.5 e 5.6, que o ponto de maior relação entre a potência ativa e reativa encontra-se próximo ao índice de carregamento igual a um. Desta forma, conclui-se que a relação PQ dos motores de indução trifásicos ensaiados, pode ser utilizada para se determinar o carregamento nominal do motor, onde, normalmente, o equipamento apresenta seu melhor rendimento. São apresentadas na Tabela 5.5 as potências de entrada, no eixo e dissipada, bem como, os carregamentos e rendimentos dos motores ensaiados.

Tabela 5.5. - Carregamento e rendimento dos motores dos pivôs ensaiados na Embrapa Agropecuária Oeste e Assentamento Itamarati I em abril de 2006

	Pivô	Potência de entrada (kW)	Potência nominal (kW)	Potência calculada (kW)	Carregamento (%)	Potência dissipada (kW)	Rendimento (%)
1	Embrapa	37,30	29,44	34,67	1,18	2,63	92,96
2	L06	197,00	184,00	189,67	1,03	7,33	96,28
3	C08	203,10	220,80	197,03	0,89	6,07	97,01
4	G13	247,60	220,80	240,00	1,09	7,60	96,93

Pôde se verificar uma sobrecarga de 18% no motor da Embrapa, ocasionado pelas alterações realizadas no projeto inicial do pivô. Observa-se na Figura 5.5 e 5.6 que os motores não apresentam superdimensionamento e, desta forma, seu ponto de operação está próximo dos valores máximos de rendimento, fator de potência e relação PQ.

Verificam-se, ainda, rendimentos mais elevados nos motores de maior potência, todavia, a energia dissipada nestes equipamentos também é maior. Com rendimento de 96,93%, o motor do pivô G13 consome 7,6 kW de perdas, ao passo que, com 92,96% de rendimento, o motor do pivô da Embrapa Agropecuária Oeste consome 2,63 kW.

De posse da potência no eixo do motor no ponto de operação do equipamento, considerando acoplamento com rendimento igual a um, tem-se a potência de entrada da bomba. Utilizando a metodologia determinada em ABNT (1975) e apresentada no Capítulo III, os rendimentos das bombas podem ser calculados a partir dos dados obtidos do conjunto motor e bomba e do motor, Tabela 5.6.

Tabela 5.6. – Rendimento das bombas ensaiadas na Embrapa Agropecuária Oeste e no Assentamento Itamarati I em abril de 2006

	Pivô	Potência de entrada (kW)	Vazão (m³/h)	Altura manométrica (mca)	Rotação (rpm)	Potência de saída (kW)	Potência dissipada (kW)	Rendimento (%)
1	Embrapa	34,67	89,9	80,9	1774	19,82	14,85	57,16
2	L06	189,67	468,0	115,3	1786*	147,07	42,60	77,54
3	C08	197,03	278,0	169,3	1794	128,22	68,81	65,08
4	G13	240,00	375,0	142,6	1782*	145,67	94,33	60,70

* Valores nominais de placa

Pode se verificar que o menor rendimento encontrado refere-se à bomba do pivô da Embrapa (57,16%) e o maior rendimento ao pivô L06 (77,54%). Utilizando como referência a faixa de rendimento proposta em Azevedo (1998), são apresentados, os valores encontrados para cada bomba em seu ponto de operação,.Figura 5.7.

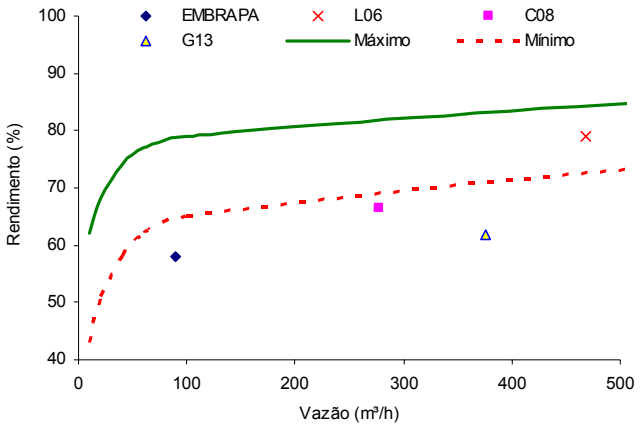


Figura 5.7. – Avaliação dos rendimentos das bombas obtidos no pivô da Embrapa Agropecuária Oeste e no Assentamento Itamarati I em abril de 2006

Verificou-se que a bomba do pivô L06 encontra-se na faixa de rendimento apresentada por Azevedo (1998) e os pivôs da Embrapa, C08 e G13 estão abaixo do mínimo esperado. Uma característica importante que contribui para rendimento obtido na bomba do pivô L06 consiste na forma de sua instalação, ou seja, a bomba opera afogada, abaixo do nível de água.

Consolidando os dados obtidos para os conjuntos motor e bomba, é apresentado na Tabela 5.7 o indicador de eficiência (Equação 3.42), a potência dissipada e o rendimento para o ponto de operação (Equações 3.56 e 3.41).

Tabela 5.7. – Indicador de eficiência nos conjuntos motor e bomba dos pivôs ensaiadas na Embrapa Agropecuária Oeste e Assentamento Itamarati I em abril de 2006.

	Pivô	Potência de entrada no motor (kW)	Potência no eixo (kW)	Potência hidráulica (kW)	Potência dissipada (kW)	Rendimento (%)	Consumo específico (kWh/m³.100m)
1	Embrapa	37,30	34,67	19,82	17,5	53,14	0,513
2	L06	197,00	189,67	147,07	49,9	74,65	0,365
3	C08	203,10	197,03	128,22	74,9	63,13	0,432
4	G13	247,60	240,00	145,67	101,9	58,83	0,463

Observaram-se baixos rendimentos nos conjuntos ensaiados. O menor rendimento refere-se ao conjunto da Embrapa (53,14%), que dissipa 17,5 kW e possui consumo específico igual a 0,513 kWh/(m³.100m). Por outro lado, o maior rendimento refere-se ao conjunto L06 (74,65%), que dissipa 49,9 kW e possui consumo específico igual a 0,365 kWh/(m³.100m). Deve-se ainda destacar a potência de 101,9 kW dissipada no conjunto motor e bomba do pivô G13 que, com potência de entrada igual 247,6 kW, possui rendimento igual a 58,83%.

5.3. Tubulação de sucção

Considerando a inexistência de manômetros na tubulação de sucção, a altura manométrica nesta tubulação foi obtida por meio de cálculos. Levantadas as características da tubulação de sucção (Figura 5.8), a potência elétrica dissipada (Equação 3.45), os indicadores de eficiência energética relativos a este elemento (Equações 3.46 e 3.47), são apresentados na Tabela 5.8.

(a) L06 **(b) G13**

Figura 5.8. – Tubulação de sucção dos pivôs L06 (a) e G13 (b) do Assentamento Itamarati I

Tabela 5.8. – Indicador de eficiência das tubulações de sucção dos pivôs ensaiadas na Embrapa Agropecuária Oeste e Assentamento Itamarati I ensaiados em abril de 2006.

Pivô		Indicador de Eficiência		Potência Elétrica (kW)
		Δh_{100} (mca)	C_{ENT} (kWh/(m³.km))	
1	Embrapa	3,64	0,099	0,17
2	L06	1,02	0,028	0,52
3	C08	4,72	0,129	0,45
4	G13	5,22	0,142	1,36

Pode se verificar na Tabela 5.8 uma variação no Consumo Específico Normalizado na Tubulação (C_{ENT}) entre 0,028 e 0,142 kWh/(m³.km), o que propicia potências elétricas entre 0,52 e 1,36 kW para a tubulação de sucção do pivô L06 e do G13, respectivamente. Verifica-se ainda que, com valores inferiores a 1,5 kW, as potências elétricas dissipadas nas tubulações de sucção encontradas representam pequena influência nas perdas gerais do equipamento.

5.4. Adutora e linha de pressão

A avaliação da adutora e linha de pressão foi realizada a partir de suas características e condições de instalação (Figuras 5.9b e 5.10). O sistema de irrigação possui um manômetro na saída da bomba (Figuras 5.1b) e outro no ponto do pivô (Figura 5.9a). Assim, com o desnível geométrico obtido por meio de um GPS e as demais características representadas na Figura 3.9 e apresentadas na Tabela 5.9, pode se determinar os indicadores de eficiência da tubulação adutora (Tabela 5.10).

(a) Embrapa **(b) G13**

Figura 5.9. – (a) Manômetro no ponto do pivô da Embrapa Agropecuária Oeste e (b) Trecho da adutora do pivô G13 do Assentamento Itamarati I

(a) **(b)** **(c)**

Figura 5.10. – Tubulação de adutora em ferro galvanizado (a), Ferro com revestimento em cimento: (b) em bom estado, (c) corroído

Tabela 5.9. – Características das adutoras dos pivôs ensaiadas na Embrapa Agropecuária Oeste e Assentamento Itamarati I em abril de 2006.

Pivô		Manômetro 01			Manômetro 02			Desnível	Adutora			
		Pg1 (kgf/cm²)	Z1 (m)	D1 (mm)	Pg3 (kgf/cm²)	Z3 (m)	D3 (mm)	hg (m)	D2 (mm)	l (m)	Material*	e (m)
1	Embrapa	7,8	0,33	80	4,9	1,95	199,2	17	150	628	F.G.	0,00030
1	L06	11,5	0,85	150	5,9	1,55	199,2	34	300	1142	F.C.	0,00015
2	C08	16,5	0,90	150	5,0	1,22	199,2	30	200	1466	F.C.	0,00015
3	G13	13,6	1,00	150	6,8	0,15	199,2	58	300	2298	F.C.	0,00015

(*) F.G. - Ferro galvanizado, F.C. - Ferro cimentado

Utilizando os dados apresentados na Tabela 5.9 foi possível determinar a energia de posição, pressão e velocidade no trecho ensaiado e, a partir da Equação 3.34, calcular a perda de carga. Obtidas as perdas de carga, os indicadores de eficiência Perda de Carga em 100 m e Consumo Específico Normalizado na Tubulação foram obtidos através das Equações 3.46 e 3.47. A potência elétrica dissipada na adutora e linha de pressão é determinada pela Equação 3.45. Calculando-se a perda de carga na adutora e linha de pressão a partir dos dados da Tabela 5.9 foi possível também determinar seus valores teóricos (Tabela 5.10).

Tabela 5.10. – Indicadores de eficiência energética na adutora e linha de pressão dos pivôs ensaiadas na Embrapa Agropecuária Oeste e Assentamento Itamarati I em abril de 2006.

	Pivô	Ensaiado				Perda de carga calculada (mca)	Variação na perda de carga (%)
		Perda de carga (mca)	Indicador de eficiência		Potência elétrica (kW)		
			Δh_{100} (mca)	C_{ENT} (kWh/(m³.km)			
1	Embrapa	11,7	1,87	0,051	5,34	10,94	6,5
2	L06	21,2	1,85	0,051	36,94	12,34	41,8
3	C08	85,6	5,84	0,159	102,55	44,05	48,5
4	G13	12,0	0,52	0,014	20,82	15,78	-31,5

Pode se verificar na Tabela 5.10 uma variação de até 48,5% entre os valores medidos e calculados para a perda de carga. Analisando os sistemas ensaiados, foi possível observar três fatores determinantes para esta variação.

Para o cálculo da perda de carga é necessário conhecer a rugosidade da tubulação que, por sua vez, varia ao longo do tempo. Utilizando valores teóricos normais para se determinar esta perda de carga, conclui-se que a adutora do pivô C08 apresenta incrustações e, possivelmente, exista sedimentação de sólidos em sua tubulação, justificando a variação de 44,05 mca do valor calculado para 85,6 mca na perda de carga obtida através do ensaio.

Outros problemas que justificariam o valor da altura manométrica obtida referem-se a existência de trechos da tubulação em menor diâmetro, ou ainda, problemas na abertura do registro ou na válvula de retenção.

Outra fonte de erro pertinente aos demais pivôs ensaiados consiste no processo da determinação da altura geométrica do trecho ensaiado. A leitura da altura geométrica foi realizada por meio de um GPS com barômetro que, para eliminação do erro proposital, são

permitidas somente quando se trata de medida relativa, podendo, todavia, apresentar erro de até 3 m. Pôde, ainda, se avaliar a precisão dos manômetros utilizados onde, com escala em kgf/cm², sua menor divisão representa um metro de coluna de água.

Assim, a não disponibilidade do coeficiente de rugosidade ou informações sobre sedimentações na tubulação implica em erros não estimáveis para os valores calculados. A utilização de GPS e manômetros de uso geral, por sua vez, pode levar a um erro de até 4 mca nos dados obtidos.

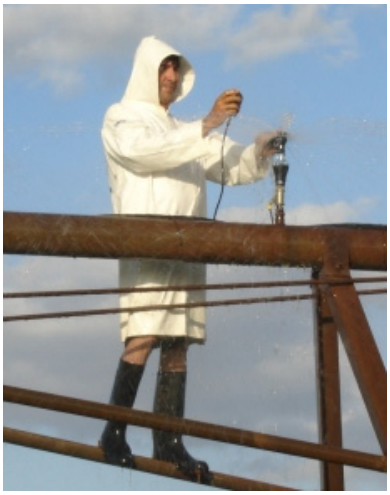
Considerando os dados da Tabela 5.10, pode se verificar que a perda de carga em 100 m, indicador normalmente utilizado pelos projetistas, variou nas adutoras ensaiada entre 0,52 e 5,84 mca o que propiciaram perda de potência elétrica de 5,35 kW na adutora da Embrapa a 102,41 kW na adutora do pivô C08 do Assentamento Itamarati I. Desta forma, o indicador Consumo Específico Normalizado na Tubulação variou entre 0,014 kWh/(m³.km) para o pivô G13 a 0,159 kWh/(m³.km) para o pivô C08, ou seja, a adutora do pivô C08 consome 11,4 vezes mais energia específica que a adutora do pivô G13.

5.5. Linha lateral

A energia dissipada na linha lateral de um sistema de irrigação é resultado da perda por atrito ao longo da tubulação e localizadas nas singularidades do sistema. A partir do diagrama apresentado na Figura 3.11 e dos dados da linha lateral (Tabela 4.6) é possível se ensaiar a linha lateral.

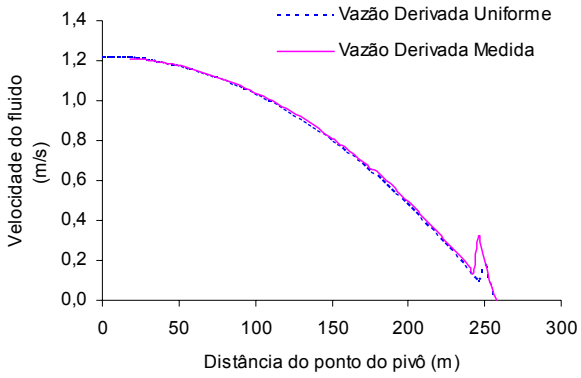
O ensaio consistiu, basicamente, na determinação do perfil topográfico ao longo da linha lateral e na medição da pressão na mesma. O perfil topográfico foi levantado com um nível Heerbrugg Wild NA 2 GPM3 e uma trena de 50 m e a pressão na tubulação determinada por um manômetro de 0 a 10 bar (Figura 5.11) conectado antes do regulador de pressão (Figura 5.12). Na Figura 5.13 é apresentado o perfil da velocidade do fluido na tubulação.

Figura 5.11. – Manômetro e acessórios para medição da pressão ao longo da linha lateral

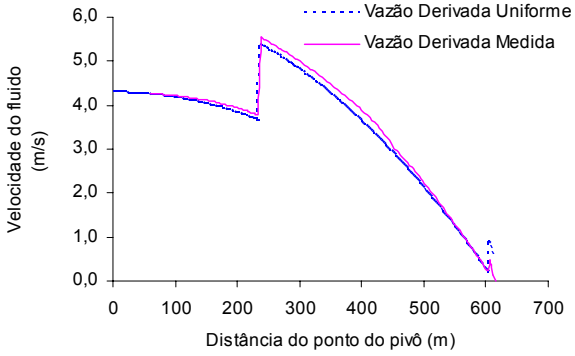


(a) **(b)**

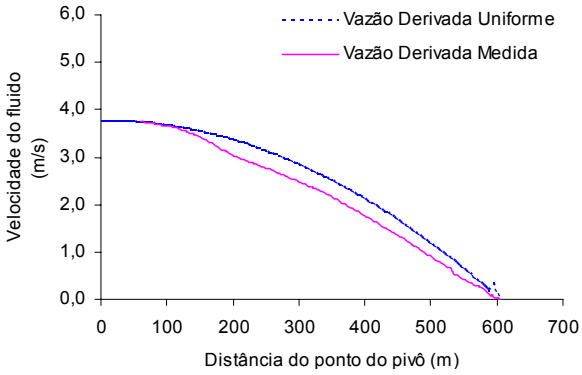
Figura 5.12. – Leitura da pressão ao longo da linha lateral: (a) Embrapa Agropecuária Oeste, (b) G13 Assentamento Itamarati I



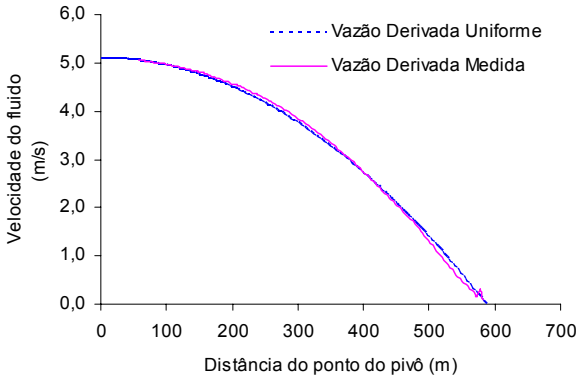
(a) Embrapa



(b) L06



(c) C08



(d) G13

Figura 5.13. – Velocidade do fluido ao longo da linha lateral nos pivôs ensaiados na Embrapa Agropecuária Oeste e no Assentamento Itamarati I em abril de 2006

O perfil da velocidade do fluido ao longo da tubulação da linha lateral, Figura 5.13, pode ser obtido a partir da vazão quando se considera uma distribuição uniforme da lâmina de água e quando se considera a distribuição coletada conforme Figura 4.6.

Pode se observar uma diferença nas curvas de velocidade para vazão derivada uniforme e para vazão derivada medida do pivô C08 que se justifica pelo vazamento e pela utilização de difusores fora de especificação a 100 metros do ponto do pivô. Os difusores utilizados, com vazão superior ao necessário, aplicam lâmina maior neste intervalo conforme pode ser verificada na Figura 4.10.

Pode se verificar, a partir da Figura 5.13, que a velocidade do fluido no início da linha lateral dos pivôs do Assentamento Itamarati I são superiores a 3,75 m/s, condição que propicia elevadas perdas de carga e de potência neste elemento do sistema de irrigação.

Considerando as leituras realizadas de pressão e perfil topográfico, é possível se determinar a linha de perda de carga na lateral e compará-la com os valores calculados a partir da Figura 5.14.

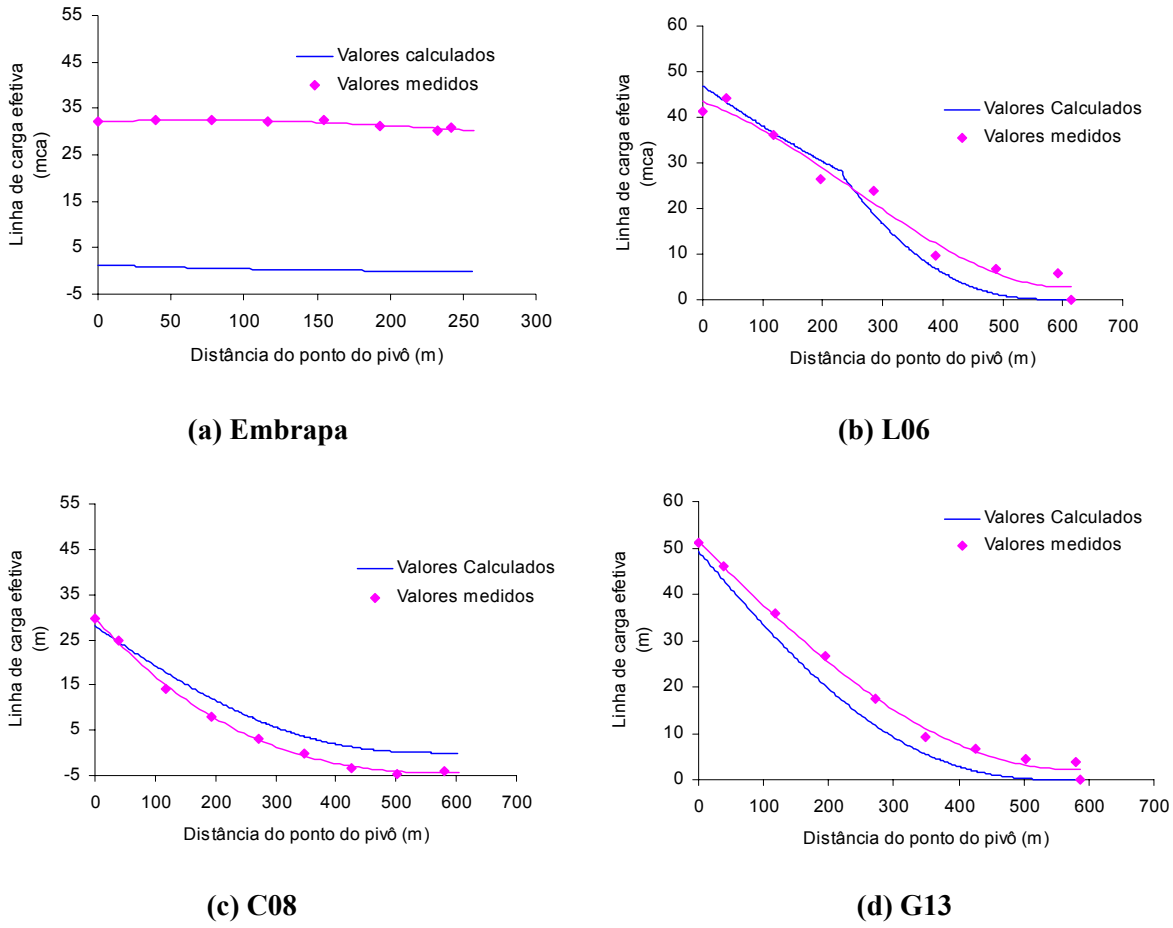


Figura 5.14. – Linha de carga medida e calculada nas laterais dos pivôs ensaiados na Embrapa Agropecuária Oeste e no Assentamento Itamarati I

A perda de carga na linha lateral devido ao atrito na tubulação aérea do pivô da Embrapa Agropecuária Oeste alcança um máximo de 1,42 mca em seu comprimento total, todavia, uma sobre-pressão de 30,48 mca é dissipada nos reguladores de pressão devido a substituição dos aspersores de média pressão, 35 mca do projeto inicial, por difusores de 14,1 mca sem alterar a bomba.

A perda de carga na linha lateral do pivô L06 alcança 44,3 mca devido à alta velocidade do fluído na tubulação (4,27 m/s). Da mesma forma, a perda de carga na linha lateral do pivô C08 obtida é de 28,9 mca e, para o pivô G13, 45,9 mca. Pode se observar, ainda no pivô L06, a mudança da tendência da curva de perda de carga quando a tubulação da linha lateral é reduzida de 8" para 6 5/8" na distância de 234,5 m do ponto do pivô.

Verifica-se também, na Figura 5.14, que a pressão necessária para o funcionamento normal dos aspersores do pivô C08 não é alcançada a partir da leitura realizada a 348,3 m do centro do pivô, ou seja, a linha de pressão é menor que zero.

A maior perda de carga observada nas linhas laterais ensaiadas refere-se ao pivô G13, 45,9 mca, resultado de uma velocidade de até 5,05 m/s no fluido dentro da tubulação. A perda de carga pode ainda ser vista normalizada para 100 m na Figura 5.15.

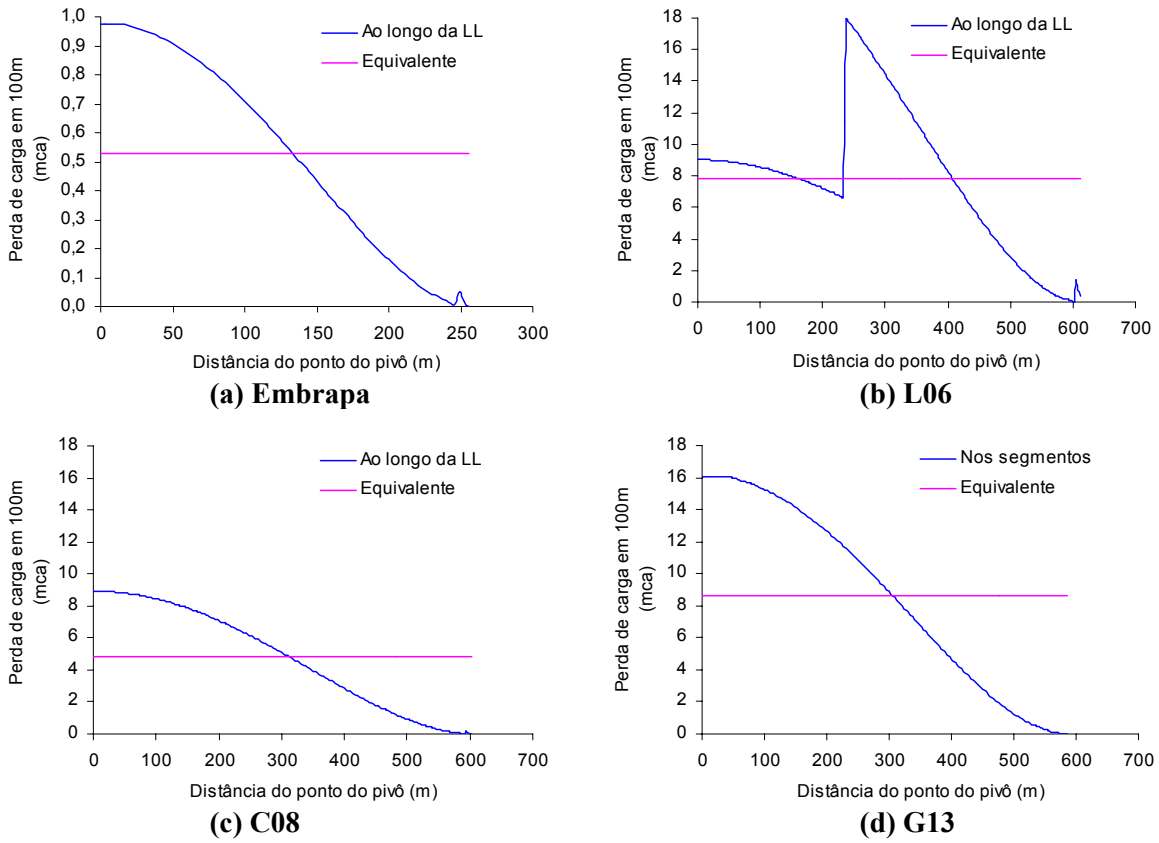


Figura 5.15. – Perda de carga em 100 m ao longo das linhas laterais ensaiadas na Embrapa Agropecuária Oeste e no Assentamento Itamarati I em abril de 2006

Verifica-se, a partir da Figura 5.15, uma variação na perda de carga em 100 m de 0,98 mca a 18,06 mca nos pivôs da Embrapa Agropecuária Oeste e L06, respectivamente. Da mesma forma, o valor médio equivalente, por sua vez, varia entre 0,53 mca e 7,8 mca. O problema propiciado pela perda de carga na linha lateral pode ser verificado através da análise da curva da potência elétrica dissipada ao longo da tubulação, Figura 5.16.

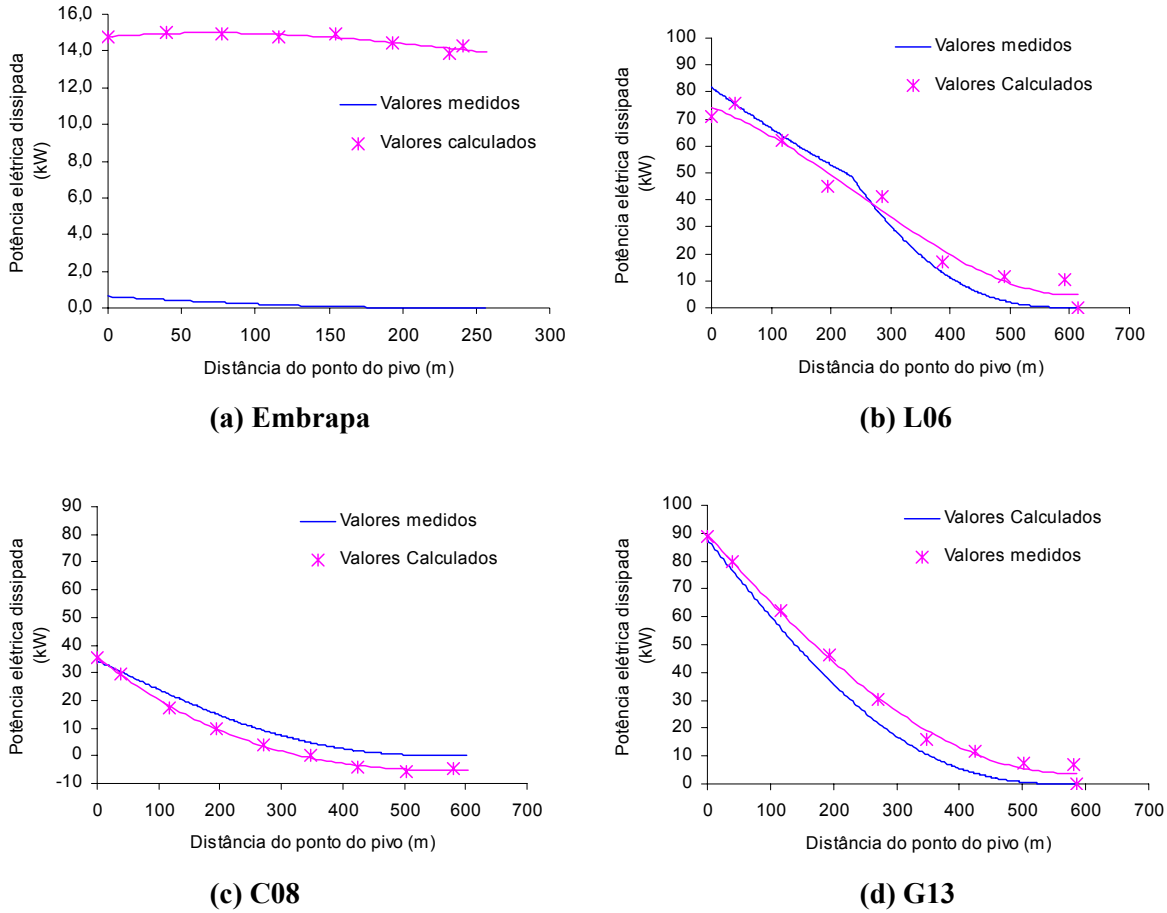


Figura 5.16. – Potência elétrica dissipada ao longo das linhas laterais ensaiadas na Embrapa Agropecuária Oeste e no Assentamento Itamarati I em abril de 2006

Pode se verificar, considerando o gráfico da potência dissipada na tubulação da linha lateral e reguladores de pressão que, para o pivô da Embrapa, este elemento consome 14,72 kW para garantir a pressão necessária no difusor. É importante ressaltar que, a potência necessária neste elemento é de 1,90 kW, sendo 12,82 kW dissipados nos reguladores de pressão devido a sobre-pressão fornecida pela bomba. Em outras palavras, a bomba consome 12,82 kW para propiciar ao fluido uma altura manométrica de 28,4 mca além do necessário que, para manter a uniformidade da distribuição de água, o regulador de pressão dissipa.

A maior potência dissipada dentre as linhas laterais ensaiadas é do pivô G13. Devido, principalmente, a elevada velocidade do fluido, este elemento dissipa 88,48 kW em sua extensão. Pode se observar que este pivô necessita 20,82 kW para deslocar o líquido em sua adutora de 2298 m enquanto que precisa de 88,48 kW para o deslocamento do líquido na linha lateral de 586,2 m.

Compilando os valores obtidos no ensaio e os valores calculados para a perda de carga na linha lateral, é possível calcular os indicadores de eficiência Perda de Carga em 100m e Consumo Específico Normalizado na Tubulação (Tabela 5.11).

Tabela 5.11. – Indicador de eficiência das linhas laterais dos pivôs ensaiadas na Embrapa Agropecuária Oeste e no Assentamento Itamarati I em abril de 2006.

Pivô		Ensaio			Potência Elétrica (KW)	Perda de carga calculada (mca)	Variação na perda de carga (%)
		Perda de carga (mca)	Δh_{100} (mca)	C_{ENT} (kWh/(m³.km))			
1	Embrapa	32,0	12,42	0,338	14,72	1,42	95,6
2	L06	42,2	6,72	0,181	71,85	46,48	-10,1
3	C08	31,6	5,24	0,143	37,90	44,06	-39,4
4	G13	50,9	8,70	0,247	88,48	48,52	4,7

Pode se verificar, a partir da Tabela 5.11, que a situação mais crítica refere-se à linha lateral e regulador de pressão da Embrapa. A Perda de Carga em 100 m encontrada é igual a 12,42 mca que, devido ao excesso de pressão fornecido à linha lateral, propicia um Consumo Específico Normalizado Tubulação de 0,339 kWh/(m³.km). A perda de carga calculada para a linha lateral da Embrapa é igual a 1,42 mca.

Considerando os indicadores para a linha lateral dos pivôs do Assentamento Itamarati I, o pivô G13 possui Perda de Carga em 100 metros igual a 8,7 (mca) e C_{ENT} igual a 0,247 kWh/(m³.km), o que caracteriza uma potência elétrica de 88,48 kW dissipada neste elemento.

A variação entre os valores ensaiados e calculados justifica-se para o pivô da Embrapa pela utilização no cálculo da pressão necessária e não a altura manométrica dissipada nos reguladores de pressão. A variação observada nos pivôs do Assentamento Itamarati I, por sua

vez, surge devido à precisão do manômetro utilizado e a utilização do coeficiente de rugosidade normal para a tubulação, haja vista, não se conhecer os valores reais, uma vez que eles variam ao longo do tempo e das condições de uso do sistema.

5.6. Aspersão

A potência associada à aspersão consiste na energia absorvida pelo motor do sistema hidráulico para propiciar pressão e vazão necessárias à formação e distribuição das gotas de água na área irrigada. Desta forma, a energia consumida por este elemento está associada à tecnologia utilizada nos difusores caracterizada pela sua pressão e Eficiência de Aplicação.

Considerando a vazão bombeada (Qs), a lâmina coletada a partir do ensaio de avaliação de pivô, apresentado no Capítulo IV e uma área adequadamente irrigada igual a 80%, é possível se determinar as Eficiências de Aplicação em Potencial, de Distribuição e de Aplicação, bem como calcular o Consumo Específico no Aspersor (C_{Easp}), Equação 3.49 e a potência elétrica dissipada neste elemento do pivô, Tabela 5.12.

Tabela 5.12. – Indicador de eficiência energética dos aspersores dos sistemas de irrigação ensaiados na Embrapa Agropecuária Oeste e Assentamento Itamarati I em abril de 2006.

	Pivô	Lâmina diária (mm)				Eficiência de Aplicação em Potencial (1)	Eficiência de Distribuição (%)	Eficiência de Aplicação (%)	C_{Easp} (kWh/(mm.ha))	Potência elétrica (kW)
		Bruta	Coletada	Útil pa=80%	Perdida					
1	Embrapa	8,98	9,07	7,95	1,03	1,01	87,69	88,54	0,67	5,33
2	L06	8,27	7,32	6,72	1,55	0,89	91,73	81,28	1,08	40,78
3	C08	5,04	4,15	3,23	1,81	0,82	77,83	64,11	2,97	52,37
4	G13	7,30	6,86	5,96	1,34	0,94	86,94	81,67	1,13	38,48

Desta forma, pode se observar, a partir da Tabela 5.12, que os difusores do pivô da Embrapa consomem 0,67 kWh/(mm.ha), ao passo que, o pivô C08 do Assentamento Itamarati I necessita de 2,97 kWh/(mm.ha) para garantir um milímetro de lâmina d'água em pelo menos 80% de um hectare. Com isto, se associa potências aos difusores variando entre 40,78 kW e

52,37 kW nos pivôs do Assentamento Itamarati I, cujas linhas laterais possuem comprimentos aproximados, e 5,33 kW para os difusores do pivô da Embrapa.

Para explicar esta variação na energia consumida pelos aspersores nos equipamentos ensaiados é necessário detalhar a Eficiência de Aplicação de cada sistema, visto que a pressão no aspersor é a mesma nos pivôs ensaiados.

Como apresentado no Capítulo III, a Eficiência de Aplicação é a relação entre a lâmina útil, considerada para 80% da área adequadamente irrigada, e a lâmina bruta, obtida da vazão e área irrigada para 21 horas de funcionamento diário, Tabela 5.12.

A partir da Tabela 5.12 pode se observar que a menor Eficiência de Aplicação encontra-se no pivô C08 com 64,11% e a maior no pivô da Embrapa, com 88,54%. Esta baixa eficiência deve-se a vazamentos na linha lateral, Figura 5.17, perdas por evaporação e deriva pelo vento e, mais significativamente, ao grande volume de água percolado, Figura 5.18.

Observa-se ainda que, a utilização dos difusores em pendurais (Figura 4.6a) proporcionaram, ao pivô da Embrapa, Eficiência de Aplicação em Potencial próximo a um, ao passo que a utilização dos difusores acima da linha lateral, bem como influência dos desgastes dos mesmos, velocidade do vento e umidade relativa (Tabela 4.7) levaram a eficiência de 0,89, 0,82 e 0,94% nos pivôs L06, C08 e G13 respectivamente.

Figura 5.17. – Vazamento no ponto do pivô G13 do Assentamento Itamarati I em abril de 2006

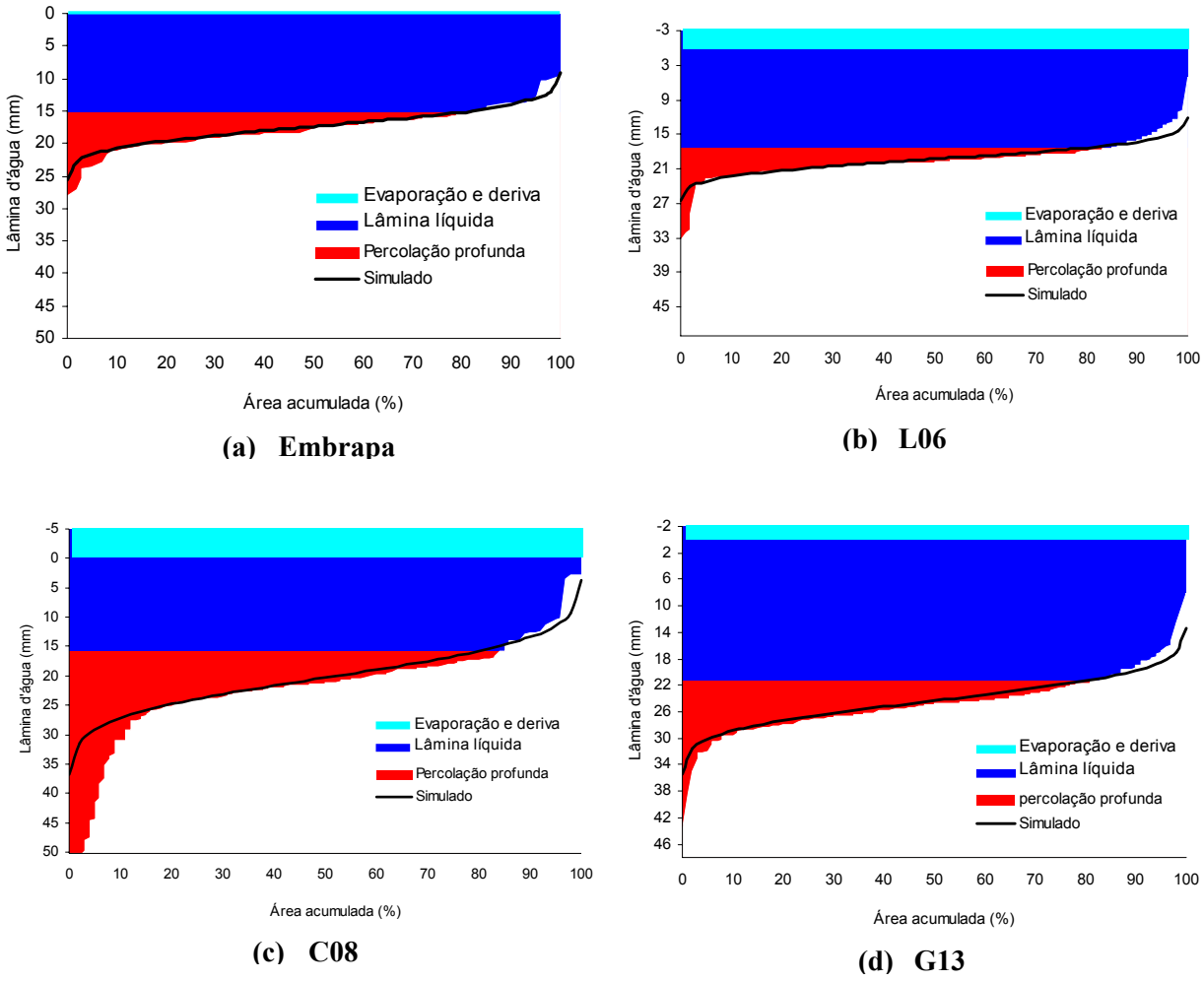


Figura 5.18. – Distribuição das lâminas de água nos pivôs ensaiados na Embrapa Agropecuária Oeste e Assentamento Itamarati I em abril de 2006

A Eficiência de Aplicação pode ser visualizada na Figura 5.18. Como pode ser observado, uma lâmina equivalente está associada à evaporação, deriva e vazamentos, outra fica disponível na zona radicular da planta e outra percola profundamente. Assim, das vazões fornecidas pelos sistemas de irrigação, perde-se diariamente lâminas de água equivalentes a 1,03, 1,55, 1,81 e 1,34 mm por evaporação, deriva, vazamentos e percolação profunda nos pivôs da Embrapa, L06, C08 e G13 respectivamente.

Desta forma, o indicador de eficiência energética Consumo Específico nos Aspersores, proposto neste trabalho, é suficiente para avaliar este elemento do sistema de irrigação, possibilitando associar a energia consumida pelos aspersores com a Eficiência de Aplicação a partir da fixação de uma área adequadamente irrigada.

5.7. Sistema de irrigação

O sistema de irrigação, conforme apresentado no Capítulo III, pode ser caracterizado considerando a vazão bombeada, fluxo energético e a vazão útil, onde são determinados os indicadores de eficiência.

5.7.1 Fluxo energético

Calculando a potência dissipada no conjunto motor e bomba, Equação 3.56, as perdas na sucção, adutora, linha lateral e aspersores, determina-se a potência útil do pivô central para a vazão total bombeada, Equação 3.57. Esta estratificação de potência pode ser representada em gráficos de setores (Figura 5.19).

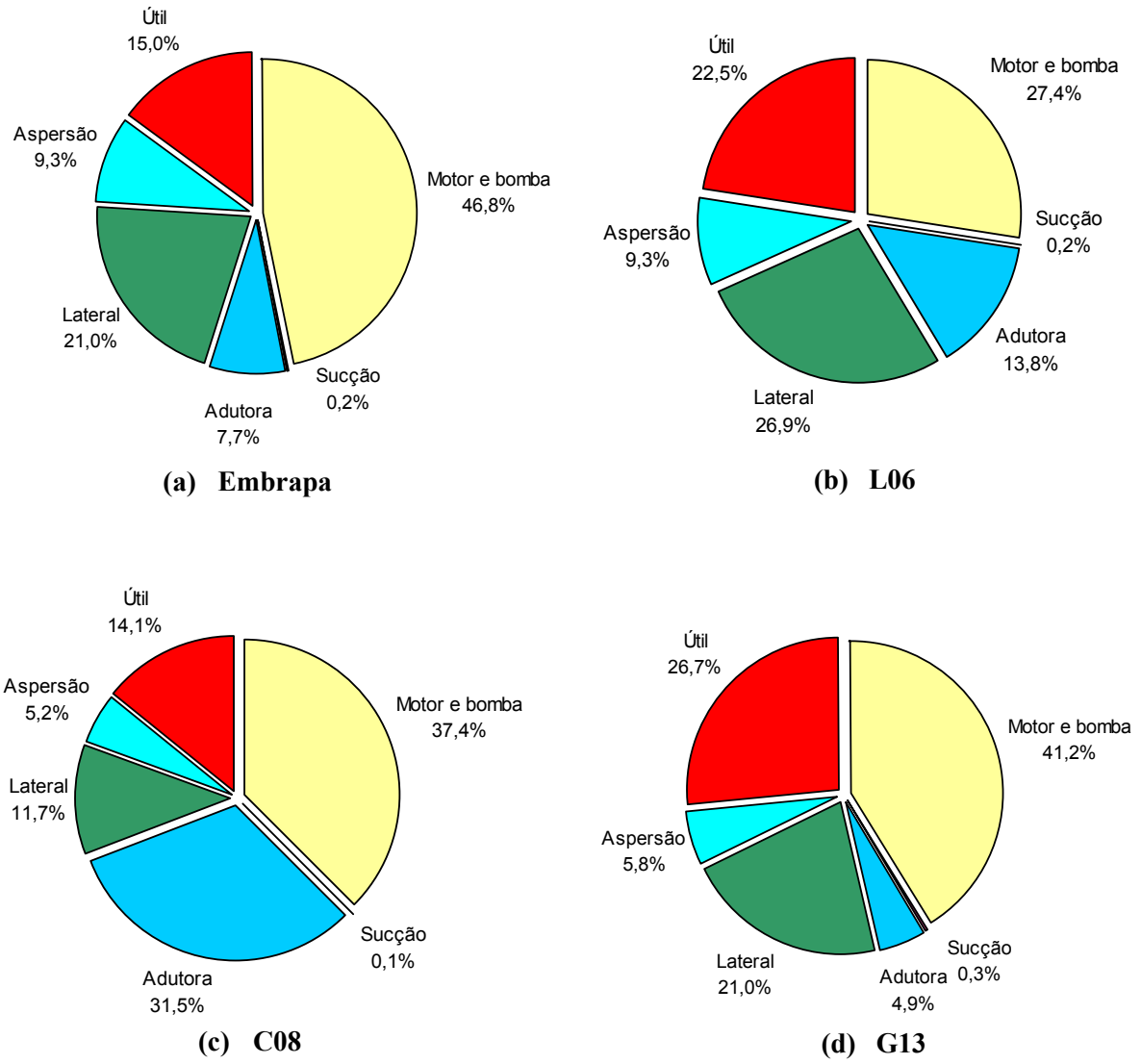


Figura 5.19. – Fluxo energético nos equipamentos de irrigação ensaiados em abril de 2006

A partir da Figura 5.19, observa-se que o pivô da Embrapa consome 46,8% de sua energia no conjunto motor e bomba para a conversão de energia elétrica para hidráulica, enquanto que o pivô L06 necessita de 27,4%.

Da mesma forma, a potência dissipada na adutora do pivô C08 com 1466 m equivale a 31,5% enquanto que, com 2298 m a tubulação do pivô G13 perde 4,9%. Considerando que, quando se analisa o equipamento pivô central, sob este enfoque, não é utilizada a Eficiência de Aplicação, observa-se, também, na Figura 5.19, pequena porcentagem de potência associada ao aspersor, ou seja, uma variação entre 5,2% e 9,3% para os pivôs C08 e Embrapa, respectivamente.

A análise do fluxo energético possibilita uma visão sobre as potências dissipadas em cada elemento, todavia, fica restrita ao equipamento, pois considera que toda a água bombeada é aproveitada. Apesar de consistir-se de uma importante representação, é necessário considerar também a disponibilidade da água para a cultura que, por sua vez, é representado pela Eficiência de Aplicação como será apresentado no Item 5.7.2 para a determinação dos indicadores de eficiência energética.

5.7.2 Indicadores de eficiência do sistema de irrigação

Considerando a avaliação desenvolvida nos itens 5.2 a 5.6 quando a Eficiência de Aplicação garante 80% da área adequadamente irrigada, neste item serão sintetizados e comparados os indicadores de eficiência de irrigação obtidos, Tabela 5.13 e Figura 5.20.

Pode se observar na Figura 5.20 que o Consumo Específico Normalizado da bomba da Embrapa é o maior dos equipamentos ensaiados. Assim, o conjunto motor e bomba da Embrapa necessita de 0,512 kWh para bombear um metro cúbico de água em 100 m de altura manométrica, enquanto que os pivôs L06, C08 e G13 consomem 0,376, 0,436 e 0,463 kWh/(m³.100m), respectivamente.

Para o ponto de operação ensaiado, os fatores de potência obtidos foram iguais a 84,86% para o pivô da Embrapa, 84,23%, 84,98% e 84,88% para os pivôs L06, C08 e G13 do Assentamento Itamarati I, respectivamente. Observou-se, ainda, que as relações entre potência ativa e reativa, próximas ao ponto máximo, caracterizam o melhor acoplamento entre motor e bomba, uma vez que determinam o maior rendimento do motor.

Apesar da tubulação de sucção apresentar Consumo Específico maior do que da adutora, está associada a comprimentos iguais ou inferiores a 29 metros, assim sua perda energética é relativamente pequena, ou seja, iguais ou menores que 1,42 kW.

Tabela 5.13. – Indicadores de eficiência energética nos pivôs ensaiados na Embrapa Agropecuária Oeste e Assentamento Itamarati I em abril de 2006

Pivô		Motor e bomba		Sucção		Adutora	
		C_{EN} (kWh/(m³.100m))	n (%)	C_{ENT} (kWh/(m³.km))	Δh_{100} (mca)	C_{ENT} (kWh/(m³.km))	Δh_{100} (mca)
1	Embrapa	0,512	53,2	0,099	3,64	0,051	1,87
2	L06	0,376	72,5	0,028	1,02	0,051	1,85
3	C08	0,436	62,6	0,129	4,72	0,159	5,84
4	G13	0,463	58,8	0,142	5,23	0,014	0,52

Continuação

Pivô		Lateral		Aspersão		Sistema de irrigação		
		C_{ENT} (kWh/(m³.km))	Δh_{100} (mca/100m)	C_{Easp} (kWh/(mm.ha))	EA_{80} (%)	C_{EI} (kWh/m³)	C_{ENI} (kWh/(mm.ha.100m))	E_I (%)
1	Embrapa	0,338	12,42	0,670	88,5	0,42	20,47	13,3
2	L06	0,183	6,72	1,080	78,1	0,42	15,01	18,2
3	C08	0,143	5,24	2,970	64,1	0,73	30,47	8,9
4	G13	0,247	8,70	1,260	81,7	0,66	12,49	21,8

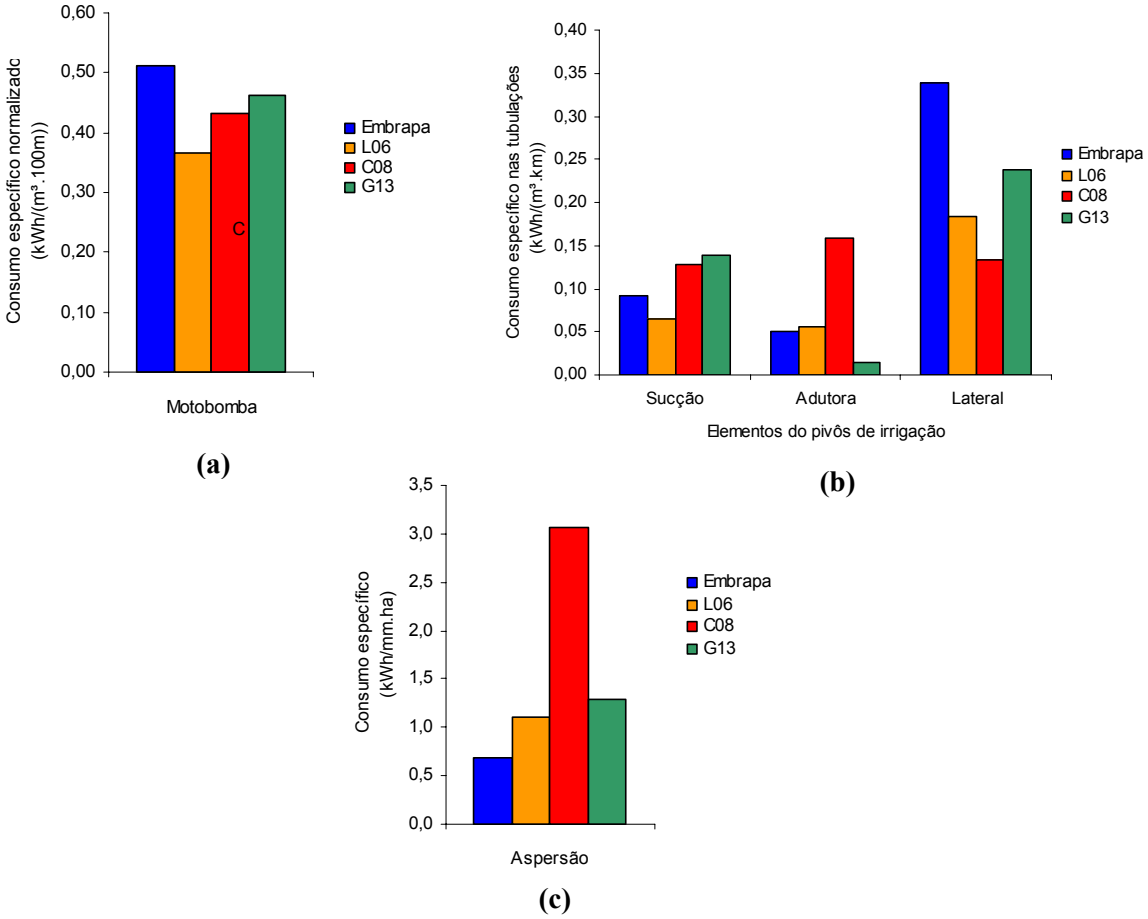


Figura 5.20. – Indicadores de eficiência energética nos elementos dos sistemas de irrigação ensaiados em abril de 2006

Destaca-se, ainda, na Figura 5.20, o Consumo Específico Normalizado da adutora do pivô C08, pois, enquanto esta tubulação consome 0,014 kWh no pivô G13, este pivô necessita 0,159 kWh para bombear um metro cúbico em um quilômetro de tubulação, ou seja, 11,4 vezes maior.

Outro ponto a ser destacado consiste no indicador de eficiência da linha lateral. Observa-se um Consumo Específico Normalizado na Tubulação de 0,338 kWh/(m³.km) neste elemento do pivô da Embrapa devido, como já apresentado, ao excesso de pressão dissipado nos reguladores. Por outro lado, 0,183, 0,143 e 0,247 kWh/(m³.km) representam as perdas por atrito nesta tubulação dos pivôs L06, C08 e G13, respectivamente.

Na Figura 5.20 (c) deve-se observar o Consumo Específico associado ao aspersor do pivô C08. Este pivô necessita de 2,97 kWh/(mm.ha), ao passo que o menor valor encontrado refere-se ao pivô da Embrapa, 0,67 kWh/(mm.ha).

Deve se verificar, ainda, que um metro cúbico equivale a 10^{-1} mm.ha, unidade mais representativa para avaliação de aspersores. Por este motivo, a escala utilizada na Figura 5.20c é aproximadamente 10 vezes maior do que a utilizada nos indicadores das tubulações, Figuras 5.20a e 5.20b. Sobre este aspecto, quando o consumo específico refere-se a metro cúbico, este está associado a vazão do sistema (Q_S) e quando se refere a milímetro hectare é utilizada a vazão útil para uma parcela com 80% de sua área adequadamente irrigada.

Avaliados os elementos, foi possível calcular três indicadores de eficiência energética para o sistema de irrigação completo. Trata-se do Consumo Específico (C_E), usualmente utilizado pelos profissionais da área, o Consumo Específico Normalizado na Irrigação (C_{ENI}) e a Eficiência da Irrigação (E_I) proposta neste trabalho, conforme Tabela 5.13 e Figura 5.21.

O Consumo Específico pode fornecer diretamente a energia por volume de água bombeado. Trata-se, então, de um indicador dependente das condições topográficas locais, todavia, importante para comparação entre diferentes projetos de um mesmo sistema de irrigação e para o acompanhamento da depreciação da eficiência do equipamento.

O Consumo Específico Normalizado na Irrigação para uma lâmina útil garantida em 80% da área, proposto neste trabalho, consiste em um indicador geral, possibilitando os sistemas de irrigação pivôs centrais serem comparados entre si. A partir dos ensaios realizados foram determinados valores iguais a 20,47, 15,01, 30,47 e 12,49 kWh/(mm.ha.100m) para o pivô da Embrapa e os pivôs L06, C08 e G13 do Assentamento Itamarati I respectivamente (Tabela 5.13 e Figura 5.21).

Pode se observar que, apesar do conjunto motor e bomba do pivô G13 apresentar o terceiro pior rendimento e consumo específico, Tabela 5.7 e 5.13, na avaliação geral, utilizando o Consumo Específico Normalizado na Irrigação, é o pivô mais eficiente.

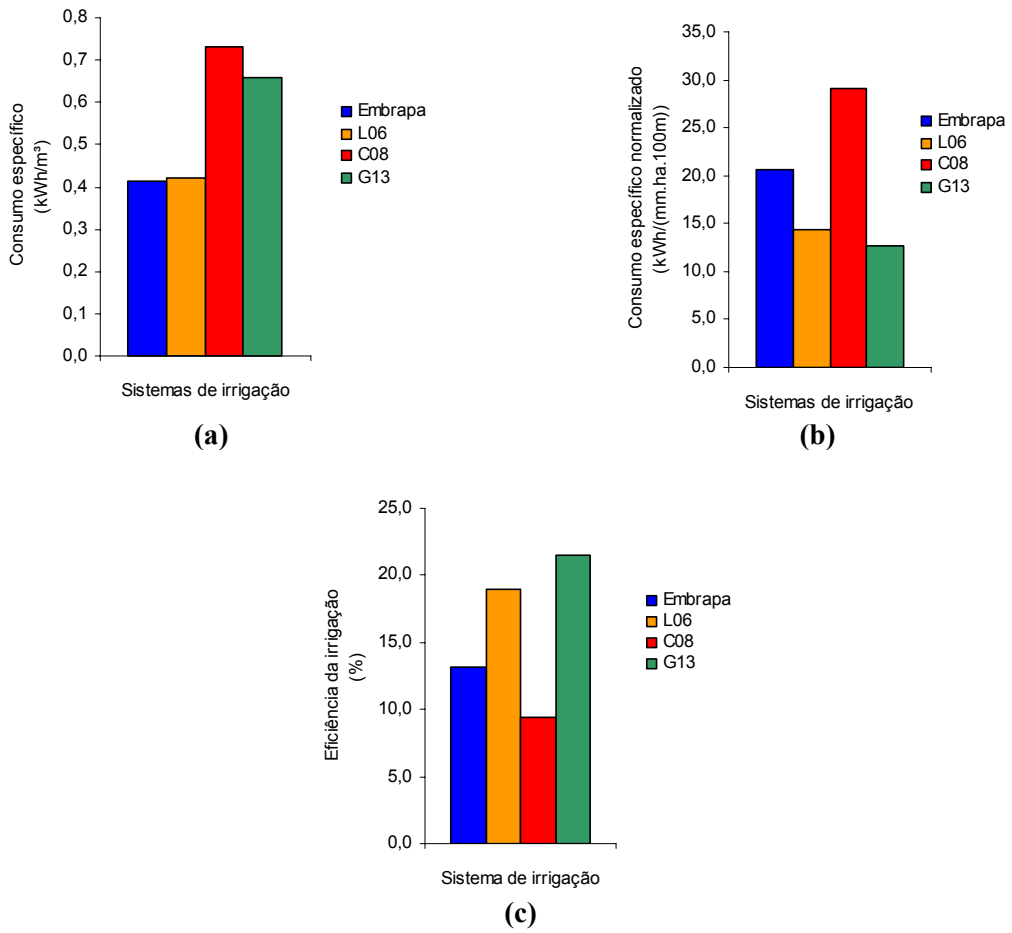


Figura 5.21. – Indicadores de eficiência energética (a) Consumo Específico, (b) Consumo Específico Normalizado, (c) Eficiência da Irrigação dos sistemas ensaiados na Embrapa Agropecuária Oeste e Assentamento Itamarati I em abril de 2006

Avaliando os indicadores energéticos dos sistemas de irrigação ensaiados e apresentados na Tabela 5.13 pode-se determinar ainda que, o pivô C08, com Eficiência de Irrigação igual a 8,9%, 91,1% da energia absorvida pelo motor é dissipada no conjunto motor e bomba, nas perdas de carga ao longo da tubulação de sucção, adutora e linha lateral, nos reguladores de pressão e emissores por evaporação, deriva pelo vento ou vazamentos e, ainda, devido à percolação profunda.

Assim, apesar do indicador de uniformidade de distribuição de água, Coeficiente de Hernnan e Hein e Eficiência de Aplicação fornecer dados importantes a respeito do funcionamento hídrico do sistema, a avaliação energética por meio do Consumo Específico Normalizado e Eficiência de Irrigação, propostos neste trabalho, complementam esta avaliação e são eficazes para caracterização do aproveitamento energético na irrigação utilizando pivô central.

CAPÍTULO VI

PADRÃO DE EFICIÊNCIA PARA PIVÔS CENTRAIS DE IRRIGAÇÃO

6.1. Introdução

O desenvolvimento de indicadores de eficiência energética para avaliar um pivô central busca, à priori, caracterizar o equipamento. O comprador deste sistema de irrigação normalmente não possui informações sobre o rendimento energético do equipamento e, de uma forma geral, aceita projetos desenvolvidos pelos próprios fabricantes que buscam valorizar os custos iniciais do sistema em detrimento do custo operacional.

O desenvolvimento de uma metodologia para determinação dos indicadores de eficiência energética para o sistema de irrigação por pivô central visa, desta forma, contribuir para a implementação do Selo PROCEL de eficiência neste equipamento, bem como fornecer informações necessárias ao irrigante para seleção do melhor projeto e acompanhamento de seu desempenho ao longo da vida útil.

No Capítulo IV foram apresentados os sistemas de irrigação do Assentamento Itamarati I e suas despesas com energia elétrica, bem como, obtidas as etiquetas que caracterizam energeticamente os equipamentos ensaiados. No Capítulo V foram analisadas as potências elétricas de cada elemento dos pivôs ensaiados e determinados seus indicadores de eficiência associados.

Assim, se por um lado a implementação de medidas de eficiência energética pode reduzir os custos operacionais dos sistemas de irrigação, o investimento nestas medidas deve ser analisado criteriosamente, pois pode inviabilizar o projeto. Desta forma, neste Capítulo será associado o investimento nas medidas de eficiência energética à redução das despesas com energia elétrica no sistema de irrigação, para determinar um padrão de eficiência energética.

6.2. Dimensionamento econômico de um sistema de bombeamento

De acordo com Gomes (2004), o dimensionamento hidráulico de um conduto pressurizado consiste em se determinar a velocidade, a vazão, o diâmetro do tubo e também o coeficiente de perda de carga do sistema. Todavia, é possível se determinar inúmeras soluções em função do diâmetro ou da velocidade, que atendem à vazão demandada pelo projeto.

A indeterminação no cálculo de um projeto pode ser superada, por sua vez, admitindo-se, como restrição hidráulica, a perda de carga máxima admissível no conduto ou a velocidade recomendada de escoamento, ou então, admitindo-se um diâmetro já normalizado dentre os comercialmente disponíveis.

De acordo com Batista & Coelho (2003), todo o sistema de bombeamento deve ser determinado segundo um critério econômico, pois o diâmetro da tubulação, o sistema de bombeamento e as despesas operacionais estão inter-relacionados:

- Um diâmetro pequeno da tubulação ocasiona maior perda de carga e, portanto, altura manométrica e potência do conjunto motor e bomba mais elevada. Esta configuração de projeto propicia maior custo do conjunto elevatório e maior despesa com energia, embora se economize na tubulação;
- Um diâmetro maior da tubulação implica, por sua vez, em despesas mais elevadas na sua implantação, entretanto, proporciona menor perda de carga. A potência deste conjunto elevatório será menor, de forma que o custo operacional de energia elétrica é reduzido, tornando-se uma alternativa viável ao longo da vida útil do equipamento.

O diâmetro da tubulação mais conveniente é aquele que resulta em menor custo total das instalações ao longo de sua vida útil, normalmente chamado de diâmetro econômico. Este aspecto pode ser ilustrado através do gráfico da Figura 6.1 onde a curva “I” representa a variação dos custos da tubulação (material mais implantação) em relação ao seu diâmetro e a curva “II” representa a variação do custo de implantação do conjunto motor e bomba mais equipamentos e despesa com energia.

A curva “III” representa a soma dos custos apresentados na curva “I” e “II”, fornecendo, portanto, o custo total da instalação elevatória. O diâmetro econômico corresponde ao ponto de menor custo da curva “III”, quando se considera a vida útil do sistema.

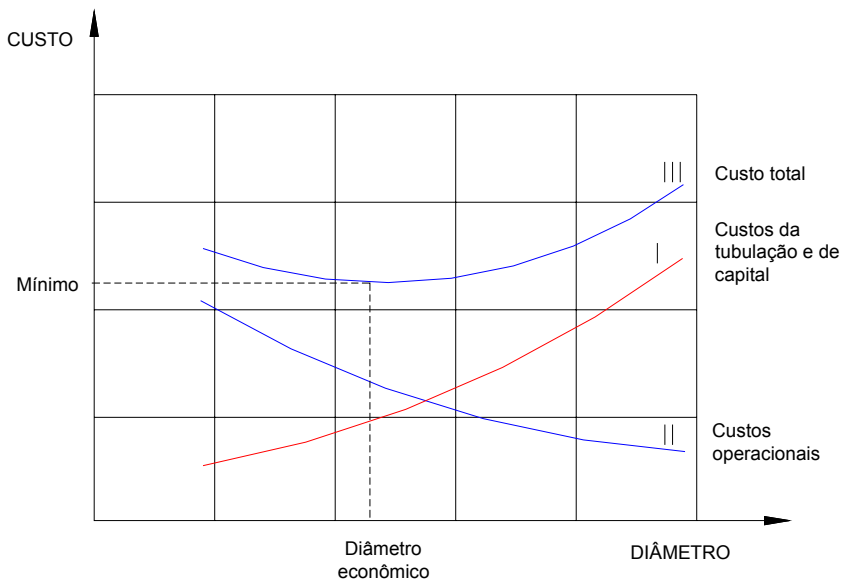


Figura 6.1. – Diâmetro econômico de um sistema de bombeamento
(fonte: Batista & Coelho, 2003)

Segundo Gomes (2004), a literatura apresenta vários métodos para se determinar o diâmetro para a tubulação de uma estação elevatória. Como exemplo, pode se apresentar uma das primeiras fórmulas da hidráulica para o dimensionamento econômico da tubulação de recalque, ainda atualmente utilizada, a fórmula de Bresse (Equação 6.1).

$$D = k\sqrt{Q_S} \tag{6.1}$$

Onde: D – *Diâmetro da tubulação [m];*
k – *Coeficiente [];*
Q_S – *Vazão do sistema [m³/h].*

O coeficiente k depende de inúmeros fatores que são determinados de acordo com a experiência do projetista, o que torna este método vulnerável quanto à obtenção do diâmetro econômico (Gomes, 2004).

.

6.3. Equacionamento do padrão de eficiência energética de um pivô central

O padrão de eficiência energética pode ser determinado através da análise econômica dos investimentos, para o ponto de equilíbrio caracterizado pela igualdade dos custos das medidas de eficiência energética e a economia na fatura de energia elétrica do sistema de irrigação ao longo da vida útil do projeto.

Para a avaliação econômica do sistema de irrigação é necessário utilizar a Energia Dissipada Específica (E_{de}), pois medidas de eficiência energética implementadas podem propiciar o aumento na Eficiência de Aplicação que, por sua vez, está associada à vazão útil do sistema. Assim, para considerar não somente os benefícios da redução da energia por meio de uma medida implementada, mas também, o aumento da vazão útil obtida, é necessário se analisar o sistema utilizando os valores específicos, ou seja, dividindo a potência dissipada pela vazão útil do sistema (líquida). Desta forma, obtém-se a Equação 6.2.

$$E_{de} = \frac{P_{dI}}{Q_{80}} \tag{6.2}$$

Onde: E_{de} – *Energia dissipada específica no sistema de irrigação [kWh/(mm.ha)];*

P_{dI} – *Potência dissipada no sistema de irrigação, Equação 3.55 [kW];*

Q_{80} – *Vazão útil para 80% da área adequadamente irrigada [mm.ha/h];*

Determinando-se a Energia Dissipada Específica no sistema de irrigação para duas condições de eficiência energética, a diferença entre elas representa a redução do consumo específico para irrigar adequadamente um hectare. Para isto, é necessário determinar a economia a partir do preço médio da energia, Equações 2.4, 2.5 ou 2.6.

O preço médio da energia varia de acordo com as tarifas e a forma de utilização do sistema de irrigação quando se considera um consumidor horo-sazonal rural irrigante. Frizzone (2003), por sua vez, determina como condição de utilização para pivôs centrais, para compor o custo médio da energia, que o sistema funcione todos os meses, totalizando 2000 horas anuais, sendo:

- Horário fora de ponta:
  - Período seco: 1260 horas;
  - Período úmido: 140 horas;
- Horário reservado:
  - Período seco: 540 horas;
  - Período úmido: 60 horas.

Desta forma, considerando as tarifas estabelecidas para o Estado do Mato Grosso do Sul em 2006, ANEEL (2006) e os tempos, períodos e horários de funcionamento apresentados, é possível se obter um custo médio da energia igual R$ 0,177485/kWh.

Quando se analisa um sistema, o investimento para implementação de uma medida de eficiência geralmente ocorre de imediato, enquanto que os benefícios retornam anualmente ao longo da vida útil do equipamento. Assim, para realizar a comparação entre o custo e o benefício deve-se utilizar a metodologia de avaliação econômica.

Seguindo os procedimentos de avaliação econômica apresentados em Haddad (2004), os investimentos e os benefícios da redução do consumo de energia podem ser comparados ao longo da vida útil do equipamento. Assim, o custo fixo ou de investimento das instalações é convertido em amortizações anuais de capital multiplicando-se o valor presente "P" pelo fator de amortização, também conhecido como Fator de Recuperação de Capital (FRC):

$$FRC = \frac{i\,(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \tag{6.3}$$

Onde: FRC – *Fator de recuperação do capital [];*

i – *Taxa de oportunidade anual [];*

n – *Vida útil das instalações ou alcance do projeto [anos];*

Assim, o custo anual do investimento específico pode ser determinado a partir do Fator de Recuperação de Capital, conforme Equação 6.4.

$$C_{Ae} = I_e \; FRC \tag{6.4}$$

Onde: C_{Ae} – *Custo anual do investimento específico [R$/(mm.ha)];*
I_e – *Investimento específico [R$/(mm.ha)];*
FRC – *Fator de recuperação do capital [];*

Segundo Haddad (2004), pode se avaliar o investimento por meio da relação custo-benefício (B/C) (Equação 6.5), tempo de retorno de capital (TRC) (Equação 6.6), valor presente líquido (VPL) (Equação 6.7) ou pela taxa interna de retorno (TIR) (Equação 6.8).

$$B/C = \frac{B_e}{C_{Ae}} \tag{6.5}$$

$$TRC = -\frac{\ln\left(1 - \frac{I_e}{B_e} i\right)}{\ln\left(1+i\right)} \tag{6.6}$$

$$VPL_e = \frac{B_e}{FRC} - I_e \tag{6.7}$$

$$B_e \cdot \left(\frac{(1+TIR)^n - 1}{TIR\,(1+TIR)^n}\right) - I_e = 0 \tag{6.8}$$

Onde: B/C – *Relação custo-benefício [];*
B_e – *Benefício específico [R$/(mm.ha)];*
C_{Ae} – *Custo anual específico do investimento [R$/(mm.ha)];*
TRC – *Tempo de retorno de capital [anos];*
i – *Taxa de oportunidade [];*
VPL_e – *Valor presente líquido específico [R$/(mm.ha)];*
TIR – *Taxa interna de retorno [];*
n – *Horizonte de análise [anos];*

Buscando-se uma metodologia para se obter um sistema de irrigação economicamente eficiente, a análise consiste na redução das perdas em cada elemento do equipamento e no estudo da viabilidade para sua adequação. Para cada etapa analisada, uma configuração deve ser escolhida considerando a melhor opção dentre o motor, a bomba, adutora, linha lateral e aspersores.

Uma vez que a alteração de um elemento pode influenciar os demais, a cada configuração escolhida do projeto deve-se atualizar as medidas de eficiência energéticas implementadas à configuração do projeto.

6.4. Padrão de eficiência energética dos sistemas ensaiados

Para a determinação do padrão de eficiência energética foi desenvolvido um programa em Matlab® (2000) intitulado "eficiencia_pivo" para, a partir da avaliação realizada, simular medidas de eficiência até se obter o equilíbrio entre os custos iniciais e as despesas com energia ao longo da vida útil do sistema. Esta simulação compreende, a partir da situação inicial (opção 01), substituir o motor original por outro de alto rendimento (opção 02), substituir a bomba (opção 03), substituir a adutora (opção 04), substituir parte da linha lateral (opção 05) e por último, substituir os aspersores (opção 06).

6.4.1 Índice de eficiência para o pivô da Embrapa Agropecuária Oeste

A partir do equacionamento proposto no item 6.3, são apresentadas na Tabela 6.1 as opções de medidas de eficiência energética para o sistema de irrigação da Embrapa Agropecuária Oeste e suas implicações conforme relatório obtido do programa "eficiencia_pivo" desenvolvido em Matlab® (2000).

A partir da Tabela 6.1 pode se observar rendimento na situação inicial igual a 13,3%, conforme determinado no Capitulo IV e V. O projetista tem, analisando a opção 02, possibilidade de substituir o motor original por outro de alto rendimento. Esta ação possibilita o aumento do rendimento do conjunto motor e bomba de 53,2% para 53,6% a partir da troca do motor de 40 cv original de rendimento calculado igual a 92,96% por um motor de alto rendimento (93,0%), como é indicado em WEG (2007). O novo rendimento do sistema de irrigação passaria, então, para 13,4%.

Tabela 6.1. – Eficiência energética no sistema de irrigação da Embrapa Agropecuária Oeste

Opção	vazão (m^3/s)	EA8 (%)	Altura geomet. (m)	perda de carga sucção (mca)	perda de carga adutora (mca)	perda de carga lateral (mca)	perda de carga aspersor (mca)	Hm (mca)	rend. (%)	vazão útil (mmha/h)	efic Irrig. (%)
1	0,0250	88,5	22,9	0,4	11,7	32,0	14,1	81,1	53,2	7,96	13,3
2	0,0250	88,5	22,9	0,4	11,7	32,0	14,1	81,1	53,9	7,96	13,5
3	0,0250	88,5	22,9	0,4	11,7	5,0	14,1	54,1	74,3	7,96	27,9
4	0,0250	88,5	22,9	0,4	2,0	32,0	14,1	71,3	53,2	7,96	15,1
6	0,0250	90,0	22,9	0,4	11,7	32,0	14,1	81,1	53,2	8,09	13,5

OPÇOES:

1 - Situação atual
2 - Substituição do motor
3 - Substituição da bomba
4 - Substituição da adutora
5 - Substituição da linha lateral
6 - Substituição dos aspersores

O projetista tem também como opção substituir a bomba, o que elevaria o rendimento do conjunto motor e bomba de 53,2% para 74,3% e possibilitaria reduzir a perda de carga da linha lateral de 32 mca para 5 mca. Esta opção eleva o rendimento do sistema de 13,3% para 27,9%. Outra opção importante refere-se à substituição dos aspersores, o que possibilita elevar a Eficiência de Aplicação de 88,5% para 90% conforme propõe Bernardo, Soares, Mantovani (2005). Isto não propicia redução nas perdas, mas aumento na vazão útil de 7,96 para 8,09 mm.ha/h e, consequentemente pode se obter uma nova Eficiência de Irrigação igual a 13,5%. A substituição da linha lateral não foi analisada por apresentar baixa perda de carga.

Pela observação direta da Tabela 6.1 verifica-se que a medida de eficiência que propicia maior aumento no rendimento do sistema consiste na substituição da bomba, todavia é necessária a confirmação da viabilidade econômica do investimento. Considerando orçamentos realizados em setembro de 2006 é possível associar as medidas de eficiência energética aos custos conforme são apresentados na Tabela 6.2. A relação custo-benefício é ilustrada na Figura 6.2.

Tabela 6.2. – Avaliação econômica das medidas de eficiência energética no sistema de irrigação da Embrapa Agropecuária Oeste (primeira análise)

Opção	Potência dissip. total (kW)	Potência dissip. especif. (kW/mmha)	Investimento total (R$)	Investimento especif. (R$/mmha)	Energia anual (kWh)	Energia econom. (kWh)
1	32,3	4,06	0,0	0,0	8129,3	0,0
2	31,9	4,01	7141,0	897,6	8015,4	113,9
3	12,9	1,62	8107,0	1019,1	3231,2	4898,1
4	27,9	3,50	40167,0	5049,1	7004,9	1124,4
6	32,3	3,99	2231,0	275,9	7977,7	151,6

Opção	Relação B/C benef. R$/mmha)	Relação B/C Custo (kW/mmha)	Relação B/C relação (1)	TRC (anos)	VPL (R$)	TIR (%)
2	20,22	110,05	0,18	Inf	-732,7	0,0
3	869,34	124,94	6,96	1,3	6071,9	85,3
4	199,57	619,01	0,32	Inf	-3421,2	0,0
6	26,91	33,83	0,80	27,6	-56,4	5,2

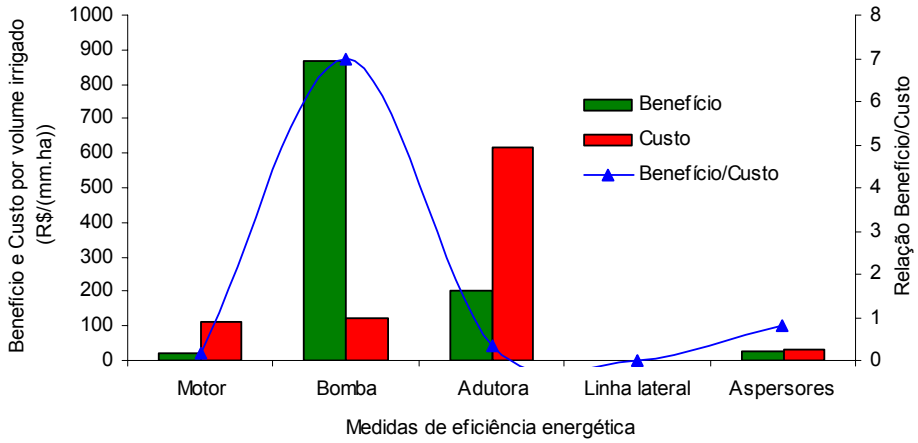


Figura 6.2. – Avaliação econômica do sistema de irrigação da Embrapa Agropecuária Oeste

Pode se verificar que a substituição da bomba é a melhor medida de eficiência energética a ser implementada (Tabela 6.2 e Figura 6.2). Assim, com relação beneficio custo igual a 6,96, tempo de retorno de capital de 1,3 ano, valor presente líquido de R$ 6.071,90/(mm.ha) e taxa interna de retorno igual a 85,3%, esta é a medida de eficiência energética economicamente viável para esse equipamento.

Observa-se que, com a substituição da bomba, a nova potência necessária no eixo passa para 18,67 kW, o índice de carregamento para 0,63 e o rendimento para 94,07%, se afastando do ponto de máxima relação PQ, conforme Figura 6.3.

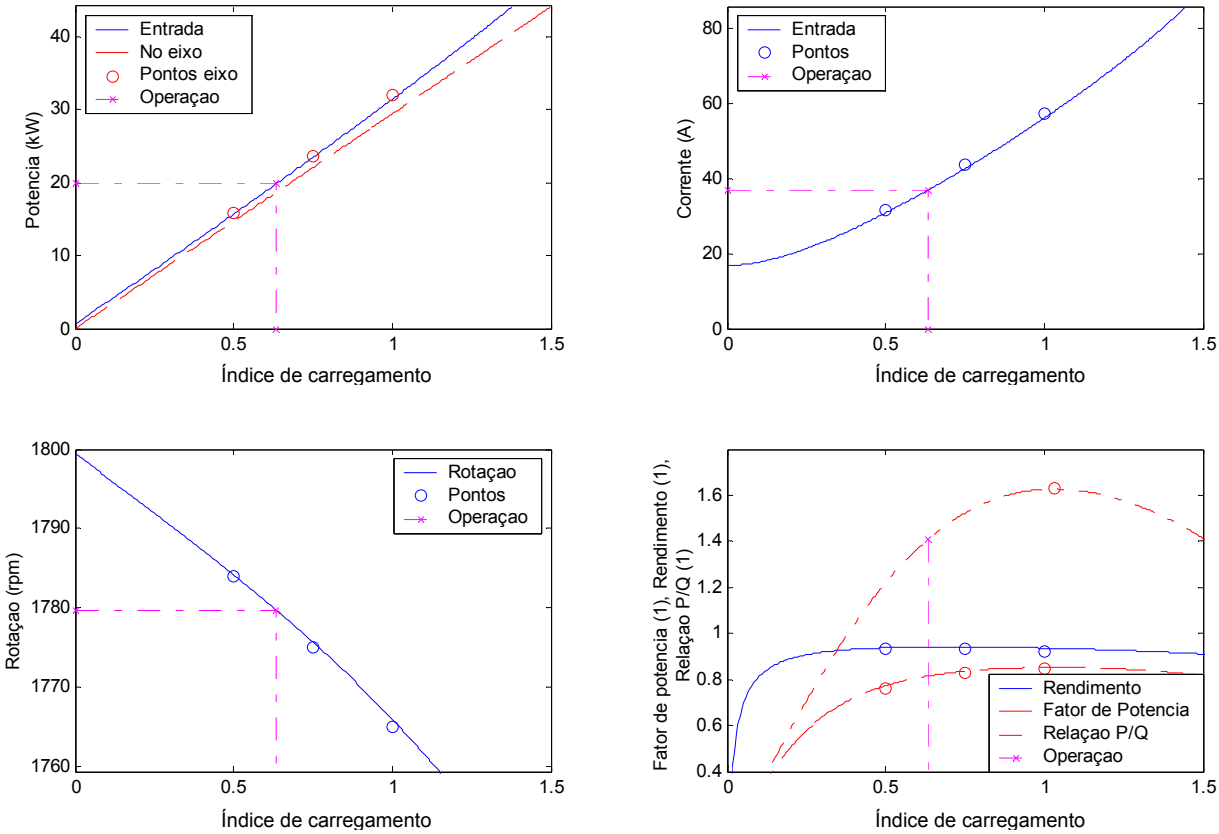


Figura 6.3. – Curvas características do motor de 40 cv após substituição da bomba do pivô da Embrapa Agropecuária Oeste ensaiado em abril de 2006

Após escolhidas as medidas de eficiência energéticas economicamente viáveis o programa "eficiencia_pivo" fornece o relatório com informações sobre os indicadores obtidos conforme apresentado na Tabela 6.3.

Assim, o sistema de irrigação por pivô central da Embrapa Agropecuária Oeste, para a condição de utilização apresentada, considerando o projeto existente, pode alcançar 27,9% de Eficiência de Irrigação. Observa-se que nesta condição, o sistema absorve 17,82 kW da rede de energia, dissipa 12,85 kW e fornece 4,96 kW ao sistema irrigado. Verifica-se ainda que um motor de 25 cv torna-se suficiente para o conjunto de bombeamento onde o motor de 40 cv trabalha atualmente com 18% de sobrecarga. Todavia foi observado que a substituição do

motor de 40 cv instalado não é economicamente viável, uma vez que seu rendimento permanece elevado para este carregamento.

Tabela 6.3. – Padrão de eficiência energética para o sistema de irrigação da Embrapa Agropecuária Oeste

opção	vazão (m³/s)	EA8 (%)	Altura geomet. (m)	perda de carga: sucção (mca)	perda de carga: adutora (mca)	perda de carga: lateral (mca)	perda de carga: aspersor (mca)	Hm (mca)	rend. (%)	vazão útil (mmha/h)	efic Irrig. (%)
1	0,0250	88,5	22,9	0,4	11,7	32,0	14,1	81,1	53,2	7,96	13,3
3	0,0250	88,5	22,9	0,4	11,7	5,0	14,1	54,1	66,9	7,96	25,1

OPÇOES:

1 - Situação atual

3 - Substituição da bomba

INDICADORES DO CONJUNTO MOTOR E BOMBA

Opção	Potência: entrada (kW)	Potência: hidrául. (kW)	Potência: dissip. (kW)	Consumo esp. norm. (kWh/m³100m)	Rendimento: motor (%)	Rendimento: bomba (%)	Rendimento: conjunto (%)
1	37,30	19,85	17,45	0,512	93,0	57,2	53,2
3	17,82	13,24	4,58	0,367	92,9	80,0	74,3

INDICADORES DAS TUBULAÇÕES

Opção	sucção: Potência elétrica (kW)	sucção: consumo especif. (kWh/(m³km))	sucção: Dh100 (mca)	adutora: Potência elétrica (kW)	adutora: Consumo especif. (kWh/(m³km))	adutora: Dh100 (mca)	linha lateral: Potência elétrica (kW)	linha lateral: Consumo especif. (kWh/(m³km))	linha lateral: Dh100 (mca)
1	0,17	0,099	3,64	5,39	0,051	1,87	14,72	0,338	12,42
3	0,12	0,099	3,64	3,86	0,051	1,87	1,65	0,053	1,94

INDICADORES DA ASPERSÃO E SISTEMA DE IRRIGAÇÃO COMPLETO

Opção	aspersão: Potência elétrica (kW)	aspersão: consumo especif. (kWh/(mmha))	aspersão: EA80 (%)	Potência na irrigação: Entrada (kW)	Potência na irrigação: Útil (kW)	Potência na irrigação: Dissip. (kW)	Irrigação: Consumo especif. (kWh/m³)	Irrigação: Consumo esp. norm. (kWh/(mmha100m))	Irrigação: Efic. (%)
1	5,33	0,670	88,5	37,30	4,96	32,34	0,415	20,475	13,3
3	4,57	0,575	88,5	17,82	4,96	12,85	0,198	9,780	27,9

Quando a avaliação é desenvolvida para um sistema instalado, considera-se na análise, o custo total da medida de eficiência energética diferente de um sistema ainda em fase de projeto. Durante o projeto de um sistema de irrigação, o benefício da economia de energia por meio da eficiência energética deve ser comparado com o custo incremental, ou seja, a

diferença, por exemplo, entre um motor normal e um de alto rendimento, entre uma tubulação de 150 mm e outra de 200 mm. Assim, é apresentado na Tabela 6.4 um projeto novo para o sistema de irrigação da Embrapa Agropecuária Oeste.

Tabela 6.4. – Padrão de eficiência energética para o sistema de irrigação da Embrapa Agropecuária Oeste – projeto novo.

opção	vazão (m^3/s)	EA8 (%)	Altura geomet. (m)	perda de carga: sucção (mca)	perda de carga: adutora (mca)	perda de carga: lateral (mca)	perda de carga: aspersor (mca)	Hm (mca)	rend. (%)	vazão útil (mmha/h)	efic Irrig. (%)
1	0,0250	90,0	22,9	0,3	8,3	5,0	14,1	50,6	74,3	8,09	30,3

INDICADORES DO CONJUNTO MOTOR E BOMBA

Opção	Potência: entrada (kW)	Potência: hidrául. (kW)	Potência: dissip. (kW)	Consumo esp. norm. ($kWh/m^3 100m$)	Rendimento: motor (%)	Rendimento: bomba (%)	Rendimento: conjunto (%)
1	16,67	12,39	4,28	0,367	92,9	80,0	74,3

INDICADORES DAS TUBULAÇÕES

Opção	sucção: Potência elétrica (kW)	sucção: consumo especif. ($kWh/(m^3km)$)	sucção: Dh100 (mca)	adutora: Potência elétrica (kW)	adutora: Consumo especif. ($kWh/(m^3km)$)	adutora: Dh100 (mca)	linha lateral: Potência elétrica (kW)	linha lateral: Consumo especif. ($kWh/(m^3km)$)	linha lateral: Dh100 (mca)
1	0,10	0,082	3,00	2,73	0,036	1,32	1,65	0,053	1,94

INDICADORES DA ASPERSÃO E SISTEMA DE IRRIGAÇÃO COMPLETO

Opção	aspersão: Potência elétrica (kW)	aspersão: consumo especif. (kWh/(mmha))	aspersão: EA80 (%)	Potência na irrigação: Entrada (kW)	Potência na irrigação: Útil (kW)	Potência na irrigação: Dissip. (kW)	Irrigação: Consumo especif. (kWh/m^3)	Irrigação: Consumo esp. norm. (kWh/(mmha100m))	Irrigação: Efic. (%)
1	4,35	0,537	90,0	16,67	5,05	11,62	0,186	9,002	30,3

Pode se observar na Tabela 6.4 que, considerando o projeto novo, para as condições de orçamento, utilização e tarifas de energia considerada, o Padrão de Eficiência Energética obtido para o pivô da Embrapa Agropecuária Oeste é 9,002 kWh/(mm.ha.100m), o que resulta na Eficiência de Irrigação igual 30,3%.

As curvas características dos motores de 25, adotado para o acionamento da bomba, e de 30 cv, simulado para se observar suas características com baixo carregamento, podem ser observadas nas Figuras 6.4 e 6.5.

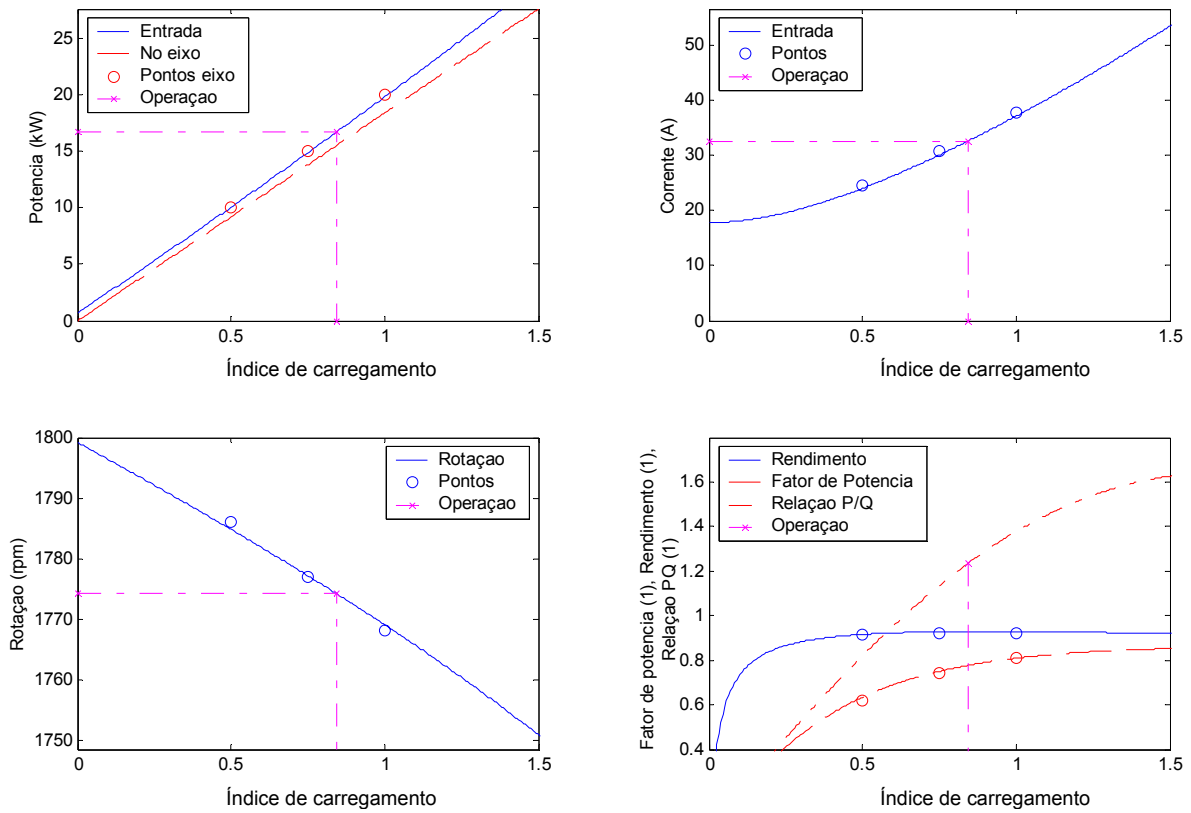


Figura 6.4. – Curvas características do motor de 25 cv acionando a bomba de um projeto novo do pivô da Embrapa Agropecuária Oeste ensaiado em abril de 2006

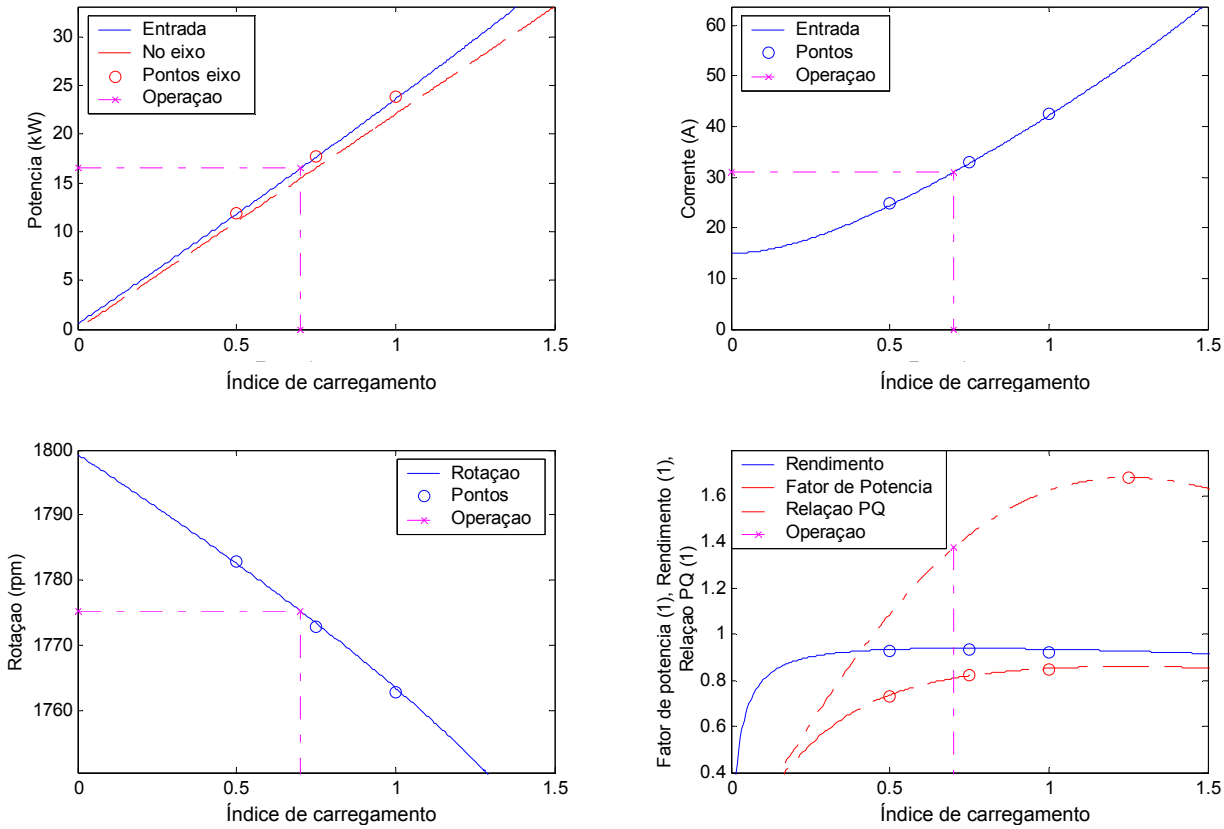


Figura 6.5. – Curvas características do motor de 30 cv acionando a bomba de um projeto novo do pivô da Embrapa Agropecuária Oeste ensaiado em abril de 2006

Observa-se carregamento, rendimento e fator de potência do motor de 25 cv iguais a 0,84, 92,89% e 77,68% enquanto que o motor de 30 cv possui 0,70, 93,86% e 80,92% para a carga considerada. Pode se observar, ainda, que motores trabalhando com baixo índice de carregamento apresentam, também, menores relações entre a potência ativa e a reativa, Equação 3.30.

Verifica-se, a partir das Figuras 6.3 a 6.5, que motores de maior potência possuem maior rendimento e, para carregamento superior a 0,5, a curva de rendimento mantém-se aproximadamente constante. Assim, apesar do motor de 25 cv apresentar maior índice de carregamento possui menor rendimento que o de 30 cv.

6.4.2 Índice de eficiência para o pivô L06

São apresentadas na Tabela 6.5 as características para simulação de medidas de eficiência energética no pivô L06 do Assentamento Itamarati I. Pode-se observar Eficiência de Irrigação igual a 18,2% para condição inicial a partir da Eficiência de Aplicação igual a 81,3% e rendimento do conjunto motor e bomba igual a 72,5%.

Tabela 6.5. – Análise da eficiência energética no sistema de irrigação L06 do Assentamento Itamarati I

Opção	vazão (m^3/s)	EA80 (%)	Altura geomet. (m)	perda de carga: sucção (mca)	adutora (mca)	lateral (mca)	aspersor (mca)	Hm (mca)	rend. (%)	vazão útil (mmha/h)	efic Irrig. (%)
1	0.1290	81.3	34.1	0.3	21.2	41.2	14.1	110.9	72.5	37.76	18.2
3	0.1290	81.3	34.1	0.3	21.2	41.2	14.1	110.9	77.0	37.76	19.3
4	0.1290	81.3	34.1	0.3	5.1	41.2	14.1	94.8	72.5	37.76	21.2
5	0.1290	81.3	34.1	0.3	21.2	29.5	14.1	99.2	72.5	37.76	20.3
6	0.1290	90.0	34.1	0.3	21.2	41.2	14.1	110.9	72.5	41.81	20.1

OPÇOES:

1 - Situação atual
2 - Substituição do motor
3 - Substituição da bomba
4 - Substituição da adutora
5 - Substituição da linha lateral
6 - Substituição dos aspersores

O projetista tem como opção substituir a bomba, opção 03, o que elevaria o rendimento do conjunto motor e bomba de 72,5% para 77,0% a partir de uma bomba com rendimento igual a 80%. Isso possibilitaria elevar o rendimento do sistema de 18,2% para 19,3%.

Outra opção importante refere-se à substituição dos difusores, o que possibilitaria elevar a Eficiência de Aplicação de 81,3 para 90% e, desta forma, aumentar a vazão útil de 37,76 para 41,81 mm.ha/h propiciando Eficiência de Irrigação igual a 20,1%. A substituição do motor, opção 2, não foi simulada considerando que a eficiência obtida para este motor é igual ao de alto rendimento. É apresentado, na Figura 6.6, a relação custo-benefício das opções da Tabela 6.5.

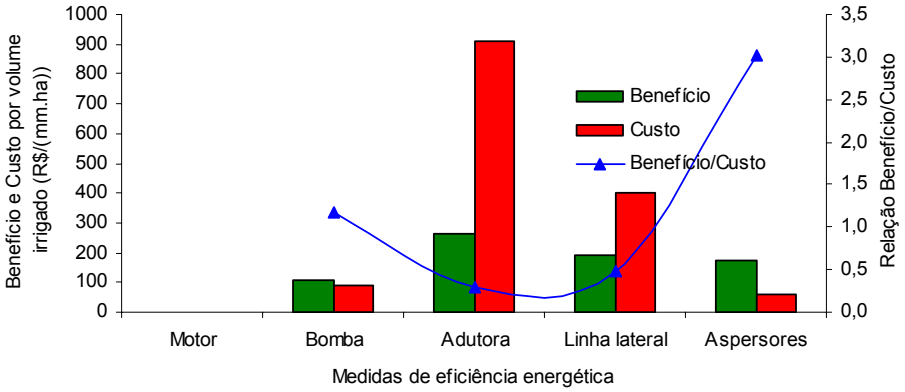


Figura 6.6. – Avaliação econômica do sistema de irrigação L06 do Assentamento Itamarati I

Pode-se observar que, com relação custo-benefício igual a 3,02, a substituição dos difusores trazem o retorno do investimento em 3,2 anos. Atualizando os dados no sistema e novamente submetendo a análise econômica determina a substituição da bomba com uma nova eficiência igual a 21,3% e Consumo Específico Normalizado na Irrigação igual a 12,764 kWh/(mm.ha.100m), Tabela 6.

Tabela 6.6. – Resultado da análise da eficiência energética no sistema de irrigação L06 do Assentamento Itamarati I

INDICADORES DO CONJUNTO MOTOR E BOMBA

Opção	Potência entrada (kW)	Potência hidrául. (kW)	Potência dissip. (kW)	Consumo esp. norm. (kWh/m³100m)	Rendimento motor (%)	Rendimento bomba (%)	Rendimento conjunto (%)
1	193,51	140,38	53,13	0,376	96,3	75,4	72,5
6	193,51	140,38	53,13	0,376	96,3	75,4	72,5
3	182,26	140,38	41,88	0,354	96,3	80,0	77,0

INDICADORES DAS TUBULAÇÕES

Opção	sucção Potência elétrica (kW)	sucção consumo especif. (kWh/(m³km))	sucção Dh100 (mca)	adutora Potência elétrica (kW)	adutora Consumo especif. (kWh/(m³km))	adutora Dh100 (mca)	linha lateral Potência elétrica (kW)	linha lateral Consumo especif. (kWh/(m³km))	linha lateral Dh100 (mca)
1	0,52	0,028	1,02	36,94	0,051	1,85	71,85	0,183	6,72
6	0,52	0,028	1,02	36,94	0,051	1,85	71,85	0,183	6,72
3	0,49	0,028	1,02	34,80	0,051	1,85	67,67	0,183	6,72

INDICADORES DA ASPERSÃO E SISTEMA DE IRRIGAÇÃO COMPLETO

Opção	aspersão Potência elétrica (kW)	aspersão consumo especif. (kWh/(mmha))	aspersão EA80 (%)	Potência na irrigação Entrada (kW)	Potência na irrigação Útil (kW)	Potência na irrigação Dissip. (kW)	Irrigação Consumo especif. (kWh/m³)	Irrigação Consumo esp. norm. (kWh/(mmha100m))	Irrigação Efic. (%)
1	40,78	1,080	81,3	193,51	35,14	158,37	0,417	15,006	18,2
6	30,10	0,720	90,0	193,51	38,91	154,60	0,417	13,552	20,1
3	30,10	0,720	90,0	182,26	38,91	143,35	0,392	12,764	21,3

Não havendo outra medida de eficiência energética economicamente viável, quando se considera a condição de utilização e os orçamentos obtidos, este pivô permanecerá com a Eficiência de Irrigação igual a 21,3% obtida pela substituição dos difusores, reguladores de pressão, tubos em bengala e da bomba.

Para a avaliação da eficiência energética de um pivô com condições similares ao L06, ainda durante o projeto, podem se obter as características da Tabela 6.7. Nesta condição, considerando que instalando os difusores novos a Eficiência de Aplicação inicial é de 90% e, estando o conjunto motor e bomba adequadamente dimensionado, seu rendimento seja igual a 77,3%, a Eficiência de Irrigação inicia-se com 20,2%.

Para se verificar se a adutora de 300 mm é realmente a indicada para este sistema de irrigação foi analisada uma condição inicial com tubulação de 250 mm e o incremento do custo para sua ampliação. Outra alternativa simulada consiste na substituição de 156 m da tubulação aérea de diâmetro 6 5/8” por 8”.

Tabela 6.7. – Eficiência energética no sistema de irrigação L06 do Assentamento Itamarati I

opção	vazão (m³/s)	EA8 (%)	Altura geomet. (m)	perda de carga: sucção (mca)	perda de carga: adutora (mca)	perda de carga: lateral (mca)	perda de carga: aspersor (mca)	Hm (mca)	rend. (%)	vazão útil (mmha/h)	efic Irrig. (%)
1	0,1290	90,0	34,1	0,7	27,3	41,4	14,1	117,7	77,3	41,81	20,2
4	0,1290	90,0	34,1	0,7	11,0	41,4	14,1	101,3	77,3	41,81	23,4

OPÇÕES:

1 - Situação inicial de um projeto novo

4 - Substituição da adutora

INDICADORES DO CONJUNTO MOTOR E BOMBA

Opção	Potência: entrada (kW)	Potência: hidrául. (kW)	Potência: dissip. (kW)	Consumo esp. norm. (kWh/m³100m)	Rendimento: motor (%)	Rendimento: bomba (%)	Rendimento: conjunto (%)
1	192,73	148,94	43,79	0,353	96,6	80,0	77,3
4	166,03	128,30	37,72	0,353	96,6	80,0	77,3

INDICADORES DAS TUBULAÇÕES

Opção	sucção: Potência elétrica (kW)	sucção: consumo especif. (kWh/(m³km))	sucção: Dh100 (mca)	adutora: Potência elétrica (kW)	adutora: Consumo especif. (kWh/(m³km))	adutora: Dh100 (mca)	linha lateral: Potência elétrica (kW)	linha lateral: Consumo especif. (kWh/(m³km))	linha lateral: Dh100 (mca)
1	1,15	0,066	2,41	44,72	0,065	2,39	67,82	0,184	6,75
4	1,15	0,066	2,41	18,02	0,026	0,96	67,82	0,184	6,75

INDICADORES DA ASPERSÃO E SISTEMA DE IRRIGAÇÃO COMPLETO

Opção	aspersão: Potência elétrica (kW)	aspersão: consumo especif. (kWh/(mmha))	aspersão: EA80 (%)	Potência na irrigação: Entrada (kW)	Potência na irrigação: Útil (kW)	Potência na irrigação: Dissip. (kW)	Irrigação: Consumo especif. (kWh/m³)	Irrigação: Consumo esp. norm. (kWh/(mmha100m))	Irrigação: Efic. (%)
1	30,96	0,740	90,0	192,73	38,91	153,82	0,415	13,498	20,2
4	28,90	0,691	90,0	166,03	38,91	127,12	0,357	11,628	23,4

Com relação custo-benefício igual a 1,45, a melhor opção de diâmetro de adutora é realmente 300 mm. Deve-se analisar, ainda, outro fator para esta escolha. Apesar de consistir-se em uma opção economicamente viável, esta alternativa terá um retorno de investimento longo, ou seja, 8,1 anos, e um incremento no investimento inicial de R$ 53.365,00 que devem ser criteriosamente analisados pelo comprador. Observa-se que, como ponto positivo, a utilização da adutora de 300 mm possibilita se obter Eficiência de Irrigação igual a 23,4%.

Pode se verificar, ainda, a possibilidade da utilização do motor de 200 cv em substituição ao de 250 cv inicialmente empregado, Figuras 6.7 e 6.8.

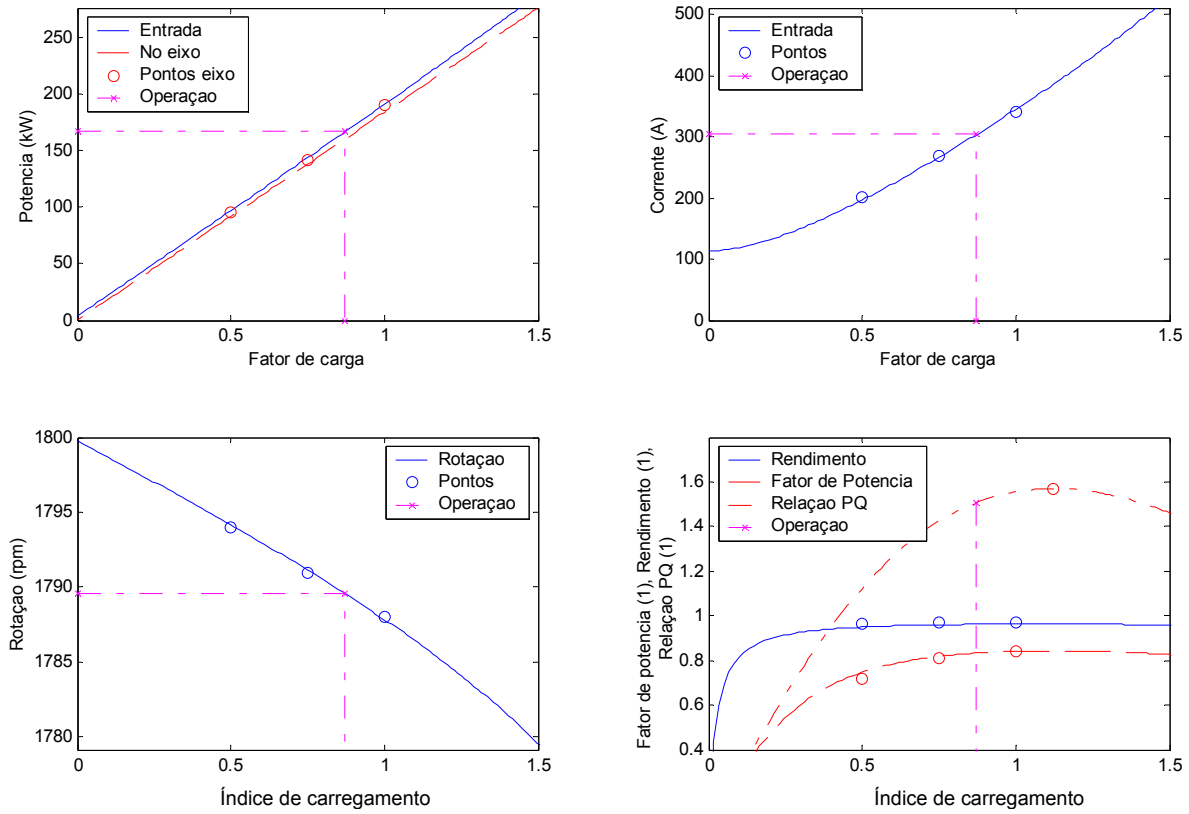


Figura 6.7. – Características do motor de 250 cv para o projeto novo do pivô L06 do Assentamento Itamarati I

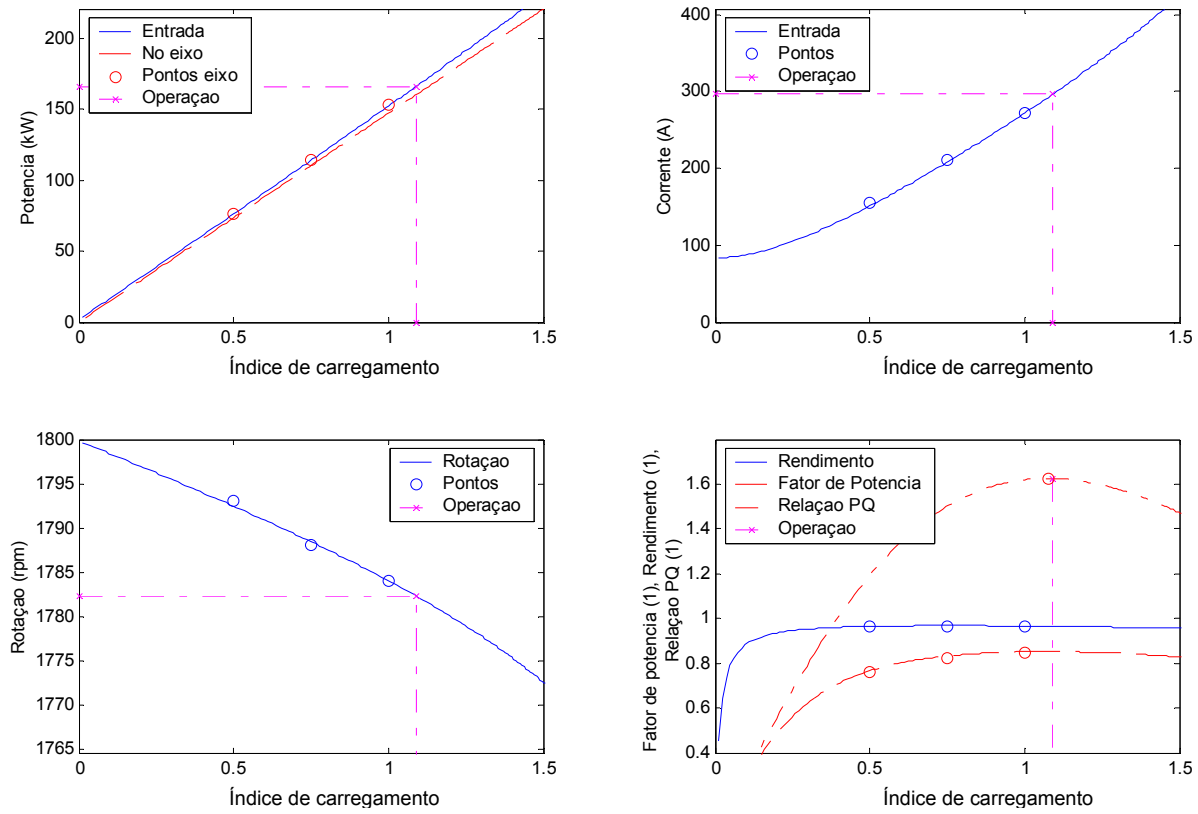


Figura 6.8. – Características do motor de 200 cv para o projeto novo do pivô L06 do Assentamento Itamarati I

O carregamento para o motor de 250 cv é igual a 0,87, com rendimento e fator de potência iguais a 96,3% e 83,34%, respectivamente. O motor de 200 cv, por sua vez, com rendimento igual a 96,6% e fator de potência igual a 85,18% funciona próximo ao ponto de máximo PQ, todavia, com índice de carregamento igual a 1,09, não pode ser utilizado devido a sobrecarga de 9%.

6.4.3 Índice de eficiência para o pivô C08

A avaliação do pivô C08 do Assentamento Itamarati I pode trazer informações importantes sobre a eficiência e os problemas em sistemas de irrigação por pivô central, Tabela 6.8.

Tabela 6.8. – Eficiência energética no sistema de irrigação C08 do Assentamento Itamarati I

Opção	vazão (m^3/s)	EA80 (%)	Altura geomet. (m)	perda de carga: sucção (mca)	perda de carga: adutora (mca)	perda de carga: lateral (mca)	perda de carga: aspersor (mca)	Hm (mca)	rend. (%)	vazão útil (mmha/h)	efic Irrig. (%)
1	0,0764	64,1	37,8	0,4	85,6	31,6	14,1	169,5	62,6	17.64	8,9
3	0,0764	64,1	37,8	0,4	85,6	31,6	14,1	169,5	76,8	17.64	11,0
4	0,0764	64,1	37,8	0,4	12,6	31,6	14,1	96,5	61,8	17.64	15,5
5	0,0764	64,1	37,8	0,4	85,6	19,8	14,1	157,7	62,6	17.64	9,6
6	0,0764	90,0	37,8	0,4	85,6	29,6	14,1	167,5	62,6	24.76	12,7

Com Eficiência de Irrigação inicial de 8,9%, 91,1% da energia fornecida ao conjunto motor e bomba não é aproveitada pelo sistema. Com Eficiência de Aplicação igual a 64,1%, 35,9% da água bombeada não é disponibilizada na zona radicular da planta, Tabela 6.8.

O projetista tem como opção 3 substituir a bomba existente, com rendimento igual a 64,5%, por outra com 80% de rendimento. Um ponto crítico observado neste pivô refere-se à perda de carga na tubulação de ferro cimentado da adutora de 200 mm. Com perda de carga inicial de 85,6 mca, o projetista pode substituir esta tubulação por outra de 250 mm em pvc e obter nova perda de carga de 12,6 mca e, desta forma, elevar o rendimento do sistema para 16,0%, opção 4. Não foi considerada a possibilidade da manutenção na adutora de forma que, como apresentado no Capítulo V, pode reduzir esta perda de carga de 85,6 para 44,0 mca.

A opção 5 de medida de eficiência energética consiste-se na substituição de parte da linha lateral (158 m de tubulação 6 5/8" por 8") elevando o rendimento para 9,6% a partir da redução da perda de carga de 31,6 mca para 19,8 mca. Ou ainda a substituição dos difusores, reguladores de pressão e a instalação de tubos pendurais, o que possibilita elevar a Eficiência de Aplicação de 64,1% para 90%, a vazão útil de 17,64 para 24,76 mm.ha/h e, consequentemente, a Eficiência de Irrigação para 12,7%, opção 6.

A substituição do motor, opção 2, não foi simulada considerando que a eficiência obtida para este equipamento é igual à obtida para os motores de alto rendimento. A escolha da melhor alternativa deve, sobretudo, basear-se na análise econômica de investimento conforme apresentado na Figura 6.9.

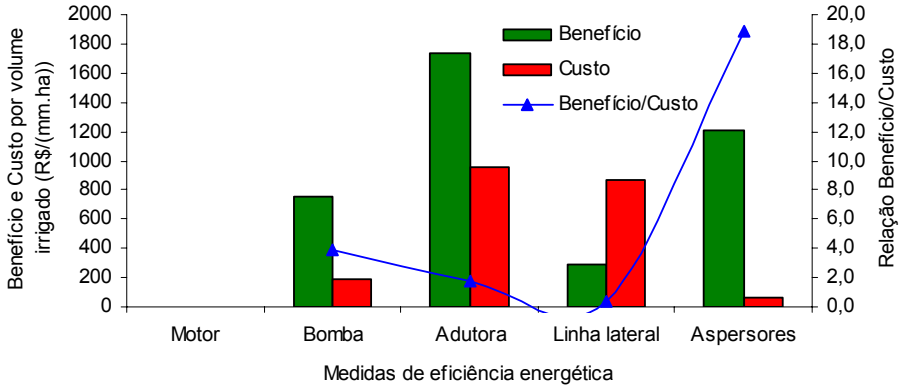


Figura 6.9. – Avaliação econômica do sistema de irrigação C08 do Assentamento Itamarati I

Pode-se observar, a partir da Figura 6.9, que são alternativas economicamente viáveis a substituição dos difusores e acessórios (B/C = 18,89), a bomba (B/C = 3,90) e a adutora (B/C = 1,81). Todavia a avaliação deve ser desenvolvida em etapas, assim, determina-se como ordem de prioridade a substituição dos difusores e acessórios, a substituição da bomba e a substituição da adutora, obtendo como resultado final o valores apresentados na Tabela 6.9.

Tabela 6.9. – Eficiência energética no sistema de irrigação C08 do Assentamento Itamarati I

opção	vazão (m³/s)	EA8 (%)	Altura geomet. (m)	perda de carga: sucção (mca)	perda de carga: adutora (mca)	perda de carga: lateral (mca)	perda de carga: aspersor (mca)	Hm (mca)	rend. (%)	vazão útil (mmha/h)	efic Irrig. (%)
1	0,0764	64,1	37,8	0,4	85,6	31,6	14,1	169,5	62,6	17,64	8,9
6	0,0764	90,0	37,8	0,4	85,6	29,6	14,1	167,5	62,6	24,76	12,7
3	0,0764	90,0	37,8	0,4	85,6	29,6	14,1	167,5	76,8	24,76	15,6
4	0,0764	90,0	37,8	0,4	12,6	29,6	14,1	94,5	76,8	24,76	27,7

INDICADORES DO CONJUNTO MOTOR E BOMBA

Opção	Potência: entrada (kW)	Potência: hidrául. (kW)	Potência: dissip. (kW)	Consumo esp. norm. (kWh/m³100m)	Rendimento: motor (%)	Rendimento: bomba (%)	Rendimento: conjunto (%)
1	203,10	127,04	76,06	0,436	97,0	64,5	62,6
6	200,67	125,53	75,15	0,436	97,0	64,5	62,6
3	163,39	125,53	37,87	0,355	96,0	80,0	76,8
4	92,19	70,82	21,37	0,355	96,0	80,0	76,8

INDICADORES DAS TUBULAÇÕES

Opção	sucção: Potência elétrica (kW)	sucção: consumo especif. (kWh/(m³km))	sucção: Dh100 (mca)	adutora: Potência elétrica (kW)	adutora: Consumo especif. (kWh/(m³km))	adutora: Dh100 (mca)	linha lateral: Potência elétrica (kW)	linha lateral: Consumo especif. (kWh/(m³km))	linha lateral: Dh100 (mca)
1	0,45	0,129	4,72	102,55	0,159	5,84	37,90	0,143	5,24
6	0,45	0,129	4,72	102,55	0,159	5,84	35,47	0,134	4,91
3	0,37	0,129	4,72	83,50	0,159	5,84	28,88	0,134	4,91
4	0,37	0,129	4,72	12,29	0,023	0,86	28,88	0,134	4,91

INDICADORES DA ASPERSÃO E SISTEMA DE IRRIGAÇÃO COMPLETO

Opção	aspersão: Potência elétrica (kW)	aspersão: consumo especif. (kWh/(mmha))	aspersão: EA80 (%)	Potência na irrigação: Entrada (kW)	Potência na irrigação: Útil (kW)	Potência na irrigação: Dissip. (kW)	Irrigação: Consumo especif. (kWh/m³)	Irrigação: Consumo esp. norm. (kWh/(mmha100m))	Irrigação: Efic. (%)
1	52,37	2,970	64,1	203,10	18,17	184,93	0,738	30,466	8,9
6	22,07	0,891	90,0	200,67	25,50	175,17	0,729	21,442	12,7
3	22,07	0,891	90,0	163,39	25,50	137,89	0,594	17,459	15,6
4	16,59	0,670	90,0	92,19	25,50	66,69	0,335	9,851	27,7

Deve se analisar para a terceira prioridade, substituição da adutora, a capacidade de desembolso do investidor, uma vez que necessitará um dispêndio financeiro de R$ 137.980,00. Ainda, a partir da Tabela 6.9, pode se analisar que, para condição inicial de

potência útil igual a 18,17 kW e Eficiência de Irrigação 8,9% o sistema necessitava de um motor de 300 cv para o bombeamento de água com fator da carga igual a 0,89. Substituindo os aspersores o índice de carregamento cai para 0,88, o rendimento e o fator de potência continuam aproximadamente constante, 97,0% e 84,5%, respectivamente, Figura 6.10.

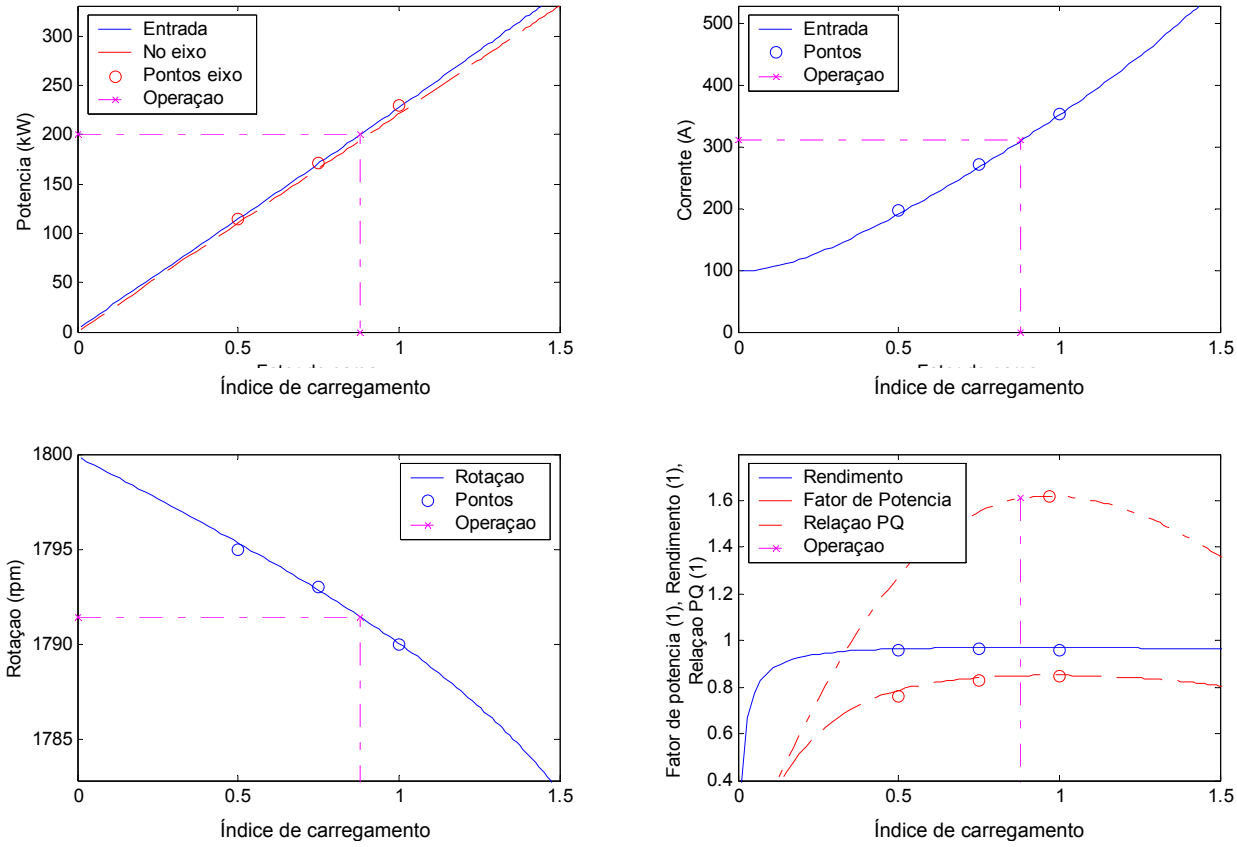


Figura 6.10. – Curvas características do motor de 300 cv do pivô C08 do Assentamento Itamarati I com a substituição dos aspersores

Quando a bomba é substituída permanece sua potência hidráulica, todavia, a potência do eixo é reduzida, passando o índice de carregamento para 0,71, o rendimento para 96,9% e o fator de potência para 83,6%, afastando-se do ponto de operação da condição de máxima relação entre a potência ativa e reativa, Figura 6.11. Da mesma forma, quando a adutora é substituída tem-se como índice de carregamento 0,40, rendimento igual a 95,9% e fator de potência igual a 73,8%, Figura 6.12.

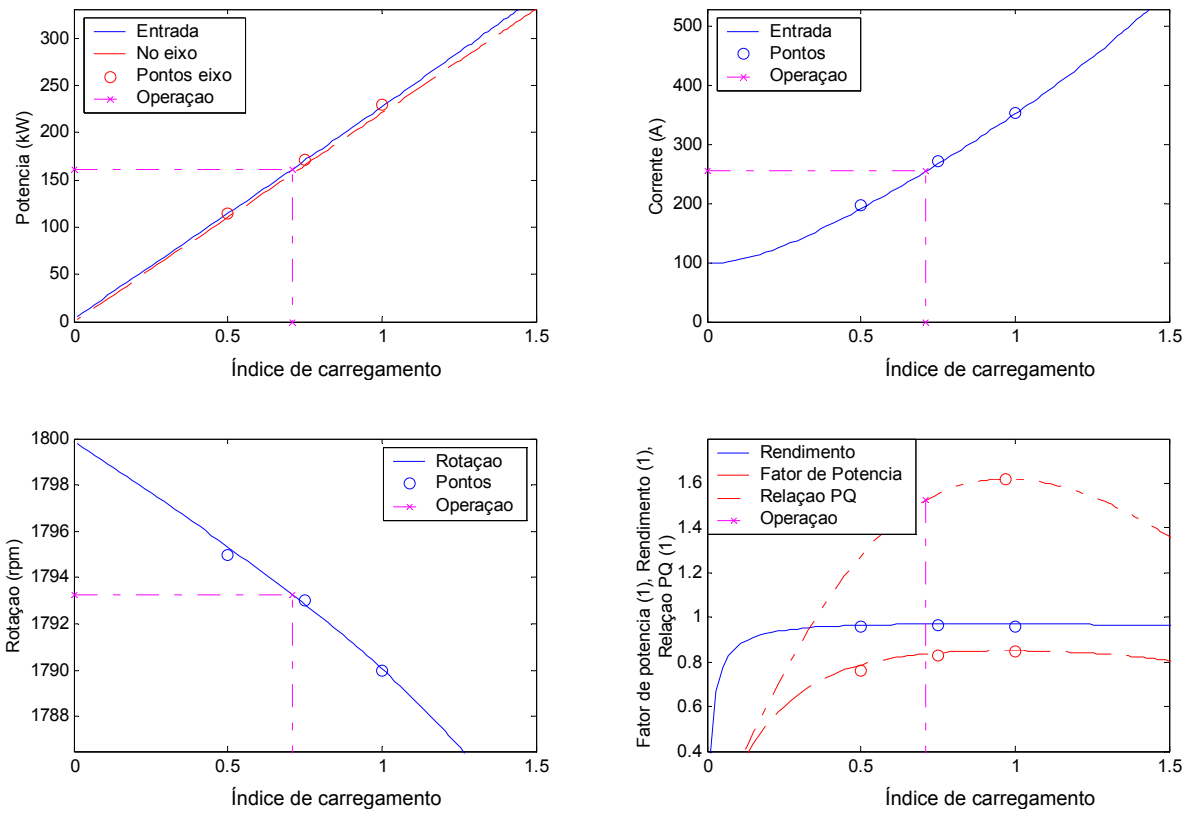


Figura 6.11. – Curvas características do motor de 300 cv do pivô C08 do Assentamento Itamarati I com a substituição dos aspersores e da bomba

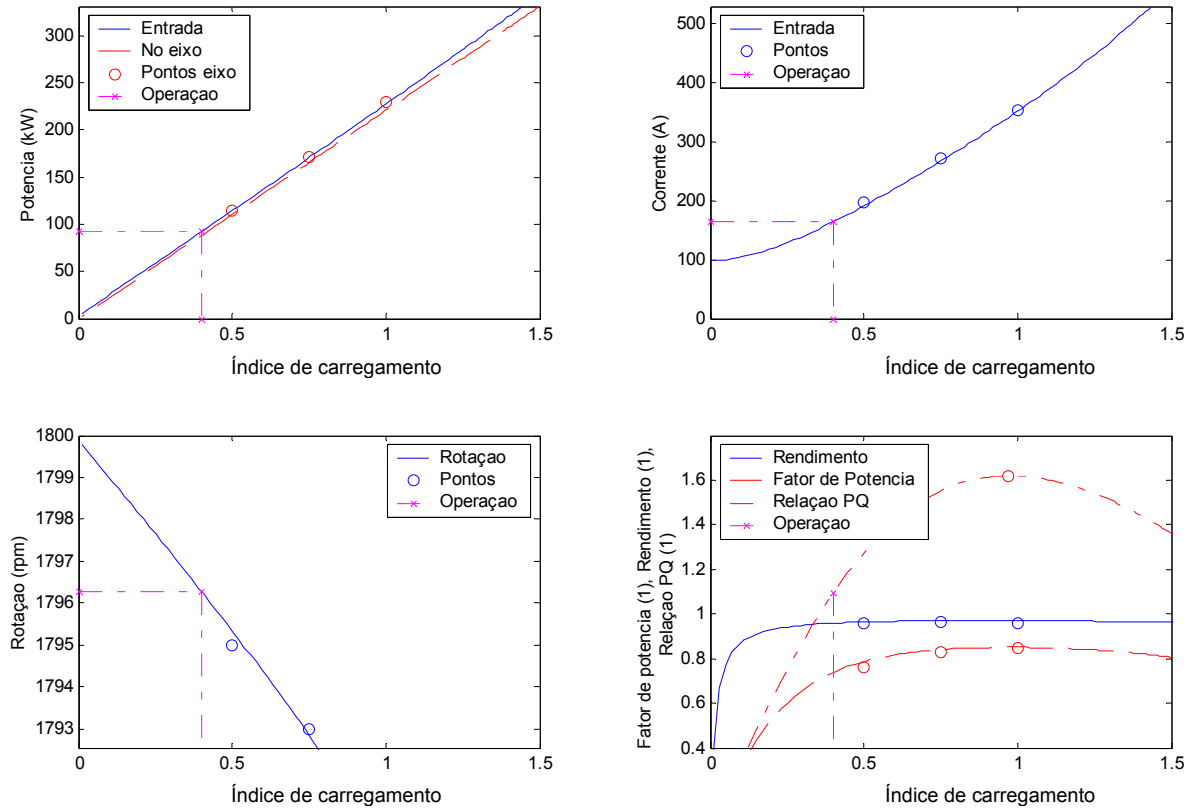


Figura 6.12. – Curvas características do motor de 300 cv do pivô C08 do Assentamento Itamarati I com a substituição dos aspersores, da bomba e da adutora

Verificando o benefício da utilização de um motor de 125 cv, verifica-se índice de carregamento igual a 0,96 e rendimento muito próximo ao motor original de 300 cv, 96,0%, todavia, com fator de potência igual a 85,0%, apresenta melhor relação entre potência ativa e reativa, Figura 6.13.

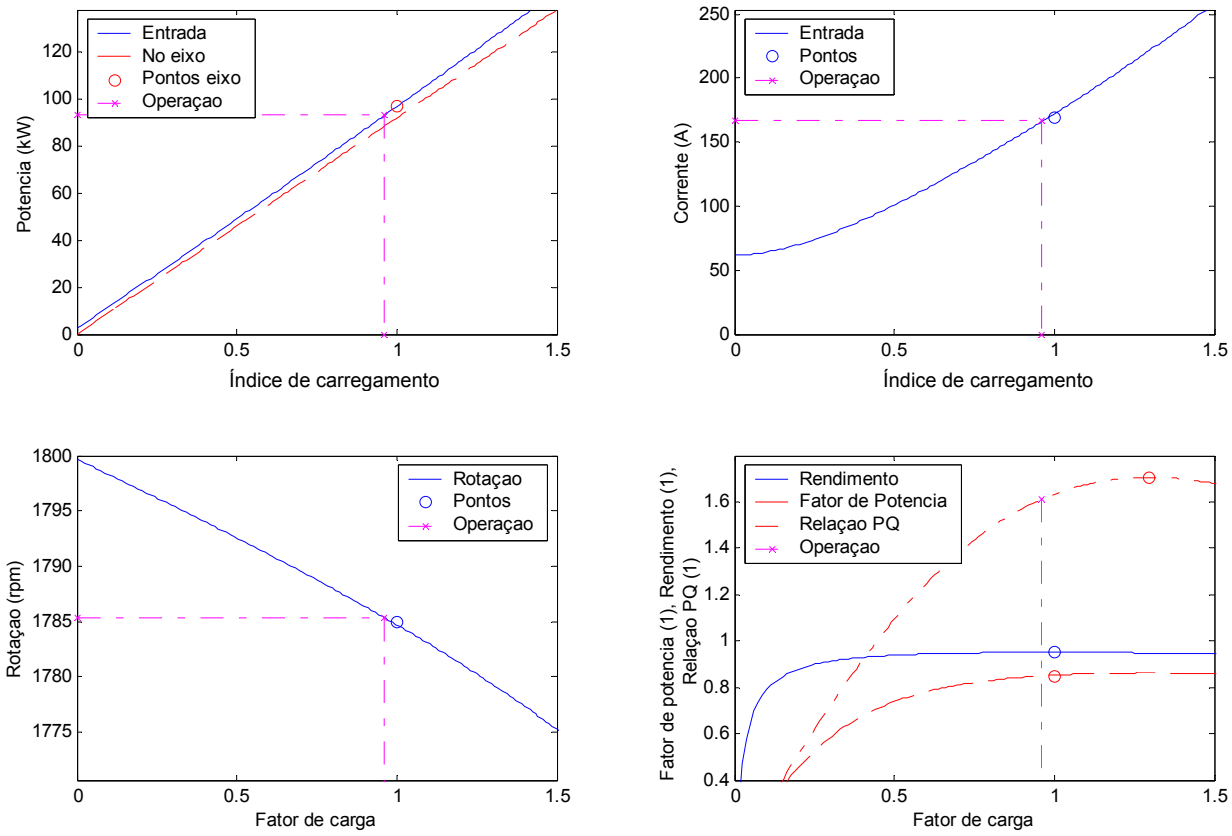


Figura 6.13. – Curvas características do motor de 125 cv do pivô C08 do Assentamento Itamarati I com a substituição dos aspersores, da bomba e da adutora

Assim, após as medidas de eficiência energéticas, um motor de 125 cv seria suficiente para fornecer 25,5 kW de potência útil e propiciando Eficiência de Irrigação igual a 27,7%. Deve-se, então, para determinar o padrão de eficiência analisar as condições de um projeto novo, Tabela 6.10.

Tabela 6.10. – Padrão de eficiência energética para o sistema de irrigação C08 do Assentamento Itamarati I

opção	vazão (m^3/s)	EA8 (%)	Altura geomet. (m)	perda de carga: sucção (mca)	perda de carga: adutora (mca)	perda de carga: lateral (mca)	perda de carga: aspersor (mca)	Hm (mca)	rend. (%)	vazão útil (mmha/h)	efic Irrig. (%)
1	0,0764	90,0	37,8	0,4	12,6	29,8	14,1	94,7	77,3	24,76	27,8

OPÇÃO:

1 - Situação atual para projeto novo

INDICADORES DO CONJUNTO MOTOR E BOMBA

Opção	Potência: entrada (kW)	Potência: hidrául. (kW)	Potência: dissip. (kW)	Consumo esp. norm. ($kWh/m^3 100m$)	Rendimento: motor (%)	Rendimento: bomba (%)	Rendimento: conjunto (%)
1	91,86	70,99	20,87	0,353	96,6	80,0	77,3

INDICADORES DAS TUBULAÇÕES

Opção	sucção: Potência elétrica (kW)	sucção: consumo especif. ($kWh/(m^3 km)$)	sucção: Dh100 (mca)	adutora: Potência elétrica (kW)	adutora: Consumo especif. ($kWh/(m^3 km)$)	adutora: Dh100 (mca)	linha lateral: Potência elétrica (kW)	linha lateral: Consumo especif. ($kWh/(m^3 km)$)	linha lateral: Dh100 (mca)
1	0,39	0,136	5,00	12,22	0,023	0,86	28,91	0,135	4,94

INDICADORES DA ASPERSÃO E SISTEMA DE IRRIGAÇÃO COMPLETO

Opção	aspersão: Potência elétrica (kW)	aspersão: consumo especif. (kWh/(mmha))	aspersão: EA80 (%)	Potência na irrigação: Entrada (kW)	Potência na irrigação: Útil (kW)	Potência na irrigação: Dissip. (kW)	Irrigação: Consumo especif. (kWh/m^3)	Irrigação: Consumo esp. norm. (kWh/(mmha100m))	Irrigação: Efic. (%)
1	16,61	0,671	90,0	91,86	25,50	66,36	0,334	9,816	27,8

Com pequena variação do calculado para o sistema existente, o projeto novo apresenta 27,8% de Eficiência de Irrigação e determina, desta forma como Padrão de Eficiência Energética para este equipamento o Consumo Específico Normalizado na Irrigação igual a 9,816 kWh/(mm.ha.100m).

6.4.4 Índices de eficiência energética nos elementos do pivô G13

O último pivô ensaiado no Assentamento Itamarati I corresponde ao G13. É apresentada na Tabela 6.11 a condição inicial e as ações de eficiência energética que podem ser implementadas neste sistema.

Tabela 6.11. – Eficiência energética no sistema de irrigação G13 do Assentamento Itamarati I

Opção	vazão (m^3/s)	EA80 (%)	Altura geomet. (m)	perda de carga: sucção (mca)	perda de carga: adutora (mca)	perda de carga: lateral (mca)	perda de carga: aspersor (mca)	Hm (mca)	rend. (%)	vazão útil (mmha/h)	efic Irrig. (%)
1	0,1042	81,7	64,7	0,8	12,0	50,9	14,1	142,5	58,8	30,64	21,8
3	0,1042	81,7	64,7	0,8	12,0	50,9	14,1	142,5	77,5	30,64	28,8
5	0,1042	81,7	64,7	0,8	12,0	34,7	14,1	126,3	58,8	30,64	24,6
6	0,1042	90,0	64,7	0,8	12,0	48,9	14,1	140,5	58,8	33,77	24,4

OPÇOES:

1 - Situação atual

3 - Substituição da bomba

5 - Substituição da linha lateral

6 - Substituição dos aspersores

Observa-se que, com a maior Eficiência de Irrigação dentre os equipamentos ensaiados (21,8%), as alternativas a serem analisadas para o pivô G13 consistem na substituição da bomba, de parte da linha lateral e dos difusores e acessórios.

Assim, conforme mostrado na Tabela 6.11, substituir a bomba eleva para 28,8%, trocar parte da linha lateral propicia 24,6% e instalar difusores e reguladores novos em pendurais determina Eficiência de Irrigação igual a 24,4%. A análise da melhor opção pode ser obtida a partir da Figura 6.14.

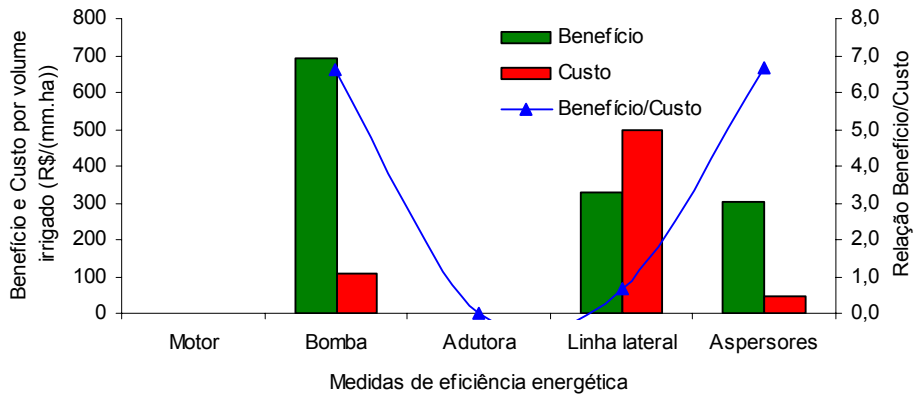


Figura 6.14. – Avaliação econômica do sistema de irrigação G13 do Assentamento Itamarati I

Novamente observa-se que, com relação custo-benefício igual a 6,68, a instalação dos novos emissores e acessórios é a melhor opção seguida da substituição da bomba onde pode se obter, como resultado, as características apresentadas na Tabela 6.12

Tabela 6.12. – Resultado da avaliação econômica da eficiência energética no sistema de irrigação do pivô G13

opção	vazão (m³/s)	EA8 (%)	Altura geomet. (m)	perda de carga: sucção (mca)	perda de carga: adutora (mca)	perda de carga: lateral (mca)	perda de carga: aspersor (mca)	Hm (mca)	rend. (%)	vazão útil (mmha/h)	efic Irrig. (%)
1	0,1042	81,7	64,7	0,8	12,0	50,9	14,1	142,5	58,8	30,64	21,8
6	0,1042	90,0	64,7	0,8	12,0	48,9	14,1	140,5	58,8	33,77	24,4
3	0,1042	90,0	64,7	0,8	12,0	48,9	14,1	140,5	77,6	33,77	32,2

OPÇOES:

1 - Situação atual

3 - Substituição da bomba

6 - Substituição dos aspersores

INDICADORES DO CONJUNTO MOTOR E BOMBA

Opção	Potência: entrada (kW)	Potência: hidrául. (kW)	Potência: dissip. (kW)	Consumo esp. norm. (kWh/m³100m)	Rendimento: motor (%)	Rendimento: bomba (%)	Rendimento: conjunto (%)
1	247,60	145,67	101,93	0,463	96,9	60,7	58,8
6	244,09	143,61	100,48	0,463	96,9	60,7	58,8
3	185,06	143,61	41,45	0,351	97,0	80,0	77,6

INDICADORES DAS TUBULAÇÕES

Opção	sucção: Potência elétrica (kW)	sucção: consumo especif. (kWh/(m³km))	sucção: Dh100 (mca)	adutora: Potência elétrica (kW)	adutora: Consumo especif. (kWh/(m³km))	adutora: Dh100 (mca)	linha lateral: Potência elétrica (kW)	linha lateral: Consumo especif. (kWh/(m³km))	linha lateral: Dh100 (mca)
1	1,36	0,142	5,23	20,82	0,014	0,52	88,48	0,237	8,70
6	1,36	0,142	5,23	20,82	0,014	0,52	84,97	0,228	8,36
3	1,03	0,142	5,23	15,79	0,014	0,52	64,43	0,228	8,36

INDICADORES DA ASPERSÃO E SISTEMA DE IRRIGAÇÃO COMPLETO

Opção	aspersão: Potência elétrica (kW)	aspersão: consumo especif. (kWh/(mmha))	aspersão: EA80 (%)	Potência na irrigação: Entrada (kW)	Potência na irrigação: Útil (kW)	Potência na irrigação: Dissip. (kW)	Irrigação: Consumo especif. (kWh/m³)	Irrigação: Consumo esp. norm. (kWh/(mmha100m))	Irrigação: Efic. (%)
1	38,48	1,256	81,7	247,60	54,02	193,58	0,660	12,490	21,8
6	27,33	0,810	90,0	244,09	59,53	184,56	0,651	11,173	24,4
3	27,33	0,810	90,0	185,06	59,53	125,53	0,493	8,471	32,2

Pode ser observado na Tabela 6.12 que, enquanto a Eficiência de Aplicação eleva-se de 81,7% para 90%, a potência elétrica de entrada reduz-se de 247,6 kW para 185,6 kW e a Eficiência de Irrigação alcança 32,2%. Verifica-se, ainda, que o motor de 300 cv com carregamento de 1,09, rendimento de 96,9% e fator de potência igual a 84,9%, Figura 5.6b, apresenta novo índice de carregamento igual a 0,81, rendimento de 97,0% e fator de potência igual a 84,6%, afastando-se da melhor relação PQ, Figura 6.15.

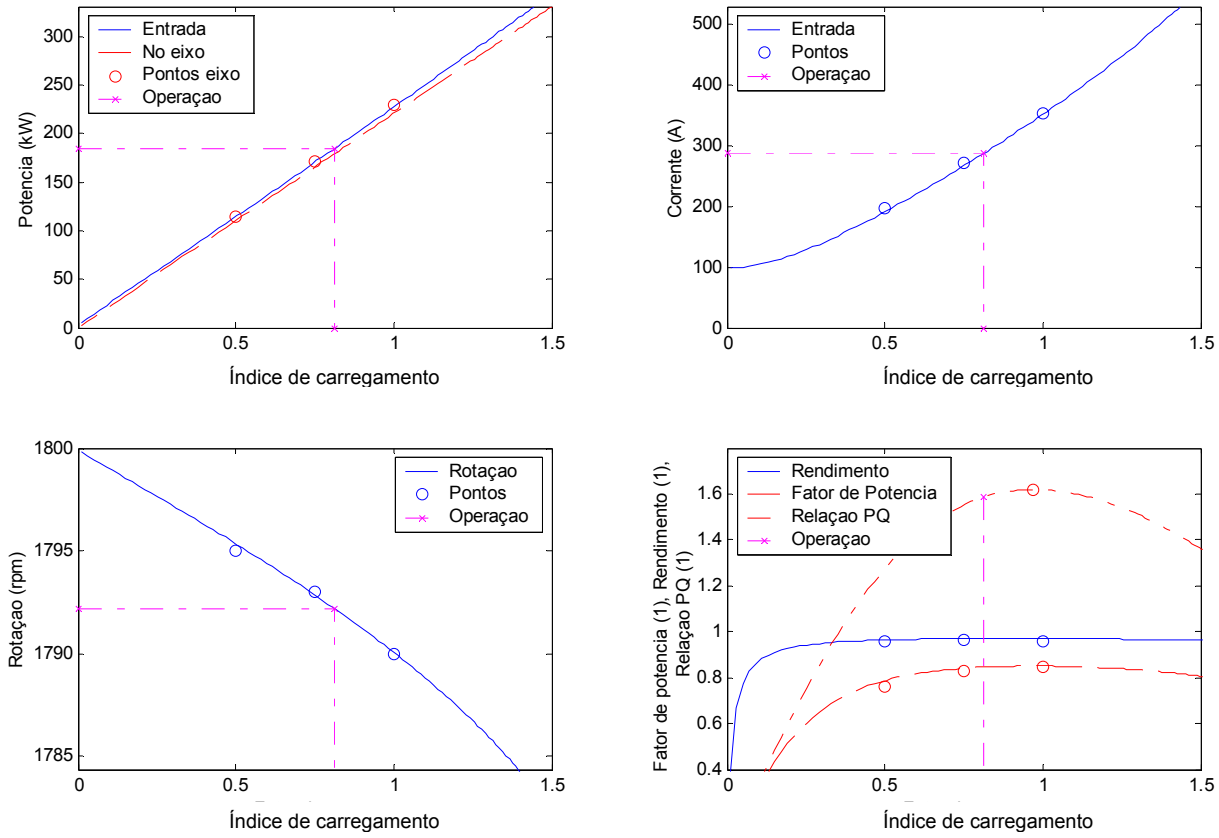


Figura 6.15. – Curvas características do motor de 300 cv do pivô G13 do Assentamento Itamarati I com a substituição dos aspersores e da bomba

Verificando a existência de outras medidas economicamente viáveis, sob condição de projeto, determinam-se os dados apresentados na Tabela 6.13.

Tabela 6.13. – Padrão de eficiência energética para o sistema de irrigação C08 do Assentamento Itamarati I

opção	vazão (m³/s)	EA8 (%)	Altura geomet. (m)	perda de carga: sucção (mca)	perda de carga: adutora (mca)	perda de carga: lateral (mca)	perda de carga: aspersor (mca)	Hm (mca)	rend. (%)	vazão útil (mmha/h)	efic Irrig. (%)
1	0,1042	90,0	64,7	0,8	12,1	51,2	14,1	142,9	77,0	33,77	31,4

INDICADORES DO CONJUNTO MOTOR E BOMBA

Opção	Potência: entrada (kW)	Potência: hidrául. (kW)	Potência: dissip. (kW)	Consumo esp. norm. (kWh/m³100m)	Rendimento: motor (%)	Rendimento: bomba (%)	Rendimento: conjunto (%)
1	189,70	146,10	43,60	0,354	96,3	80,0	77,0

INDICADORES DAS TUBULAÇÕES

Opção	sucção: Potência elétrica (kW)	sucção: consumo especif. (kWh/(m³km))	sucção: Dh100 (mca)	adutora: Potência elétrica (kW)	adutora: Consumo especif. (kWh/(m³km))	adutora: Dh100 (mca)	linha lateral: Potência elétrica (kW)	linha lateral: Consumo especif. (kWh/(m³km))	linha lateral: Dh100 (mca)
1	1,06	0,145	5,33	16,06	0,014	0,53	67,97	0,238	8,75

INDICADORES DA ASPERSÃO E SISTEMA DE IRRIGAÇÃO COMPLETO

Opção	aspersão: Potência elétrica (kW)	aspersão: consumo especif. (kWh/(mmha))	aspersão: EA80 (%)	Potência na irrigação: Entrada (kW)	Potência na irrigação: Útil (kW)	Potência na irrigação: Dissip. (kW)	Irrigação: Consumo especif. (kWh/m³)	Irrigação: Consumo esp. norm. (kWh/(mmha100m))	Irrigação: Efic. (%)
1	27,58	0,817	90,0	189,70	59,53	130,16	0,506	8,683	31,4

Observa-se que, para condição simulada, um motor de 250 cv é suficiente para acionar a bomba, obtendo ainda, índice de carregamento igual a 0,99, todavia com rendimento inferior ao motor de 300 cv, 96,3%. O fator de potência para o motor avaliado, com valor igual a 84,1%, apresenta o ponto de máxima relação entre a potência ativa e reativa, PQ, acima da potência nominal do motor, Figura 6.16.

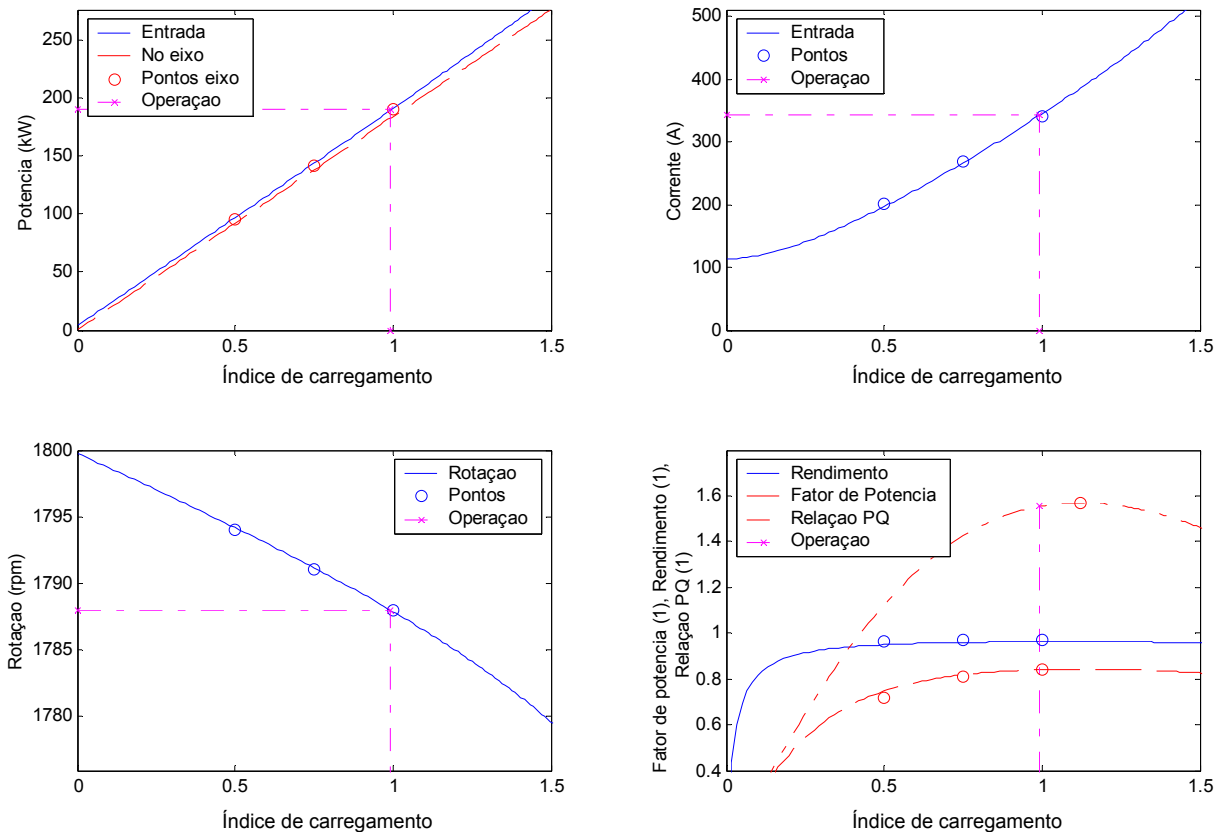


Figura 6.16. – Curvas características do motor de 250 cv do pivô G13 do Assentamento Itamarati I com a substituição dos aspersores e da bomba

6.4.5 Padrão de eficiência energética de pivôs centrais

A análise de quatro pivôs é insuficiente para se determinar um padrão definitivo de eficiência energética para pivôs centrais de irrigação. Uma vez que a análise considera uma condição específica de utilização, custo médio da energia, custo do dinheiro e orçamentos, fica aqui determinado um padrão de eficiência energética referencial que deve, através do uso e disseminação dos procedimentos desenvolvidos, ser ajustado.

O indicador de consumo mínimo, variando, ainda, com o estado tecnológico do equipamento, deve ser revisado periodicamente para garantir preços que viabilizem o projeto de irrigação e propiciem ganhos em eficiência, a partir da concorrência entre fabricantes. Considerando os sistemas avaliados, suas principais características e sua nova configuração de projeto são apresentadas na Tabela 6.14.

Tabela 6.14. – Características atuais e projeto novo para os pivôs da Embrapa Agropecuária Oeste e do Assentamento Itamarati I ensaiados.

Pivô		Condição atual				Projeto novo			
		Potência do Motor (cv)	Adutora		Linha lateral Comprimento (m) x diâmetro (pol)	Potência do Motor (cv)	Adutora		Linha lateral Comprimento (m) x diâmetro (pol)
			Diâmetro (mm)	Material			Diâmetro (mm)	Material	
1	Embrapa	40	150	Alumínio	247,8x6 5/8" + 9,8x4"	25	150	pvc	247,8x6 5/8" + 9,8x4"
2	L06	250	300	F.C*	234,5x8"+369,5x6 5/8"+9x4"	250	300	pvc	234,5x8"+369,5x6 5/8"+9x4"
3	C08	300	200	F.C*	592x6 5/8" + 12x4"	125	250	pvc	592x6 5/8" + 12x4"
4	G13	300	300	F.C*	586,28x6 5/8"	250	300	pvc	156x8+431x6 5/8"

* Ferro cimentado

Pode se verificar a redução da potência dos motores necessários para o bombeamento nos sistemas de irrigação. A mais significativa refere-se ao pivô C08 que passa a exigir um motor de 125 cv no lugar do atualmente utilizado de 300 cv. No pivô da Embrapa, através da redução da perda de carga nos reguladores de pressão, há necessidade de um motor de 25 ao invés de 40 cv, funcionando com 18% de sobrecarga.

Considerando as configurações economicamente viáveis, para a condição de utilização e orçamentos analisados, é possível verificar o fluxo energético nos equipamentos de irrigação, Figura 6.17.

A partir da Figura 6.17, observa-se uma melhor distribuição e homogeneidade no fluxo energético entre os pivôs após a aplicação da metodologia de análise das medidas de eficiência energética. Verifica-se, ainda, a maior potência útil associada ao pivô G13, que possui maior desnível geométrico.

A potência dissipada na linha lateral do pivô da Embrapa possui menor parcela de perdas que nos pivôs do Assentamento Itamarati I, devido a utilização da mesma seção da tubulação aérea dos pivôs de grande porte, apesar de possuir pequena vazão, caracterizando assim baixa velocidade do fluido e baixa perda de carga. A potência perdida na conversão de energia elétrica para hidráulica é maior no pivô da Embrapa, haja vista, o rendimento do motor ser inferior para equipamentos menores.

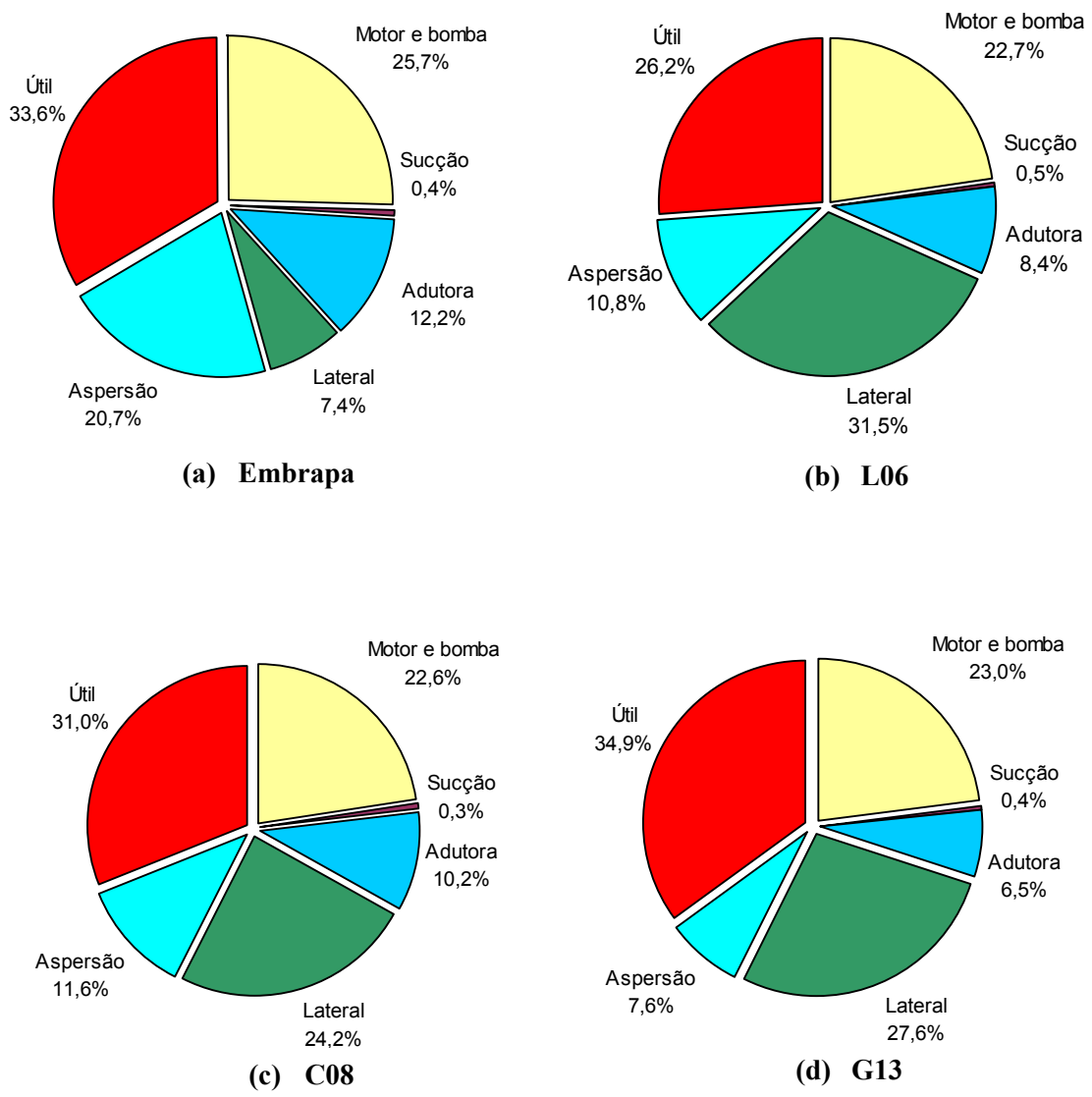


Figura 6.17. – Fluxo energético nos pivôs ensaiados na Embrapa Agropecuária Oeste e Assentamento Itamarati I após as medidas de eficiência energética

É possível, agora, definir e comparar os índices de eficiência energéticos apresentados no Capítulo V sob as novas configurações para, então, se definir o padrão de eficiência de pivôs centrais. Desta forma, são apresentados na Tabela 6.15 os índices que podem ser visualizados nas Figuras 6.18 e 6.19.

Tabela 6.15. – Índices de eficiência energética baseados nos pivôs ensaiados na Embrapa Agropecuária Oeste e no Assentamento Itamarati I em abril de 2006.

	Pivô	Motor e Bomba		Sucção		Adutora	
		C_{EN} (kWh/(m³.100m))	η (%)	C_{ENT} (kWh/(m³.km))	Δh_{100} (mca)	C_{ENT} (kWh/(m³.km))	Δh_{100} (mca)
1	Embrapa	0,367	74,3	0,082	3,00	0,036	1,32
2	L06	0,353	77,3	0,066	2,41	0,026	0,96
3	C08	0,353	77,3	0,136	5,00	0,023	0,86
4	G13	0,353	77,0	0,145	5,06	0,014	0,53

Continuação

	Pivô	Lateral		Aspersão		Sistema de irrigação		
		C_{ENT} (kWh/(m³.km))	Δh_{100} (mca)	C_{Easp} (kWh/mm.ha)	EA_{80} (%)	C_{EI} (kWh/m³)	C_{ENI} (kWh/(mm.ha.100m))	E_I (%)
1	Embrapa	0,053	1,94	0,537	90,0	0,19	9,00	30,3
2	L06	0,184	6,75	0,691	90,0	0,37	11,63	23,4
3	C08	0,135	4,94	0,671	90,0	0,35	9,82	27,8
4	G13	0,238	8,75	0,817	90,0	0,45	8,68	31,4

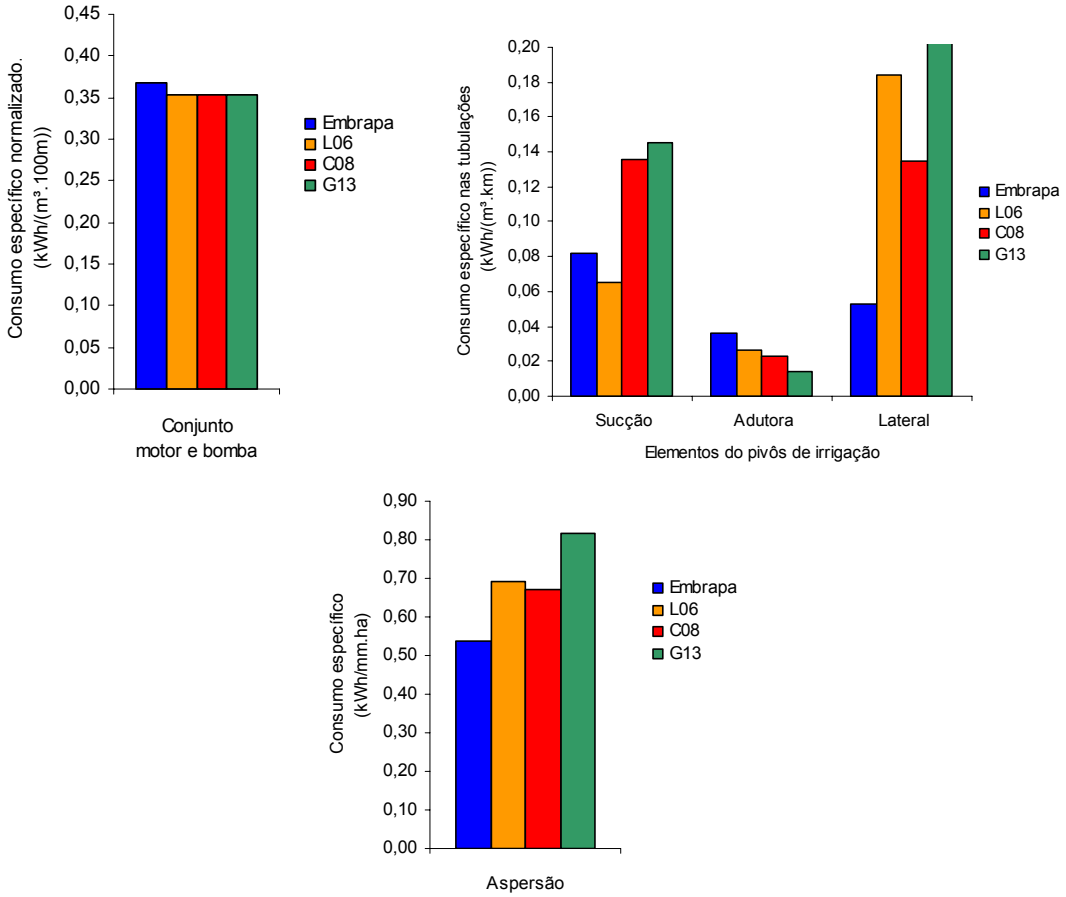


Figura 6.18. – Padrões de Eficiência Energética propostos para os elementos dos pivôs da Embrapa Agropecuária Oeste e Assentamento Itamarati I ensaiados

Pode se observar, na Figura 6.18, que o Consumo Específico Normalizado no sistema de bombeamento, indicador associado ao rendimento do conjunto motor e bomba, depende da potência da bomba e do motor e, por isso, o pivô da Embrapa, com bomba de 25 cv possui o maior valor encontrado (0,367 kWh/(m³.100m)) enquanto que os equipamentos de potência maiores (igual e superiores a 125 cv) mantém-se iguais a 0,353 kWh/(m³.100m).

O consumo da sucção tem pouca representatividade na energia gasta pelo sistema. Por outro lado, a adutora tem Consumo Específico Normalizado variando entre 0,014 a 0,036 kWh/(m³.km) e, de forma similar, a perda de carga em 100 m varia entre 0,53 a 1,32 mca. Observa-se que os indicadores de eficiência energética na tubulação estão associados ao custo médio da energia que, por sua vez, depende da utilização do sistema. Assim, uma elevação no custo médio da energia poderia justificar o aumento do diâmetro da adutora e a conseqüente redução do consumo específico deste elemento.

As linhas laterais possuem Consumo Específico Normalizado superiores aos das adutoras, de onde se conclui que, sendo estas tubulações aéreas, necessitam de maior espessura de parede para sustentação mecânica e, ainda, constituindo-se de aço galvanizada, possui maior custo e coeficiente de rugosidade. Assim, quando se realiza a análise econômica das medidas de eficiência energética há maiores perdas de energia nas tubulações das linhas laterais.

A aspersão, por sua vez, é determinada pela pressão de trabalho e pela perda da energia associada à Eficiência de Aplicação. Uma vez que pivôs com maiores comprimentos de adutoras e altura geométrica perdem mais energia, mesmo com Eficiência de Aplicação constante, este índice será dependente da instalação dos pivôs.

É possível, ainda, consolidar os índices dos elementos dos pivôs de forma a englobar todo o sistema de irrigação e apresentar o padrão de eficiência energética obtido neste trabalho, Figura 6.19.

Sendo o Consumo Específico, indicador usualmente utilizado, dependente das condições de instalação do sistema de irrigação, Figura 6.19, é possível observar que, além da eficiência dos elementos do equipamento, este índice depende da altura geométrica entre a captação de água e a altura da cultura no ponto mais desfavorável de operação. Desta forma, sendo a altura geométrica 22,9, 34,2, 37,8 e 64,7 m para os pivôs da Embrapa, L06, C08 e G13, o Consumo Específico acompanha aproximadamente esta tendência.

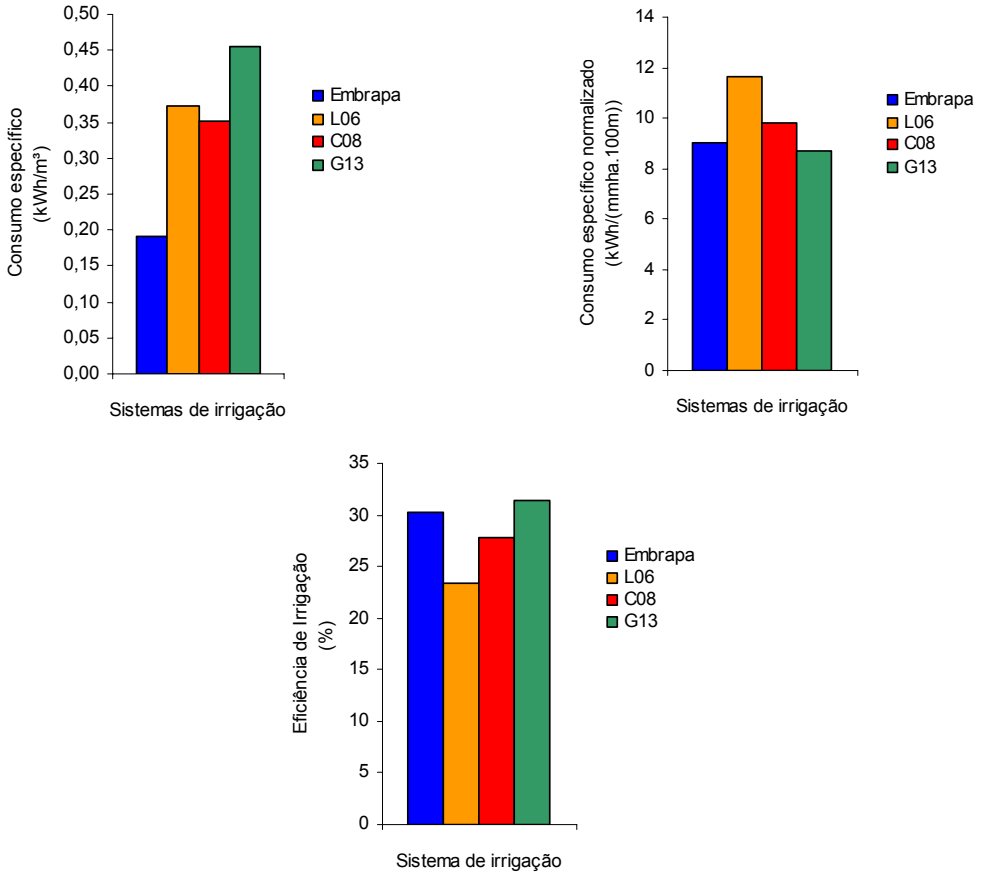


Figura 6.19. – Índices de Eficiência Energética do sistema de irrigação dos pivôs da Embrapa Agropecuária Oeste e Assentamento Itamarati I ensaiados

É possível determinar a Eficiência de Irrigação, caracterizando a porcentagem da energia elétrica útil associada à disposição de água para o sistema radicular das culturas. Estes índices foram iguais a 23,4, 27,8, 30,3 e 31,4%, respectivamente, para os pivôs L06, C08, da Embrapa e G13. Deve-se ainda ressaltar que, por utilizar como referência a altura geométrica do sistema para se determinar a energia útil, o pivô G13, com maior desnível, apresenta também a maior Eficiência de Irrigação

Por fim, o Consumo Específico Normalizado na Irrigação, caracterizando o pivô em qualquer condição de instalação, define como pivô mais eficiente o G13, com 8,68 kWh/(mm.ha.100m), seguido por 9,00, 9,82 e 11,63 kWh/(mm.ha.100m), respectivamente, nos pivôs da Embrapa, C08 e L06. Assim, será definido como Padrão de Eficiência Energética para pivôs centrais, sob as condições simuladas, o menor valor obtido, ou seja, 8,68 kWh/(mm.ha.100m).

Verificando a representatividade das medidas propostas no custo total da energia consumida nos sistemas de irrigação do Assentamento Itamarati I em 2004, é possível se obter os valores apresentados na Tabela 6.16.

Tabela 6.16. – Extrapolação das Eficiências Energéticas aos sistemas de irrigação dos pivôs ensaiados para o consumo do Assentamento Itamarati I em 2004.

Benefício	Reforma				Projeto novo			
	Eficiência de Irrigação (%)	Energia dissipada (R$)	Economia (R$)	Economia %	Eficiência de Irrigação (%)	Energia dissipada (R$)	Economia (R$)	Economia %
Menor	21,8	843.955,20	(5.396,13)	-0,5	21,8	843.955,20	58.278,24	5,4
	21,3	849.351,33			27,2	785.676,96		
Maior	8,1	991.917,16	260.201,53	24,1	8,1	991.917,16	251.567,72	23,3
	32,2	731.715,63			31,4	740.349,44		
Fatura anual de energia:		1.079.226,59						

A partir da Tabela 6.16, é possível observar que os benefícios econômicos com a implementação de medidas de eficiência energética podem alcançar até 24,1% para reforma e 23,3% em projetos novos. Assim, considerando os dados obtidos como representativos para os sistemas de irrigação do Assentamento Itamarati I, com base na fatura de 2004 é possível economizar na condição de maior benefício até R$ 260,2 mil ao ano de energia através da implementação de medidas de eficiência energética. Na condição de projeto novo este valor pode chegar a R$ 251,6 mil.

Considerando ainda a estimativa de 1928 GWh/ano para o consumo em sistemas de irrigação por pivô central apresentada no Capítulo I e, utilizando como incremento médio da economia determinada para projetos novos, ou seja, 11,9%, é possível se obter 229,4 GWh/ano de energia evitada, ou ainda, 40,72 milhões de reais ano de economia de energia através de pivôs centrais eficientes no Brasil.

CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Utilizando 4,8% da área cultivada, a agricultura irrigada no Brasil contribui com 16% da produção e garante 35% do faturamento em produtos agrícolas. Por outro lado, as perdas de energia podem chegar até 91,1% em sistemas pivôs centrais de irrigação.

Para potencializar a implementação de medidas de eficiência energética em sistemas de irrigação pivôs centrais, buscou-se apresentar as políticas e programas relacionados ao uso eficiente da energia elétrica e as metodologias utilizadas para a avaliação destes sistemas. Verificou-se, então, a necessidade do desenvolvimento de indicadores e a proposição de uma etiqueta e um padrão de eficiência adequado à caracterização completa deste sistema, de forma a englobar as condições de desempenho energético e agrícola da irrigação.

A avaliação agrícola e energética, atualmente utilizada para sistemas de irrigação é realizada principalmente por meio da Eficiência de Aplicação, do Coeficiente de Heerman e Hein e do Consumo Específico. Observou-se, todavia, que apesar da representatividade da avaliação disponível na literatura, havia a necessidade da associação destes elementos para a definição de indicadores gerais. Estes indicadores deveriam fornecer informações sobre a eficiência de irrigação durante a compra e uso, além de estimular a concorrência entre os profissionais envolvidos na fabricação, no projeto e venda destes sistemas.

Partindo dos indicadores existentes, foi proposta, justificada e experimentada uma metodologia de avaliação e definido um procedimento para integração das variáveis agrícolas e energéticas. O Consumo Específico do Aspersor (C_{Easp}), Consumo Específico Normalizado na Irrigação (C_{ENI}) e a Eficiência de Irrigação (EI), propostos neste trabalho, podem ser utilizados para fornecer as informações sobre eficiência energética nos pivôs centrais com os objetivos esperados.

Os indicadores propostos partem da determinação do volume útil disponível na zona radicular da planta para, pelo menos, 80% da parcela irrigada. Considerou-se, ainda, para a obtenção da energia útil, a altura geométrica entre o manancial e a altura desejada para a cultura na condição mais desfavorável e, ao invés do volume bombeado, o volume associado à lâmina disponível na zona radicular da planta.

Assim, definida a metodologia e os indicadores desejados, foram ensaiados quatro sistemas de irrigação por pivô central, um na Embrapa Agropecuária Oeste e três no Assentamento Itamarati I no Mato Grosso do Sul. O equipamento da Embrapa possibilitou, devido à logística, a avaliação da metodologia proposta, o treinamento dos técnicos e a verificação dos instrumentos utilizados. O Assentamento Itamarati I, representando aproximadamente 1% da área irrigada por pivô central no Brasil, com 7.232 ha, 58 unidades, 16.260 cv instalados e um gasto com energia elétrica de R$ 1,08 milhão em 2004, apresentou informações relevantes sobre a aplicabilidade dos indicadores propostos.

Inicialmente, a partir dos resultados dos Ensaios de Avaliação Energética de Pivôs Centrais, foram determinados etiquetas de eficiência energética que apresentam, como caracterização principal, os indicadores propostos Consumo Específico Normalizado na Irrigação (C_{ENI}) e Eficiência de Irrigação (E_I).

O Consumo Específico Normalizado na Irrigação (C_{ENI}) determina a energia ativa necessária para irrigar adequadamente pelo menos 80% de um hectare quando a altura geométrica entre o manancial e a altura desejada para a cultura na condição mais desfavorável é igual a 100 metros. Assim, o sistema de irrigação da Embrapa necessita 20,47 kWh, ao passo que, com 15,01, 30,47 e 12,49 kWh os pivôs L06, C08 e G13 podem irrigar sob esta condição.

O segundo indicador proposto, Eficiência de Irrigação, associa a energia absorvida pelo motor com a energia útil. A energia útil é definida neste trabalho como a potência média ao longo de uma hora necessária ao deslocamento do volume disponível à zona radicular da planta em pelo menos 80% da área, considerando a altura geométrica entre o manancial e a altura desejada para a cultura na condição mais desfavorável. Obtiveram-se, então, Eficiências de Irrigação iguais a 13,1, 18,2, 8,9 e 21,8% para os pivôs da Embrapa, L06, C08 e G13 respectivamente. Isto significa dizer que o pivô C08 perde 91,1% de sua energia total.

Caracterizados os equipamentos, foi necessária a determinação de um padrão de eficiência para identificar uma condição ótima de projeto. Para isto foram analisados, detalhadamente, os elementos componentes do pivô central. Assim, a partir da estratificação dos equipamentos de irrigação em motor, bomba, tubulação de sucção, adutora, linha lateral e

aspersores, foi possível caracterizar a energia dissipada em cada elemento e a total, bem como calcular os indicadores de eficiência propostos.

Com rendimentos nos conjuntos motor e bomba variando entre 53,2 e 72,5%, as bombas dos pivôs da Embrapa, L06, C08 e G13 apresentaram 14,85, 42,60, 68,81 e 94,33 kW de perdas, respectivamente. O rendimento dos motores, superior a 92,96%, apresentou suas perdas limitadas a 7,60 kW. Assim, os Consumos Específicos nos conjuntos motor e bomba obtidos foram iguais a 0,512, 0,376, 0,436, 0,463 kWh/(m³.100m) nos pivôs da Embrapa, L06, C08 e G13, respectivamente.

As tubulações de sucção, por possuírem pequeno comprimento, apresentaram perdas iguais ou inferiores a 1,36 kW. Todavia, as adutoras com comprimento de até 2.298 m, são responsáveis por até 102,55 kW da energia dissipada no sistema. Os indicadores utilizados para caracterização destes elementos foram a perda de carga em 100 m e o Consumo Específico Normalizado na Tubulação (C_{ENT}).

Variando entre 0,52 para o pivô G13 e 5,84 mca por 100 m para o pivô C08, os Consumos Específicos Normalizados na Tubulação determinados foram iguais a 0,051, 0,051, 0,159 e 0,014 kWh/(m³.km) para os pivôs da Embrapa, L06, C08 e G13 respectivamente.

Observaram-se variações de até 48,5% entre os valores obtidos através do ensaio e os valores calculados na avaliação das adutoras. Esta diferença pode ser justificada, principalmente, pela indisponibilidade do coeficiente de rugosidade real da instalação e devido a problemas de incrustações ou estrangulamento nas tubulações ensaiadas, uma vez que, calculando-se as perdas de cargas com os valores padrões disponíveis nas bibliografias específicas, não se considera o envelhecimento e os problemas de manutenção existentes nos sistemas de irrigação.

As linhas laterais, por sua vez, com comprimentos variando entre 257,6 m e 613 m, apresentaram perdas de até 88,48 kW. Assim, com perda de carga de 12,42, 6,72, 5,24 e 8,70 mca por 100 m os Consumos Específicos Normalizados na Tubulação obtidos foram de 0,338, 0,183, 0,143 e 0,247 kWh/(m³.km) para os pivôs da Embrapa, L06, C08 e G13 do Assentamento Itamarati I respectivamente.

Pôde-se observar na linha lateral que o excesso de pressão fornecido pela bomba do pivô da Embrapa, dissipado nos reguladores de pressão, ocasionou perdas de carga igual a 30,78 mca. Por outro lado, a elevada velocidades do fluido, até 5,05 m/s, propiciaram elevadas perdas nas linhas laterais dos pivôs do Assentamento Itamarati I.

O indicador proposto para a aspersão associa os parâmetros agrícolas e energéticos na avaliação do pivô central de irrigação. Assim, considerando uma área adequadamente irrigada

de 80%, definiu-se o volume útil do sistema caracterizado por Eficiências de Aplicação (EA_{80}) iguais a 88,54%, 81,24%, 64,11%, 81,67%. Observou-se, então, que os volumes de água bombeada equivalentes a 11,46%, 18,72%, 35,89% e 18,33% não permaneciam disponíveis na zona radicular da planta.

Desta forma, sendo os aspersores responsáveis pela energia necessária para a formação e distribuição das gotas na área irrigada, um milímetro disponível em pelo menos 80% de um hectare consome, para o pivô da Embrapa, 0,670 kWh e para os pivôs L06, C08 e G13 do Assentamento Itamarati I 1,080, 2,970 e 1,260 kWh. Assim, nestes elementos do sistema de irrigação são dissipadas potências de 5,33 kW para o pivô da Embrapa que possui linha lateral igual a 257,6 m e 40,78, 52,37, 38,48 kW para os pivôs L06, C08 e G13 de tubulações com comprimentos de 600 metros aproximadamente.

O mais importante fator responsável pela baixa Eficiência de Aplicação foi a irregularidade distribuição da lâmina na parcela irrigada obtida. Caracterizado pelo Coeficiente de Uniformidade de Heerman e Hein, com valor determinado igual a 72,5%, o pivô C08 é considerado com eficiência de distribuição de água ruim por ABNT (1998) e os pivôs da Embrapa, L06 e G13, apresentando índices superiores a 85%, são caracterizados como bons pela mesma referência. Esta irregularidade na distribuição de água pode ser atribuída, principalmente, ao envelhecimento dos difusores, sua instalação acima da tubulação da linha lateral, caso dos equipamentos do Assentamento Itamarati I e a utilização de aspersores fora da especificação.

Após a avaliação das condições iniciais dos equipamentos buscou-se a determinação do padrão de eficiência energética para os sistemas de irrigação por pivô central. Utilizando a metodologia de análise econômica de investimento, índices foram obtidos pelo equilíbrio entre os investimentos na aplicação de medidas de eficiência energética e a redução dos gastos com a energia elétrica ao longo da vida útil do equipamento para a obtenção do padrão proposto. Para isto, foi necessário o equacionamento de todas as perdas em um pivô central de irrigação.

Considerando uma condição específica de funcionamento do sistema de irrigação, determinou-se uma tarifa média de R$ 0,177485 por kWh. Desta forma, através da análise econômica, o projetista via-se diante da possibilidade de substituir o motor por outro de alto rendimento, trocar a bomba, a adutora, parte de linha lateral ou ainda os aspersores.

Após a análise verificou-se, considerando medidas economicamente viáveis, a redução do Consumo Específicos Normalizado na Irrigação do pivô da Embrapa de 20,47 para 9,00 kWh/(mm.ha.100m), ou ainda, o aumento da Eficiência de Irrigação de 13,3% para

30,3%. O ganho de eficiência obtido nas medidas simuladas neste sistema pôde ser observado considerando que o motor inicial de 40 cv com 18% de sobrecarga poderia, após a implementação das medidas, ser substituído por outro de 25 cv sob condição nominal de funcionamento. Também como benefício observou-se que a percolação do sistema de irrigação da Embrapa foi reduzida com o aumento da vazão útil de 7,96 para 8,09 mm.ha/h e a perda de energia, por sua vez, com valor inicial igual a 32,34 passou para 11,62 kW, ou seja, reduziu 64%.

As Eficiências de Irrigação dos pivôs L06, C08 e G13 alcançaram, para sistemas economicamente viáveis, valores iguais a 23,4, 27,8 e 31,4% e, desta forma, as potências dissipadas reduziram-se de 158,87 kW para 127,12 kW, 184,93 kW para 66,36 kW e 193,58 para 130,16 kW respectivamente. Observou-se ainda, que nos projetos eficientes, o motor do pivô C08, inicialmente com potência igual 300 cv, poderia ser substituído por outro de 125 cv e o pivô G13 necessita agora potência de 250 cv ao invés dos 300 cv iniciais. Assim, os projetos passam a ter características de eficiência similares, determinadas pelo seu uso, custo dos equipamentos, juros e tarifas de energia.

Assim, sob as condições analisadas, pôde-se concluir que um equipamento de irrigação por pivô central deve possuir como Padrão de Eficiência Energética o Consumo Específico Normalizado na Irrigação igual ou inferior a 8,68 kWh/(mm.ha.100m).

Associando as avaliações realizadas à fatura de energia no Assentamento Itamarati I em 2004, verificou-se que até 260,2 mil Reais poderiam ser evitados ao ano com energia elétrica. Ainda sob este aspecto, considerando 11,9% como o incremento médio de eficiência esperados para projetos novos e, extrapolando este valor para o consumo nacional de energia neste sistema de irrigação, obtém-se uma economia de 229,4 GWh/ano, ou ainda, a possibilidade evitar 40,72 milhões de Reais ano em energia no Brasil.

Assim, as avaliações hídricas e energéticas utilizadas atualmente propiciam informações importantes sobre o aproveitamento da água e da energia de um sistema de irrigação separadamente. Por outro lado o Consumo Específico Normalizado na Irrigação (C_{ENI}) igual a 8,68 kWh/(mm.ha.100m) proposto como padrão neste trabalho, é suficiente para caracterizar um sistema de irrigação pivô central como eficiente. Desta forma, a etiqueta desenvolvida e o padrão proposto, uma vez aferidos por órgãos competentes, podem limitar a comercialização de equipamentos não eficientes e fornecer informações aos compradores e usuários deste sistema de irrigação, bem como potencializar o aumento da eficiência dos pivôs centrais através da concorrência entre fabricantes, fornecedores e projetistas.

Como trabalhos futuros são sugeridos:

- A verificação da influência do nível e desbalanceamento de tensão nos indicadores propostos;
- A simulação de outras medidas de eficiência energéticas já disponíveis comercialmente ou em desenvolvimento, tais como, utilização de inversores de freqüência para acionamento dos motores das bombas;
- O desenvolvimento de um software de projeto e avaliação energética de pivô central, com simulação técnica-econômica da eficiência dos elementos e determinação dos indicadores propostos;
- A publicação de um manual de avaliação de eficiência energética de pivôs centrais;
- A proposição de um selo de eficiência para pivôs centrais;
- O correlacionamento dos indicadores desenvolvidos com as especificidades regionais dos equipamentos e produtos agrícolas;
- A ampliação dos indicadores propostos aos sistemas de irrigação por aspersão convencional e localizada.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABIMAQ. Associação Brasileira de Irrigação. Câmara Setorial de Equipamentos de Irrigação. **Importância da irrigação no desenvolvimento do agronegócio**. 2002. 45 p.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6397 – Ensaios em bombas hidráulicas de fluxo.** 1975. 48 p

_____. **NBR 14244 - Equipamento de irrigação mecanizada – Pivô central e lateral móvel providos de emissores fixos ou rotativos – Determinação da uniformidade de distribuição de água**. dez, 1998. 11 p.

_____. **NBR 5383-1 – Máquinas elétricas girantes, parte 1: Motores de indução trifásicos – Ensaios.** abr, 2002. 62 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Resolução nº 456 de 29.nov.00. **Condições de Fornecimento de Energia Elétrica**. 80 p. Disponível em http://www.aneel.gov.br/. Acessado em: 8.abr.2005.

_____. **Manual para Elaboração do Programa de Eficiência Energética**. Brasília – DF: Aneel, 7.out.2002a. 116 p. Disponível em http://www.aneel.gov.br/. Acessado em: 8.abr.2005.

_____. Resolução nº 492, de 3.set.02b. **Estabelece os critérios para aplicação de recursos em Programas de Eficiência Energética**. 3 p. Disponível em http://www.aneel.gov.br/. Acessado em: 8.abr.2005.

_____. Resolução homologatória nº 311, de 6.abril.06. **Homologa as tarifas de fornecimento de energia elétrica da Empresa Energética de Mato Grosso do Sul S/A – ENERSUL, para o período de 08 de abril de 2006 a 07 de abril de 2007.** Disponível em http://www.aneel.gov.br/. Acessado em: 10.set.2006.

AYASUN, Saffet; NWANKPA, Chika O. **Induction Motor Tests Using MATLAB/Simulink and Their Integration Into Undergraduate Electric Machinery Courses.** IEEE Transactions on Education, vol. 48, nº. 1, 10 p., fev. 2005.

AZEVEDO, Hamilton Jorge. BERNARDO, Salassier; RAMOS, Marcio Mota; SEDIUAMA, Gilberto Chohaku; CECON, Paulo Roberto. **Influência de elementos do clima no**

desperdício de energia em um sistema de irrigação por aspersão de alta pressão. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.3, n.3, p.336-341, Campina Grande, PB, 1999.

BATISTA, Márcio Benedito; COELHO, Márcia Maria Lara Pinto. **Fundamentos de Engenharia Hidráulica**. Belo Horizonte: Editora UFMG – Escola de Engenharia da UFMG, 2003. 440 p.

BERNARDO, Salassier; SOARES, Antonio Alves; MANTOVANI, Everardo Chartuni. **Manual de irrigação**. 7. ed. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2005. 611 p.

BORTOLOZZO, A. R.; BRITO, R. A.L.; SOARES, A. A. C**omparação entre dois perímetros irrigados usando-se os indicadores de desempenho REcBU e RGBC**. XIV CONIRD – Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem, 2004a.

_____. **Análise comparativa e crítica geral dos valores médios de indicadores de desempenho de três perímetros irrigados**. XIV CONIRD – Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem, 2004b.

_____. **Comparação entre dois perímetros irrigados usando-se os indicadores de desempenho Rd e energia**. XIV CONIRD – Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem, 2004c.

_____. **Comparação entre dois perímetros irrigados usando-se os indicadores de desempenho RGC e SAI**. XIV CONIRD – Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem, 2004d.

BRASIL. Lei nº 9.991, de 24.jul.00. **Dispõe sobre realização de investimentos em pesquisa e desenvolvimento e em eficiência energética por parte das empresas concessionárias, permissionárias e autorizada do setor de energia elétrica, e dá outras providências. D.O.U**., Brasília, DF, 25.jul.2000.

_____. Agência Nacinal de Energia Elétrica (ANEEL). **Inclusão dos municípios do norte do Espírito Santo e nordeste de Minas Gerais nos Descontos Tarifários para Irrigação**. Resolução 277 de 19/7/2000. D.O.U, Brasília, DF, 20.set.00.

_____. Lei 10.295, de 17.out.01 – **"Lei de Eficiência Energética"**. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e dá outras providências. D.O.U., Brasília, DF, 18.out.2001a

_____. Decreto 4.059 de 19.dez.01. **Regulamenta a Lei no 10.295, de 17 de outubro de 2001, que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, e dá outras providências**. D.O.U., Brasília, DF, 20.dez.2001b.

_____. Ministério das Minas e Energia. Plano de trabalho - **Implementação da Lei de Eficiência Energética.** Brasília, DF, jul.2002a. Preparado por: Ministério das Minas e Energia (MME); Secretaria de Energia (SEN); Departamento Nacional de Desenvolvimento Energético (DNDE); Coordenação Geral de Eficiência Energética (CGEE). Disponível em http://www.mme.gov.br. Acesso em 24.abr.2004.

_____. Decreto 4.508 de 11.dez.02. **Dispõe sobre a regulamentação específica que define os níveis mínimos de eficiência energética de motores elétricos trifásicos de indução rotor gaiola de esquilo de fabricação nacional ou importados para comercialização ou uso no Brasil e dá outras providências**. D.O.U., Brasília, DF, 12.dez.2002b.

_____. Ministério do Desenvolvimento Agrário. Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA). Superintendência Regional do Mato Grosso do Sul – Cartografia e Geoprocessamento. **Mapa Assentamento Itamarati I**. Campo Grande, jul.2002c.

_____. Agência Nacional de Águas – ANA. **Projeto de gerenciamento integrado das atividades desenvolvidas em terra na bacia do São Francisco: Agricultura Irrigada**. Brasília. 2004a. 108 p. Disponível em http://www.ana.gov.br/prhbsf/arquivos/Estudos/ET%2012%20Irrigacao.pdf. Acessado em 03.maio.2006.

_____. Ministério do Meio Ambiente. ANA – Agência Nacional de Águas. **Agricultura Irrigada e o Uso Racional da Água**. Brasília, DF, 2004b. 30 p.

BRONER, I. **Center-pivot irrigation systems**. Colorado State University Cooperative Extension. Disponível em: www.ext.colostate.edu/pubs/crops/04704.html. Acessado em: 02.fev.2005.

CAMPANA, Saulo. **Racionalização do uso de energia elétrica em sistemas de irrigação dos tipos pivô central e aspersão.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa [UFV]. Minas Gerais. 2000. 108 p.

CAMPBELL, B.H. **Failed motors: rewind or replace?.** IEEE Industry Applications Magazine, vol. 3 nº 1, p. 45 – 50, 1997.

CAO, Wenping; BRADLEY, K.J. **Assessing the impacts of rewind and repeated rewinds on induction motors: is an opportunity for re-designing the machine being wasted?.** IEEE Transactions Industry Applications, vol. 42, nº 4, p. 958 – 964, 2006.

CHRISTOFIDIS, Demétrios. **Água: gênesis, gênero e sustentabilidade alimentar no Brasil**. Brasília, 2006a. 18 p. Disponível em: < http://www.pt.genderandwater.org/content/download/2996/33129/file/AguaesustentabilidadealimentarBrasil1.pdf>. Acessado em: 01. maio 2006.

_____. **Equipamentos atuais para irrigação**. 94 p. Disponível em: < http://www.mma.gov.br/port/srh/acervo/publica/doc/anais2.pdf>. Acessado em 03 maio 2006b.

Collaborative Labeling and Appliance Standards Program (CLASP). **Energy-Efficiency Labels and Standards: A guidebook for appliances, equipment, and lighting**. Washington - D.C. USA. 2ª Edição, fev.2005. 321 p. Disponível em: http://www.clasponline.org/download/General/2001/211/index.php3. Acessado em: 21 jun 2005.

COLOMBO, Alberto. **Pivô central. IRRIGAÇÃO: Engenharia Agrícola Irrigação**. Editores: Jarbas Honório de Miranda, Regina Célia de Matos. Piracicaba: FUNEP. 2003. SBEA. Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola. Volume 2. pag. 209-258.

CUENCA, Richard H. Irrigation System Design: **An engineering approach**. New Jersey. 1989. 547 p.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuária. EMBRAPA Milho e Sorgo. Circular técnica 14. **Seleção do sistema de irrigação**. Minas Gerais, 2001. 18 p.

_____. EMBRAPA Cerrados. **Análise de desempenho da irrigação**. Brasília, 2002.84 p.

_____. EMBRAPA Milho e Sorgo. **Irrigação**. Disponível em: www.cnpms.embrapa.br/ publicações/milho/imetodos.htm. Acesso em: 14 mar.2005.

EVANS, Robert; SNEED, R. E. **Selection and management of efficient center-pivot and linear move irrigation systems.** North Carolina Cooperative Extension Service, jun. 1996.

Evans, Robert G. **Center pivot irrigation.** Northern Plains Agricultural Research Laboratory, USDA-Agricultural Research Service. Disponível em http://www.sidney.ars.usda.gov/ Site_Publisher_Site/pdfs/personnel/center%20pivot%20design%202.pdf. Acessado em 13.out.2007.

FERNÁNDEZ, Javier Barragán. **El ahorro de água y energia en los sistemas de riegos a presion.** XI Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem, Campinas, SP, 1996.

FINLEY, W. R.; HODOWANEC, M. M.; HUSSAIN, K. S.; LARABEE, J.; **Proper selection of induction motor tests.** Pulp and Paper Industry Technical Conference, 2003. Conference Record of the 2003 Annual, p. 9 – 20, jun. 2003.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **Crops and Drops: making the best use of water for agriculture**. Roma, 2002. Disponível em: <http://www.fao.org/landandwater/aglw/index.stm>. Acesso em: 01.maio.2006.

_____. **Agriculture, food and water**. 2003. 64 p. Disponível em:<http://www.fao.org> Acesso em: 5.maio.2006.

FITZGERALD, A. E; KINGSLEY Jr., Charles; UMANS, Stephan D. **Máquinas Elétricas**. 6ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2006. 648 p.

FRIZZONE, José Antônio; DOURADO, Associado Durval Neto. **Avaliação de Sistema de Irrigação**. IRRIGAÇÃO: Engenharia Agrícola Irrigação. Editores: Jarbas Honório de Miranda, Regina Célia de Matos. Piracicaba: FUNEP. 2003. SBEA. Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola. Volume 2. pag. 573-651.

FUCHSLOCH, J.F.; FINLEY, W.R.; WALTER, R.W. The Next Generation Motor. Industry Applications Magazine, IEEE. Vol. 14, nº 1, p. 37-43, 2008 .

GARCIA, Agenor Gomes Pinto. **Impacto da Lei de Eficiência Energética para motores elétricos no Potencial de conservação de energia na indústria**. Dissertação (Mestrado Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro [UFRJ]. Rio de Janeiro. 2003. 127 p.

GOMES, Herber Pimentel. **Sistema de Abastecimento de Água: Dimensionamento Econômico e Operação de Redes e Elevatória**. João Pessoa: Editora Universitária/UFPB, 2ª ed. 2004. 242 p.

HADDAD, Jamil. **A Lei de Eficiência Energética e os possíveis impactos nos setores produtivos**. 4º Encontro de Energia no Meio Rural - Agrener. UNICAMP, Campinas - SP. 2002. 5 p.

HADDAD, Jamil. **Análise econômica de investimentos.** PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica: Programa de eficientização energética. Eletrobrás, Rio de Janeiro – RJ. 2004. 39 p.

IEEE Power Engineering Society. **112TM - IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators**. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. New York, NY, USA, 2004, 87 p.

INMETRO, Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. **Programa Brasileiro de Etiquetagem**. Disponível em: http://www.inmetro.gov.br/ consumidor/pbe.asp. Acessado em: 08.abr.2005

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Agropecuário de 1995 -1996**. Disponível em: < http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/agric/ default.asp>. Acesso em 01 maio. 2006.

IWA – International Water Association. **Performance indicators for water supply services**. Versão portuguesa: Indicadores de desempenho para serviços de abastecimento de água. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2000. 200 p.

KLAR, Antônio Evaldo; SANTANA, Renato de Castro; DUROHA, Charles. **Evaluation center pivot systems using newns and old sprays and pressure regulators.** Revista Irriga, vol. 6, n° 1, Botucatu, SP, 2001.

KUECK J. D. **Development of a method for estimating motor efficiency and analyzing motor condition.** IEEE Pulp and Paper Ind. Tech. Conf., pag. 67–72, jun, 1998.

LEMES, Marcelo Inácio. **Modelagem, modelamento e análise de eficiência energética em motores de indução.** Trabalho de iniciação científica - Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Uberlândia, MG, Convênio Eletrobrás, 84 p., 2007.

LIMA, Aureo Cezar de. **Sistema decisório fuzzy aplicado ao gerenciamento de energia elétrica no lado da demanda.** Universidade Federal de Uberlândia: Faculdade de Engenharia Elétrica. Dissertação de Mestrado, 161 p. Uberlândia, MG, 2003.

LIMA, Jorge Enoch Furquim Werneck; FERREIRA, Raquel Scalia Alves; CHRISTOFIDIS, Demétrios. **Estudo do uso da água e energia elétrica para irrigação no Brasil**. Disponível em < http://www.cf.org.br/cf2004 /irrigacao.doc> Acessado em: 03 maio 2006.

LOPES, Daniela de Carvalho; MARTINS, José Helvécio; OLIVEIRA, Delly Filho; MELO, Evandro de Castro. **Programa computacional para adequação de força motriz**

considerando o remanejamento dos motores existentes. Revista Engenharia na Agricultura, v.14, n.1, 51-63, Viçosa, MG, 2006.

LU, Bin; HABETLER, Thomas G.; HARLEY, Ronald G. **A Survey of Efficiency-Estimation Methods for In-Service Induction Motors.** IEEE Transactions on industry applications, vol. 42, nº. 4, 10 p., 2006.

LU, Bin; QIAO, Wei; HABETLER, Thomas G.; HARLEY, Ronald G. **Solving Induction Motor Equivalent Circuit using Numerical Methods for an In-Service and Nonintrusive Motor Efficiency Estimation Method.** Power Electronics and Motion Control Conference, 2006. IPEMC '06. vol. 2, p. 1- 6, 2006.

MARQUES, Patrícia Angélica Alves; MARQUES, Tadeu Alcides; FRIZZONE, José Antônio. **Viabilidade econômica sob condições de risco para a irrigação da cana-de-açúcar na região de Piracicaba – SP.** Revista Irriga, v. 11, n. 1, p. 55-65, Botucatu, SP, 2006.

MATLAB® The Language of Technical Computing. The Math Works Inc. Version 6.0.0.88, Release 12, 2000.

MEDEIROS, Salomão de S.; SOARES, Antônio A..; RAMOS, Márcio M.; MANTOVANI, Everardo C.; SOUZA, José A. A. de. **Avaliação da eficiência do uso da energia elétrica no Perímetro Irrigado de Pirapora, MG**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 7, nº 2, p. 394-398, Campina Grande, PB, 2003.

MATO GROSSO DO SUL. Secretaria de Estado de desenvolvimento agrário (SDA). Instituto de desenvolvimento agrário, assistência técnica e desenvolvimento rural do MS (IDATERRA). **Plano de desenvolvimento do Assentamento Itamarati**: Produção. 2003. 341 p.

MANTOVANI, Everardo Chartuni; BERNARDO, Salassier; PALARETTI, Luiz Fabiano. **Irrigação: princípios e métodos.** Viçosa: Ed. UFV, 2006. 318 p.

MOREIRA, Henrique. **Sistema de suporte à decisão agrícola (SISDA): manejo dos cultivos e dos recursos hídricos**. 8 p. Disponível em: < http://www.mma.gov.br/port/srh/acervo/publica/doc/anais2.pdf>. Acessado em 03 maio 2006.

OLIVEIRA, Aureo Silva de; PEREIRA, Francisco Adriano de Carvalho; PAZ, Vital Pedro da Silva; SANTOS, Carlos Amilton. **Avaliação do desempenho de sistemas pivô central na região oeste da Bahia**. Revista: Irriga, Botucatu, v.9, nº 2, p. 126 – 135, maio-ago, 2004.

OLIVEIRA, Delly Filho; TEIXEIRA, Carlos A.; RIBEIRO, Marcos C. **Racionalização energética de uma estação de pressurização de um perímetro irrigado**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.8, n.1, p.135-143, Campina Grande, PB, 2004.

PAZ, Vital P. da S.; FRIZZONE, José A.; BOTREL, Tarlei A.; FOLEGATTI, Marcos V. **Otimização do uso da água em sistemas de irrigação por aspersão**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.8, v.6, n.3, p.404-408, Campina Grande, PB, 2002.

PESSOA, Paulo César Silveira. **Otimização hidráulica e energética de sistemas de irrigação em olericultura**. Disponível em: www.pivotvalley.com.br/valley/mestre/ otimizaçãohidrulica.doc. Acessado em: 26 jan. 2005.

PESSOA, Paulo César; FOLEGATTI, Marcos Vincícius, PAZ, Vital Pedro da Silva. **Avaliação da performace de um pivô central de grande porte e baixa pressão.** XI Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem, Campinas, SP, 1996.

PHUMIPHAK, T; CHAT-UTHAI, C. **Estimation of induction motor parameters based on field test coupled with genetic algorithm.** International Conference on Power System Technology, proceedings - PowerCon. Vol. 2, p 1199- 1203, 2002.

PILLLAY, P. **Applying energy-efficient motors in the petrochemical industry.** Industry Applications Magazine, IEEE, vol. 3, nº 1, p. 32–40, 1997.

PINTO, Jacques M.; SILVA, Cícero L. DA; OLIVEIRA, Carlos A. DA S. **Influência de variáveis climáticas e hidráulicas no desempenho da irrigação de um pivô central no oeste baiano**. Revista Engenharia Agrícola, v.26, n.1, p.76-85, Jaboticabal, SP, jan./abr. 2006.

PROCEL, Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. **Regulamento do selo procel de economia de energia**. Eletrobrás/Procel: Departamento de planejamento e estudos de conservação de energia. 10 p., 2005.

RIBEIRO, Marcos Caldeira. **Estudo sobre a racionalização do uso da energia na irrigação.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa [UFV]. Minas Gerais. 2003. 164 p.

ROCHA, Pauletti Karlien; PEREIRA, Edilaine Regina; COELHO, Rubens Duarte. **Custo do bombeamento de água para irrigação no Brasil.** Revista Irriga, vol. 6, n° 3, Botucatu, SP, 2001.

RODRIGUES, Denílson Eduardo; DIAS, Gutemberg Pereira; FERNANDES, Haroldo Carlos; PIZZIOLO, Tarcísio de Assunção. **Avaliação do desempenho do desintegrador/picador/ moedor (dpm) na moagem do milho.** Revista Engenharia na Agricultura, v.14, n.1, 64-73, Viçosa, MG, 2006.

ROGERS, Danny H.; CLARK, Gary; ALAM, Mahbub; STRATTON, Robert; BRIGGEMAN, Steven. **A mobile irrigation lab for water conservation: II educational programs and field data**. Disponível em: www.oznet.ksu.edu/mil/Resources/Conference% 20Papers/21.pdf. Acessado em: 02 fev 2005. 8p.

SANO, Edson E.; LIMA, Jorge E. F. W.; SILVA, Euzebio M.; OLIVEIRA, Elaine C. **Estimativa da variação na demanda de água para irrigação por pivô-central no distrito federal entre 1992 e 2002**. Revista Engenharia Agrícola, v.25, n.2, p.508-515, Jaboticabal, SP, maio/ago. 2005.

SCHEIHING, Paul E.; ROSENBERG, Mitchell; OLSZEWSKI, Mitchell; COCKRILL, Chris; OLIVER, Julia. **United States Industrial Motor-Driven Systems Market Assessment: Charting a Roadmap to Energy Savings for Industry**. Disponível em:

http://www1.eere.energy.gov/industry/bestpractices/us_industrial_motor_driven.html. Acessado em 12.março.2008.

SEN, Paresh Chandra. **Principles of electric machine and power electronics**. Ed. John Wiley & Sons, New York, 1989.

SENNINGER IRRIGATION INC. **Catálogo de produtos**. Disponível em: www. Senninger.com. Acessado em: 02 fev 2005. 7p.

SIEBERT, S.; D¨OLL, P.; HOOGEVEEN, J.; FAURES, J.-M.; FRENKEN, K.; FEICK, S. **Development and validation of the global map of irrigation areas.** Hydrology and Earth System Sciences, 9, 535–547, 2005. Disponível em: http://www.fao.org/ag/agl/aglw/aquastat/reports/index2.stm . Acessado em: 15.nov.2006.

SILVA, Vital Pedro da; FOLEGATTI, Marcos Vinicius; DUARTE, Sérgio Nascimento. **Irrigação por aspersão e localizada**. Disponível em: http://www.agr.feis.unesp.br/IRRIGACAO.html. Acesso em: 14.mar. 2005.

SOARES, José Monteiro; NASCIMENTO, Tarcísio. **Avaliação técnica do sistema de irrigação por aspersão do perímetro irrigado Barreiras**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 2, nº 2, p. 136-141, Campina Grande, PB, 1998.

SOUZA, Gustavo H. F. de; BRITO, Ricardo A. L.; DANTAS NETO, Jose; SOARES, José M.; NASCIMENTO, Tarcizio. **Desempenho do distrito de irrigação Senador Nilo Coelho**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 5, nº 2, p. 204- 209, Campina Grande, PB, 2001.

TURCO, José Eduardo Pitelli; SANTOS, Jarbas dos Jr.; FERNANDES, Edemo João. **Estudo do consumo e custo de energia elétrica em cultura de soja irrigada.** Revista Irriga, vol. 10, n° 1, p. 64 – 75, Botucatu, SP, 2005.

UMANS, Stephen D. **Ac induction motor efficiency.** Department of Electrical Engineering and Computer Science Laboratory for Electromagnetic and Electronic Systems, Massachusetts Institute of Technology Cambridge, p. 9, MA, USA, 1989.

VALÍN, Maria I.; PEREIRA, Luis S. Pereira. **DEPIVOT, a simulation model for design and performance assessment of center-pivot irrigation systems.** In: Agricultural Engineering for a Better World (Proc. XVI CIGR World Congress, Bonn, Sept. 2006), VDI Verlag, Dusseldorf, paper 0009.

_____ . **DEPIVOT, a software tool for improved water use with center pivot sprinkler systems.** In: International Conference on Water Saving In Mediterranean Agriculture & Future Research Needs, Bari, fev. 2007.

VALLEY. **Catálogo de produtos Valley**. Uberaba – MG, 2003. 31 p.

WEG. **Relatórios de ensaio de motores.** Relatório de ensaio de tipo dos motores de 40, 250 e 300 cv fornecidos pela fábrica após consulta. Out. 2007.

YUNG, Chuck. Tips for improving motor efficiency: enhancing reliability and efficiency for medium-voltage machines. Ieee Industry Applications Magazine, nov/dez., 2007.

ZANATTA, Fábio Luiz; LACERDA, Adílio Flauzino de Filho; TEIXEIRA, Carlos Alberto; SANTOS, William Rosário dos; COSTA, Pedro L. A. de O.; SILVEIRA, Cláudio Lobo da; PEREIRA, Heverton Augusto. **Avaliação energética de moinho de martelos em relação ao dgm de milho e o desempenho em suínos e aves.** Revista Engenharia na Agricultura, , v.14, n.4, 276-286, Viçosa, MG, 2006.

ZOCOLER, João Luis. **Análise econômica de sistema de irrigação**. IRRIGAÇÃO: Engenharia Agrícola Irrigação. Editores: Jarbas Honório de Miranda, Regina Célia de Matos. Piracicaba: FUNEP. 2003. SBEA. Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola. Volume 2. pag. 653- 703.

ANEXOS

ANEXOS

- Anexo A1. – Programa referenciado na página 75.
  - Programa de etiquetagem de pivôs centrais desenvolvido em Matlab®: etiqueta_pivo
- Anexo A2 – Tabela utilizada como base para se determinar a Figura 3.3 da página 43 e citada na página 44.
  - Eficiência de Distribuição de água em função do Coeficiente de Uniformidade de Heerman e Hein (CUH) e área adequadamente irrigada.
- Anexo A3 – Tabela referenciada na página 85
  - Volumes coletados nos pivôs da Embrapa Agropecuária Oeste, L06, C08 e G13 do Assentamento Itamarati I ensaiados em abril de 2006.
- Anexo A4 – Tabela referenciada nas páginas 94 e 95.
  - Dados do ensaio da bomba da Embrapa Agropecuária Oeste obtidos pelo Medidor Universal de Grandezas em abril de 2006
- Anexo A5 – Tabela referenciada nas páginas 94 e 95.
  - Dados do ensaio da bomba do pivô L06 do Assentamento Itamarati I obtidos pelo Medidor Universal de Grandezas em abril de 2006
- Anexo A6 – Tabela referenciada nas páginas 94 e 95.
  - Dados do ensaio da bomba do pivô C08 do Assentamento Itamarati I obtidos pelo Medidor Universal de Grandezas em abril de 2006
- Anexo A7 – Tabela referenciada nas páginas 94 e 95.
  - Dados do ensaio da bomba do pivô G13 do Assentamento Itamarati I obtidos pelo Medidor Universal de Grandezas em abril de 2006

Anexo A1. - Programa de etiquetagem de pivôs centrais desenvolvido em Matlab®

```
% Arquivo de programa: etiqueta_pivo.m
%
% Objetivo: Consolidação dos dados do:
%           Ensaio de Avaliação Energética de Pivô Central
%
% Indicadores determinados:
%           1. Consumo especifico normalizado na irrigação;
%           2. Eficiência de irrigação;
%           3. Lamina liquida media diária;
%           4. Lamina para 80% da área adequadamente irrigada;
%           5. Eficiência de distribuição;
%           6. Coeficiente de Uniformidade de Hermann e Hein;
%
% Gráficos obtidos:
%           1. Lamina ao longo da linha lateral;
%           2. Curva de distribuição da água irrigada.
%
% Revisões:
%     Numero     Data               Descrições da mudança
%       01         10/08/2007         Primeira versão
%
% Obs.: O arquivo daqui para frente será
%       apresentado sem acentuação e ç conforme escrito no Matlab®.
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Limpeza da tela, variaveis  e graficos
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clc
clear
close all
disp (' ');
disp (' ');
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Definiçao das variaveis
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%   ENTRADA DE DADOS
%       coleta                --  matriz de entrada de dados contendo - Excell: planilha:
%                                                                        avaliacao, pasta: coleta
%           coletor           --  Numero do coletor  a partir do ponto do pivo
%           distancia         --  Distancia do coletor ate o ponto do pivo, m
%           volume1           --  Volume do coletor da primeira linha, mL
%           volume2           --  Volume do coletor da segunda linha, mL
%%       etiqueta              --  matriz de entrada de dados contendo - Excell: planilha:
%                                                                        etiqueta, pasta: etiqueta
%           superficie_coletor --  area interna da boca do coletor utilizado, mm2
%           evaporacao        --  Evaporaçao determinada pelos tres coletores de referencia, mL
%           velocidade_pivo   --  velocidade de deslocamento da ultima torre, mm/h
%           periodo           --  tempo para uma rotaçao completa,h
%           raio_irrigado     --  diatancia entre o ponto do pivo e 75% do raio molhado do ultimo
%                                 aspersor, m
```

```
%          potencia_medida    --  potencia ativa medida na entrada do sistema, kW
%          hg                 --  desnivel geometrico entre o manancial e o ponto mais elevado da
%                                 parcela irrigada, m
%   VARIAVEIS
%       lamina                --  Lamina media corrigida, mm
%       distanciaxlamina      --  calcula o produto da distancia pela lamina
%       soma_distanciaxlamina  --  soma os elementos do vetor distanciaxlamina
%       soma_distancia        --  soma os elementos do vetor distancia
%       lamina_media          --  determina a lamina media ponderada, mm
%       soma_distanciaxvariacao--  calcula a soma do vetor distancia x variacao
%       hermann_hein          --  determina o coeficiente de Hermann & Hein
%       avaliacao_hh          --  clasifica a Uniformidade de distribuiçao de agua
%       max_coletor           --  numero total de coletores utilizados
%       mlamina_media         --  matriz lamina_media com o numero de coletores utilizados
%       area_irrigada         --  area irrigada considerando o raio efetivo, ha
%       lamina_liquida_diaria  --  obtida para da lamina media ponderada coletada para 21 horas, mm
%       lamina0               --  variavel auxiliar que recebe a 'lamina'
%       espacamento_coletor   --  espacamento entre coletores, m
%       dec_distancia         --  distancia do coletor ao ponto do pivo para lamina em ordem
%                                 decrescente, m
%       dec_lamina            --  lamina em ordem decrescente, mm
%       area_acumulada        --  area acumulada para deteminaçao dos 80% de lamina garantida, m²
%       marea_acumulada       --  matriz area acumulada (para utilizaçao no grafico), m²
%       menor_distancia       --  distancia do primeiro coletor ao ponto do pivo, m
%       lamina_pa             --  lamina garantida para 80% da parcela adequadamente irrigada
%                                 no ensaio, mm
%       eficiencia_d         --  eficiencia de distribuiçao de agua (lamina_pa/lamina_media * 100),%
%       max_lamina            --  maxima lamina obtida (determinaçao dos eixos do grafico), mm
%       Q80                   --  vazao util 80% da parcela adequadamente irrigada, mmha/s
%         CENI                      --   consumo especifico normalizado no conjunto motor e bomba,
kWh/(m³.100m)
%       potencia_util         --  potencia util considerando a vazao util e altura geometrica, k/w
%       EI                    --  eficiencia de irrigaçao, %

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Definiçao das constantes utilizadas
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%       gravidade             --  aceleraçao da gravidade, m/s²
%       viscosidade           --  viscosidade cinematica da agua a 4° C, m²/s
%       peso_especifico       --  peso especifico da agua a 4°C, kN/m³

gravidade = 9.81;
viscosidade = 1.007E-06;
peso_especifico = 9.81;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Importa os dados da planilha excel
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

coleta = xlsread('etiqueta', 'coleta');        % Importa os dados da planilha etiqueta, coleta
                                               % coleta = [coletor distancia volume1 volume2];
coletor = coleta(:,1);
distancia = coleta(:,2);
volume1 = coleta(:,3);
volume2 = coleta(:,4);
```

```
etiqueta = xlsread('etiqueta', 'etiqueta');  % Importa os dados da planilha etiqueta, pasta etiqueta
superficie_coletor = etiqueta(1);
evaporacao = etiqueta(2);
velocidade_pivo = etiqueta(3);
periodo = etiqueta(4);
raio_irrigado = etiqueta(5);
potencia_medida = etiqueta(6);
hg = etiqueta(7);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Calcula a lamina media corrigindo a evaporaçao
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

lamina = ((volume1 + volume2)/2 + evaporacao)*1000/superficie_coletor;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Calcula a lamina liquida media ponderada
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

distanciaxlamina = distancia .* lamina;
soma_distanciaxlamina = sum(distanciaxlamina);
soma_distancia = sum(distancia);
lamina_media = soma_distanciaxlamina / soma_distancia;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Calcula o Coeficiente de Hermann & Hein
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

soma_distanciaxvariacao = sum (distancia .* abs(lamina - lamina_media));
hermann_hein = 100*(1 - soma_distanciaxvariacao/soma_distanciaxlamina);

if hermann_hein > 50 & hermann_hein <= 100
    if hermann_hein < 80
        avaliacao_hh = 'RUIM';
        elseif hermann_hein < 85
            avaliacao_hh = 'REGULAR';
        elseif hermann_hein < 90
            avaliacao_hh = 'BOA';
        else hermann_hein <= 100
            avaliacao_hh = 'MUITO BOA';
    end
else
    avaliacao_hh = 'VERIFIQUE OS DADOS FORNECIDOS';
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Calcula a area irrigada e a lamina liquida diaria
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

raio_minimo = 10;                                   % raio sem aspersor proximo ao ponto do pivo
area_irrigada = pi*(raio_irrigado)^2*10^(-4) - pi*(raio_minimo)^2*10^(-4);
lamina_liquida_diaria = lamina_media / periodo * 21;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Calcula a Eficiencia de Distribuiçao para 80%
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Ordena as laminas em ordem decrescente

lamina0 = lamina;
espacamento_coletor = distancia (2) - distancia (1);

dec_distancia = 0;

max_coletor = max (coletor);
mlamina_media = ones(max_coletor, 1).*lamina_media;

    for i = 1: max_coletor
        dec_lamina(i) = 0.1;
        for jota = 1: max_coletor
            if  dec_lamina(i) < lamina0(jota);
                dec_lamina(i) = lamina0(jota);
                m = jota;
            else

            end
        end
        lamina0(m) = 0;
        dec_distancia(i) = distancia (m);
    end

% Calcula a area acumulada decimal e lamina liquida diaria para pa=80% e Eficiencia de Distribuiçao

area_acumulada = 0;
menor_distancia = min(dec_distancia);
for i = 1: max_coletor
    if   dec_distancia(i)== menor_distancia
         area_acumulada = area_acumulada - pi*raio_minimo^2 + ...
         pi*(dec_distancia(i)+espacamento_coletor/2)^2;
         marea_acumulada(i) = area_acumulada/(area_irrigada*10000);
     else
        area_acumulada = area_acumulada + 2*pi*dec_distancia(i)*espacamento_coletor;% area acumulada
        marea_acumulada(i) = area_acumulada/(area_irrigada*10000);  % matriz area acumulda decimal
    end
    if area_acumulada < 0.80*area_irrigada*10000
        lamina_pa = dec_lamina(i+1);
        lamina_pa_diaria = lamina_pa / periodo * 21;                   % lamina liquida diaria para
pa=80%
    else
    end
end

eficiencia_d = lamina_pa/lamina_media * 100;                        % Eficiencia de Distribuiçao

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Calcula o Consumo Especifico Normalizado na Irrigaçao
%           Potencia util e Eficiencia de Irrigaçao
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Q80 = lamina_pa * area_irrigada / (periodo*3600)*10;   % Vazao em m³/s

CENI = potencia_medida/(Q80*hg*3.6);                 % Consumo Especifico Normalizado na Irrigaçao
```

```
potencia_util = peso_especifico * Q80 * hg;           % Potencia util

EI = potencia_util/potencia_medida*100;               % Eficiencia de irrigaçao

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Saidas de dados
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

fprintf('  ===========================================================================\n')
fprintf('            ENSAIO DE AVALIAÇAO ENERGETICA DE PIVO CENTRAL\n')
fprintf('  ===========================================================================\n')
disp(' ')
fprintf ('   Area irrigada                                      = %6.2f ha \n', area_irrigada)
fprintf ('   Consumo Especifico Normalizado na Irrigaçao        = %6.2f kWh/(mmha100m) \n', CENI)
fprintf ('   Eficiencia de irrigaçao (PA = 80%%)                 = %6.2f%% \n', EI)
fprintf ('    Lamina liquida media diaria                                  = %6.2f mm \n', lamina_liquida_diaria)
fprintf ('   Lamina para 80%% da parcela irrigada adequadamente  = %6.2f mm \n', lamina_pa_diaria)
fprintf ('   Eficiencia de Distribuiçao (PA = 80%%)              = %6.2f%% \n', eficiencia_d)
fprintf ('   Coeficiente de Hermann & Hein                      = %6.2f%% \n', hermann_hein)
fprintf ('      Uniformidade de distribuiçao de agua            =  %s \n', avaliacao_hh)
fprintf ('      %s\n', 'Classificaçao')
fprintf ('              %s\n', 'Unif. de distribuiçao de agua < 80  =  RUIM')
fprintf ('                                    %s\n','>= 80 e < 85  =  REGULAR')
fprintf ('                                    %s\n','>= 85 e < 90  =  BOA')
fprintf ('                                    %s\n','       >= 90  =  MUITO BOA')

figure (1)
plot (distancia, lamina, 'b.-', distancia, mlamina_media, 'r')
title ('LAMINA AO LONGO DA LINHA LATERAL')
xlabel ('Distancia (m)')
ylabel ('Lamina de agua (mm)')
legend('Coletada', 'Media ponderada')

figure (2)
mlamina_pa = ones(max_coletor, 1).*lamina_pa;
max_lamina = - max (lamina);
plot (marea_acumulada, -mlamina_pa, 'kx-', marea_acumulada, -dec_lamina, 'b.-')
axis ([0 1 max_lamina 0])
title ('DISTRIBUIÇAO DA AGUA IRRIGADA')
xlabel ('Fraçao da area total (1)')
ylabel ('Lamina de agua (mm)')
legend('Lamina para pa = 80%', 'Distribuiçao')
```

Anexo A2. - Eficiência de Distribuição de água em função do Coeficiente de Uniformidade de Heerman e Hein (C_{UH}) e área adequadamente irrigada

C_{UH}	Porcentagem de área cultivada adequadamente irrigada									
	95%	90%	85%	80%	75%	70%	65%	60%	55%	50%
	Eficiência de Distribuição de Água - EDpa (%)									
98%	0,959	0,968	0,974	0,979	0,983	0,987	0,990	0,994	0,997	1,000
96%	0,918	0,936	0,948	0,958	0,966	0,974	0,981	0,987	0,994	1,000
94%	0,876	0,904	0,922	0,937	0,949	0,961	0,971	0,981	0,991	1,000
92%	0,835	0,872	0,896	0,916	0,932	0,947	0,961	0,975	0,987	1,000
90%	0,794	0,839	0,870	0,895	0,915	0,934	0,952	0,968	0,984	1,000
88%	0,753	0,807	0,844	0,873	0,899	0,921	0,942	0,962	0,981	1,000
86%	0,711	0,775	0,818	0,852	0,882	0,908	0,932	0,956	0,978	1,000
84%	0,670	0,743	0,792	0,831	0,865	0,895	0,923	0,949	0,975	1,000
82%	0,629	0,711	0,766	0,810	0,848	0,882	0,913	0,943	0,972	1,000
80%	0,588	0,679	0,740	0,789	0,831	0,869	0,903	0,936	0,969	1,000
78%	0,546	0,647	0,714	0,768	0,814	0,855	0,894	0,930	0,965	1,000
76%	0,505	0,615	0,688	0,747	0,797	0,842	0,884	0,924	0,962	1,000
74%	0,464	0,582	0,662	0,726	0,780	0,829	0,874	0,917	0,959	1,000
72%	0,423	0,550	0,636	0,705	0,763	0,816	0,865	0,911	0,956	1,000
70%	0,382	0,518	0,610	0,684	0,746	0,803	0,855	0,905	0,953	1,000
68%	0,340	0,486	0,584	0,662	0,729	0,790	0,845	0,898	0,950	1,000
66%	0,299	0,454	0,558	0,641	0,713	0,777	0,836	0,892	0,946	1,000
64%	0,258	0,422	0,532	0,620	0,696	0,763	0,826	0,886	0,943	1,000
62%	0,217	0,390	0,506	0,599	0,679	0,750	0,816	0,879	0,940	1,000
60%	0,175	0,358	0,480	0,578	0,662	0,737	0,807	0,873	0,937	1,000

Fonte: procedimento de cálculo conforme Cuenca (1989).

Anexo A3. – Volumes coletados nos pivôs da Embrapa Agropecuária Oeste, L06, C08 e G13 do Assentamento Itamarati I ensaiados em abril de 2006

Embrapa			L06			C08			G13		
Distância (m)	Volume (mL)		Distância (m)	Volume (mL)		Distância (m)	Volume (mL)		Distância (m)	Volume (mL)	
	1	2		1	2		1	2		1	2
18	61	90	60		66	60	39	73	58	102	100
21	44	53	63	46	66	63	155	170	61	98	126
24	94	102	66	45	60	66	205	142	64	97	116
27	62	80	69	47	70	69	123	135	67	80	
30	77	78	72	47	68	72	150	217	70	114	174
33	110	122	75	43	65	75	179	274	73	112	117
36	67	87	78	49	120	78	167	192	76	78	111
39	86	87	81	149	75	81	196	194	79	92	136
42	61	70	84	52	77	84	230	189	82	79	92
45	66	79	87	58	74	87	75	84	85	14	131
48	71	82	90	50	71	90	65	54	88	18	127
51	78	78	93	50	69	93	43	57	91	144	115
54	88	94	96	52	69	96	71	71	94	82	94
57	104	100	99	62	69	99	67	127	97	84	141
60	130	135	102	69	71	102		152	100	112	76
63	72	65	105	65	69	105	176	180	103	103	123
66	75	68	108	59	69	108	151	152	106	110	119
69	86	78	111	73	78	111	133	108	109	74	77
72	101	85	114	62	80	114	100	160	112	122	114
75	76	69	117	75	66	117	235	224	115	129	99
78	71	85	120	76	71	120	292	300	118	156	145
81	84	123	123	56	53	123	295	320	121	113	83
84	70	90	126	69	68	126	216	200	124	90	81
87	99	96	129	82	70	129	217	130	127	112	86
90	88	88	132	79	71	132	148	90	130	104	108
93	95	85	135	70	73	135	136	164	133	106	96
96	83	112	138	69	73	138	229	284	136	146	108
99	89	95	141	81	78	141	283	268	139	100	68
102	80	70	144	80	74	144	210	196	142	97	142
105	76	65	147	66	55	147	200	180	145	98	90
108	94	93	150	66	81	150	141	246	148	75	99
111	87	92	153	77	74	153	209	216	151	119	97
114	88	80	156	89	79	156	260	210	154	114	106
117	71	75	159	86	85	159	244	210	157	152	102
120	76	105	162	93	83	162	225	218	160	134	107
123	94	70	165	78	72	165	268	260	163	114	125
126	65	57	168	99	80	168	265	310	166	115	121
129	93	100	171	82	69	171	266	288	169	130	83
132	93	90	174	89	95	174	274	270	172	150	95
135	72	88	177	87	80	177	262	310	175	130	80
138	117	93	180	90	88	180	245	202	178	115	107
141	133	115	183	75	67	183	148	118	181	150	118
144	84	75	186	74	84	186	104	160	184	125	108
147	72	95	189	83	111	189	201	278	187	102	104
150	61	65	192	101	90	192	253	230	190	131	86
153	74	92	195	101	107	195	229	210	193	130	152
156	77	55	198	100	87	198	189	148	196	122	60
159	87	88	201	95	85	201	190	124	199	115	66
162	89	75	204	98	106	204	103	110	202	90	73
165	122	108	207	116	119	207	106	108	205	106	75
168	90	68	210	129	94	210	133	148	208	111	98
171	78	72	213	114	77	213	117	120	211	105	76
174	95	84	216	110	80	216	100	148	214	128	110
177	32	65	219	117	80	219	137	146	217	135	107
180	102	84	222	95	86	222	144	120	220	165	102
183	105	90	225	85	75	225	130	118	223	170	128
186	75	77	228	89	84	228	90	98	226	115	90
189	60	75	231	92	94	231	87	112	229	97	74
192	174	102	234	101	91	234	89	98	232	130	103
195	81	85	237	92	98	237	95	98	235	127	79
198	66	66	240	94	95	240	85	85	238	119	87
201	99	68	243	90	105	243	104	114	241	115	85
204	108	115	246	106	91	246	98	82	244	125	91

Embrapa			L06			C08			G13		
Distância (m)	Volume (mL)		Distância (m)	Volume (mL)		Distância (m)	Volume (mL)		Distância (m)	Volume (mL)	
	1	2		1	2		1	2		1	2
207	99	100	249	110	111	249	70	92	247	120	112
210	108	74	252	107	94	252	127	87	250	139	119
213	110	95	255	92	85	255	99	93	253	116	130
216	72	87	258	95	95	258	90	98	256	136	115
219	74	81	261	91	80	261	102	115	259	138	122
222	100	93	264	90	92	264	117	112	262	143	117
225	82	78	267	96	95	267	108	110	265	129	93
228	84	85	270	92	89	270	106	110	268	140	97
231	86	92	273	84	72	273	109	114	271	115	107
234	83	70	276	89	92	276	95	116	274	120	114
237	97	88	279	94	105	279	80	106	277	137	111
240	96	86	282	95	93	282	106	104	280	108	100
243	93	100	285	97	92	285	112	108	283	137	102
246	95	97	288	96	93	288	71	74	286	140	104
249	97	103	291	90	104	291	75	82	289	164	96
252	100	80	294	95	85	294	73	113	292	150	106
255	62	70	297	105	91	297	94	90	295	130	118
258	45	45	300	79	90	300	96	134	298	164	125
			303	110	102	303	81	89	301	117	101
			306	90	95	306	99	118	304	116	106
			309	88	92	309	131	224	307	147	95
			312	86	80	312	56	57	310	154	124
			315	84	92	315	35	66	313	130	125
			318	91	79	318	74	73	316	175	103
			321	98	83	321	98	70	319	125	115
			324	77	78	324	90	102	322	117	115
			327	85	85	327	107	71	325	167	106
			330	80	100	330	58	80	328	144	100
			333	103	92	333	71	123	331	148	89
			336	101	106	336	82	95	334	154	126
			339	94	100	339	100	92	337	137	111
			342	102	105	342	87	110	340	127	104
			345	90	93	345	94	134	343	115	135
			348	100	95	348	128	95	346	159	130
			351	98	85	351	112	112	349	144	105
			354	90	92	354	119	114	352	174	138
			357	96	95	357	103	112	355	125	115
			360	96	88	360	100	113	358	165	107
			363	86	44	363	91	101	361	145	113
			366	96	86	366	84	93	364	130	76
			369	89	85	369	103	100	367	134	242
			372	81	88	372	99	112	370	131	117
			375	88	85	375	107	94	373	149	94
			378	94	79	378	75	86	376	145	106
			381	65	70	381	81	132	379	127	88
			384	88	104	384	93	105	382	130	104
			387	103	108	387	95	105	385	145	140
			390	98	91	390	91	95	388	185	130
			393	102	105	393	122	102	391	140	111
			396	95	100	396	70	85	394	150	122
			399	100	100	399	95	112	397	146	95
			402	90	86	402	83	90	400	158	105
			405	96	101	405	75	102	403	134	121
			408	84	90	408	86	98	406	168	86
			411	95	103	411	97	107	409	100	122
			414	86	95	414	86	100	412	130	105
			417	91	104	417	99	83	415	145	106
			420	90	96	420	121	89	418	260	169
			423	98	114	423	113	87	421	127	68
			426	108	176	426	87	96	424	210	133
			429	202	127	429	108	86	427	158	115
			432	90	97	432	76	98	430	115	98
			435	96	107	435	96	77	433	122	115
			438	116	100	438	86	84	436	136	139
			441	100	104	441	70	82	439	117	83

Embrapa			L06			C08			G13		
Distância (m)	Volume (mL)		Distância (m)	Volume (mL)		Distância (m)	Volume (mL)		Distância (m)	Volume (mL)	
	1	2		1	2		1	2		1	2
			444	153	165	444	78	78	442	147	118
			447	150	162	447	54	104	445	145	113
			450	118	93	450	88	100	448	99	125
			453	94	100	453	94	97	451	105	132
			456	110	100	456	96	105	454	125	104
			459	93	104	459	100	96	457	170	128
			462	104	105	462	101	107	460	110	125
			465	103	93	465	123	76	463	150	126
			468	94	87	468	84	75	466	144	112
			471	97	100	471	75	90	469	115	96
			474	97	98	474	67	77	472	119	108
			477	86	97	477	70	86	475	135	104
			480	100	82	480	98	85	478	150	138
			483	101	95	483	107	82	481	165	137
			486	96	97	486	101	84	484	138	121
			489	106	120	489	83	105	487	157	138
			492	127	95	492	80	100	490	148	123
			495	94	105	495	100	87	493	175	140
			498	110	100	498	86	91	496	115	165
			501	118	95	501	82	75	499	145	112
			504	109	96	504	71	75	502	135	137
			507	102	93	507	76	67	505	150	114
			510	97	106	510	98	63	508	130	133
			513	110	102	513	80	65	511	180	100
			516	95	100	516	98	73	514	134	129
			519	109	105	519	56	60	517	106	123
			522	117	101	522	71	73	520	140	141
			525	110	86	525	78	70	523	180	143
			528	100	96	528	80	160	526	134	102
			531	102	93	531	143	165	529	140	98
			534	123	117	534	141	140	532	110	114
			537	108	96	537	67	63	535	135	123
			540	124	110	540	70	82	538	137	126
			543	118	98	543	91	70	541	80	84
			546	104	103	546	43	56	544	55	121
			549	30	95	549	91	60	547	158	116
			552	96	104	552	73		550	155	85
			555	122	101	555	35	45	553	68	84
			558	117	103	558	46	50	556	100	88
			561	106	90	561	56	55	559	96	113
			564	104	87	564	72	39	562	110	86
			567	118	96	567	40	45	565	81	72
			570	120	91	570	54	45	568	150	90
			573	113	98	573	44	31	571	90	120
			576	102	88	576	70	61	574	64	123
			579	132	90	579	81	81	577	165	80
			582	109	93	582	106	105	580	88	29
			585	96	90	585	142	104	583	55	18
			588	114	107	588	145	85			
			591	109	76	591	88	73			
			594	92	100	594	45	32			
			597	94	95	597	7	0			
			600	98	90	600	0	0			
			603	102	97	603	0	0			
			606	91	110	606	0	0			
			609	85	78						
			612	78	80						
			615	29	18						

Anexo A4. – Dados do ensaio da bomba da Embrapa Agropecuária Oeste obtidos pelo Medidor Universal de

Elo Sistemas Eletrônicos S.A. - ELO Seis - Relatório de medição de grandezas elétricas.
Data da Emissão: 18/4/2006
Embrapa: Ensaio da bomba

Data	Hora	C.Med.A	C.Med.B	C.Med.C	P.Ati.3	T.MedAB	T.MedBC	T.MedCA	P.Apa.3	P.Rea.3	F.Pot.3
dd/mm/aaaa	hh:mm:ss	A	A	A	kW	V	V	V	kVA	kvar	%
7/4/2006	17:43:03:00	71,5	73,9	74,4	37,5	379,9	380,7	380,0	48,2	30,3	77.8L
7/4/2006	17:43:33:00	71,4	73,9	74,5	37,4	380,5	381,5	380,7	48,3	30,5	77.5L
7/4/2006	17:44:03:00	71,3	73,7	74,3	37,3	380,7	381,6	381,0	48,2	30,5	77.4L
7/4/2006	17:44:33:00	71,2	73,5	74,3	37,2	380,7	381,6	381,0	48,1	30,5	77.3L
7/4/2006	17:45:03:00	71,2	73,2	74,1	37,1	380,7	381,6	381,0	48,0	30,5	77.3L
7/4/2006	17:45:33:00	71,2	73,4	74,0	37,1	381,1	381,9	381,4	48,0	30,5	77.2L
7/4/2006	17:46:03:00	71,1	73,0	73,8	36,9	381,5	382,5	381,8	48,0	30,7	76.9L
7/4/2006	17:46:33:00	70,9	72,9	73,5	36,7	381,5	382,3	381,6	47,8	30,7	76.7L
7/4/2006	17:47:03:00	70,9	72,9	73,7	36,8	381,8	382,7	382,1	47,9	30,7	76.8L
7/4/2006	17:47:33:00	69,7	72,0	72,8	36,0	381,6	382,6	382,1	47,2	30,6	76.2L
7/4/2006	17:48:03:00	69,7	71,8	72,7	36,0	381,1	381,9	381,4	47,1	30,4	76.4L
7/4/2006	17:48:33:00	69,0	71,3	72,0	35,5	381,0	381,9	381,2	46,6	30,3	76.0L
7/4/2006	17:49:03:00	68,8	71,1	71,9	35,3	381,2	382,2	381,5	46,6	30,4	75.8L
7/4/2006	17:49:33:00	68,3	70,4	71,3	34,8	381,4	382,2	381,6	46,2	30,4	75.3L
7/4/2006	17:50:03:00	68,4	70,4	71,3	34,8	381,4	382,2	381,6	46,2	30,4	75.3L
7/4/2006	17:50:33:00	68,5	70,5	71,3	34,9	381,9	382,7	382,2	46,3	30,5	75.3L
7/4/2006	17:51:03:00	68,4	70,7	71,2	34,9	382,1	382,9	382,2	46,3	30,5	75.3L
7/4/2006	17:51:33:00	66,8	69,3	69,8	33,6	381,9	382,9	382,1	45,3	30,4	74.2L
7/4/2006	17:52:03:00	66,8	69,4	70,1	33,7	382,3	383,3	382,6	45,5	30,6	74.1L
7/4/2006	17:52:33:00	66,5	69,3	69,7	33,6	381,4	382,5	381,6	45,2	30,3	74.3L
7/4/2006	17:53:03:00	66,2	68,8	69,3	33,5	379,7	380,7	379,9	44,7	29,7	74.8L
7/4/2006	17:53:33:00	65,3	67,9	68,6	32,8	379,7	380,7	379,9	44,2	29,6	74.2L
7/4/2006	17:54:03:00	63,0	65,6	66,4	31,0	380,0	381,1	380,3	42,8	29,5	72.4L
7/4/2006	17:54:33:00	63,2	65,7	66,3	31,0	380,3	381,2	380,4	42,8	29,6	72.3L
7/4/2006	17:55:03:00	59,7	61,9	62,9	27,8	380,4	381,4	380,7	40,5	29,4	68.8L
7/4/2006	17:55:33:00	59,4	61,7	62,8	27,6	380,7	381,6	381,0	40,3	29,4	68.4L
7/4/2006	17:56:03:00	58,7	60,9	61,8	26,7	381,2	382,2	381,5	39,8	29,5	67.1L
7/4/2006	17:56:33:00	55,6	57,8	58,8	23,7	381,6	382,6	381,8	37,9	29,6	62.6L
7/4/2006	17:57:03:00	55,6	58,0	58,9	23,7	381,9	383,0	382,2	38,0	29,7	62.4L
7/4/2006	17:57:33:00	55,9	58,2	59,2	23,8	382,7	383,8	383,0	38,2	29,9	62.2L
7/4/2006	17:58:03:00	56,1	58,2	59,4	23,8	383,0	384,1	383,3	38,4	30,1	62.0L
7/4/2006	17:58:33:00	55,9	57,9	59,2	23,7	382,3	383,4	382,7	38,1	29,8	62.3L
Mínimo:	17:43:03:00	55,6	57,8	58,8	23,7	379,7	380,7	379,9	37,9	29,4	
Médio:		65,8	68,1	68,9	32,7	381,2	382,2	381,5	44,6	30,2	
Máximo:	17:58:48:00	71,5	73,9	74,5	37,5	383,0	384,1	383,3	48,3	30,7	

Anexo A5. – Dados do ensaio da bomba do pivô L06 do Assentamento Itamarati I obtidos pelo Medidor Universal de

Elo Sistemas Eletrônicos S.A. - ELO Seis - Relatório de medição de grandezas elétricas.
Data da Emissão: 18/4/2006
L06: Ensaio da bomba

Data	Hora	C.Med.A	C.Med.B	C.Med.C	P.Ati.3	T.MedAB	T.MedBC	T.MedCA	P.Apa.3	P.Rea.3	F.Pot.3
dd/mm/aaaa	hh:mm:ss	A	A	A	kW	V	V	V	kVA	kvar	%
9/4/2006	12:30:01:00	282,2	304,5	294,7	196,0	440,1	442,0	440,8	224,0	109,0	87.5L
9/4/2006	12:30:31:00	282,3	304,8	295,2	197,0	440,5	442,6	441,2	225,0	109,0	87.5L
9/4/2006	12:31:01:00	282,0	304,5	295,0	196,0	440,1	442,1	440,9	224,0	109,0	87.5L
9/4/2006	12:31:31:00	282,5	305,0	295,0	197,0	440,6	442,6	441,3	225,0	109,0	87.4L
9/4/2006	12:32:01:00	282,0	304,5	294,7	196,0	440,4	442,3	441,0	224,0	109,0	87.5L
9/4/2006	12:32:31:00	282,2	304,5	295,0	196,0	440,4	442,3	441,0	224,0	109,0	87.5L
9/4/2006	12:33:01:00	282,7	304,5	295,2	197,0	440,9	442,8	441,6	225,0	109,0	87.4L
9/4/2006	12:33:31:00	283,0	304,4	295,2	196,0	439,4	441,2	440,1	224,0	109,0	87.5L
9/4/2006	12:34:01:00	282,7	304,7	295,0	196,0	439,8	441,7	440,5	224,0	108,0	87.6L
9/4/2006	12:34:31:00	282,7	304,4	294,7	197,0	440,6	442,6	441,3	225,0	109,0	87.5L
9/4/2006	12:35:01:00	282,0	304,2	294,2	196,0	440,6	442,6	441,3	224,0	109,0	87.5L
9/4/2006	12:35:31:00	282,3	304,1	294,1	196,0	440,6	442,6	441,3	224,0	109,0	87.5L
9/4/2006	12:36:01:00	282,7	303,8	294,4	196,0	440,6	442,6	441,3	224,0	109,0	87.5L
9/4/2006	12:36:31:00	281,6	303,0	293,4	196,0	440,4	442,3	441,0	223,0	108,0	87.6L
9/4/2006	12:37:01:00	279,2	300,6	290,8	194,0	440,9	442,8	441,6	222,0	108,0	87.4L
9/4/2006	12:37:31:00	278,1	299,4	289,7	193,0	441,0	442,8	441,7	221,0	108,0	87.4L
9/4/2006	12:38:01:00	277,8	299,1	289,5	193,0	441,0	442,8	441,7	221,0	107,0	87.4L
9/4/2006	12:38:31:00	278,0	299,4	289,8	193,0	441,5	443,2	442,0	221,0	107,0	87.4L
9/4/2006	12:39:01:00	272,0	293,1	284,1	189,0	441,6	443,4	442,3	217,0	106,0	87.3L
9/4/2006	12:39:31:00	271,7	293,1	284,2	189,0	441,6	443,5	442,4	217,0	106,0	87.2L
9/4/2006	12:40:01:00	271,6	293,0	283,9	189,0	441,5	443,4	442,1	216,0	106,0	87.3L
9/4/2006	12:40:31:00	271,7	293,3	283,9	189,0	441,3	443,2	442,1	217,0	106,0	87.3L
9/4/2006	12:41:01:00	266,7	288,1	278,9	186,0	441,9	443,7	442,6	213,0	104,0	87.1L
9/4/2006	12:41:31:00	260,2	281,6	272,2	181,0	442,0	443,9	442,7	208,0	103,0	86.9L
9/4/2006	12:42:01:00	260,3	281,6	272,2	181,0	442,3	444,2	443,0	208,0	103,0	86.9L
9/4/2006	12:42:31:00	260,5	281,7	272,5	181,0	441,7	443,5	442,3	208,0	103,0	86.9L
9/4/2006	12:43:01:00	253,8	274,7	265,6	176,0	442,1	443,9	442,8	203,0	101,0	86.7L
9/4/2006	12:43:31:00	253,8	274,5	265,3	176,0	441,9	443,7	442,6	203,0	101,0	86.7L
9/4/2006	12:44:01:00	253,8	274,2	265,3	176,0	441,3	443,1	442,0	202,0	101,0	86.7L
9/4/2006	12:44:31:00	254,1	274,4	265,8	176,0	442,0	443,8	442,8	203,0	101,0	86.7L
9/4/2006	12:45:01:00	246,6	266,4	258,4	170,0	442,0	443,8	442,8	197,0	99,0	86.5L
9/4/2006	12:45:31:00	246,3	266,1	258,4	170,0	441,7	443,4	442,4	197,0	99,0	86.5L
9/4/2006	12:46:01:00	239,4	259,2	251,6	165,0	442,4	444,2	443,1	192,0	97,0	86.2L
9/4/2006	12:46:31:00	239,2	259,2	251,3	165,0	442,4	444,2	443,1	192,0	97,0	86.2L
Mínimo:	12:30:01:00	239,2	259,2	251,3	165,0	439,4	441,2	440,1	192,0	97,0	
Médio:		270,2	291,6	282,3	187,6	441,2	443,0	441,8	215,2	105,5	
Máximo:	12:46:31:00	283,0	305,0	295,2	197,0	442,4	444,2	443,1	225,0	109,0	

Anexo A6. – Dados do ensaio da bomba do pivô C08 do Assentamento Itamarati I obtidos pelo Medidor Universal de

Elo Sistemas Eletrônicos S.A. - ELO Seis - Relatório de medição de grandezas elétricas.

Data da Emissão: 18/4/2006
C08: Ensaio da bomba

Data	Hora	C.Med.A	C.Med.B	C.Med.C	P.Ati.3	T.MedAB	T.MedBC	T.MedCA	P.Apa.3	P.Rea.3	F.Pot.3
dd/mm/aaaa	hh:mm:ss	A	A	A	kW	V	V	V	kVA	kvar	%
10/4/2006	10:25:30:00	231,4	246,6	252,3	156,0	454,0	454,8	453,1	191,0	111,0	81.5L
10/4/2006	10:25:45:00	230,9	246,1	252,0	156,0	454,0	454,8	453,1	191,0	111,0	81.5L
10/4/2006	10:26:00:00	230,5	245,9	251,7	155,0	454,2	455,1	453,4	191,0	111,0	81.4L
10/4/2006	10:26:15:00	230,2	245,8	251,4	155,0	454,0	454,8	453,1	190,0	110,0	81.5L
10/4/2006	10:26:30:00	230,2	245,9	251,4	155,0	454,0	454,8	453,1	190,0	111,0	81.4L
10/4/2006	10:26:45:00	230,5	246,3	251,7	155,0	454,0	454,8	453,1	191,0	111,0	81.4L
10/4/2006	10:27:00:00	233,6	249,4	254,8	158,0	453,4	454,4	452,7	193,0	111,0	81.7L
10/4/2006	10:27:15:00	250,5	266,1	271,7	170,0	453,1	454,0	452,3	206,0	116,0	82.7L
10/4/2006	10:27:30:00	256,6	272,2	277,8	175,0	452,6	453,4	451,8	210,0	117,0	83.1L
10/4/2006	10:27:45:00	255,9	271,6	277,2	174,0	452,5	453,1	451,6	210,0	117,0	83.1L
10/4/2006	10:28:00:00	255,9	271,3	276,9	174,0	452,3	453,1	451,5	210,0	117,0	83.1L
10/4/2006	10:28:15:00	255,8	271,1	276,6	174,0	452,2	452,9	451,4	210,0	117,0	83.0L
10/4/2006	10:28:30:00	255,3	270,6	276,1	174,0	451,9	452,6	451,1	209,0	116,0	83.1L
10/4/2006	10:28:45:00	255,2	270,3	275,8	174,0	452,0	452,9	451,2	209,0	116,0	83.0L
10/4/2006	10:29:00:00	255,2	270,3	275,8	174,0	452,3	453,1	451,5	209,0	116,0	83.0L
10/4/2006	10:29:15:00	265,2	280,5	285,8	181,0	451,9	452,6	451,1	217,0	119,0	83.6L
10/4/2006	10:29:30:00	274,4	289,5	295,2	188,0	451,4	452,0	450,5	224,0	122,0	83.9L
10/4/2006	10:29:45:00	271,7	286,7	292,2	186,0	451,4	452,0	450,5	221,0	121,0	83.8L
10/4/2006	10:30:00:00	270,9	286,1	291,9	185,0	451,2	452,0	450,4	221,0	120,0	83.8L
10/4/2006	10:30:15:00	270,8	285,9	291,7	185,0	450,9	451,8	450,1	221,0	120,0	83.8L
10/4/2006	10:30:30:00	270,8	286,1	291,9	185,0	451,2	451,9	450,3	221,0	120,0	83.8L
10/4/2006	10:30:45:00	270,2	285,9	292,0	185,0	451,2	452,0	450,4	221,0	121,0	83.7L
10/4/2006	10:31:00:00	274,7	290,5	296,4	188,0	451,2	452,0	450,4	224,0	122,0	83.9L
10/4/2006	10:31:15:00	288,6	304,8	310,9	198,0	450,3	451,1	449,3	235,0	126,0	84.4L
10/4/2006	10:31:30:00	289,4	305,9	312,0	199,0	450,0	450,8	449,0	235,0	126,0	84.5L
10/4/2006	10:31:45:00	289,4	305,8	311,9	199,0	449,8	450,7	449,0	235,0	126,0	84.5L
10/4/2006	10:32:00:00	288,9	305,5	311,6	199,0	450,0	450,8	449,0	235,0	126,0	84.4L
10/4/2006	10:32:15:00	288,9	305,5	311,4	199,0	450,0	450,9	449,2	235,0	126,0	84.3L
10/4/2006	10:32:30:00	293,9	310,3	316,4	202,0	449,7	450,5	448,7	239,0	127,0	84.7L
10/4/2006	10:32:45:00	297,2	313,8	320,0	204,0	449,4	450,3	448,5	241,0	129,0	84.6L
10/4/2006	10:33:00:00	298,0	314,7	320,9	205,0	449,4	450,3	448,5	242,0	129,0	84.7L
10/4/2006	10:33:15:00	298,1	315,2	321,3	205,0	449,2	450,0	448,2	242,0	128,0	84.8L
10/4/2006	10:33:30:00	298,4	315,2	321,6	205,0	449,2	450,0	448,2	242,0	129,0	84.7L
10/4/2006	10:33:45:00	298,3	315,0	321,6	205,0	449,4	450,3	448,5	242,0	129,0	84.7L
10/4/2006	10:34:00:00	298,6	315,3	321,6	205,0	449,2	450,0	448,2	242,0	129,0	84.7L
10/4/2006	10:34:15:00	298,3	315,0	321,3	205,0	449,2	450,0	448,2	242,0	129,0	84.7L
10/4/2006	10:34:30:00	298,0	314,5	321,3	205,0	449,2	450,0	448,2	242,0	128,0	84.8L
10/4/2006	10:34:45:00	298,1	314,5	321,3	205,0	449,2	450,1	448,3	242,0	129,0	84.7L
10/4/2006	10:35:00:00	297,8	314,4	320,9	205,0	449,4	450,3	448,5	242,0	129,0	84.7L
10/4/2006	10:35:15:00	298,0	314,8	321,3	205,0	449,7	450,5	448,7	242,0	129,0	84.6L
10/4/2006	10:35:30:00	298,4	315,0	321,3	205,0	449,7	450,5	448,7	243,0	129,0	84.6L
10/4/2006	10:35:45:00	298,0	314,5	320,9	205,0	450,0	450,8	449,0	242,0	129,0	84.7L
Mínimo:	10:25:30:00	230,2	245,8	251,4	155,0	449,2	450,0	448,2	190,0	110,0	
Médio:		272,4	288,3	294,3	186,2	451,2	452,0	450,3	222,4	121,5	
Máximo:	10:35:45:00	298,6	315,3	321,6	205,0	454,2	455,1	453,4	243,0	129,0	

Anexo A7. – Dados do ensaio da bomba do pivô G13 do Assentamento Itamarati I obtidos pelo Medidor Universal de

Elo Sistemas Eletrônicos S.A. - ELO Seis - Relatório de medição de grandezas elétricas.
Data da Emissão: 18/4/2006
G13: Ensaio da bomba

Data	Hora	C.Med.A	C.Med.B	C.Med.C	P.Ati.3	T.MedAB	T.MedBC	T.MedCA	P.Apa.3	P.Rea.3	F.Pot.3
dd/mm/aaaa	hh:mm:ss	A	A	A	kW	V	V	V	kVA	kvar	%
11/4/2006	15:52:46:00	380,9	406,6	407,2	246,0	410,9	410,7	407,5	282,0	139,0	87.1L
11/4/2006	15:53:01:00	380,9	406,6	407,2	246,0	410,9	410,7	407,5	282,0	139,0	87.1L
11/4/2006	15:53:16:00	387,2	412,8	413,4	249,0	410,4	410,1	406,9	287,0	142,0	86.9L
11/4/2006	15:53:31:00	389,4	415,0	415,6	250,0	410,1	409,8	406,7	288,0	142,0	86.9L
11/4/2006	15:53:46:00	389,1	414,7	415,6	250,0	410,1	409,8	406,7	288,0	142,0	86.9L
11/4/2006	15:54:01:00	388,8	414,7	415,3	250,0	410,4	410,1	406,9	288,0	142,0	86.9L
11/4/2006	15:54:16:00	389,1	414,7	415,6	250,0	410,1	409,8	406,7	288,0	142,0	86.9L
11/4/2006	15:54:31:00	386,9	412,2	413,4	249,0	410,4	410,1	406,9	286,0	142,0	86.9L
11/4/2006	15:54:46:00	385,3	410,6	411,6	248,0	410,5	410,2	407,2	285,0	140,0	87.0L
11/4/2006	15:55:01:00	385,6	410,6	411,9	248,0	410,2	410,0	406,9	285,0	140,0	87.0L
11/4/2006	15:55:16:00	384,7	409,7	410,9	248,0	410,1	410,0	406,8	285,0	140,0	87.0L
11/4/2006	15:55:31:00	384,4	409,4	410,6	247,0	410,1	410,0	406,8	284,0	140,0	87.1L
11/4/2006	15:55:46:00	384,7	409,7	410,6	247,0	410,1	409,8	406,7	284,0	140,0	87.0L
11/4/2006	15:56:01:00	384,4	409,4	410,3	247,0	410,1	409,8	406,7	284,0	140,0	87.1L
11/4/2006	15:56:16:00	384,4	409,4	410,3	247,0	410,0	409,7	406,7	284,0	140,0	87.1L
11/4/2006	15:56:31:00	384,1	409,1	410,0	247,0	410,1	409,8	406,7	284,0	140,0	87.1L
11/4/2006	15:56:46:00	383,8	408,4	409,7	247,0	410,1	409,8	406,7	284,0	140,0	87.0L
11/4/2006	15:57:01:00	383,4	408,8	409,4	247,0	410,4	410,2	407,1	284,0	140,0	87.1L
11/4/2006	15:57:16:00	383,4	408,8	409,4	247,0	410,5	410,2	407,2	284,0	140,0	87.0L
11/4/2006	15:57:31:00	383,1	408,4	409,1	247,0	410,4	410,2	407,1	284,0	140,0	87.0L
11/4/2006	15:57:46:00	382,8	408,4	408,8	247,0	410,9	410,7	407,5	284,0	140,0	87.1L
11/4/2006	15:58:01:00	382,8	408,4	408,8	247,0	410,7	410,4	407,2	284,0	140,0	87.0L
11/4/2006	15:58:16:00	383,4	408,8	409,1	247,0	410,5	410,1	407,1	284,0	140,0	87.1L
11/4/2006	15:58:31:00	383,4	408,8	409,1	247,0	411,1	410,7	407,6	284,0	140,0	87.1L
11/4/2006	15:58:46:00	383,1	408,8	409,1	247,0	410,8	410,5	407,5	284,0	140,0	87.1L
Mínimo:	15:52:46:00	380,9	406,6	407,2	246,0	410,0	409,7	406,7	282,0	139,0	
Médio:		384,8	410,1	410,9	247,7	410,4	410,1	407,0	284,8	140,4	
Máximo:	15:58:46:00	389,4	415,0	415,6	250,0	411,1	410,7	407,6	288,0	142,0	